

# OctoBot Performance: Gripper for simulation of pick and place in AAA eggs

Sierra Juan<sup>1</sup>, Montana Julián<sup>2</sup>, Echeverry Luis<sup>3</sup>

**Resumen:** Este informe es la recopilación de diseños sustentados en la innovación de una idea tangible (OctoBot Performance - pinza), con la capacidad de transformar la energía motriz en movimientos asociados a la manipulación y agarre de un objeto ovoidal. El origen de desarrollos Gripper, han sido vinculados en investigaciones de carácter biomimetismo resultando modelos integradores de la Ingeniería Mecánica, Electrónica, Computacional y Control en la sinergia de Ingeniería Mecatrónica. El movimiento de traslación es efectuado mediante un acople al robot paralelo comandado por cables de tipo suspendido y espacial de 3 Grados-de-Libertad, es decir, con traslación en los ejes X, Y & Z. Dicho robot fue desarrollado por el semillero MEC-AUTRONIC, perteneciente al grupo de investigación D+TEC de la Universidad de Ibagué. El efector final (pinza), debe tener la capacidad de atrapar y trasladar (Pick n' Place) huevos tipo AAA. La pinza OctoBot Performance, desarrollada para tal fin ha surgido de tres diseños propuestos; modelo n°3 de diseños simulados, presenta un agarre adecuado sobre el objeto ovoide en ambas posiciones (vertical y horizontal), debido a su estructura cefalópodo y sus Tentarticulaciones de Poliuretano Termoplástico (TPU). El torque ejercido por el servomotor SG90, varía a lo largo del cáñamo, aun así, la fuerza actuante sobre las áreas de las articulaciones no representa una presión excesiva en la sujeción del ovoide.

**Palabras claves:** Ovoidal, Huevo AAA, Pick and Place, Gripper, Biomímesis.

## 1. Introducción

Las necesidades a raíz del evolucionismo cotidiano de la contemporaneidad, surgen con la demanda de eco-diseños, basados en un modelo arquitectónico e ingenieril bajo la inspiración de la vida natural. La naturaleza es una fuente de 3.800 millones de años de evolución, un ejemplar de lo funcional, oportuno y trascendental, [1]. La unidad epistémica de la naturaleza, entre el conocimiento teórico y la experiencia evolutiva, a través de los procesos naturales, han sido de origen innovador en el desarrollo de robots Pick and Place, para la industria de manipulación de alimentos, Ragnar Robot; basado en arquitectura de Schönflies-motion robots, [2]. Además de incorporar en su diseño arquitectónico trayectorias personalizadas en un espacio de trabajo geométricamente acondicionado, [3].

La manipulación de objetos catalogados frágiles, ha involucrado el desarrollo de la robótica suave, es decir, por medio de investigaciones en el campo de la robótica se establecen materiales acondicionados a tales requerimientos. Por ejemplo, el uso de actuadores de elastómero dieléctrico (DEAs), para Gripper de manipulación de huevos, [4]. De igual manera, la industria robótica, se ha interesado en el desarrollo de efectores finales con prótesis de manos biónicas para otorgar una mayor flexibilidad y destreza de agarre al actuador. Uno de los resultados de investigaciones en el campo es la pinza neumática diestra suave, posee un mecanismo de conversión capaz de accionar cuatro dedos inspirados en la ventosa, por su versatilidad a múltiples modos de agarre, [5].

El complejo sistema mecatrónico de las pinzas desarrolladas en la industria robótica, determina una distinción entre pinzas en cuanto a la síntesis de la estructura, análisis y diseño. De ahí el estudio antropomórfico modular de la pinza, subdivido en dos categorías de pinzas mecánicas antropomórficas: tradicionales y modulares, [6]. Una pinza mecánica antropomórfica modular, tiene la capacidad de variar la rigidez de sus componentes por el tipo de estructura y diseño implementado. Investigaciones en el campo, han innovado en la implementación de cables aleados (NiTi), para brindar super elasticidad a los dedos, independencia y recuperación del estado original, [7]. Sin embargo, la adaptación de los conceptos y diseños de las ciencias e ingeniería en la replicación de la naturaleza, adiciona un valor al desarrollado de las pinzas, puesto que, se adapta la antropomórfica tradicional y modular en un diseño único. La pinza basada en la estructura FinRay, ejemplifica estas dos categorías por la estructura isósceles de sus dedos y la reacción consecuente a la fuerza ejercida sobre sus articulaciones, [8].

A continuación, se encuentran los modelos desarrollados con el propósito de abordar las características relevantes para alcanzar una proporción adecuada entre la optimización y el rendimiento de la pinza modelo OctoBot Performance.

## 2. Diseños de modelos – OctoBot Performance

<sup>1</sup> Juan Sebastián Sierra Silva 2120152023@estudiantesunibague.edu.co

<sup>2</sup> Julián Felipe Montana Aguilar 2420162030@estudiantesunibague.edu.co

<sup>3</sup> Luis Alberto Echeverry Henao 2420161006@estudiantesunibague.edu.co

El diseño seleccionado para la fabricación del prototipo, provino de una evolución de diseños propuestos, algunos fabricados de forma artesanal con materiales convencionales. Y otros simulados en el entorno del software SolidWorks. Una breve inducción de estos modelos, se encuentra en el apartado de Anexos. A continuación, se encuentra el diseño seleccionado y sus características mecánicas y electrónicas.

**Tercer modelo simulado:** El diseño presenta variaciones estructurales que involucran la fusión de dos piezas: miembros y ventosas, para dar origen a la Tentarticulación. Un componente de carácter elíptico con secciones de articulaciones como rol de ventosas. Perforadas por una cavidad cilíndrica de diámetro 0,7 cm, para el paso del cáñamo. Los miembros presentan sujeciones atornilladas en sus extremos elípticos a la pieza base soporte. Además, el diseño del carrete optimiza una de sus tapas, por consecuencia de optimización del enrollado.

Las condiciones prestablecidas por las piezas ubicadas espacialmente en la base soporte, optimiza el uso de ejes soporte de miembros. Al igual que, se estableció un acople directo entre el servomotor y el carrete, por lo tanto, los ejes de accionamiento quedan descartados dentro de la estructura que conforma la pinza OctoBot Performance. La Fig. 1, contiene una ilustración del diseño final desarrollado para la pinza.

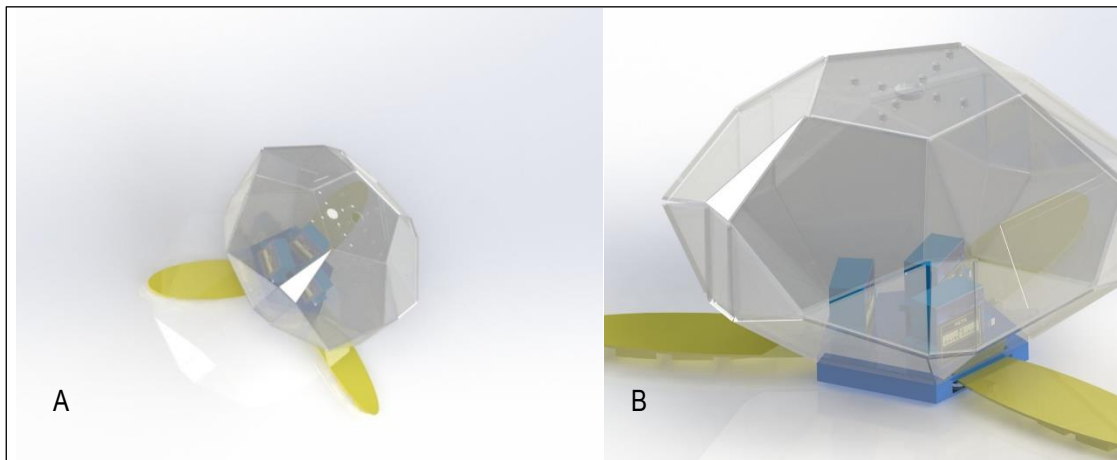


Fig. 1. Modelo 3°, OctoBot Performance simulado entorno software SolidWorks. Estructura articulada de tres Tentarticulaciones de características: largo 11 cm y ancho 2,5 cm. SoporteBase: Ø 6cm, geometría pentagonal con cavidades elípticas, 3 cm; Diámetro de entrada del hilo 0,7 cm; Carrete: Ø interno 0,4cm, Ø externo 2cm; Tornillos M3x0.5; Tuercas M3x0.5. Caja compuesta de geometrías: triangular (3.3x4.4cm), rectangular (3.3x1.5cm) y pentagonal (Ø6cm); Servomotor SG90. Sujeción de huevos AAA. Vista isométrica superior (A) y vista isométrica (B).

Este modelo presenta la evolución de las ideas surgidas a la satisfacción de la necesidad involucrada, unificadas en un diseño integrador que brinda la mejor estructura y tamaño, para el agarre de objetos ovoides en conjunto con un efector final. Para llevar a cabo, la manufactura del diseño del modelo 3°, se procedió a impresión 3D en impresores Ultimaker 2+ y 3. En la Fig. 2, se puede observar el proceso de fabricación por impresión 3D y acople de la pinza robótica suave al efector final.

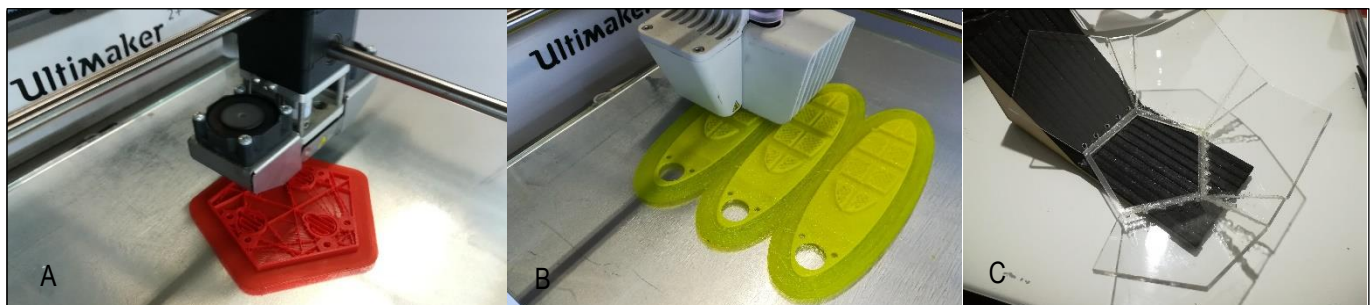


Fig. 2. Proceso de impresión 3D piezas: (A) SoporteBase, (B) Tentarticulaciones, (C) Ensamble de caja.

Los materiales seleccionados fueron PLA (Base soporte – azul), TPU (Tentarticulaciones – amarillo) y acrílico (Caja). Materiales de naturaleza polimérica, por rigidez y baja densidad (PLA), flexibilidad y fricción al contacto (TPU), y resistencia a baja densidades (acrílico). Desde el punto de vista de la ciencia mecánica es de interés saber el comportamiento de la pinza, a raíz de la fuerza motriz ejercida por el servomotor SG90, sobre el cáñamo como medio óseo de accionamiento de las articulaciones en la Tentarticulación. A continuación, se hallan estudios asociados a los comportamientos en relación con el torque ejercido por el micro servo.

### 3. Cálculos mecánicos modelo 3°

A partir del diseño final, es de interés conocer el comportamiento de la pieza "Tentarticulación", frente al torque que genera el servomotor a 4.8 V, diferencial de potencial indicado para el funcionamiento normal del mismo. De acuerdo con los datos suministrados por la datasheet del micro servo, se procede a calcular la fuerza generada y las presiones sobre las áreas de interés. Para ello, se tiene en cuenta las ecuaciones que se encuentran en el apartado de Anexos.

Una fuerza de magnitud 2,21 N, obedece a un torque de 17,658 N-cm a lo largo de una cuerda de cáñamo de 8 cm. Es decir, asumiéndose que el torque sea constante a través de la longitud de la cuerda. El diseño de la Tentarticulación, posee cuatro articulaciones de geometría elíptica. El par de articulaciones en los extremos, cuenta con la misma área, de igual manera, las articulaciones internas. Por lo que, en continuidad del análisis hace vital interés la exploración del comportamiento debido a la fuerza en dadas áreas. Para ello, se ha planteado la hipótesis de la fuerza hallada es constante y actúa de igual proporción en las áreas de interés. Con los fundamentos teóricos de la mecánica, se sabe que la presión (ecuación 3), está determinada por un comportamiento de fuerzas sobre áreas.

Con base en las áreas determinadas por el software CAD/CAM SolidWorks, tabla 1, se tiene que las articulaciones dentro de la geometría elíptica, además de las presiones ejercidas por cada una de estas.

Tabla 1. Medidas suministradas por el software SolidWorks acerca de las áreas y presiones de las articulaciones.

Articulación	Área (mm <sup>2</sup> )	Presión (Pa)
1°	190,89	11.577,35
2°	328,74	6.722,64
3°	328,74	6.722,64
4°	190,89	11.577,35
Total	1.039,26	36.599,98

#### 3.1. Análisis de resultados

La fuerza actuante en el cáñamo varía a lo largo de la longitud y, por ende, el comportamiento de la presión ejercida por áreas de interés presenta variaciones. Para demostrar este planteamiento, se llevó a cabo por el software MatLab, la simulación de la fuerza a lo largo del cáñamo (8 cm), obteniéndose el comportamiento apreciable en la Fig. 3.

Asimismo, el comportamiento de la presión es influenciada por la fuerza, observándose en la Fig. 3, un comportamiento creciente a aumentos de fuerza. Es decir, a una mínima distancia 0,5 cm, se experimenta la mayor fuerza y presión debido al torque de accionamiento del servomotor. Por el contrario, a una mayor distancia, se ejerce una menor fuerza y presión aún con el mismo torque de accionamiento.

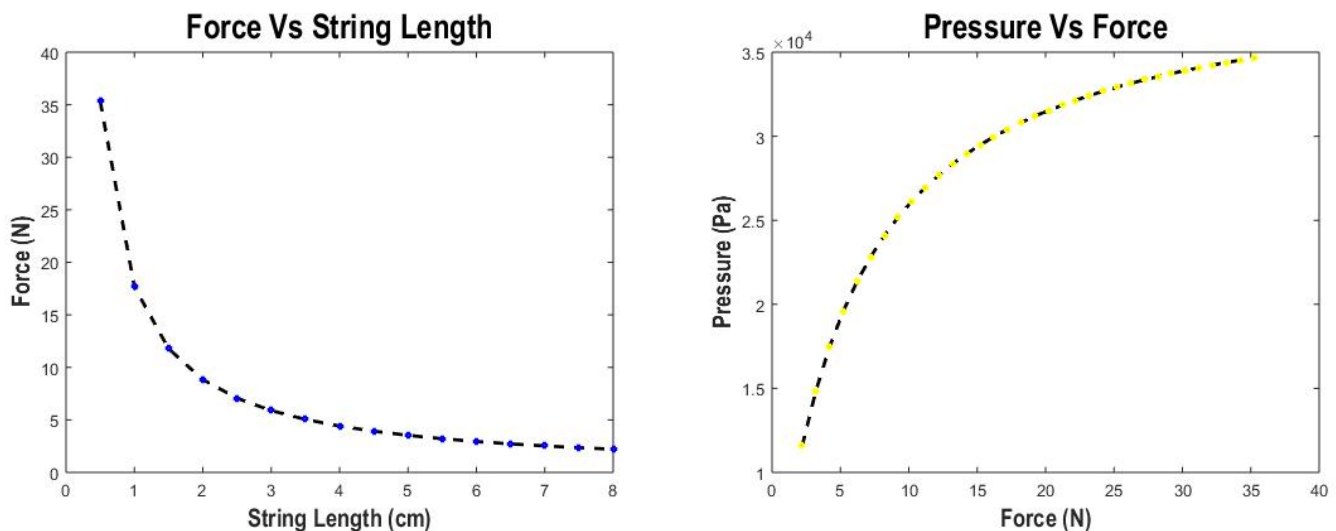


Fig. 3. Comportamiento de la fuerza y presión a través de 8 cm de cáñamo.  $F = 2,21 \text{ N} - 2,4 \text{ cm} - T = 1,8 \text{ kgf-cm} - P = 11.577 \text{ Pa}$ .

Sin embargo, el comportamiento del torque según los referentes teóricos de la mecánica, debería presentar una influencia por las mediciones de presión; la ecuación 4, demuestra la relación directa del torque frente a los cambios de presión.

$$T = P * A * d \quad (4)$$

La ecuación 4, se obtiene de despejar de la ecuación 3, la fuerza y asociando dicho termino en la ecuación 1 del apartado de Anexos. El comportamiento desarrollado por este modelo matemático, está representado en la Fig. 4, apreciándose el comportamiento del torque en las articulaciones de la pieza Tentarticulación.

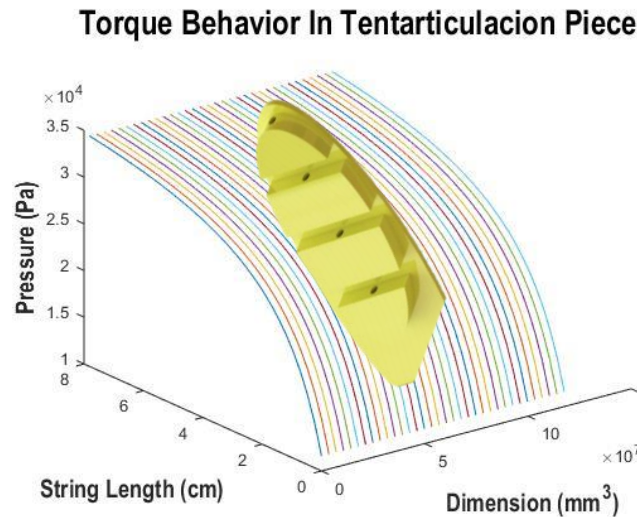


Fig. 4. Comportamiento del torque según el planteamiento matemático de la ecuación 4.

Un estudio realizado por el metodo de elementos finitos, comprobo que para una carga de 10 N, se observa una micro fisura en el huevo de 0.0723mm. Tal y como, se evidencia en la Fig. 5 (A).

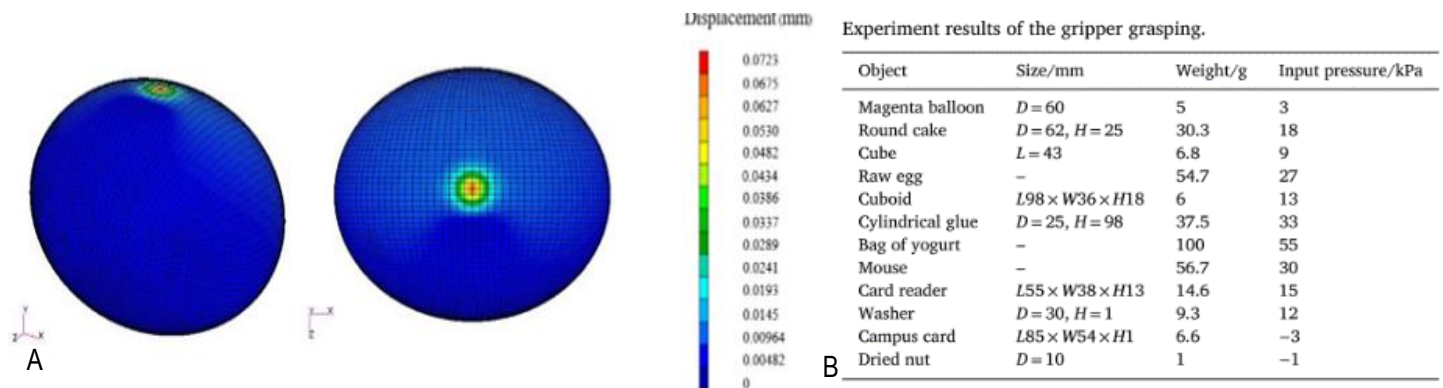


Fig. 5. (A), desplazamiento del contorno de la cascara de huevo bajo una carga de 10 N. (B), tabla de resultados experimentales de agarre sobre objetos por pinza neumática suave Fuente: [5], [9].

Por lo que, las fuerzas desarrolladas por el servomotor SG90, se hallan por debajo de dicha carga, al observarse el comportamiento del fenomeno en la Fig. 3, dado que, la primer articulación se encuentra a una distancia de 2 cm. Por otro lado, las presiones ejercidas por la suma de las articulaciones, representa una presión indicada para la sujeción del huevo, puesto que, a través de un estudio sobre una pinza diestra suave, se comprobo mediante sensores de presión la presión ejercida para el agarre optimo de un huevo de 54.7 g. Ver Fig. 5 (B). En contraste, la presión 36 kpa, desarrollada por sistema servomotor y cañamo, deben asegurar el agarre de un huevo AAA, por el promedio de masa que contienen 53 – 63 g.

## 4. Cálculos electrónicos

Para la elección de el microcontrolador hizo una intensa búsqueda en el sitio oficial de Arduino para conocer el consumo de corriente que tiene cada uno de sus dispositivos y por ende escoger el mas pertinente en tema de consumo y relación con la batería que se maneja para el proyecto.

<b>Modelo Arduino</b>	<b>Consumo de corriente</b>	<b>Duración en una batería de 1200mAh</b>
<b>Uno</b>	<b>46mA</b>	<b>26 horas</b>
<b>Mega</b>	<b>93mA</b>	<b>13 horas</b>
<b>Due</b>	<b>75mA</b>	<b>16 horas</b>
<b>Nano</b>	<b>15mA</b>	<b>80 horas</b>

Tabla 2. Tabla de consumo para microcontroladores

Deduciendo de la tabla anterior se toma como elección el microcontrolador Arduino nano, pues su consumo es bastante bajo respecto a los anteriores, además es importante resaltar que el tamaño de este encaja a la perfección con el diseño que se tiene para el "Octo-bot".

Por otra parte, se consulta el datasheet de los motores seleccionados para este proyecto los cuales serán los "micro-servo sg90" la razón para la elección de ellos es su oportuno tamaño y su bajo consumo en corriente en comparación con distintos motores de este tamaño que hay en el mercado. Los micro-servos consumen un aproximado de 800mA, al necesitar 3 motores dentro de el "Octo-bot" se estima un aproximado de 2.4A que se necesitaran para el prudente uso de este.

Por otra parte, se tiene en cuenta el consumo que tiene el módulo bluetooth que tendrá el microcontrolador, pues este hará uso del módulo HC05 que tendrá un aproximado de 50mA de corriente, dando como consumo de final para todo el funcionamiento de la mano un estimado de 2.5A, y teniendo como independencia en consumo de corriente 0.2 horas o unos 12 minutos aproximadamente.

### 4.1. Análisis de resultados

La mecatrónica que implica el desarrollo e implementación del el gripper o pinza "Octo-bot" es simple si todas las áreas y campos de trabajo que encierran la mecatrónica se llevan a cabo de una manera ordenada y prevenida, pues el manejo de un elemento alimenticio tan frágil como lo es un huevo AAA lo requieren, además es importante resaltar de que este proyecto tiene una visión a futuro y en veras de ser implementado en un ámbito empresarial e industrial esta atado a futuras mejoras.

Un calculo mecánico preciso es fundamental en este tipo de proyectos pues la fuerza que se ejerce hacia el huevo es indispensable para no quebrar dicho objeto o para no dejarlo caer en los peores de los casos, así como la adaptación de dicho gripper hacia el huevo pues dependiendo de su tamaño, peso y posicionamiento la pinza es capaz de adaptarse a él, y lograr su debido proceso.



## 5. Conclusiones

El desarrollo del diseño de la pinza, sugiere acorde a sus características estructurales modos de agarre adecuados al tamaño y posición del huevo AAA. En cuanto a un agarre del objeto ovoide vertical y horizontal yaciendo sobre una superficie. El torque generado por el micro servo SG90, 1.8 kgf-cm, establece fuerzas y presiones en las articulaciones de forma óptima para el agarre del objeto sin ocasionar fisuras en este. La Fig. 6, evidencia experimentalmente la sujeción del objeto ovoide, con la adición de cinta doble faz para una mayor adherencia entre la pinza al objeto.

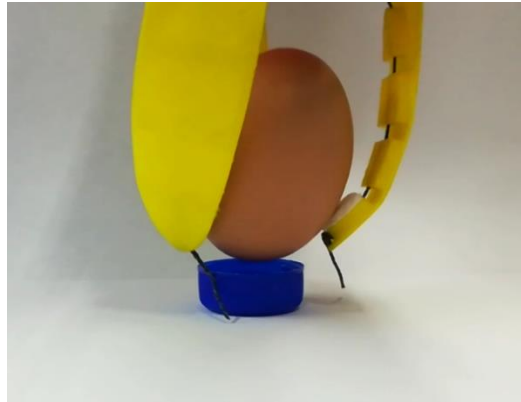


Fig. 6. Agarre del huevo AAA con pinza OctoBot Performance, y cinta doble faz en las articulaciones exteriores.

## Referencias

- [1] N. Chayaamor-Heil, F. Guéna, and N. Hannachi-Belkadi, "Biomimétisme en architecture. État, méthodes et outils," *Cah. la Rech. Archit. urbaine paysagère*, no. 1, pp. 0–33, 2018.
- [2] J. Collado-Ruano, "Educación y desarrollo sostenible: la creatividad de la naturaleza para innovar en la formación humana," *Educ. y Educ.*, vol. 20, no. 2, pp. 229–248, 2017.
- [3] G. Wu, S. Bai, and P. Hjørnet, "Architecture optimization of a parallel Schönflies-motion robot for pick-and-place applications in a predefined workspace," *Mech. Mach. Theory*, vol. 106, pp. 148–165, 2016.
- [4] J. Shintake, S. Rosset, B. Schubert, S. Mintchev, D. Floreano, and H. R. Shea, "DEA for soft robotics: 1-gram actuator picks up a 60-gram egg," *Electroact. Polym. Actuators Devices 2015*, vol. 9430, p. 94301S, 2015.
- [5] G. Zhong, Y. Hou, and W. Dou, "A soft pneumatic dexterous gripper with convertible grasping modes," *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 153–154, no. February, pp. 445–456, 2019.
- [6] I. Staretu, "Modular anthropomorphic grippers: Structural synthesis, analysis and design," *Vojnoteh. Glas.*, vol. 63, no. 2, pp. 30–46, 2015.
- [7] Y. Haibin, K. Cheng, L. Junfeng, and Y. Guilin, "Modeling of grasping force for a soft robotic gripper with variable stiffness," *Mech. Mach. Theory*, vol. 128, pp. 254–274, 2018.
- [8] C. Silva, "Diseño e implementación de prototipo de una pinza robótica adaptativa de tres dedos basada en estructura FinRay ®," *Ing. Univ. Medellín*, vol. 18, no. 34, pp. 103–121, 2018.
- [9] J. Priyadumkol and C. Suvanjumrat, "A study of mechanical property of Eggshell with inverse method and finite element analysis," *Key Eng. Mater.*, vol. 775 KEM, no. mm, pp. 542–546, 2018.

## Anexos

**Primer modelo:** El primer modelo novedoso fue construido a partir de materiales convencionales. El sistema de accionamiento del modelo, se da por la aplicación de fuerzas de torsión en ejes perpendiculares a la superficie articulada. Esta transmisión de fuerza se distribuye por hilos que recorren las articulaciones dispuestas para cada miembro diseñado. La Fig. 7, ilustra el modelo n°1 experimental llevado a cabo para la manipulación de huevos AAA.



Fig. 7. Modelo n°1, pinza OctoBot, elaborada artesanalmente, materiales convencionales, apertura de 180°, estructura articulada de tres miembros de características: articulaciones horizontales; Pulgar (largo 4cm), articulación n°1 (ancho 2,4cm), articulación n°2 (ancho 1,9cm); Índice (largo 6cm), articulación n°1 (ancho 2cm), articulación n°2 (ancho 2cm) y articulación n°3 (ancho 1,9cm); Medio (largo 7cm), articulación n°1 (ancho 2cm), articulación n°2 (ancho 2cm) y articulación n°3 (ancho 1,7cm); diámetro interno 5,3cm, diámetro de los ejes 0,5cm y diámetro exterior 8,2cm. Sujeción de huevos AAA. Vista frontal (A) y vista lateral (B).

**Segundo modelo:** El modelo n°2, presenta articulaciones con orientación vertical replicando la posición de las falanges de la mano humana. De la misma manera, se acciona por medio de fuerzas de torsión en ejes perpendiculares a la superficie articulada. Asimismo, la tensión generada acciona las extremidades de la pinza en un movimiento de cierre. En la Fig. 8, se puede observar el interior del modelo (A) y finalizado (B).

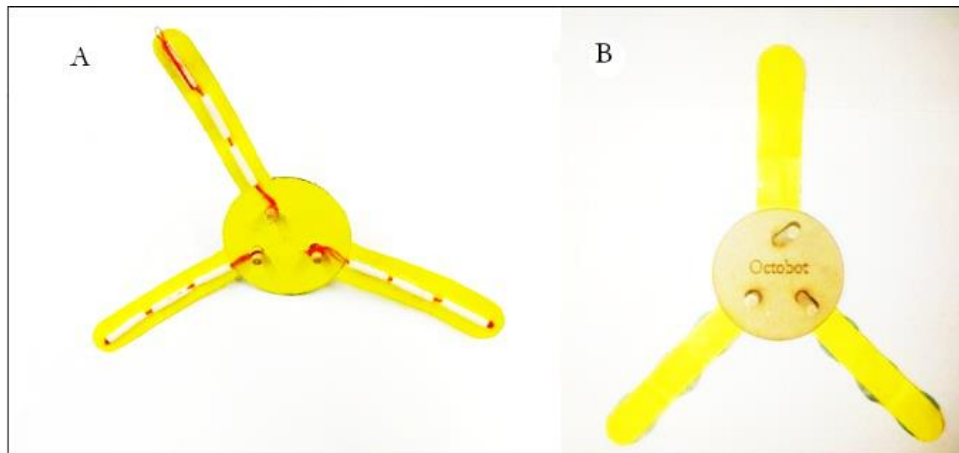


Fig. 8. Modelo n°2, pinza OctoBot, articulaciones con orientación vertical, apertura de miembros 180°, ángulo de miembro n°1 a 90° con respecto a la horizontal, ángulo de miembro n°2 a 45° con respecto a la horizontal en el cuadrante 3er, ángulo de miembro n°3 a 45° con respecto a la horizontal en el cuadrante 4° cuadrante.

De acuerdo con los diseños experimentales anteriores, se procedió a la realización de diseños por herramientas computacionales, en este caso el software CAD/CAM SolidWorks. Por ende, a continuación, se evidencia el desarrollo de tres modelos simulados por el software, asociados a las características cefalópodo del modelo 1 y 2 experimentales.

**Primer modelo simulado:** Este modelo cuenta con una estructura desarrollada en la combinación de las falanges y ventosas en tanto a las geometrías de los componentes. Además, la reacción de los dedos, debido a las fuerzas motrices accionadas por los ejes sobre el hilo como estructura ósea. La Fig. 9, muestra el diseño articula las dos naturalezas seleccionadas para la satisfacción de los requerimientos; agarre y/o sujeción de huevos AAA.

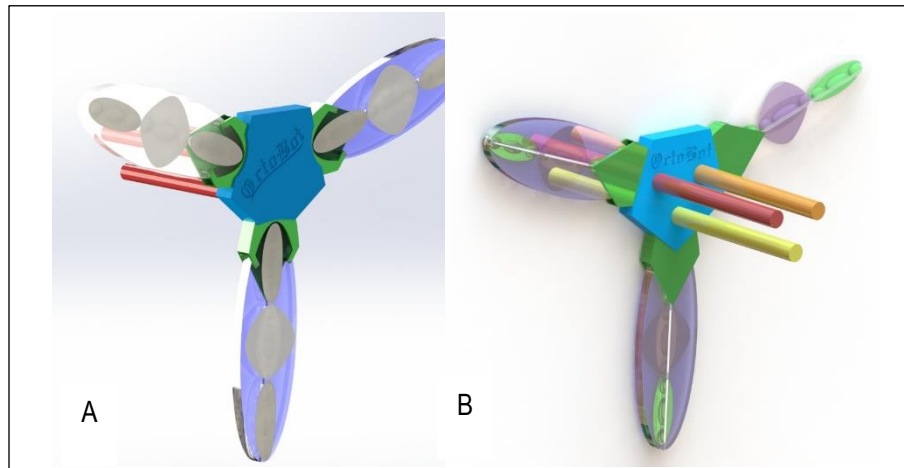


Fig. 9. Modelo 1°, OctoBot simulado entorno software SolidWorks. Estructura articulada de tres miembros de características: ventosas horizontales y verticales, 2cm y 2,5 cm respectivamente. Diámetro de los ejes 0,5 cm, largo 7cm. SoporteBase: Ø 5cm, geometría pentagonal; Soporte de miembros: largo 2cm, ancho 2cm, geometría elíptica. Diámetro de entrada del hilo 0,7 cm. Sujeción de huevos AAA. Vista isométrica inferior (A) y vista isométrica (B).

**Segundo modelo simulado:** En este modelo se ajusta la geometría a los componentes electrónicos, puesto que los ejes deben ser accionados por servomotores. La pieza soporte miembro, es reemplazada por un eje rotacional, para las aperturas de los miembros, a raíz del accionamiento de la pinza. Empleándose la antropomórfica modular, las piezas denominadas ventosas son unidas en una misma pieza, para proporcionar una menor rigidez de los componentes en el agarre. La Fig. 10, se ilustra la simulación de modelo en el entorno del software SolidWorks.

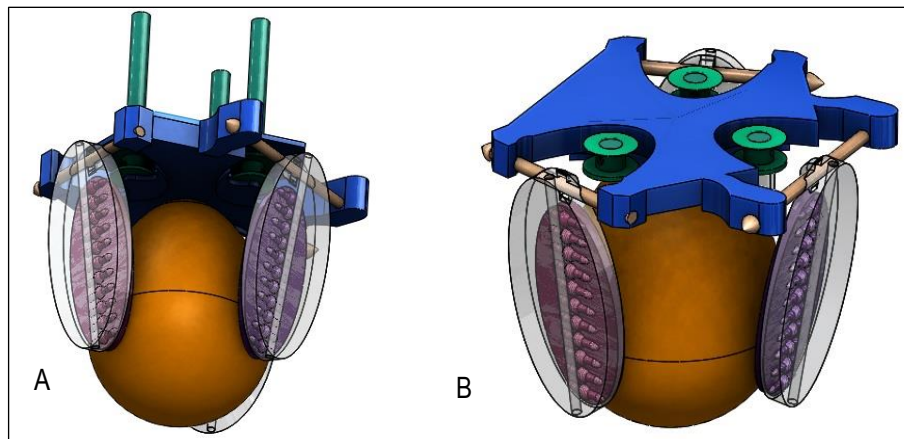


Fig. 10. Modelo 2°, OctoBot simulado entorno software SolidWorks. Estructura articulada de tres miembros compuesto por ventosas integradas y dedos de características: 5 y 6 cm de largo respectivamente. Diámetro de los ejes 1 cm, largo 5cm. SoporteBase: Ø 5cm, geometría pentagonal, seccionada por cavidades elípticas, 2,5 cm; Diámetro de entrada del hilo 0,7 cm; Carrete: Øinterno 1cm, Øexterno 2cm; Ejes soporte de miembros: Ø 0,5cm. Sujeción de huevos AAA. Vista isométrica inferior (A) y vista isométrica seccionada (B).



## Ensamblajes al efector final



Fig. 11. Caja de pinza ensamblada al efector final diseñado por el semillero MEC-AUTRONIC, perteneciente al grupo de investigación D+TEC de la Universidad de Ibagué.

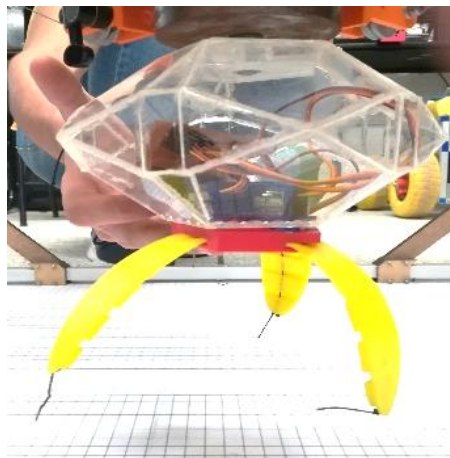


Fig. 12. Pinza (OctoBot Performance) ensamblada al efector final diseñado por el semillero MEC-AUTRONIC, perteneciente al grupo de investigación D+TEC de la Universidad de Ibagué. Vista frontal.

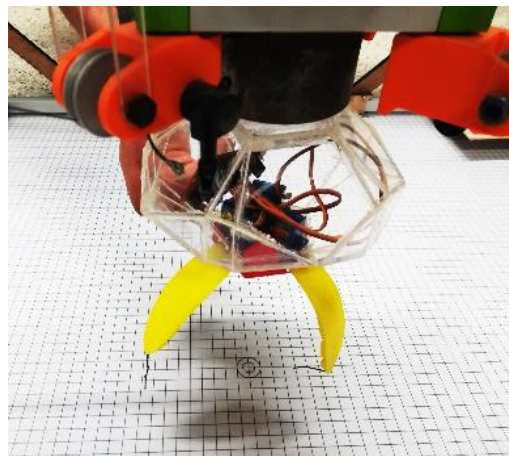


Fig. 13. Pinza (OctoBot Performance) ensamblada al efector final diseñado por el semillero MEC-AUTRONIC, perteneciente al grupo de investigación D+TEC de la Universidad de Ibagué. Vista lateral.

## Cálculos mecánicos:

Datos suministrados por la datasheet del micro servo SG90:

Torque 1,8 kgf-cm @ 4,8 V @ 0,1 s/60°

Sabiéndose que 1 kgf es igual a 9,81 N, la equivalencia del torque entregado por el servomotor a 4,8 V, es:

1 kgf 9,81 N Torque 17,658 N-cm

Luego, partiendo de los referentes teóricos de la mecánica, el torque (ecuación 1), es influenciado por cargas en dadas distancias, es decir:

$$T = F * d \quad (1)$$

En este caso, la distancia es una longitud de cuerda "Cáñamo", para cada Tentarticulación es aproximadamente de 8 cm. Por lo tanto, partiendo de la ecuación 1, la fuerza (ecuación 2) ejercida por parte del micro servo, será:

$$F = \left( \frac{T}{d} \right) \quad (2)$$

$$F = \left( \frac{17,658 \text{ N-cm}}{8 \text{ cm}} \right) \quad F = 2,20725 \text{ N} \approx 2,21 \text{ N}$$

Ecuación de presión, para el análisis de presiones sobre las áreas determinadas en las articulaciones.

$$P = \left( \frac{F}{A} \right) \quad (3)$$

En la Fig. 14, se puede observar las mediciones realizadas en el entorno de SolidWorks, para conocer las áreas de las articulaciones en la pieza Tentarticulación.

La presión que ejerce la primera articulación, debido a la fuerza sobre dicha área, es:

$$P_{1^\circ} = \left( \frac{2,21 \text{ N}}{190,89 \text{ mm}^2} \right) \quad P_{1^\circ} = 0,011577348 \text{ N/mm}^2$$

Dadas las unidades de presión obtenidas, se puede realizar una equivalencia a unidades de Pascales. Un Pascal es equivalente a  $(1 \times 10^{-6}) \text{ N/mm}^2$ , por ende, la presión haya de la primera articulación será:

1 Pa 0,000001 N/mm<sup>2</sup> Presión 1° 11.577,35 Pa

Dado que, la cuarta articulación posee la misma área que la primera, se asume que la presión ejercida por esta, será:

$$P_{1^\circ} = 11.577,35 \text{ Pa} = P_{4^\circ}$$

La segunda articulación, presenta un área diferente de la primera articulación como se puede apreciar en la figura. Por ende, la presión asociada por el área correspondiente será:

$$P_{2^\circ} = \left( \frac{2,21 \text{ N}}{328,74 \text{ mm}^2} \right) \quad P_{2^\circ} = 0,006722637 \text{ N/mm}^2$$

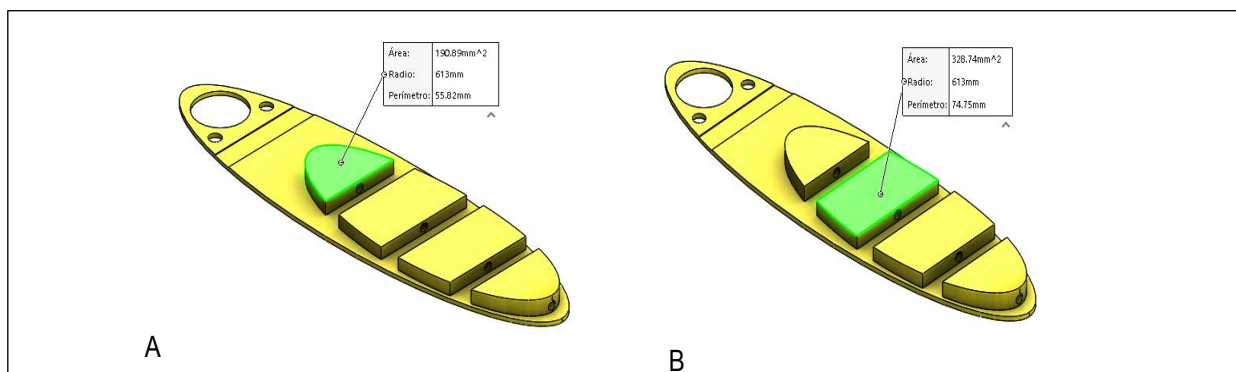


Fig. 14. Áreas de interés del estudio del comportamiento del torque generado por el micro servo. (A) Área articulación 1°, (B) Área de articulación 2°.

Realizándose, la equivalencia de las unidades de la presión en N/mm<sup>2</sup> a Pa, se tiene que la presión ejercida por el área de la articulación 2°, es:

$$P_{2^\circ} = 6.722,64 \text{ Pa}$$

A partir del análisis de áreas, el área de la articulación 3°, guarda similitud con la 2°, además de ser accionada por la misma fuerza, la presión asociada será la misma.

$$P_{2^\circ} = 6.722,64 \text{ Pa} = P_{3^\circ}$$

En resumen, la geometría elíptica conformada por las articulaciones ejerce una sumatoria de presiones equivalente a:

$$\sum_{P_{1^\circ}}^{P_{4^\circ}} P_{1^\circ+\dots+P_{4^\circ}} = (11.577,35 \text{ Pa} * 2) + (6.722,64 \text{ Pa} * 2) = 36.600 \text{ Pa}$$