

# Diseño y Construcción de un Sistema de Sujeción Bioinspirado para el Aumento del Área de Contacto en Manipuladores Robóticos

## Design and Development of a Bioinspired Subjection System to Increase the Contact Area of a Robotics Manipulator

Cruz, G. W.<sup>a</sup>; Cháves, G.C.<sup>a</sup>; Bulla, C. B.<sup>a</sup>; Yepes, R. C.<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Fundación Universitaria Agraria de Colombia – Uniagraria, Colombia. [cruz.wilmer@uniagraria.edu.co](mailto:cruz.wilmer@uniagraria.edu.co)

Fecha de recepción: mayo de 2016 / Fecha de aceptación: noviembre de 2016

### Resumen

Este artículo expone el diseño y construcción de un sistema de sujeción bioinspirado para aumentar del área de contacto entre el efector final y el elemento manipulado, con el objetivo de disminuir la presión aplicada por unidad de área. El diseño se realizó analizando y parametrizando los elementos funcionales que constituyen la teoría adaptativa, denominada 'Fin Ray', la cual describe el comportamiento de las aletas de los peces, concentrándose especialmente en la aleta pectoral. Esta teoría fue la base para elaborar el modelo matemático que caracteriza la condición forzada y el comportamiento natural del sistema, para luego encontrar los valores de los vectores que describen el comportamiento de las capas de las aletas, conocidos como rayo, y que permitió calcular los eslabones de la pinza. Asignando valores entre 0 y 0,01 a la variable dependiente, se pudo determinar que el rayo sufre una deformación directamente proporcional al valor asignado que simula la activación muscular, comprobando los efectos que tiene en el sistema, el aumento de los valores de los parámetros principales del rayo y las cargas aplicadas al sistema. Se determinó que un aumento en el módulo de corte del material interno tiene como consecuencia la concentración de esfuerzo producido por un gran cambio en una pequeña zona cercana a la base, que en condiciones reales puede ocasionar fallas en el material. Gracias a la capacidad adaptativa del prototipo construido se aumentó el área de contacto entre los dedos y el objeto sujetado, lo que disminuye la presión ejercida por unidad de área, también el consumo de energía es menor, debido al mecanismo de la espiral aritmética, ya que el sistema se activa únicamente al sujetar o soltar el objeto.

**Palabras clave:** sensor, teoría adaptativa, deformación, espiral aritmética.

## Abstract

This article exposes the design and construction of a bio-inspired fastening system to increase the contact area between the end effector and the manipulated element, with the aim of decreasing the applied pressure per air unit. The design was carried out analyzing and parametrizing the functional elements that constitute the adaptive theory 'Fin Ray'; which describes the behavior of fins of fish, concentrating especially on the pectoral fin. This theory was the basis to elaborate the mathematical model that characterizes the forced condition and the natural behavior of the system to then find the values of the vectors that describe the behavior of the fin layers, known as lightning, and that allowed to calculate the links of the clamp. Assigning values between 0 and 0.01 to the dependent variable it was possible to determine that the ray undergoes a deformation directly proportional to the assigned value, which simulates muscle activation by checking the effects on the system of the increase of the values of the main parameters of the beam and the charges applied to the system. It was determined that an increase in the cutting modulus of the internal material results in the concentration of stress produced by a large change in a small area near the base that in real conditions can cause material failure. Thanks to the adaptive capacity of the constructed prototype, the contact area between the fingers and the held object is increased, which decreases the pressure exerted per unit area, also the energy consumption is lower due to the mechanism of the arithmetic spiral, since the system is activated only when holding or releasing the object.

**Keywords:** sensor, adaptive theory, deformation, arithmetic spiral.

## Introducción

La naturaleza ha sido fuente de inspiración para el desarrollo y mejoramiento de procesos, materiales, teorías, herramientas y productos. Todo esto, gracias al planteamiento de soluciones, a partir de la observación del comportamiento en la naturaleza, metodología conocida como bioinspiración. Es por ello que esta investigación se enfoca en el desarrollo de un sistema de sujeción, capaz de adaptarse a la geometría del elemento manipulado, inspirado en una estructura natural, conocida como la teoría de 'Fin Ray', que permite distribuir la fuerza aplicada al objeto y reducir la presión ejercida, para prevenir daños, lesiones o pérdidas durante el proceso de manipulación de un objeto.

La teoría 'Fin Ray' planteada por Videler J. et al. (1987) establece los principios mecánicos del movimiento de los peces y fue patentada por la compañía <sup>®</sup> (Cirovic y Stano Simeonov, 2011). Videler explica que las aletas de los peces son dos capas de piel apoyados en lepidotrichias o rayos óseos que pueden ser espinosos, rígidos y flexibles, no segmentados y segmentados. Los radios espinosos de la aleta se endurecen y se usan comúnmente para la defensa, mientras que los flexibles juegan un papel importante en el ajuste del área y la rigidez de la aleta pectoral. Cada rayo consta de dos *hemitrich*, uno a cada lado de la aleta. Un *hemitrich* tiene un esqueleto óseo acelular de perfil curvado o semilunar que contiene fibrillas de colágeno orientado perpendicular al eje longitudinal de los rayos.

Más adelante Silas, A. (2010) plantea la optimización del componente estructural principal en la aleta flexible de un pez, bajo una carga constante y da como resultado un modelo matemático que explica el comportamiento natural de la aleta caudal del pez. Es en esta ecuación en la que se basa el modelo matemático del proyecto y permite el desarrollo del mismo.

## Modelo Matemático

Para el modelo matemático del sistema se tomó como base la estructura 'Fin Ray', la cual centra sus principios en las aletas radiadas de los peces, principalmente en la aleta pectoral que tiene la capacidad de adaptar su forma y rigidez a las circunstancias del medio. De esta manera, cumple con las características principales que debe tener el sistema; una estructura capaz de adaptarse a la forma del objeto que se desea sujetar, aumentando de esta forma el área de contacto, que sea flexible y a su vez rígida, que pueda resistir la carga que se ejerce en ella.

Alben (2010) en su trabajo estableció una Eq (1) diferencial de segundo orden que caracteriza el comportamiento y trayectoria de la línea central imaginaria del rayo, basándose en la fisionomía de la estructura 'Fin Ray'. Cada rayo está formado por dos vigas idénticas e inextensibles de material óseo, llamados *hemitrich*, los cuales se encuentran unidos por tejido elástico incomprensible (gel de colágeno). En la ecuación del modelo elástico, B es el

módulo de resistencia al dobléz,  $G$  es el módulo de corte del material interno y

$M_{ext}$  es el momento resultante de aplicar una carga sobre la estructura.

$$-2\partial_s \left( \frac{B\partial_s\varphi}{d^2} \right) + \left( \frac{G\varphi}{d^2} \right) + \partial_s \left( \frac{M_{ext}}{d} \right) = 0 \quad (1)$$

Para el diseño del Sistema de Sujeción Bioinspirado se deben establecer los valores

óptimos para  $(d, B, G, s)$ . Reorganizando la Eq (2) se tiene:

$$\partial_s^2 \varphi + \frac{d^2}{B} \left( \partial_s \frac{B}{d^2} \right) \partial_s \varphi - \left( \frac{G\varphi}{2B} \right) = - \left( \frac{Pd}{2B} \right) (1 - s) \quad (2)$$

Donde la respuesta natural está en términos de la variable dependiente  $\varphi$ . Su valor indica la trayectoria y la forma que toma la estructura a lo largo de la longitud  $s$ . Teniendo en cuenta que en el momento de sujetar un elemento se genera una carga sobre la estructura, se evalúa la ecuación con condiciones reales. Por simplicidad

se evalúa como una carga uniformemente distribuida que genera un momento en la estructura que (Silas, 2010) determina como el momento externo producido por la carga  $(p)$  que se relacionan de esta forma: [ $M_{ext} = p(1-s)^2/2$ ] y posteriormente se reemplaza en la ecuación original, donde se obtiene la expresión Eq (3).

$$\partial_s^2 \varphi + \left( \partial_s \frac{B}{d^2} \right) \partial_s \varphi - \left( \frac{G}{2B} \varphi \right) = - \left( \frac{Pd}{2B} \right) (1 - s) \quad (3)$$

El diferencial de los parámetros  $d$  y  $B$  tienen un valor de 0, puesto que son constantes para toda la longitud  $s$ . Las condiciones iniciales en la base, equivale a en  $(s = 0)$  y toma el valor de cero en  $(s = 1)$ , siempre y cuando

se encuentran fusionadas las puntas al final de la estructura son tenidas en cuenta para determinar el comportamiento real del rayo, dando lugar a la Eq (4).

$$\partial_s^2 \varphi - \left( \frac{G}{2B} \varphi \right) = - \left( \frac{Pd}{2B} \right) (1 - s) \quad (4)$$

Obteniendo el parámetro  $\varphi$

$$\varphi = \left( \varphi_0 - \frac{Pd}{G} \right) \frac{\sinh\left((1-s)\sqrt{\frac{G}{2B}}\right)}{\sinh\sqrt{\frac{G}{2B}}} + \frac{Pd}{G}(1-s) \quad (5)$$

Para encontrar la trayectoria o forma que adquiere la estructura al aplicar una carga (p) distribuida sobre ella, se emplea la

función de curvatura  $\kappa$  que fue determinada de la Eq (6).

$$k = -\frac{1}{d} \left( \frac{\partial \varphi}{\partial s} \right) \quad (6)$$

En donde ( $\kappa$ ) es la curvatura del rayo, d es la distancia entre los *hermitrichs*, es el término dependiente de la ecuación elástica y s la línea central a lo largo del rayo.

Se emplea el término *teta* que está definido por:

$$\theta = \int_0^s k ds \quad (7)$$

Para calcular los vectores X y Y (Eq 8 y 9) se emplea el método de interpolación, por medio de Spline. Es por ello que se crea un programa en Matlab que permite encontrar los valores intermedios posibles y así calcular los vectores. Primero son definidas las constantes globales, B corresponde al módulo de resistencia a la flexión, G es el módulo de resistencia al cizallamiento del material interno del rayo y d es la distancia entre *hermitrichy*( $\varphi_0$ ) el parámetro de deposición inicial de la base del rayo. A continuación,

se declara la variable independiente s como un vector de mil espacios entre los valores 0 y 1. Posteriormente, se ingresa la solución correspondiente al parámetro ( $\kappa$ ) en forma de función y se realiza el proceso de integración numérica de ( $\kappa$ ), utilizando el método de cuadratura de Gauss Conrod 2 para almacenar el resultado en un nuevo vector del mismo tamaño de (s). Con estos resultados se obtienen los vectores X y Y con los cuales se grafica el comportamiento del rayo.

$$X = \int_0^s \cos(\theta) ds \quad (8)$$

$$Y = \int_0^s \sin(\theta) ds \quad (9)$$

**Diseño.** El sistema de sujeción bioinspirado se desarrolló a partir de un diseño conceptual que definió los componentes

principales del sistema, con la finalidad de aumentar el área de contacto entre el manipulador y objeto.

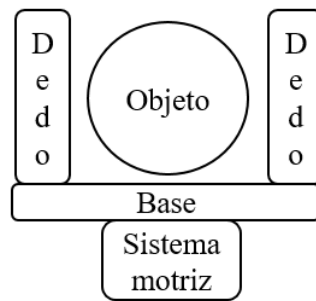


Figura 1. Diseño conceptual del sistema de sujeción.

El objeto a sujetar tiene una geometría esférica con diámetro de 45 mm y está construido en poliuretano.

**Dedos.** La estructura interna de los dedos es inextensible e incompresible para garantizar su volumen constante y de esta manera

obtener un funcionamiento acorde con el modelo matemático. El diseño implementa el sistema de eslabones internos articulados para generar movimiento en cada *hemitrich* y simultáneamente conservar siempre la misma distancia entre ellos.

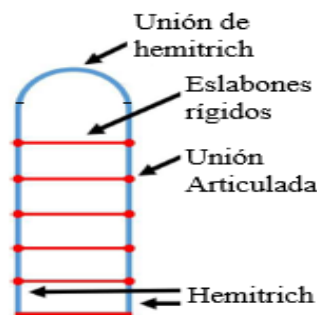


Figura 2. Estructura y componentes internos de los dedos.

**Base.** La función principal de la base es convertir el movimiento circular que describe el sistema motriz en movimiento lineal para abrir y cerrar los dedos de forma paralela, y así sujetar el objeto. Siguiendo la metodología propuesta por Jiménez I. (2013) para la construcción de espirales aritméticas se diseñó la base del prototipo.

**Sistema motriz.** Los elementos adyacentes que soportan y permiten el desplazamiento de los dedos a lo largo de la base se diseñaron en función del objeto a manipular. Adicionalmente, para simular la activación muscular, se diseñó una pieza que admite la elevación a más de  $45^\circ$  en la base de los dedos. La activación de todo el sistema se realiza con un servomotor MG90S para control de posición, el cual proporciona un torque de 2,2 kg/cm.

## Resultados

**Prototipo.** Para elaborar el prototipo del sistema de sujeción bioinspirado se llevaron a cabo tres fases: el modelado 3D de cada componente, mediante el *software* Autodesk Inventor®, la impresión de los componentes modelados y el ensamble general de acuerdo con el cumplimiento de parámetros tales como dimensión, calidad, acabado y funcionamiento. Los dedos se imprimen con un material flexible termoplástico y el resto de componentes en plástico ABS.

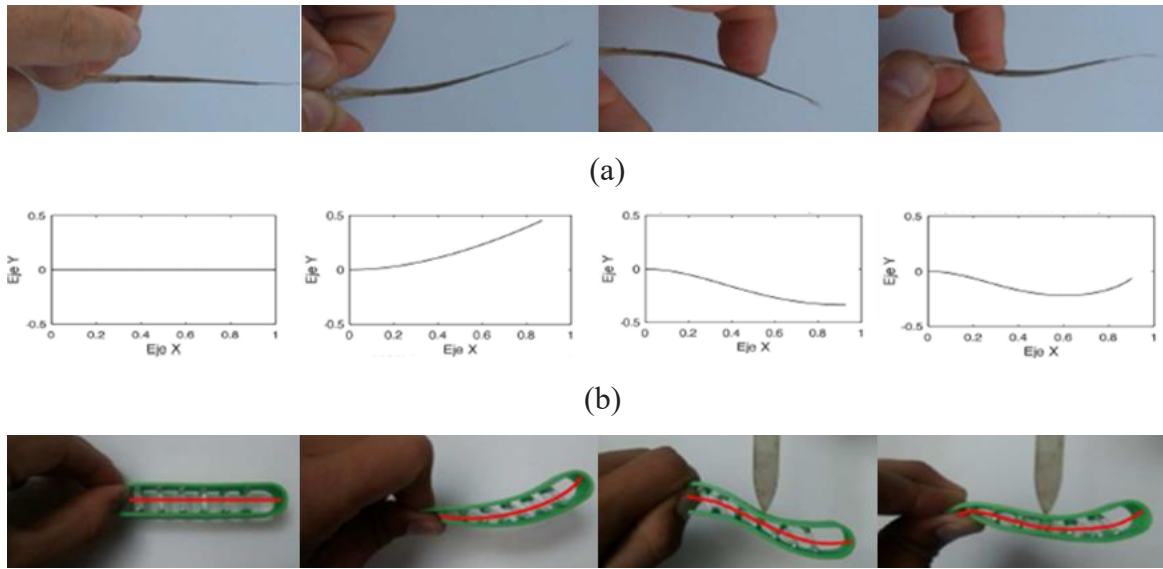
La Figura 3 presenta el prototipo del sistema de sujeción bioinspirado.



**Figura 3.** Sistema de sujeción bioinspirado.

**Simulación del comportamiento de los dedos.** El comportamiento individual de los dedos se analizó bajo cuatro condiciones de carga diferente y se comparó con el comportamiento obtenido, mediante el modelo matemático y los resultados

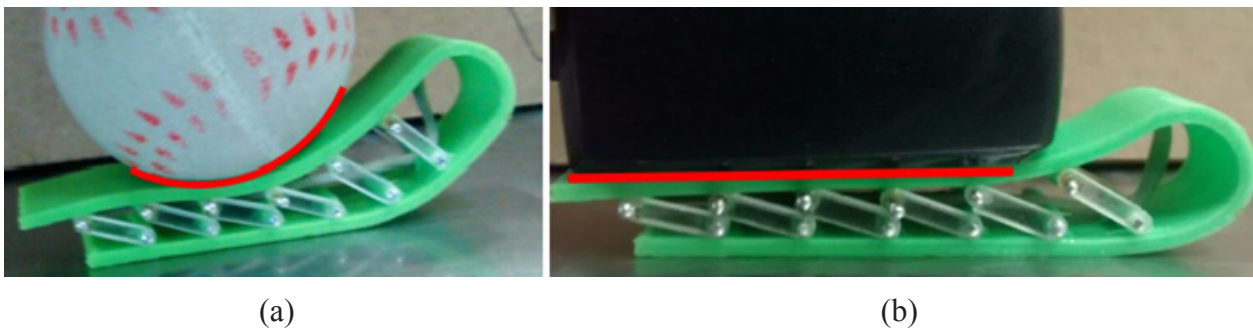
reportados en la literatura. La primera condición de carga es en estado de reposo, la segunda es en activación muscular, la tercera es con una carga aplicada y la cuarta es en activación muscular con carga aplicada.



**Figura 4.** Comportamiento del dedo bajo cuatro condiciones de carga. (a) Rayo de la aleta de un pez (Bas-Goris, 2011), (b) Simulación basada en el modelo matemático, (c) Prototipo.

Se puede observar en la Figura 4 que tanto la simulación (b) como el comportamiento del prototipo (c), concuerdan con la forma que toma el rayo de la aleta del pez (a) en diferentes situaciones, demostrando que el proceso de diseño y construcción es exitoso. La capacidad del prototipo de adaptarse a diferentes cargas, permite aumentar el área de contacto ente el dedo y el elemento a sujetar.

**Adaptación de la estructura de los dedos.** Para validar la capacidad que tiene el dedo de adaptar la forma de su superficie cuando entra en contacto con un objeto, se realizó la siguiente prueba experimental: presionar contra la superficie del dedo un objeto con geometría curva y un objeto con superficie plana.



**Figura 5.** Prueba de adaptación de la estructura de los dedos, (a) Superficie curva, (b) Superficie plana.



Cuando la superficie del dedo entra en contacto con una superficie curva, se adapta de tal forma que el objeto no presenta ninguna deformación visible en su

contorno. Así mismo, la superficie del dedo presenta una respuesta favorable cuando entra en contacto con la superficie plana.

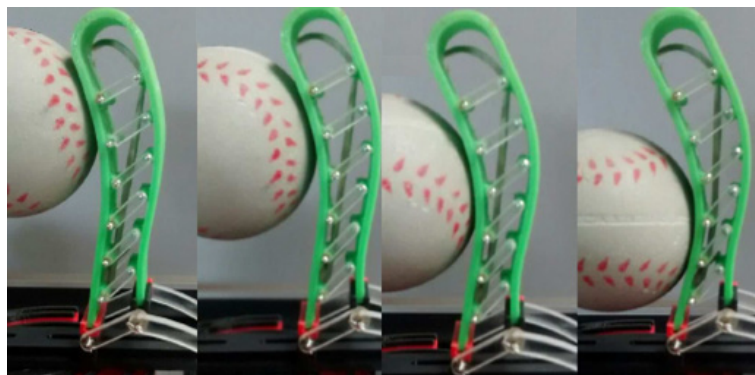


Figura 6. Prueba de adaptación al objeto en diferentes puntos de contacto.

Adicionalmente, se verificó la adaptación de los dedos montados sobre la base y el sistema motriz para diferentes posiciones del objeto, obteniendo un comportamiento similar al que presentan las aletas radiadas de los peces.

**Valoración de la eficiencia energética y prueba de sujeción.** Para valorar la eficiencia energética del prototipo, se comparó con

la pinza comercial Peg1602, desarrollada por la empresa Festo (Disponible en [www.festo.com/net](http://www.festo.com/net)) y utilizada en la plataforma Robotino del Laboratorio de Procesos Automáticos de la Fundación Universitaria Agraria de Colombia- Uniagraria. El resultado de las mediciones realizadas para encontrar el consumo de corriente y otras características relevantes de los manipuladores se describen en la Tabla 1.

Tabla 1. Características de los manipuladores.

Manipulador	Parámetro					
	Voltaje	Corriente	Potencia	Movimiento de la pinza	Material de los dedos	Estructura de los dedos
Peg1602	24V	120 mA	2,88 W	Paralelo	Aluminio	Rígida
Prototipo	5V	110 mA	0,55 W	Paralelo/ inclinado	Polímero	Flexible

Para la operación adecuada del prototipo es necesaria una potencia de 0,55 W, mientras que para el manipulador comercial es de 2,88 W. Así mismo, al sujetar el objeto esférico con la pinza comercial Peg1602, se evidenció una deformación en la superficie del objeto, lo cual representa una desventaja cuando se pretende conservar intactas las características físicas del elemento.

## Conclusiones

Aumentar el parámetro G tiene como consecuencia la concentración de esfuerzo producido por un gran cambio en una pequeña zona cercana a la base que en el modelo real puede ocasionar fallas en el material. Esto se debe a que el resto de la estructura no se deforma para adaptarse a la carga o al accionamiento muscular aplicado, porque el rayo es demasiado rígido. Es necesario tener en cuenta que los parámetros G, B, d, y s son parámetros determinados por la construcción física de la estructura, por tanto tienen valores fijos. En este orden de ideas, los únicos parámetros controlables del modelo son la carga p y el accionamiento. El prototipo que se implementó disminuye la presión ejercida por unidad de área, gracias a su capacidad de adaptación al objeto que sujeta, permitiendo un aumento en el área

de contacto entre los dedos y el objeto sujetado. El sistema a su vez, consume menos energía, gracias al mecanismo de espiral aritmética, ya que se activa únicamente al sujetar o soltar el objeto.

## Referencias Bibliográficas

- Cirovic & Stano Simeonov, Simeonov (2011). *Application of fin ray effect approach for production process automation*. DAAAM.
- Bas-Goris (2011). *Fish fin ray*. Recuperado de [www.vimeo.com](http://www.vimeo.com)
- Festo (2014). *Multichoice gripper*. Recuperado de [www.festo.com](http://www.festo.com)
- Jiménez, I. & Calavera, C. (2013). *Dibujo Técnico*. España: Ediciones Paraninfo S.A.
- Videler, J.J. & Geerlink P.J. (1987). The relation between structure and bending properties of teleost fin rays. *Netherlands Journal of zoology*. Netherlands.
- Silas, A. (2010). Optimizing a fin ray stiffness. *Journal of the Mechanical and Physics of solids*, 656–654.