

Development of a Hand Prototype for Gripper Explosive Grenade of Pineapple Type by Applying Soft Robotic Elements and Embedded Sensors

Mijail Guerrero, Estudiante¹, Leonardo Vinces, Bachiller (Ingeniero Electrónico)¹, Christian del Carpio, Master¹
¹Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, u201220980@upc.edu.pe, leonardo.vinces@upc.pe, pcelcdel@upc.edu.pe

Abstract -- This article is part of a project to develop a robot for tasks in the collection and transfer of explosives, in which the system of the robotic hand was selected to make a proposal prototype and its development, in this article. This prototype of a robotic hand has the objective the grip of explosives grenades of the "pineapple" type, having as constituent parts of some soft robotics elements, especially the "soft fingers" because of their softness, they have the potential of grabbing objects in a more soft or delicate way than traditional gripper elements. It also makes use of an electro pneumatic system as well as sensors and another primary elements that allows the control and to get information during the complete process done by the robotic hand. The article also aims to make a prototype proposal for systems related to robotics and not only for the task described with grenade explosives, instead with a great potential of be used in a more general way in robotic systems. Some results were done to show good answer of the prototype developed into the take of an object with similar geometry as the pineapple grenade. Another analysis from the results given by the experiments, showed a linear relationship between the curvature of the finger and some of the variables and parameters considered in the proposed analysis.

Keywords– Robotic hand, Soft Robotics, Pneumatic in Soft Robotics, Explosive Grenade Robot, Robotic fingers.

Digital Object Identifier (DOI):
<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2019.1.1.274>
ISBN: 978-0-9993443-6-1 ISSN: 2414-6390

Desarrollo de un prototipo de mano para sujeción de granadas explosivas tipo piña aplicando elementos de robótica blanda y sensores embebidos

Mijail Guerrero, Estudiante¹, Leonardo Vinces, Bachiller (Ingeniero Electrónico)¹, Christian del Carpio, Master¹
¹Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, u201220980@upc.edu.pe, leonardo.vinces@upc.pe, pcelcdel@upc.edu.pe

Resumen —Este artículo de investigación es parte de un proyecto el cual tiene como objetivo el desarrollo de un robot para labores de remoción de explosivos de granada tipo piña, dicho robot contiene una mano robótica con sensores embebidos, los cuales permiten ampliar los posibles datos a obtenerse, para la mano robótica se hace uso de robótica blanda para el propósito de una sujeción más “delicada”. Se obtuvo un resultado positivo respecto a la sujeción de los dedos de la mano robot a un objeto con la geometría deseada. Así mismo, se realizó un estudio respecto de los dedos blandos, para el cual se analizan las variables de deformación de longitud, así como de ángulo de nodo o curvatura, ambos por medio de modelos de aproximación de cálculo, siendo el ángulo de nodo una alternativa al uso común de curvatura. Se verificó la existencia o no, de una relación lineal entre las variables dadas y ciertas configuraciones en el dedo. Aplicando el coeficiente de Pearson se pudo verificar que existe una correlación lineal entre la variable Ángulo de Nodo y las diferentes presiones de aire inyectadas al dedo, manteniéndose las demás variables como constantes.

Palabras clave — Robótica Blanda, Sensores embebidos, Neumática en Robótica Blanda, Curvatura en Dedo Blando.

I. INTRODUCCIÓN

El presente artículo es el resultado de una investigación respecto a sistemas robóticos, orientado hacia el desarrollo de sistemas de sujeción de objetos con la incorporación de elementos de robótica blanda como alternativa a los mecanismos rígidos usualmente utilizados.

El tema tratado, es parte de un proyecto para la realización de un robot orientado a tareas de remoción de explosivos de granadas tipo piña. La elección de dicho tipo de explosivos se debe a su mayor frecuencia durante los operativos llevados a cabo por la policía. La investigación se da, como una necesidad de la UDEX, que es la unidad anti explosivo de la Policía Nacional del Perú. El artículo se centra en la propuesta del prototipo de mano robótica, considerando su diseño y elementos componentes. Así mismo, se realiza un estudio respecto al comportamiento de algunas variables y/o parámetros de un elemento de dedo blando, como son su curvatura e inclinación.

Digital Object Identifier (DOI):
<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2019.1.1.274>
ISBN: 978-0-9993443-6-1 ISSN: 2414-6390

En cuanto a los sistemas de sujeción existentes, estos, están orientados a la tarea específica que realiza. Dentro de las propuestas analizadas, se hace observación y/o conclusión de la importancia del uso de sensores embebidos para un sistema de agarre.

Y. She y H. Jun Su, en “Design and Fabrication of a Soft Robotic Hand With Embedded Actuators and Sensors” [1], proponen desarrollar técnicas para el control de la curvatura de una mano robótica blanda por medio de materiales que permiten “Memoria permitida de forma” o conocido como SMA (“Shape Memory Alloy”). Se utilizaron sensores embebidos en la estructura de la mano para permitir un monitoreo de su curvatura y extensión. Demuestran que se puede desarrollar un sistema de mano blanda que posea el control en cuanto a su curvatura por medio de señales de excitación.

A. Saudabayev y H. Atakan Varol, en “Sensors for Robotic Hands: A Survey of State of the Art” [2], presentan los desarrollos o avances respecto a la imitación en cuanto a manos robóticas que emulen el comportamiento de la mano humana, empleando elementos blandos y sensores que permitan extraer información respecto a algunas variables en acción del dedo, como el movimiento, el contacto, temperatura, presión, entre otros. Entre las conclusiones mencionan la importancia del uso de sensores embebidos en el desarrollo de una mano robótica con propósito general.

X. Zhou, C. Majidi y O. M. O’ Reilly, en “Soft Hands: An Analysis of Some Gripping Mechanisms in Soft Robot Design” [3], a diferencia de los anteriores, desarrollan un análisis matemático en cuanto al diseño de una mano robótica blanda según el cual, teniendo ciertos parámetros o restricciones de curva, dicha mano pueda amoldarse de una manera adecuada a un objetivo.

A. Koivikko, E. Sadeghian Raei y otros, en “Screen-Printed Curvature Sensors for Soft Robots” [4], detallan el proceso de fabricación de dedos blandos con sensores embebidos. Se desarrolla un método para insertar filamentos con diferentes propiedades mecánicas y resistencia eléctrica como la plata o tinta de carbón, permitiendo realizar la

medición de curvatura a diferentes presiones de trabajo, así mismo por medio de procesamiento de imágenes, analizan los cambios geométricos del dedo como la deformación longitudinal y curvatura. Parte de la investigación calculó una expresión lineal de la curvatura del dedo en función de la resistencia eléctrica del filamento y de la presión inyectada.

W. Tao, M. Luo, F. Chen, y otros, en “Toward Modular Soft Robotics: Proprioceptive Curvature Sensing and Sliding-Mode Control of Soft Bidirectional Bending Modules” [5], proponen un sistema para robotica blanda en el cual se permita controlar y medir la curvatura del mismo, por medio de un método de sensado utilizando el efecto Hall para medir variaciones del campo magnetico y calcular la curvatura de dicho elemento. El método desarrollado brinda la posibilidad de realizar un control lineal de la curvatura del elemento robotico blando en función del sensor magnetico utilizado.

En el presente estudio se analizará la variable curvatura que pueda presentar el elemento blando de la mano robótica desarrollada.

II. DISEÑO DEL PROTIPO PROPUESTO

El prototipo de mano robótica es un parte de un robot móvil para labores de remoción de explosivos. En la Fig. 1, se muestra el modelo desarrollado con la colocación de dicho sistema de sujeción en el extremo libre del brazo.

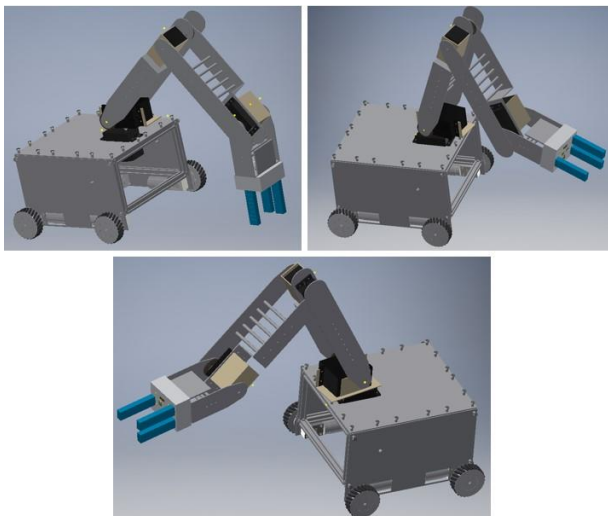


Fig. 1 Diseño del robot móvil para remoción de explosivos con la incorporación del prototipo de mano robótica

En la Fig. 2, se muestra el diagrama de bloques del prototipo de mano robótica, el cual está conformado por diferentes elementos, como son: elementos neumáticos, eléctricos y de control.

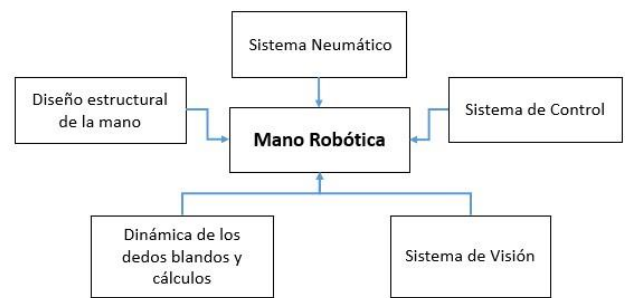


Fig. 2 Diagrama de bloques del prototipo propuesto

A. DISEÑO ESTRUCTURAL DE LA MANO

En este punto, se vio la estructura de soporte de la mano, el cual tendrá embebidos los sensores y así mismo el diseño de los dedos blandos.

Por un lado, se analizó la ergonomía respecto a la distribución o ubicación de los dedos en la estructura para obtener una mejor adaptación para sujetar objetos con geometrías similares a las granadas explosivas tipo piña, los cuales guiados en las dimensiones de variados ejemplos se limitó como modelo base un elemento del tipo elipsoidal con medidas aproximadas de 55mm de diámetro y 117mm de largo, pudiendo variar en sus secciones transversales de dimensión. En la Fig. 3, se muestra el agarre de la granada, para lo cual solo se consideró el uso de 3 dedos, esto debido a la geometría de carácter elipsoidal o cilíndrica del explosivo.

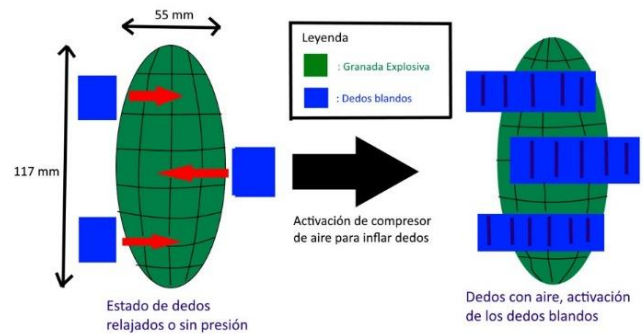


Fig. 3 Concepto de agarre de granadas con dedos. (Vista Inferior)

En la Fig. 4a y 4b, se muestra el diseño para la mano robótica. Los elementos de color celeste-azul, representan los dedos blandos que conforman la mano, los cuales se encuentran insertados a la estructura, al igual que los sensores y actuadores, así como las luces led.

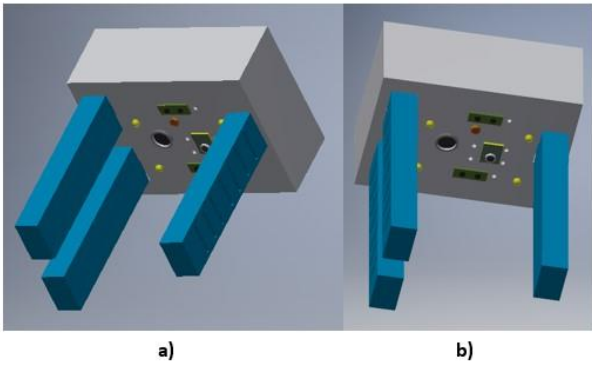


Fig. 4 Vistas del diseño del conceptual en 3D

En la Fig. 5, se muestran los elementos que conforman la mano robótica, así como su ubicación.

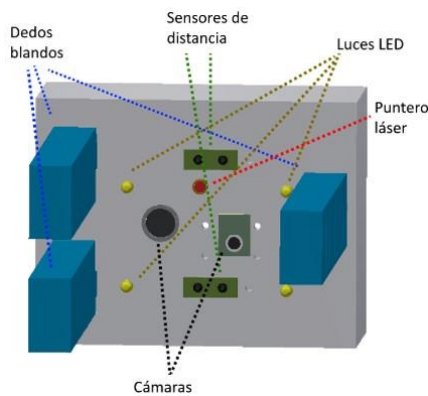


Fig. 5 Ubicación de los componentes en el diseño conceptual

Para la realización de los dedos, se fabricó los moldes, con la dimensión y geometría deseada. En la Fig. 6 y Fig. 7, se muestra el molde para la parte superior, mientras que la Fig. 8 se muestra el molde inferior.

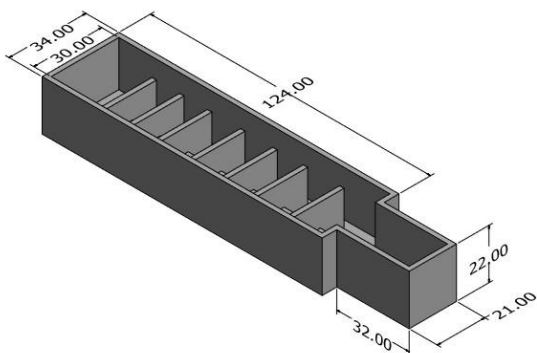


Fig. 6 Dimensiones del molde superior. Vista isométrica. Medidas dadas en milímetros (mm).

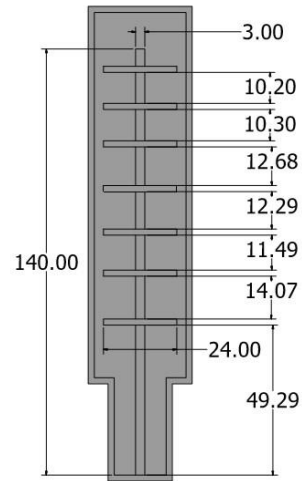


Fig. 7 Dimensiones del molde superior. Vista superior. Medidas dadas en milímetros (mm)

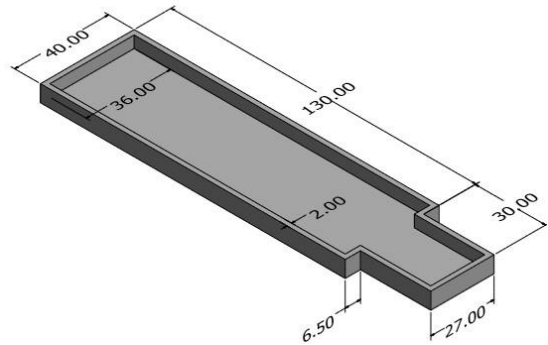


Fig. 8 Dimensiones del molde inferior. Vista isométrica. Medidas dadas en milímetros (mm)

En [6], se realizó un estudio de algunos parámetros para dedos blandos, con el cual se obtuvo que el **Ecoflex tipo 00-30** requiere menor presión interna para deformarse en comparación con el material **Dragon Skin 20**, así mismo el Ecoflex logra alcanzar curvaturas de menor radio. Debido a esta razón, se decidió utilizar la Silicona tipo Ecoflex tipo 00-30 para la presente propuesta.

El proceso de fabricación consta de llenar el molde hecho de acrílico (molde superior e inferior), con la mezcla de silicona preparada y luego esperar aproximadamente 8 horas (tiempo por exceso) a que se endurezca o deje de estar en forma líquida, para luego retirar de manera cuidadosa la silicona del molde y colocar un revestimiento rígido en la parte inferior, el cual será el encargado de permitir la curvatura del mismo, ya que al ser la parte inferior menos elástica en comparación a la superior generará una curva al expandirse más, uno de los lados respecto a su opuesto.

En la Fig. 9a y la Fig. 9b, se visualizan ambas caras del dedo ya fabricado. La Silicona Ecoflex es a su vez el único elemento utilizado para sellar ambas caras. Un proceso

importante, es la inserción de una manguera de poliuretano para neumática de 4mm de diámetro interno. Este elemento se insertará por medio de la cavidad interior una vez terminado el proceso de unión de las partes superior e inferior de la silicona.

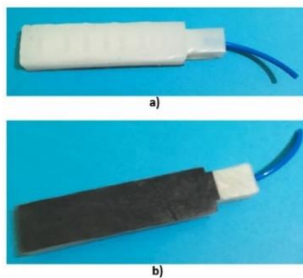


Fig. 9 (a) Parte superior del dedo blando en color blanco. (b) Parte inferior o capa exterior en color negro. (Vistas superiores)

En la Fig. 10, se presenta una imagen de un corte lateral del dedo, describiéndose o indicándose sus 3 principales componentes interiores. En celeste se representa la Silicona Ecoflex, mientras que, en marrón, en la parte inferior de revestimiento rígido, y en amarillo los espacios por donde circulará o se inyectará el aire del dedo. Dichos conductos de aire presentan un diámetro aproximado de 3mm por lo que la manguera a ser insertada ingresará con cierta dificultad, expandiendo su conducto y sellando las posibles fugas de aire en el proceso de inyección de aire durante su funcionamiento.

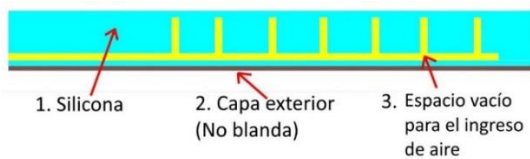


Fig. 10 Vista lateral del dedo blando.

Finalmente, se realizó el diseño de la carcasa, la cual tiene función de alojar los elementos tanto de sensado como actuadores y los dedos blandos. En la Fig. 11 se muestra el diseño propuesto indicando su dimensionamiento.

B. DINÁMICA DE LOS DEDOS BLANDOS Y CÁLCULOS

En el ítem anterior, se realizaron los detalles de diseño y fabricación de los dedos, sin haberse considerado un análisis dinámico sobre el comportamiento del aire dentro de los dedos. Debido a la complejidad que representa el análisis dinámico de fluidos, se puede obtener algunos valores de un cálculo aproximado con la hipótesis de ciertas medidas y/o maximizando/minimizando algunas condiciones de trabajo del sistema.

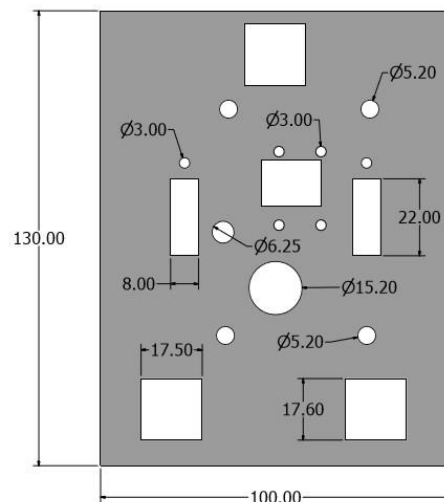


Fig. 11 Dimensionamiento de la estructura de mano robótica. Unidades dadas en milímetros (mm).

Para el aire se considerarán algunos parámetros dados como, densidad del aire, $\rho_{aire} = 1.225 \text{ Kg/m}^3$, la viscosidad dinámica del aire, $\mu_{aire} = 1.83 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$, y el valor de la gravedad como $g = 9.81 \text{ m/s}^2$. El número de Reynolds Re [7], se obtiene de (1). Así mismo, en (2) se calcula el diámetro equivalente D_{eq} de una sección de área.

$$Re = \frac{\rho_{aire} \cdot D_{eq} \cdot V}{\mu_{aire}} \quad (1)$$

$$D_{eq} = \frac{4 \cdot A}{Pe} \quad (2)$$

Tanto en (1) y (2) hay algunas variables que pueden tomar distintos valores, para el presente propósito se considerarán, $V = 10 \text{ m/s}$ siendo la velocidad media del aire, $A = 24 \text{ mm}^2$ siendo el área de la sección transversal o de flujo, y $Pe = 24 \text{ mm}$ siendo el perímetro de la sección. Reemplazando en (1) y (2) se obtiene $D_{eq} = 4.3636 \text{ mm}$ y un $Re = 2920.98$. Lo que indica el número de Reynolds, es el grado de turbulencia. Para el valor obtenido se tendrá como máximo un régimen **transitorio**, es decir, entre laminar y turbulento, pero con mayor tendencia hacia el laminar, por lo que se espera tener una dinámica no tan turbulenta del aire en el dedo.

Ahora considerarse 2 puntos diferentes y arbitrarios dentro del flujo de aire dentro del dedo; en la Fig. 12 son denotados dichos puntos con P_{P1} y P_{P2} .

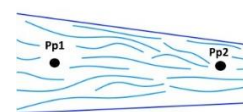


Fig. 12 Visualización de 2 puntos diferentes en un flujo.

Se tiene en (3) la ecuación de Bernoulli para 2 puntos dados.

$$h_1 \geq h_2 \geq h_3 \quad (5)$$

$$P_1 + \rho_{air} \cdot g \cdot z_1 + \frac{\rho_{air} \cdot V_1^2}{2} = P_2 + \rho_{air} \cdot g \cdot z_2 + \frac{\rho_{air} \cdot V_2^2}{2} + L \quad (3)$$

donde z representa la altura referencia, asociado a la energía potencial gravitatoria y L representa las pérdidas entre ambos puntos en consideración debido a la fricción interna con las paredes, o pérdidas de codo, $L = k_1 \cdot \frac{\rho_{air} \cdot V^2}{2}$. Si se reemplazan algunos de los valores en (3) y considerándose que las presiones P_1 y P_2 están en el orden de los KPa . Los términos restantes poseen valores no significativos respecto de la magnitud de las presiones P , donde k_1 es una constante con valor entre 0 y no llegando a ser mayor a 20. Por lo que se puede afirmar que $P_1 \approx P_2$, lo que significa que la presión es casi la misma en todos los puntos interiores.

En la Fig. 13, se muestran dos columnas, donde la columna de la izquierda muestra una vista lateral de corte del dedo blando sin flujo de aire, y la columna de la derecha muestra la misma vista lateral de corte del dedo, pero con flujo de aire. La imagen superior es la vista de corte lateral general.

La Fig. 13a muestra una primera etapa de inflado, en cambio en la Fig. 13b ya existe una mayor presión o un avance en el proceso de inyección de aire, finalmente en la Fig. 13c, las cavidades se encuentran infladas, visualizándose con un gran porcentaje de vectores rojos indicando una mayor presión. Entre los casos **a**, **b** y **c** el grado de curvatura y expansión va cambiando, tendiendo al incremento.

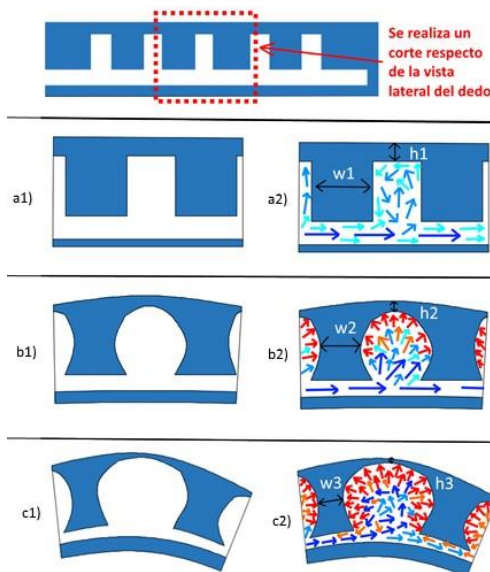


Fig. 13 Vista lateral de corte del dedo blando. Gráfica de 3 diferentes estados de inyección de aire de una sección lateral.

De manera general se deberían cumplir para los casos **a**, **b** y **c**, las desigualdades mostradas en (4) y (5).

$$w_1 \geq w_2 \geq w_3 \quad (4)$$

Donde w_1 , w_2 y w_3 son el ancho y h_1 , h_2 y h_3 es el alto del espesor de las cavidades.

C. SISTEMA NEUMÁTICO

El sistema neumático se encarga de la inyección y control del flujo de aire en los dedos. Para su desarrollo, se consideraron los siguientes elementos: **i)** Válvula tipo solenoide 3/2 a 24 VDC. **ii)** Conector manguera de 8mm a 4mm diámetro. **iii)** Manguera para neumática de 8mm y 4mm diámetro interno. **iv)** Conector neumático de 3 y 4 entradas. **v)** Válvula tipo "Check" (máx. 100 psi). **vi)** Compresor de aire digital a 12 VDC, 0-100 psi, Potencia menor a 120W, error de $\pm 5 KPa$ lectura analógica. **vii)** Módulos Relay 30 VDC-10A. **viii)** Conector neumático 2 entradas/1 salida.

Para el diseño del sistema se consideraron 2 propuestas, cada cual con ventajas/desventajas respecto a la otra. La Fig. 14 es un esquema de un sistema con solo una válvula de control para el accionamiento de los 3 dedos en simultáneo.

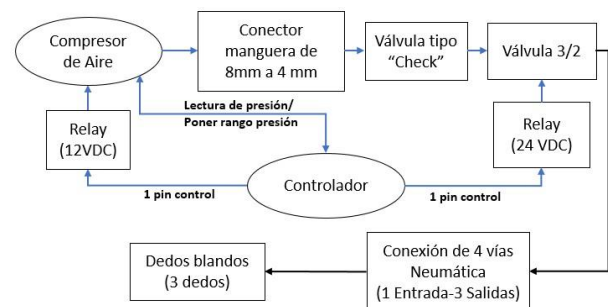


Fig. 14 Sistema neumático de control conjunto

Por otro lado, en la Fig. 15 se muestra un esquema donde cada dedo es accionado de manera independiente, brindando la capacidad de adopción de diversas geometrías con mayores grados de libertad, pero con un sistema físico más complejo.

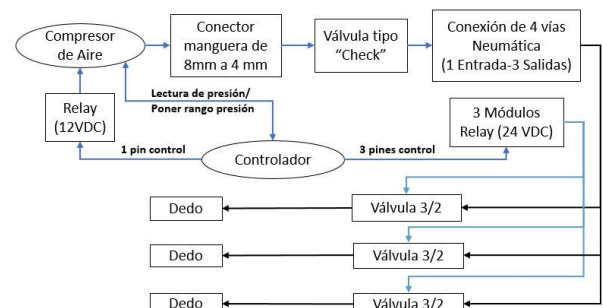


Fig. 15 Sistema neumático de control independiente

D. SISTEMA DE CONTROL

El sistema de control se muestra en la Fig. 16. Para dicho sistema se utilizaron los siguientes elementos: **a)** Sensor de distancia por principio de infrarrojo, Sharp GP2Y0A60SZLF, capaz de generar un rango linealizado. Posee un error menor a 1cm, como error máximo, para rangos de entre 5cm a 100 cm.

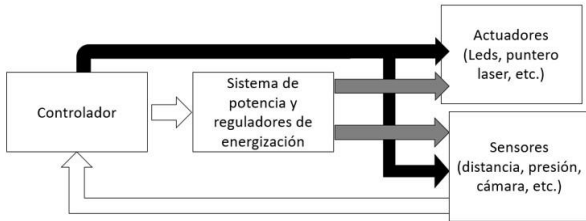


Fig. 16 Sistema de control del prototipo

b) LEDs de alta luminosidad y potencia máxima menor a 4W. **c)** Microcontrolador ATmega328. En la Fig. 17 se muestran la interconexión con el microcontrolador.

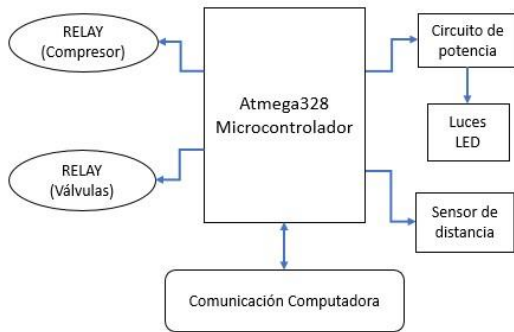


Fig. 17 Interconexión con el microcontrolador

Los elementos señalados de la Fig. 17 pueden variar de acuerdo a los modelos utilizados, por ejemplo, la válvula, por lo que la importancia del esquema mostrado es proponer una base de interconexión y de posibles elementos a ser utilizados en el desarrollo como parte del control. Por otro lado, en cuanto a sugerencias en el accionamiento, se recomienda inyectar aire comprimido un tiempo pequeño a la mano blanda y posteriormente dejar un breve tiempo de no inyección. En la Fig. 18 se detalla la secuencia a seguir para llevar la presión interna del dedo a un valor ya sea ingresado por usuario o calculado por la máquina. El algoritmo propone dar un tiempo de establecimiento de modo que se equilibre el flujo de aire interior, evitándose la acumulación de masas de aire en algunas cavidades, lo cual puede producir diferencias debido a la geometría o también propias de las imperfecciones en la fabricación realizada.

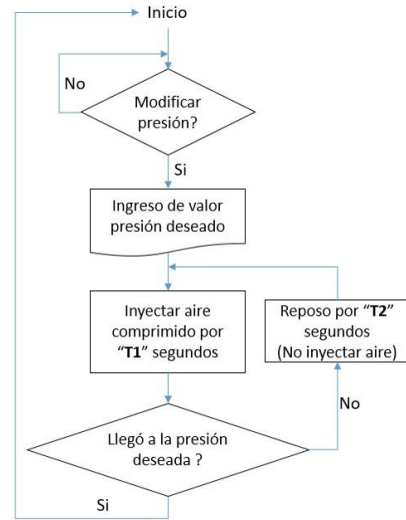


Fig. 18 Secuencia de inyección de aire

El sistema de control tiene en cuenta los 3 estados diferentes en los dedos blandos. **1) Inflar dedo:** Se inyectará aire al interior del dedo. **2) Retener aire:** Se mantendrá el aire actual del dedo, sin inyección ni escape del aire en el dedo. **3) Escape de aire:** Permitir la fuga de aire acumulado en el dedo.

E. SISTEMA DE VISIÓN

Este sistema es el que permite obtener información visual ya sea en tiempo real o para procesamiento de imagen.

Se propone un sistema que posibilite la transmisión de video en tiempo real por medio de la cámara fijada, como se mostró en las Fig. 4 y Fig. 5. La cámara se ubica en el centro de la mano permitiendo la visualización del manipulador.

En la Fig. 19, los elementos a usarse son: **i)** Elemento transmisor de video TS832 el cual es un transmisor de video que trabaja a 5.8 GHz, consumo de 600 mW, canales AV, 12 VDC. **ii)** Cámara Analógica HD 1200 TLV FPV COMS NTSC Lente de 2.8mm. **iii)** Pantalla LCD FPV RX (Receptor de video), 5.8 GHz, tamaño de 7 pulgadas.



Fig. 19 Sistema propuesto de visión

Los elementos seleccionados son compatibles entre sí. El tiempo de retardo entre la captura del video y la recepción de la imagen no supera los 150 ms. La imagen obtenida en pantalla se muestra en la Fig. 20. Así mismo, se muestran distintas imágenes obtenidas a distintas distancias.

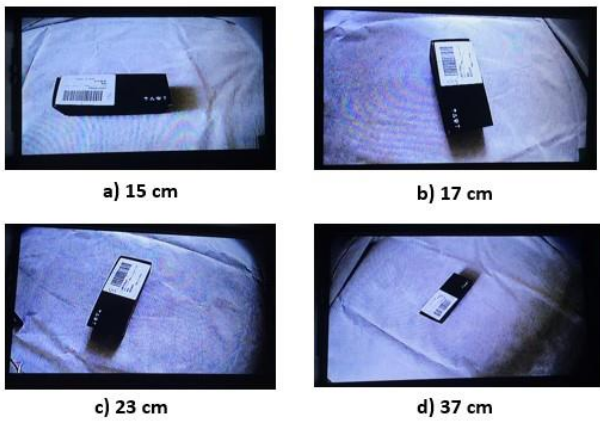


Fig. 20 Imágenes obtenidas a distintas distancias por el sistema de visión.

Las distancias fueron obtenidas por medio del sensor de distancia Sharp GP2Y0A60SZLF.

III. PRUEBAS Y RESULTADOS

En primer lugar, se expondrán los resultados obtenidos del prototipo de mano robótica (3.1), así como también el análisis realizado a los dedos blandos desarrollados como parte del mismo prototipo (3.2).

3.1. PROTOTIPO DE MANO ROBÓTICA

El objetivo principal del desarrollo de mano robótica es la extracción de granadas explosivas tipo piña. En la Fig. 21 se presenta el resultado de la estructura desarrollada, con los sensores y actuadores ya incorporados, excepto los dedos blandos.

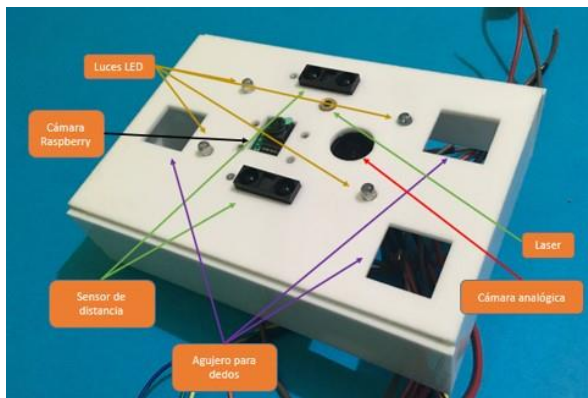


Fig. 21 Desarrollo de estructura de la mano robótica

En la Fig. 22a y Fig. 22b, se muestra la mano con los dedos blandos incorporados.

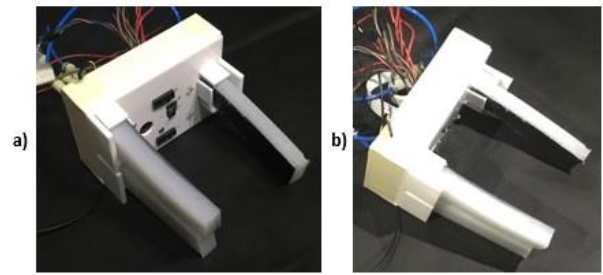


Fig. 22 Mano robótica blanda implementada

3.2. ESTUDIO DE DEDO BLANDO

Parte importante de la presente investigación fue el análisis de comportamiento un dedo blando. Se analizó la existencia o no de relaciones lineales entre algunas variables. Los pasos y procedimientos se desarrollan en los puntos *a*, *b*, *c*, *d*, *e* y *f*, referidos al presente punto 3.2.

a) VARIABLES Y PARÁMETROS

La definición los parámetros y variables considerados para el análisis del dedo fueron variables de longitud, y variables angulares.

En la Fig. 23 se muestra la variable longitudinal, la cual es denotada como *D*, mientras que las variables angulares son tanto *A* como *i*.

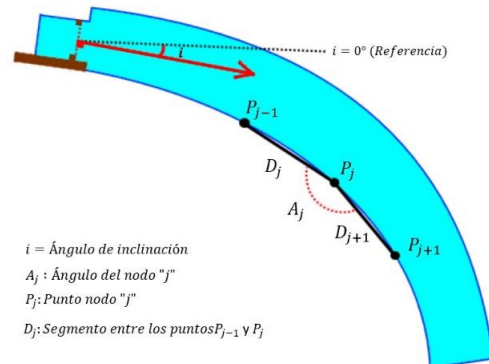


Fig. 23 Definición de términos, referencias y variables en el dedo

El ángulo de nodo está relacionado al concepto de curvatura matemática. Por geometría y en [8] se demuestra y define la curvatura, esta se obtiene de $\pi = A_j + \Delta\theta$ y que $k = \lim_{\Delta\theta \rightarrow 0} \frac{\Delta\theta}{\Delta s}$, donde $\Delta\theta$ es la variación del ángulo de la recta tangente a la curva respecto de la horizontal y Δs es la variación de longitud de arco entre los puntos (*j-1*) a (*j+1*), *k* es la curvatura según definición matemática. En (6) se brinda la relación de la curvatura aproximada (\bar{k}_j) en el nodo *j* como una función del ángulo de nodo *A_j* (radianes), sabiendo que el cálculo de dichos ángulos también representa un cálculo aproximado de la curvatura del mismo nodo. El radio de

curvatura ρ a una curva en un punto es el inverso de la curvatura $k = \frac{1}{\rho}$.

$$\pi = A_j + \frac{\Delta\theta}{\Delta s} \cdot \Delta s \xrightarrow{\frac{\Delta\theta}{\Delta s} \rightarrow \frac{d\theta}{ds} = k} \bar{k}_j = \frac{\pi - A_j}{\Delta s} \quad (6)$$

b) MÉTODO

El método para la extracción de datos consiste en la determinación de puntos referenciales de medición, tanto de las variables angulares como de longitud para los cuales deben ser los mismos para todas las pruebas a realizarse. Por otro lado, la extracción de los datos posterior a la experimentación fue a través de imágenes. Mediante la captura por imágenes del proceso de accionamiento de los dedos y utilizándose AutoCAD se calcularon las medidas de las variables para cada posible situación. La Fig. 24 detalla el proceso de marcado de cada nodo, intervalo de longitud, así como las variables angulares dentro de la imagen. Se realizó la aproximación de cálculo utilizándose 5 segmentos de longitud y 4 ángulos de nodo, los cuales son las referencias para todos los casos de experimento.

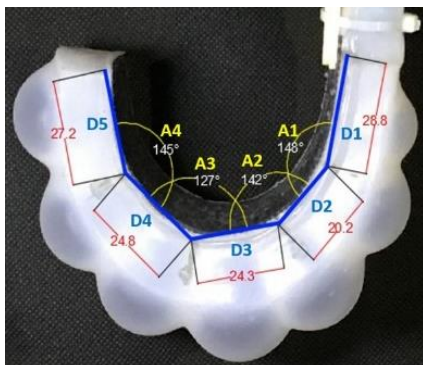


Fig. 24 Ejemplo de determinación de variables de la imagen mediante AutoCAD. (Longitudes en mm)

Mediante la determinación de referencias y el proceso de lectura y extracción de los datos en las imágenes se procede a recopilar información con diferentes configuraciones, 6 ejemplos experimentales distintos sin procesar (Fig. 25).

Luego de realizar procesamiento a las imágenes obtenidas de las pruebas, se organizaron los resultados en las Tabla I y II, los cuales enseñan de manera ordenada los datos respectivos a D y A en función de las presiones internas y la inclinación i del dedo.

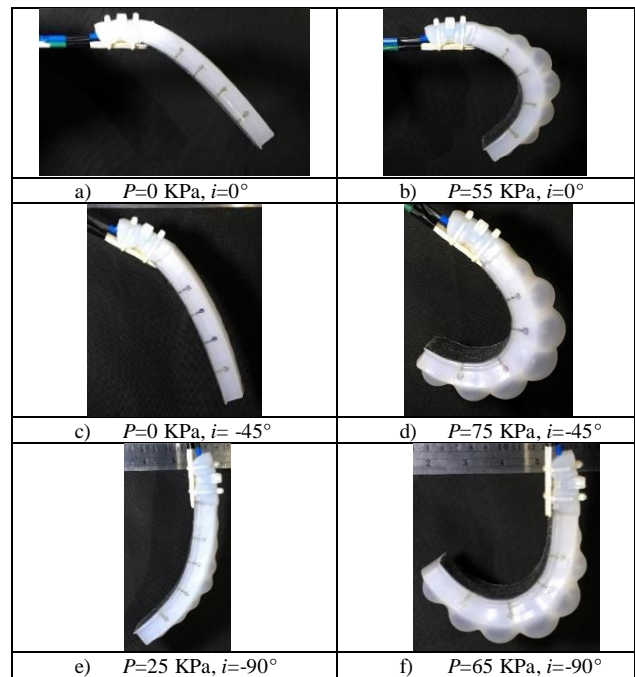


Fig. 25 Resultado obtenidos a diferentes presiones y ángulos.

TABLA I
RESULTADOS OBTENIDOS PARA LONGITUDES

Presión (KPa)	Inclinación (i)	D1 (mm)	D2 (mm)	D3 (mm)	D4 (mm)	D5 (mm)
0.0	0°	25.3	19	22.5	23.5	25.9
	-45°	26.1	18.2	20.9	21.4	23.8
	-90°	25.6	17.6	21.2	22.2	24.3
25.0	0°	27.2	18.8	21.5	23.5	25.4
	-45°	26.3	18.1	21	21.7	24.6
	-90°	26.8	17.8	21.6	22.4	24.9
55.0	0°	28	18.3	21.2	22.3	26.2
	-45°	27.3	19	21.1	22.1	26.2
	-90°	28.4	19.1	22.4	25.4	26.3
65.0	0°	28.1	18.4	21.2	22.6	27.1
	-45°	26.7	17.9	20.6	22.3	26.6
	-90°	27.6	18.9	23.3	25	27.1
80.0	0°	27.6	18.2	20.7	23.5	27
	-45°	27.4	18.2	20.2	24.1	26.9
	-90°	28.8	20.2	24.3	24.8	27.2

TABLA II
RESULTADOS OBTENIDOS PARA ÁNGULOS DE NODOS

Presión (KPa)	Inclinación (i)	A1 (°)	A2 (°)	A3 (°)	A4 (°)
0.0	0°	171	176	176	178
	-45°	170	176	177	177
	-90°	178	178	178	179
25.0	0°	165	171	168	178
	-45°	174	175	177	178
	-90°	173	173	159	170
55.0	0°	156	147	143	161
	-45°	167	145	137	156
	-90°	168	147	139	158
65.0	0°	150	151	135	155
	-45°	162	143	130	153
	-90°	160	146	134	151
80.0	0°	147	143	129	144
	-45°	150	137	125	142
	-90°	148	142	127	145

c) ANÁLISIS I/P

Este análisis de los resultados tiene por objetivo analizar cómo es que varían las variables D y A para los diferentes ángulos de inclinación i del dedo, tomándose como constante a la variable presión P , es decir, se considera como valor fijo. En la Fig. 26 se realiza el ejemplo de cálculo de los coeficientes de correlación de Pearson R para los valores tanto de $D1$ y $A1$ dado $P = 0KPa$, la cual es considerada como la presión constante en todos los datos de la gráfica.

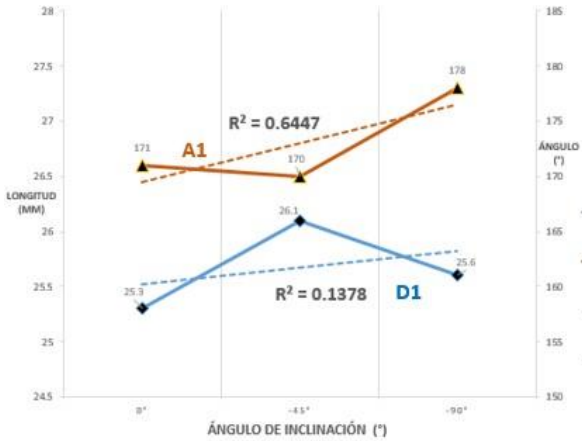


Fig. 26 Cálculo de R para $D1$ y $A1$ con $P=0$ KPa.

De igual manera se calculan los R para los diferentes valores de P , para cada uno de los segmentos D y los ángulos A . Los resultados totales se resumen en la tabla III.

TABLA III
CÁLCULO R PARA I/P

	D1	D2	D3	D4	D5	A1	A2	A3	A4
$i/P=0.0$	-0.37	0.997	0.764	0.613	0.729	-0.81	-0.87	-1	-0.50
$i/P=25.0$	0.44	0.974	-0.15	0.606	0.619	-0.81	-0.5	0.5	0.86
$i/P=55.0$	-0.36	-0.92	-0.83	-0.83	-0.86	-0.9	0	0.65	0.59
$i/P=65.0$	0.35	-0.5	-0.74	-0.81	0	-0.78	0.62	0.19	1
$i/P=80.0$	-0.79	-0.87	-0.8	-0.99	-0.65	-0.33	0.16	0.5	-0.33
i/P Promedio	-0.14	-0.06	-0.35	-0.28	-0.03	-0.72	-0.11	0.16	-0.96
Promedio Total	-0.1720					-0.4075			

d) ANÁLISIS P/I

Este tipo de análisis es similar en metodología al anterior I/P, considera como variables a D , A y P , mientras que i se lo considera constante o estático. En la Fig. 27 se presenta un ejemplo de cálculo de R para $D1$ y $A1$, siendo constante $i=0^\circ$.

e) RESULTADOS I/P E P/I

Mediante los análisis de P/I y I/P se pudo extraer los diferentes valores de R tanto para las variables de longitud D como angulares A . Al examinar los valores "Promedio Total" en las tablas III y IV, se observa que el único valor significativamente cercano a los valores de 1 o -1 se obtiene para las variables A en el estudio tipo P/I con un valor de $\bar{R} = -0.95$, el cual es un claro indicador de una tendencia lineal y negativa entre la variable presión y aquellos ángulos

nodales, pero bajo la restricción de que la variable i se debe mantener constante. El estudio genera algunas observaciones respecto del comportamiento del dedo. La no linealidad del sistema dedo blando como resultado general. Por otro lado, la fuerte tendencia lineal restringida en la variable definida como ángulo de nodales.

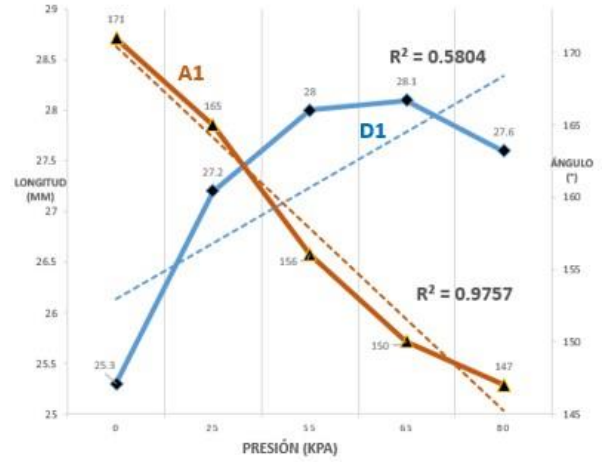


Fig. 27 Cálculo de R para $D1$ y $A1$ con $i=0^\circ$.

En la tabla IV se muestran los resultados obtenidos para el cálculo de R para P/I.

TABLA IV
CÁLCULO R PARA P/I

	D1	D2	D3	D4	D5	A1	A2	A3	A4
$P/i=0^\circ$	0.85	-0.97	-0.95	-0.4	0.8	-0.99	-0.96	-0.98	-0.95
$P/i=45^\circ$	0.87	0.07	-0.65	0.84	0.992	-0.81	-0.96	-0.95	-0.95
$P/i=90^\circ$	0.94	0.94	0.95	0.886	0.982	-0.93	-0.97	-0.99	-0.99
P/i Promedio	0.88	0.013	-0.21	0.44	0.92	-0.91	-0.96	-0.97	-0.96
Promedio Total	0.4086					-0.9500			

f) PRUEBAS

Como parte de la experimentación con los dedos blandos se hizo un modelo de mano, de mayor simplicidad y sin los elementos de sensado, colocándose 2 dedos blandos. Se buscó un indicativo respecto del amoldamiento de los dedos desarrollados al sujetar un elemento. En la Fig. 28 se muestran datos obtenidos en secuencia de los ensayos realizados con un objeto con bastante afinidad en forma respecto a la granada tipo piña, 16cm de largo, 59mm de diámetro y un peso no mayor a 180 gr. Los ensayos fueron llevados a cabo de manera supervisada y controlada. Como resultado, se evidenció un positivo amoldamiento de los dedos alrededor del objeto lo cual representa un indicador. Con lo que se espera en el caso de utilizarse adecuadamente 3 dedos en la mano prototipo se puedan obtener buenos resultados para la sujeción y adaptación a la geometría de sujeción.

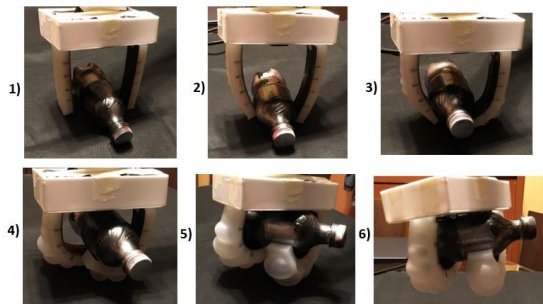


Fig. 28 Pruebas de deformación y amoldamiento de dedos

IV. CONCLUSIONES

Mediante la presente investigación se desarrolló un prototipo de mano robótica con la orientación de sujeción de granadas explosivas tipo piña. El objetivo es la generación de una propuesta la cual considere el uso de diversos sensores embebidos para una mayor adquisición de datos, así como de control e implementación de robótica blanda el cual permita la sujeción de manera más suave respecto a los manipuladores rígidos y especialmente permitiendo un mejor amolde ante diversas geometrías. Además, como parte de las pruebas se obtuvo un indicador positivo respecto de las características de trabajo de los dedos al amolde y sujeción para las geometrías objetivo del prototipo, lo cual sugiere que el uso de dicho desarrollo puede ser adecuado al objetivo.

Así mismo, la investigación respecto al comportamiento de accionamiento de los dedos blandos, para el cual se deseó conocer la existencia o no, de relaciones lineales entre las variables determinadas y definidas, obteniéndose de manera general una tendencia no lineal entre la mayoría de variables estudiadas, excepto para la variable *curvatura* o *Ángulo de nodo*, el cual respondió de manera casi lineal y con sentido negativo ante los cambios de presión pero con la restricción que la variable inclinación debe ser fija. Por lo que el estudio revela que se puede utilizar la variable ángulo de nodo como una alternativa al cálculo de curvatura desde la definición matemática y distintos estudios hacen uso para estudiar y/o controlar dichos elementos

REFERENCIAS

- [1] Y. She y H. Jun Su, «Design and Fabrication of a Soft Robotic Hand With Embedded Actuators and Sensors, » Department of Mechanical and Aerospace Engineering, The Ohio State University, Columbus, 2015.
- [2] A. Saudabayev y H. Atakan Varol, «Sensor for Robotic Hands: A Survey of State of the Art, » Department of Robotics, Nazarbayev University, Kazakhstan, 2015.
- [3] X. Zhou, C. Majidi y O. M. O' Reilly, «Soft Hands: An Analysis of Some Gripping Mechanisms in Soft Robot Design, » Department of Mechanical Engineering, University of California at Berkeley, Berkeley, 2012.
- [4] A. Koivikko, E. Sadeghian Raei, M. Mosallaei, M. Mantysalo y V. Sariola, «Screen-Printed Curvature Sensors for Soft Robots, » IEEE Sensors Journal, 2018.

- [5] W. Tao, M. Luo, F. Chen, S. Ozel, Y. Sun y C. D. Onal, «Toward Modular Soft Robotics: Proprioceptive Curvature Sensing and Sliding-Mode Control of Soft Bidirectional Bending Modules, » SoRo-Soft Robotics, 2017.
- [6] H. Kai Yap, J. Hong Goh y R. Chen Hua Yeow, «Design and Characterization of Soft Actuator for Hand Rehabilitation Application, » 6th European Conference of the International Federation for Medical and Biological Engineering, 2015.
- [7] R. Shankar Subramanian, «Reynolds Numbers » Department of Chemical and Biomolecular Engineering, Clarkson University.
- [8] T. Miura Kenjiro, Suzuki Sho, Gobithaasan R.U., Usuki Shin. «A New Log-Aesthetic Space Curve Based on Similarity Geometry », Shizuoka University-Malaysia Terengganu University, 2019.