



**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA CENTROAMERICANA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**

**DISEÑO DE UN EFECTOR FINAL PARA LA INDUSTRIA  
PANADERA MEDIANTE ROBOTICA SUAVE**

**PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO:**

**INGENIERO EN MECATRÓNICA**

**PRESENTADO POR:**

**WOLFGANG HANZ RODAS DÍAZ**

**ASESOR: ING. JOSÉ LUIS ORDOÑEZ ÁVILA**

**CAMPUS: SAN PEDRO SULA**

**2021**

## **Resumen Ejecutivo**

La siguiente investigación presenta una solución para la aplicación de pinzas robóticas en la industria alimentaria. La atención se centra en el hecho de que las pinzas rígidas tradicionales, debido a una fuerza excesiva aplicada, pueden dañar el producto. La variedad de geometría y fragilidad de los productos alimenticios hace que sea una tarea complicada para estas pinzas tradicionales. La robótica blanda aplicada en estas pinzas demuestra ser una solución eficaz en esta industria. La llegada de la robótica blanda ha mostrado una serie de posibilidades de implementaciones y aplicaciones en áreas donde los robots no podrían aplicarse fácilmente. Estos robots blandos, hechos de elastómeros, crean movimiento con actuación neumática. El elastómero que se utilizará en este efector final es OOMOO25, que es una opción más económica y no requiere una cámara de vacío para el curado como el Ecoflex30 de uso común. OOMOO25 tiene una menor resistencia al desgarro, lo cual es algo a tener en cuenta al usar este elastómero. Este efector final logró levantar un peso máximo de 63 gramos con un huevo. No dañó el huevo y tuvo una buena capacidad de agarre, lo que tuvo éxito con el elastómero aplicado en efectores finales de robótica blanda. Con el uso de un sensor de curvatura flexible para monitorear cuando se activa el actuador neumático suave, se presenta cómo ese sensor se puede aplicar en estos actuadores suaves.

Palabras clave: robótica, robótica blanda, industria alimentaria, actuadores neumáticos blandos, elastómero, efector final

## **Abstract**

The following investigation presents a solution for application of robotic grippers in food industry. The focus on it is about the fact that traditional rigid grippers, due to excessive force applied, can cause damage to the product. The variety in geometry and brittleness of the food products makes it a complicated task for these traditional grippers. With soft robotics applied in these grippers shows to be an effective solution in this industry. The arrival of soft robotics has shown a number of possibilities of implementations and applications in areas where robots could not be applied easily. These soft robots, made of elastomers, create motion with pneumatic actuation. Elastomer to be used in this end effector is OOMOO25, which is a cheaper option and does not require a vacuum chamber for curing as the commonly used Ecoflex30. OOMOO25 has lower tear strength, which is something to be careful and to have in mind while using this elastomer. This end effector could lift a maximum weight of 63 grams with an egg. It did not damage the egg and had good grip ability, making a success with the applied elastomer in soft robotics end effectors. With the use of a flexible curvature sensor for monitoring when the soft pneumatic actuator is activated, is presented how that sensor can be applied in these soft actuators.

*Keywords* - Robotics, soft robotics, food industry, soft pneumatic actuators, elastomer, end effector

## **Tabla de contenido**

<b>I. Introducción</b> .....	11
<b>II. Planteamiento del problema</b> .....	12
<b>2.1 Precedentes del problema</b> .....	12
<b>2.2 Definición del problema</b> .....	14
<b>2.3 Justificación</b> .....	15
<b>2.4 Preguntas de investigación</b> .....	15
<b>2.5 Objetivos</b> .....	16
<b>2.5.1 Objetivo general</b> .....	16
<b>2.5.2 Objetivos específicos</b> .....	16
<b>III. Marco Teórico</b> .....	16
<b>3.1 Robots en el sector alimenticio</b> .....	17

3.1.1 Pick and place.....	18
3.1.2 Packing and Palletizing Robots.....	19
3.1.3 Serving Robots .....	20
<b>3.2 Efectores Finales.....</b>	<b>21</b>
<b>3.3 Clasificación de pinzas .....</b>	<b>22</b>
<b>3.3.1 Clasificación basada en configuración .....</b>	<b>24</b>
<b>3.3.2 Clasificación basada en actuaciones .....</b>	<b>27</b>
<b>3.3.3 Clasificación basada en aplicación.....</b>	<b>30</b>
<b>3.3.4 Clasificación por tamaño .....</b>	<b>33</b>
<b>3.3.5 Clasificación basada en la rigidez .....</b>	<b>33</b>
<b>3.4 Robótica suave .....</b>	<b>35</b>
<b>3.4.1 Manipuladores suaves.....</b>	<b>35</b>
<b>3.4.2 Tecnologías de agarre .....</b>	<b>37</b>
<b>3.4.2 Cinemática, Estática y Dinámica .....</b>	<b>40</b>
<b>3.4.3 Materiales y fabricación .....</b>	<b>42</b>
<b>3.4.4 Aplicaciones .....</b>	<b>44</b>
<b>IV Metodología .....</b>	<b>48</b>
<b>4.1 Enfoque .....</b>	<b>48</b>
<b>4.2 Variables de investigación .....</b>	<b>50</b>
<b>4.3 Técnicas e instrumentos aplicados.....</b>	<b>51</b>
<b>4.4 Materiales.....</b>	<b>52</b>
<b>4.5 Metodología de estudio .....</b>	<b>52</b>
<b>4.6 Requerimientos.....</b>	<b>52</b>
<b>4.7 Efecto final suave.....</b>	<b>53</b>
<b>4.7.1 Nivel de sistemas.....</b>	<b>53</b>
<b>4.7.2 Niveles de subsistemas .....</b>	<b>53</b>
<b>4.7.3 Realización de partes .....</b>	<b>55</b>
<b>4.7.4 Integración de subsistemas .....</b>	<b>55</b>
<b>4.7.5 Integración de sistemas.....</b>	<b>55</b>
<b>4.7.4 Resultado del prototipo.....</b>	<b>56</b>
<b>4.8 Metodología de validación .....</b>	<b>56</b>
<b>4.9 Cronograma de actividades.....</b>	<b>56</b>
<b>V. Análisis y resultados.....</b>	<b>58</b>

<b>5.1 Análisis de sustento del marco teórico</b> .....	58
<b>5.2 Pruebas en SolidWorks</b> .....	66
<b>5.3 Pruebas de impacto</b> .....	69
<b>5.4 Simulación de actuador suave</b> .....	72
<b>5.5 Circuito neumático</b> .....	76
<b>5.5 Sistema electrónico</b> .....	80
<b>5.6 Pruebas de agarre</b> .....	85
<b>5.7 Simulaciones en ACE</b> .....	87
<b>VI. Conclusiones</b> .....	91
<b>Bibliografía</b> .....	94

## **Índice de Ilustraciones**

Ilustración 1: Pinza robótica con dedos flexibles, manipulando objetos de diferentes tamaños.....	25
Ilustración 2: Se puede observar como la pinza es capaz de manipular objetos con forma irregular. ....	25
Ilustración 3: O-ring gripper (Pinza de junta torica) .....	27
Ilustración 4: Pinzas suaves.....	34
Ilustración 5: Cuatro parámetros clave: precisión, cumplimiento estructural, grados de libertad (DOF) y ejecución de fuerza definen el diseño del manipulador. Los ejes solo muestran cambios cuantitativos. Las manos humanas se encuentran en la línea diagonal (color gris) de todo el espacio de diseño que combina materiales duros y blandos. ....	36
Ilustración 6: Variables de investigación .....	51
Ilustración 7: Comparación de histéresis de actuador suave con diferentes elastómeros y una misma morfología, donde la presión requerida para lograr su deformación máxima se muestra. ....	59
Ilustración 8: Parte superior del molde para el actuador, b) Parte inferior del molde para el actuador c) Ensamble de molde principal, D) molde de la base del actuador.....	61
Ilustración 9: Diseño de manipulador suave, b) vista interna del manipulador suave con vista a las recamaras y la medida de sus paredes. ....	62
Ilustración 10: Resultado de ensamble de moldes, B) Piezas de moldes por separado.....	63

Ilustración 11: Actuador suave con OOMOO 25. ....	63
Ilustración 12: Diseño de housing .....	64
Ilustración 13: Ensamble de actuadores suaves con el housing .....	64
Ilustración 14: Ensamble completo del efector final con el Viper 650. ....	65
Ilustración 15: Distancia entre los dedos de agarre. ....	65
Ilustración 16: Efector final.....	66
Ilustración 17: Prueba de desplazamiento .....	68
Ilustración 18: Pruebas de estrés .....	69
Ilustración 29: Pruebas de golpe lateral.....	70
Ilustración 20: Impacto en acople de manipulador suave. ....	71
Ilustración 21: Impacto frontal .....	72
Ilustración 22: Deformación y tensiones con 10kpa. ....	73
Ilustración 23: a) deformación con 30 kpa, b) deformación con 50 kpa, c) deformación con 70 kpa d), deformación con 100 kpa y e) deformación con 125 kpa .....	74
Ilustración 24: a) Vista de deformación y tensiones en el papel, b) vista del actuador sin ajuste de escala de tensión .....	75
Ilustración 25: Recamaras internas del actuador suave. ....	75
Ilustración 26: Actuador suave, doblado parcialmente. B) Actuador suave doblado casi a su punto máximo con 70kpa. ....	76
Ilustración 27: Circuito neumático .....	77
Ilustración 28: Actuadores accionados con la válvula conectada directa a la fuente. ....	78
Ilustración 29: Suministro de aire comprimido cortado .....	79
Ilustración 30: Liberación de aire comprimido en los actuadores.....	79
Ilustración 31: Circuito con regulador de voltaje, sensor flexible con attiny85.....	82
Ilustración 32: Voltaje de salida con 30 grados de tensión en el sensor. ....	83
Ilustración 33: Circuito simulado en funcionamiento, a) led apagado debido a la falta de curvatura necesaria en el sensor, b) led encendido debido al valor de curvatura medido por el sensor. ....	83
Ilustración 34: Diseño de placa .....	84
Ilustración 35: Código del microcontrolador.....	84
Ilustración 36: Primer agarre de un huevo.....	85

Ilustración 37: Segundo agarre de un huevo. ....	86
Ilustración 38: Prueba con rodaja de pan. ....	86
Ilustración 39: Pick and place de robot viper 650, de la banda a la bandeja. ....	88
Ilustración 40: Partes por minuto, tiempo muerto y tiempo procesando. ....	89
Ilustración 41: Simulación de efector final manipulando el alimento. ....	90
Ilustración 42: Posición de la bandeja y la banda y movimiento del robot. ....	91

### **Índice de Tablas**

Tabla 1: Comparación de algunos métodos de actuación para pinzas. ....	28
Tabla 2: Comparación de las tecnologías de agarre. ....	38
Tabla 3: Resumen de parámetros de investigación. ....	48
Tabla 4: Comparación de elastómeros. ....	59
Tabla 5: Valores resistivos cada 10 grados. ....	81

### **Índice de ecuaciones**

Ecuación 1: Relación del radio de la curva de la membrana y la expansión de los canales. ....	41
Ecuación 2: Tensión por unidad de longitud ..... 42	42
Ecuación 3: Fuerza de tensión de longitud unitaria..... 42	42
Ecuación 4: Voltaje de salida en divisor de voltaje..... 82	82
Ecuación 5: Tiempo de llenado ..... 88	88
Ecuación 6: Tiempo de elongación de volumen..... 89	89

## **I. Introducción**

Los robots industriales desde sus inicios han sido parte fundamental de la automatización. La automatización se ha podido implementar en diversas áreas e industrias, sin embargo a pesar de su gran avance y en todo el mundo en algunas áreas la implementación robótica ha sido más complicada que en otras. En la industria alimenticia se ha acudido a soluciones ingeniosas ya que las propiedades frágiles y la variación en la geometría de los alimentos ha dificultado un poco su manipulación por medio de robots. La robótica suave es un área nueva de investigación en donde las características blandas de algunos materiales han ayudado con tareas donde los robots convencionales con materiales rígidos tienen más problemas de implementación. Esta se aplicara en lo que será el efector final para la debida industria. Para la robótica suave existen numerosos materiales posibles entre los elastómeros, en donde se analizaran algunos y se probara una opción de elastómeros y analizara su resultado.

Existen numerosos tipos de pinzas donde la técnica de agarre cambia con el tipo y en la clasificación que pertenece. Las clasificaciones son por muchas características diferentes y aplicaciones. En esta investigación se exponen algunas de estas. También se analiza el proceso a seguir para la fabricación de actuadores neumáticos suaves que será el punto pilar de este efector final. Donde entre la importancia de muchos parámetros los cuales hay que tomar en cuenta para la fabricación de efectores finales mediante robótica suave. El orden y manera en la que se expondrá todo esto será de la siguiente forma:

Capitulo II: Se indaga dentro de la problemática que se busca implementar una solución para dicha industria y se analiza la solución y él porque es importante mejorar buscar soluciones a dicho problema. También se mencionan las diferentes dificultades que enfrentan esta industria y sus efectos en ella. Se establecen los objetivos de la investigación con las preguntas realizadas para la misma.

Capitulo III: En el marco teórico se exponen todos los conocimientos necesarios para la realización del proyecto y comprensión total de los capítulos a seguir. Aquí se profundiza

en la robótica, los efectores, pinzas, robótica suave, etc. Todos estos datos para poder realizar con éxito la investigación propuesta.

Capítulo IV: En este capítulo se presenta la metodología a utilizar para la realización de la investigación, también se presenta las variables independientes como la dependiente. Dentro de la metodología se abordan los pasos a seguir y las herramientas y materiales utilizados para esta propuesta.

Capítulo V: Mediante este segmento de la investigación se exponen los resultados adquiridos de la fabricación del efector final y de las simulaciones realizadas para la adquisición de datos importantes dentro de su fabricación.

Capítulo VI: Las ideas finales se exponen en este capítulo donde las conclusiones son en base a los objetivos planteados en los capítulos iniciales y se hace mención de los resultados adquiridos en el capítulo V, donde este marco las conclusiones expresadas y todo análisis concluyente se provee en este capítulo final.

## **II. Planteamiento del problema**

En este capítulo hablaremos sobre algunos problemas a mejorar dentro de la industria alimenticia. Específicamente los que están dentro de los procesos de producción, en donde se requiere la manipulación de los alimentos. En estos procesos existen oportunidades de mejora higiénica, también identificaremos los elementos que son afectados por falta de automatización en la industria de alimentos. Seguidamente justificaremos la necesidad de estudiar las problemáticas a mencionar. Por último se definirán las preguntas de investigación y objetivos del estudio.

### **2.1 Precedentes del problema**

Desde los orígenes de procesos de producción donde la mano humana era la única herramienta hasta lo que vemos hoy en día con los avances tecnológicos, todavía hay oportunidad de mejora y avance. Estos avances son la clave para muchos problemas

modernos. Como menciona Bader & Rahimifard (2018), la industria alimentaria mundial se enfrenta a muchos desafíos debido al impacto del cambio climático, demandas en constante cambio de los consumidores, y crecientes presiones legislativas por parte del gobierno, que han dado lugar a varios impulsores de cambios. Los sistemas de fabricación rígidos actuales se consideran cada vez más incapaces de apoyar los requisitos para la implementación de tales cambios. En este contexto, uno de los requisitos clave es la necesidad de una mayor flexibilidad y reconfigurabilidad de las instalaciones de producción, a menudo proporcionadas por la adopción de Robots Industriales en otros sectores manufactureros. Sin embargo, a pesar de sus recientes avances, en particular el advenimiento de la cuarta industria revolución (Industria 4.0), y reducción significativa en general costo de implementación durante las últimas dos décadas, la implementación de los robots industriales en el sector de alimentos ha sido lenta.

Sin embargo a pesar de ser lenta la adopción, (IQBAL et al., 2017) menciona que los robots para la industria de alimentos y bebidas, donde el número de unidades vendidas durante 2011-2013 fue de 4650, 4900 y 6200 respectivamente, han tenido una tendencia creciente en los últimos años. En la industria alimentaria, el uso anterior de robots se limitaba al envasado de alimentos y al paletizado en lácteos, bebidas, chocolates y latas de alimentos. En 1998, el lanzamiento del robot Flex Picker revolucionó la industria alimentaria, ya que es el robot de recogida y colocación más rápido del mundo. Los beneficios potenciales de incorporar robots en la automatización incluyen una mayor eficiencia operativa, reducción de los movimientos de materiales y la actividad del vehículo y una reducción de las etapas del proceso.

La implementación de robots es una implementación en la automatización. Tal como menciona Iqbal et al. (2016) “La robótica pertenece a la categoría de automatización industrial.” (p. 1). Como dato histórico Ballard et al. (2012) “El primer robot industrial fue patentado por el inventor estadounidense George Charles Devol, Jr.” (p.1).

Uno de los problemas que mejoro la implementación de la robótica en la industria alimenticia es la higiene. La importancia de la higiene para la salud humana es imprescindible, en especial cuando tratamos productos alimenticios. La limpieza de las manos es importante para garantizar la salud. Como menciono Wan, Stombaugh , & Wang

(2014), que el problema puede causar enfermedades y hay un alto índice de personal en la industria alimentaria que no cumple con las normas. Muchos brotes de enfermedades transmitidas por alimentos y atención médica asociada a infección se pueden evitar si se realizan los procedimientos adecuados de higiene de manos. El lavado de mano es la forma más sencilla, importante y rentable de prevenir las enfermedades transmitidas por los alimentos y la atención médica. Sin embargo, los estudios muestran que el cumplimiento de los procedimientos de higiene de manos por parte de los trabajadores de la salud es de aproximadamente el 40%, y apenas llega al 50% incluso después de varias capacitaciones o intervenciones. (p. 128)

Estos tienen muchos más usos en la industria alimenticia. Algunos de esos usos, como nos menciona Da-Wen (2016), “son la siembra, la pulverización de agua y la cosecha hasta el corte, procesamiento y envasado de productos alimenticios.” (p. 264)

## **2.2 Definición del problema**

En la industria alimenticia se requiere de un efector final especializado para poder lograr una óptima y segura manipulación de los alimentos mediante la robótica. Según Wolf & Schunk (2005), las pinzas robóticas industriales tienen un papel fundamental en la automatización moderna, ya que constituyen el extremo del brazo de los manipuladores robóticos y por lo tanto, están en contacto directo con la pieza a manipular. Pinzas como las herramientas de fin de brazo tienen que realizar sus tareas bajo los exigentes requisitos de la producción en masa moderna porque las operaciones de manipulación no incrementan directamente el mercado ni los valores intrínsecos de las piezas. Por lo tanto, el agarre y la manipulación deben lograrse no solo de forma segura sino lo más rápido posible para reducir los tiempos de ciclo. Un asunto importante es para la tasa de producción de las líneas de producción donde no se utilizan robots para verse afectado negativamente por las operaciones de manipulación.

Por otro lado tenemos el problema con la manipulación de los alimentos mediante pinzas rígidas. Estas pueden dañarlos por el exceso de fuerza aplicada en ellos. Como Wang & Hirai, (2018) menciona: “La gran variación y las propiedades frágiles de materiales alimenticios dificultan la tarea de manipulación para pinza robótica rígida.” (p. 25). Esto crea

una gran complejidad dentro de la implementación de robótica en la industria. La forma geométrica de los alimentos no es fija, una pinza convencional no podrá ser práctica para toda forma posible de alimentos.

Se propone el uso de la robótica suave para la fácil y segura manipulación de los alimentos. Así mismo, también mejorar problemas de higiene causados por parte de los trabajadores que no cumplen las normas de limpieza. Algunos de estos usos de la robótica en procesos alimenticios son: de picking, colocación, embalaje y paletizado.

### **2.3 Justificación**

Las fábricas de procesamiento y fabricación de alimentos ahora utilizan soluciones de automatización rentables para un mayor volumen de producción en comparación con los procesos convencionales. Dado que la dependencia del trabajo manual se considera ahora un concepto clásico, se da más preferencia a la instalación de manipulación / fabricación robotizada. Los ejemplos comunes incluyen; aplicaciones de picking, colocación, embalaje y paletizado (IQBAL et al., 2017).

Debido al alto nivel de variantes de productos, el estricto requisito de seguridad alimentaria y el cambio constante de regulaciones, la adopción de la Industria 4.0 en sector de alimentos y bebidas se espera que sea tan progresivo como en la industria automóvil, aeroespacial y de semiconductores. Los estilos de vida más activo del consumidor actual, así como la creciente conciencia sobre la calidad han alterado su preferencia y comportamiento de compra de alimentos (Noor Hasnan & Md. Yusof, 2018).

### **2.4 Preguntas de investigación**

1. ¿Cómo se puede implementar la robótica suave en la industria alimenticia y qué ventajas tiene?
2. ¿Cuáles son los pasos para diseñar un efector final suave?
3. ¿Cuáles son los materiales a utilizar para la creación de un efector final suave?
4. ¿Cómo se puede mejorar la funcionalidad de un efector final mediante sensores?

## **2.5 Objetivos**

### **2.5.1 Objetivo general**

Diseñar y fabricar un efector final mediante el uso de robótica suave que pueda implementarse en la industria panadera.

### **2.5.2 Objetivos específicos**

1. Determinar la utilidad y ventajas de la robótica suave dentro de los efectores finales.
2. Implementar una metodología con las herramientas y procedimiento para construir un efector final suave.
3. Determinar los materiales a utilizar para la implementación de la robótica suave.
4. Evaluar el comportamiento de un efector final suave mediante sensores y evaluar su implementación en la robótica suave.

## **III. Marco Teórico**

En este capítulo se revisara la base teórica a tratar para poder comprender los conceptos detrás de lo que rodea específicamente a los efectores finales. Esto se lograra explicando desde el comienzo de la implementación de los robots industriales hasta el diseño de los efectores finales y también se explicara la implementación mediante robótica suave.

Desde los inicios de la implementación de los robots en la industria han ocurrido avances tecnológicos que nos han ayudado cada vez más a romper las barreras y resolver problemas creando ingeniosas medidas para automatizar procesos.

Estos avances se han ido reflejando en las diferentes revoluciones industriales que han ocurrido. La industria 4.0 y los avances tecnológicos han evolucionado y creado estas 4 revoluciones: La industria 4.0 es la más reciente y hoy en día se está implementando. El término “industria 4.0” se refiere a nada más ni nada menos que a la mención de una cuarta revolución industrial: La primera siendo la primera revolución industrial donde generalmente se considera la máquina de vapor que hizo la potencia de vapor explotable abriendo la era de la industria. La Segunda Revolución Industrial se considera generalmente como la aplicación de la electricidad para crear producción en masa, especialmente en la nueva industria automotriz; La tercera revolución industrial es generalmente vinculada al uso extensivo de la electrónica y tecnología de la información para automatizar la producción (Bassi, 2017).

Las tres revoluciones estuvieron vinculadas a invenciones basadas en descubrimientos científicos revolucionarios y sus primeras aplicaciones en un nuevo entorno industrial, incluso si inventos revolucionarios, como el sistema inalámbrico de Marconi columna vertebral de las telecomunicaciones de la comunicación actual y IOT no se consideran una revolución para la industria. Esto hace que por lo tanto, la Industria 4.0 no es una revolución técnica vinculada a un descubrimiento científico revolucionario, y probablemente no tenga fundamentos científicos (Rüttimann & Stöckli, 2016).

En retrospectiva, como menciona Berttram & Schrauf (2018) “la robotica se implemento en la 3era revolucion industrial en los 70s”. (p. 8) Desde el inicio de los robots industriales estos han ido evolucionando para poder adaptarse a cada sector posible.

Este documento estara enfocado especificamente en el sector alimenticio. Hablara de los robots que se utilizan en dicha industria. Mencionara los tipos, para asi comprender mejor el trabajo a realizar. Se completara el entendimiento de la robotica suave y su gran potencial de implemento en el sector alimenticio. Pero antes de hablar de la robotica suave se hablara de los robots en la industria de alimentos y sus aplicaciones comunes.

### **3.1 Robots en el sector alimenticio**

Según la Organización Internacional de Normalización, un robot industrial es "un

control automático, manipulador multipropósito programable en tres o más ejes, que pueden ser fijos o móviles para su uso en la automatización industrial”. Los robots industriales se componen principalmente de tres partes, la base, el brazo y la muñeca, con articulaciones conectándolos para formar una unidad. Al final de la muñeca, un efector final, esto puede ser una pinza para agarrar y mover un objeto, o una herramienta, para la manipulación física de un objeto. La variedad de los robots industriales, en términos de configuración física, tamaño y el tipo de efector final depende de los requisitos de la aplicación. Tanto las máquinas automatizadas como los robots industriales pueden funcionar independientemente de la supervisión humana. Sin embargo, los robots industriales poseen el alto nivel de tecnología que respalda características de flexibilidad y reconfigurabilidad necesarias para responder a sus entornos. Estos ofrecen la capacidad de operar una variedad de sistemas bajo muchos procesos para producir cualquier producto en las cantidades deseadas. También se pueden reconfigurar en tiempo real para tratar con nuevos procesos o materiales. Dados estos beneficios otorgados por los robots industriales, la adopción de ellos en el sector alimentario ha sido lenta debido a una serie de limitaciones y dudas específicas. Muchas empresas creen que sus adquisiciones pueden ser costosas y consumir mucho tiempo, mientras que otras piensan que sus procesos son demasiado complicados. Tales problemas se destacan más en las PYMEs lo que crea un drástico cambio en la idea de adopción de estos robots (Bader & Rahimifard, 2018).

A pesar de que existen algunas limitaciones dentro de las PYMEs para la adquisición de robots existen diferentes tipos de robots que se implementan en la industria alimenticia. Las diferentes funciones de estos en ellas varían desde de picking, colocación, embalaje y paletizado. Su clasificación es mediante la aplicación asignada. Entre estos están los: Pick and place, Packing and palletizing robots y los serving robots. Todos estos aplicados en la industria de alimentos (IQBAL et al., 2017).

### 3.1.1 Pick and place

Estos robots se encargan de mover el producto de un lado a otro. Automatizar este proceso mejora la producción. Estos robots realizan actividades sumamente repetitivas que

reemplazan la manipulación humana. Esta se vuelve una ventaja dentro de la industria alimenticia, ya que como se mencionó en el capítulo anterior esto mejora la productividad e higiene.

Los robots industriales se pueden clasificar en paralelos o en serie. Los robots en serie según nos menciona (Coronel-Escamilla et al., 2018): “La base de estos robots generalmente se fija en el suelo y adopta una cadena cinemática única para controlar posición terminal y postura” (p.20).

El rendimiento de un brazo robótico incluye precisión, repetibilidad y confiabilidad para realizar una tarea. Estos parámetros, a su vez, son función de la ley de control asociado. Brazos robóticos de varios grados de libertad (DOF), debido a su dinámica inherente altamente no lineal, demanda leyes de control sofisticadas. Las estrategias de control triviales no funcionan con perturbaciones e incertidumbres que son comunes en plantas de hoy (Ullah et al., 2016).

Estos son muy parecidos a brazos humanos, incorporando la cadena cinemática que comienza de la basa y termina en el efector final. Este puede ser una herramienta o una pinza. A diferencia de los manipuladores en serie, la solución directa en paralelo no se puede obtener analíticamente. Por lo tanto, se han empleado métodos computacionales y son comunes múltiples soluciones. Tanto en los sistemas robóticos en serie como en paralelo, los modelos dinámicos son necesarios para predecir las fuerzas del actuador para las tareas del efector final. La dinámica inversa es fundamental, ya que evalúa los pares / fuerzas del actuador necesarios para generar la trayectoria deseada. Los dos algoritmos más comunes para derivar dinámicas incluyen Euler-Lagrange y Newton-Euler (IQBAL et al., 2017).

### 3.1.2 Packing and Palletizing Robots

Las recientes soluciones robóticas de paletizado han permitido incrementar considerablemente el rendimiento de los procesos en términos de (productos por hora) y tiempo (ejecución productos durante períodos más largos) y contribuyó a percibir los beneficios del comercio electrónico. Sin embargo, en entornos de alta mezcla, como almacenes, no todos los procesos son automatizados y la presencia humana sigue siendo un

requisito. Los manipuladores pesados no pueden poblar estos entornos, ya que no son seguros para los humanos y, para evitar posibles lesiones humanas, deben estar encerrados en vallas adecuadas y estar equipado con sistemas de control de seguridad fiables. Además, en los centros de distribución, se debe colocar una gran variedad de artículos en cajas y luego paletizar, que exigen un cierto nivel de flexibilidad de manipulación. En tales situaciones, los brazos robóticos ligeros redundantes, mientras lidian con diferentes tamaños de caja y peso, pueden garantizar seguridad humana debido a la capacidad de regular las fuerzas de interacción tanto con los seres humanos como con el medio ambiente (Lamon et al., 2020).

En la industria de alimentos y bebidas, por ejemplo, paletizar tipos de paquetes similares, utilizando pesados brazos robóticos que pueden levantar hasta mil kilos, tiene que convertirse en un referente de calidad y alto rendimiento. La construcción automatizada de paletas de pedidos de clientes en un centro de distribución minorista, de alimentos o bebidas sigue siendo un desafío y tarea compleja. Durante los últimos 15 años, muchas empresas han intentado desarrollar diferentes soluciones para abordar este trabajo intensivo en mano de obra. Sin embargo, Dematic ha desarrollado inicialmente una solución robótica, pero Recientemente ha cambiado a un enfoque similar al de Witron. La solución general se llama AMCAP, que significa paletización mixta automatizada y paletización de cajas mixtas (Por sus siglas en inglés). Tan pronto como el sistema ha recibido un pedido de paletizado, el software de Dematic de mezclado de paletización de cajas está calculando una paleta estable y patrón de apilamiento. Una envolvente integrada asegura la carga directamente después de que se termina el palet para garantizar un ahorro transporte. Durante el cambio de palet, el sistema puede continuar paletizando sobre placa deslizante (Christian Wurl, 2016).

### 3.1.3 Serving Robots

La industria de servicio de alimentos es el enfoque más nuevo del uso de robots en la industria alimentaria. Esta es el área más innovadora que no se ha aprovechado completamente hasta ahora. Como esto trata directamente con el comercio minorista y los consumidores, por lo tanto, se considera un cambio emocionante en el estilo de vida que implica una actividad recreativa y, por lo tanto, es necesario abordar los conceptos de

integración del sistema humano. Sushi en Japón ha comenzado la idea de líneas de alimentos automatizadas. (IQBAL et al., 2017).

A pesar de que este tipo de aplicación de robots en la industria no tiene dirigido el enfoque de estudio de los efectores finales con robótica suave, este cabe dentro de algunas aplicaciones de los robots en el sector alimenticio. Dicho esto, mencionamos algunas de sus funciones en este sector. Los robots cumplen con diferentes aplicaciones dentro de esta industria y cada robot tiene que tener una herramienta o pinza para completar eficazmente su propósito. Estos robots no incluyen estas herramientas o pinzas al ser comprados. Los ingenieros se encargan de diseñar los efectores finales que son como ya mencionamos herramientas o pinzas.

### **3.2 Efectores Finales**

Los efectores finales pueden ser dos cosas: una pinza o una herramienta. Esta investigación estará dirigida exclusivamente a las pinzas. Estas pueden clasificarse en diferentes formas. Existen diferentes tipos de ellas. Estas también tienen muchas aplicaciones que se acoplan a sus diseños de manera casi perfecta. Las aplicaciones que se buscan en esta investigación son dirigidas al sector alimenticio y más específicamente para la manipulación de productos alimenticios sin dañarlos, ya que estos pueden ser muy delicados si se manipulan por medio de un efector final rígido. Dicho esto, los efectores finales se explicaran en este segmento.

Los manipuladores se utilizan para diversas aplicaciones para facilitar las tareas o reducir el riesgo de que se consideren imposibles, peligroso o difícil para los humanos. Un manipulador robótico puede ser equipado con diferentes tipos de efectores finales para realizar diversas Tareas. Las pinzas son uno de los efectores finales de robots más utilizados como herramientas de brazo. Dependiendo de la aplicación en mano para el sistema robótico, se necesitan varios tipos de pinzas. Por lo tanto, seleccionar el adecuado es un aspecto significativamente importante en el proceso de diseño. Generalmente, los manipuladores tienen diferentes tipos de aplicaciones. Uno de los procedimientos comunes realizados por manipuladores es agarrar. Para realizar una tarea de agarre, cada manipulador necesita una pinza que se monta en el efector final del manipulador. Velocidad de manipulación, forma

del objeto, el peso y otras características son factores importantes en elegir el tipo de pinza. Sin embargo, algunas pinzas inteligentes son diseñadas para propósitos generales y diferentes formas de objetos (Samadikhoshkho et al., 2019).

La mayoría de las pinzas robóticas aplicadas en la industria tienen un grado de libertad (DOF) por sus siglas en inglés. A pesar de esto, las pinzas de un grado de libertad son adecuadas para un propósito especial, su rango de aplicaciones está limitado debido a la falta de grados de libertad. Recientemente, un buen número de pinzas de múltiples dedos han sido comercializadas para agarrar establemente varios objetos con diferentes tamaños y formas. Estas pinzas de múltiples dedos proveen más flexibilidad y adaptabilidad que las simples de un grado de libertad. Manos de robot con múltiples dedos, totalmente accionados pueden proporcionar una mayor destreza que los sub-activados, por lo que a menudo se adoptan para robots que requieren capacidad de tarea máxima, por ejemplo, robots humanoides. Sin embargo, debido al aumento en el número de actuadores, la complejidad mecánica y el aumento del costo ha obstaculizado la aplicación de las pinzas totalmente accionadas a la industria (Choi et al., 2017).

A pesar de todo lo mencionado, Choi nos propone una pinza versátil para agarrar objetos con diferentes geometrías. El punto de todo esto es que los ingenieros tienen la tarea de ingeniarlas para fabricar un efector final capaz de cumplir las tareas asignadas, incluso cuando no hay una opción comercializada para su aplicación.

### **3.3 Clasificación de pinzas**

Se han hecho diferentes comparaciones de los diferentes tipos de efectores finales. Algunas son mediante ciertas características de ellos y otras hacen las comparaciones mediante otros enfoques de construcción u otras propiedades de las pinzas.

Existen muchos tipos de clasificaciones para las pinzas robóticas. Cada uno puede usarse para diferentes propósitos. Para diseñar una pinza, hay algunos factores y requisitos que deben ser considerados. La cantidad de fuerza y torque que deben producir es uno de los principales factores. Además, es importante tener conocimiento suficiente sobre el objeto a

manipular, incluido su forma, geometría, material, rigidez y peso, que son algunas características que parecen importantes al diseñar y elegir un tipo de pinza. Considerando los criterios de manipulación y sus limitaciones como la velocidad de manipulación es otro importante factor a considerar al elegir un diseño adecuado para una pinza (Samadikhoshkho et al., 2019).

Se proporcionó una revisión sobre pinzas industriales y comparación entre varios tipos de ellas. En esta comparación el trazo, fuerza, peso, potencia y longitud de los dedos de las pinzas industriales son algunas características que se consideran para comparar robots industriales. El trazo es la distancia entre los dedos que se cubre antes de que estos se cierren. Esto nos explica que entre más grande es el trazo más grande será el objeto que puede agarrar la pinza. La Fuerza se refiere a la cantidad de fuerza que la pinza aplica para agarrar el objeto. En esta área hay que tener cuidado con la pinza seleccionada ya que si el objeto a agarrar es muy débil la pinza puede dañarlo con la fuerza aplicada. Algunos efectores finales tienen fuerza programable mediante servomotores. El peso de las pinzas es otra propiedad de gran importancia para aplicaciones robóticas ya que impacta directamente en la masa total que puede ser manipulada. La potencia de cada pinza se estableció calculando el consumo de aire por ciclo multiplicado por la presión nominal y dividida por el tiempo del ciclo. Se definió un ciclo como cerrar completamente la pinza desde una posición completamente abierta y luego volver a la posición completamente abierta configurada. La longitud del dedo se define como la distancia desde la palma de la pinza hasta la ubicación más lejana donde se puede transmitir una fuerza de agarre a la pieza de trabajo en una dirección perpendicular al movimiento de cierre / apertura. (Birglen & Schlicht, 2018).

En la industria automotriz, se menciona una comparación de pinzas. La comparación se realizó viendo las propiedades de los materiales con las que están fabricadas estas pinzas. Entre las menciones de los diferentes materiales nos mencionan que, los compuestos reforzados con fibra tienen el potencial de reducir la masa de manipulación de pinzas sin disminuir características importantes como fuerza o rigidez. Además, los costes adicionales derivados de la utilización de materiales compuestos pueden compensarse con los beneficios de la reducción de masa. Así mismo se busca el material más óptimo para la manipulación de partes de automóviles (Minsch et al., 2016).

También existen las pinzas de materiales blandos y las recientemente desarrolladas micro pinzas. Todas estas comparaciones se han hecho meticulosamente. Las pinzas se clasifican en estas categorías: CLASIFICACIÓN BASADA EN CONFIGURACIÓN, CLASIFICACIONES BASADAS EN ACTUACIONES, CLASIFICACIÓN BASADA EN LA APLICACIÓN, CLASIFICACIÓN POR TAMAÑO y CLASIFICACIONES BASADAS EN LA RIGIDEZ (Samadikhoshkho et al., 2019).

### **3.3.1 Clasificación basada en configuración**

Esta clasificación está basada en el número de dedos que tienen las pinzas y en su configuración. Existen varios tipos dentro de esta clasificación.

#### *3.3.1.1 Pinzas robóticas con 2 dedos*

Se trata de las pinzas robóticas más sencillas, adecuadas para muchos productos industriales y fáciles de fabricar. Dentro de este grupo se pueden encontrar distintas alternativas: con control de apertura, control de presión, con control de distancia en la apertura y cierre, recogiendo piezas introduciendo los dos dedos dentro de un agujero. También pueden tener accionamiento neumático o eléctrico (Ruiz, 2018).

También menciona Samadikhoshkho et al. (2019) “Estos tipos de robots tienen la capacidad de realizar varias tareas como ensamblar, recoger y colocar, y simplificar manipulaciones. Estas pueden tener dedos o garras.”(p.1).

#### *3.3.1.2 Pinzas robóticas con 3 dedos*

Este tipo de pinzas no es muy utilizado debido a que la mayoría de los trabajos se puede realizar con las pinzas de 2 garras o dedos. Esta pinza es esencial donde hay varios objetos diferentes por manipular y una pinza adaptable se necesita. Un ejemplo del uso de estas pinzas es el manejo de tubos largos ya que puede mejorar la alineación y la eficiencia

en los giros rápidos. El costo de esta, debido a su mayor complejidad, se duplica al de la pinza de dos dedos (Ruiz, 2018).

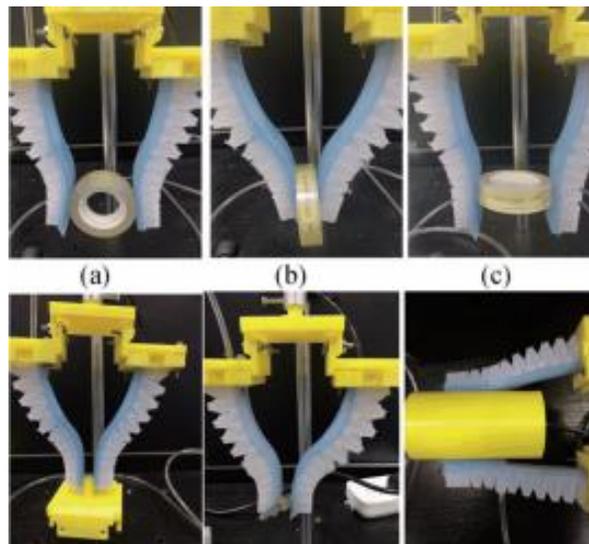
### 3.3.1.3 Pinzas adaptables y con varios dedos

Como desarrollo relativamente nuevo, este diseño permite a los robots agarrar una amplia variedad de productos que antes sería imposible de manipular de forma fiable. Estas pinzas pueden proporcionar fuerza de retroalimentación al controlador y también pueden agarrar objetos con forma irregular, blandos o esféricos (Samadikhoshkho et al., 2019).

### 3.3.1.4 Pinzas robóticas con dedos flexibles

Las pinzas de robot con dedos flexibles son más nuevas y más adecuadas para recoger diferentes objetos. Aunque son más limitados en general en cuanto al volumen y peso del objeto a recoger, son perfectas para cosas delicadas, como la comida (Ruiz, 2018).

Como se puede observar en la figura 1. Una pinza de dedos flexibles.



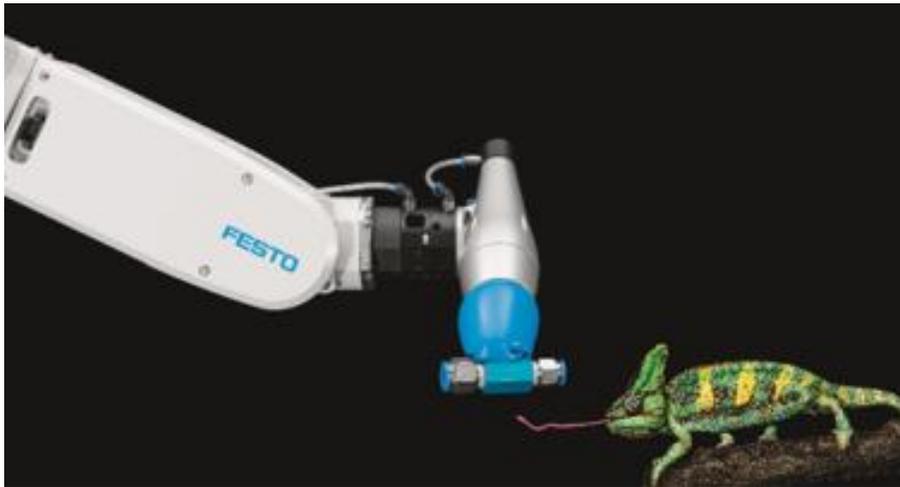
*Ilustración 1: Pinza robótica con dedos flexibles, manipulando objetos de diferentes tamaños.*

Fuente: (Liu et al., 2019)

### *3.3.1.5 Grain-Filled Flexible Ball Grippers (Pinzas de bolas flexibles rellenas de grano)*

La bola con grano se coloca sobre el objeto que se va a recoger esta tiene una forma moldeable antes de que el aire se aspire. Luego de que el aire del globo se succione esta adquiere una forma rígida y al ser rígida esta puede sostener el objeto sin dañarlo. Figura 3. La característica principal es su habilidad de cambiar entre una superficie aguada y moldeable a una rígida. Causó un gran impacto después de su lanzamiento debido a su simplicidad, concepto y versatilidad (Ruiz, 2018).

Según nos menciona Samadikhoshkho et al. (2019) “La inspiración de “FlexShape Gripper”, diseñada por Festo Company, proviene de la forma en que un camaleón caza un insecto” (p. 2)



*Ilustración 2: Se puede observar como la pinza es capaz de manipular objetos con forma irregular.*

Fuente: (Samadikhoshkho et al., 2019)

### *3.3.1.6 Bellows Grippers (Pinzas de fuelle)*

La pinza de fuelle (Bellows Gripper) se utiliza para sujetar una superficie cilíndrica. Este tipo de pinza se llena con aire comprimido que da como resultado en expansión de la pinza y agarrando el objeto. Para soltar el objeto, el aire en la pinza debe ser liberado (*8 Types of End of Arm Tooling Devices - Grippers / Keller Technology, 2018*).

### 3.3.1.7 O-ring Grippers (Pinza de junta tórica)

Según Samadikhoshkho et al., (2019): “El tipo de junta tórica es un dispositivo especial diseñado para manejar sellos de juntas tóricas. La pinza de la junta tórica tiene seis u ocho dedos que expanda y agarre el diámetro interior de la junta tórica.” (p. 2)

En la figura 4 se puede observar un ejemplo de este tipo de pinza.



*Ilustración 3: O-ring gripper (Pinza de junta torica)*

Fuente: (*8 Types of End of Arm Tooling Devices - Grippers / Keller Technology, 2018*)

### 3.3.2 Clasificación basada en actuaciones

Esta clasificación se realiza desde el punto de vista de los actuadores que controlan los movimientos de las pinzas. Es decir, la fuente de movimiento de estos efectores finales.

Estas pueden ser por cable, neumática, vacío, hidráulica y servomotores. Algunas de las ventajas y desventajas entre ellas se pueden observar en la tabla 1.

*Tabla 1: Comparación de algunos métodos de actuación para pinzas.*

Fuente: (Samadikhoshkho et al., 2019)

Tipo de pinza	Ventajas	Desventajas
<b>Accionada por cable</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Peso y espacio optimo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Complejidad de control</li> </ul>
<b>Vacío</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Altamente flexibles</li> <li>• Limpias</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Algunos problemas operacionales</li> </ul>
<b>Neumática</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pequeñas dimensiones</li> <li>• Bajo peso</li> <li>• Limpias</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No tan precisas</li> <li>• Alto costo de operación</li> </ul>
<b>Hidráulica</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fuerza</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No son lo suficientemente limpias</li> <li>• Alto costo de mantenimiento</li> </ul>
<b>Servo eléctricas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Altamente flexibles</li> <li>• Bajo costo de mantenimiento</li> <li>• Fácil de controlar</li> <li>• Limpias</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bajo nivel de fuerza</li> </ul>

### *3.3.2.1 Pinzas accionadas por cable*

Según nos menciona Xiang et al., (2019) en su diseños de una pinza mediante accionado de cable:

“El modo accionado por cable puede proporcionar un gran control de momento, así como una buena flexibilidad de movimiento. El efecto de acoplamiento de las dos secciones de actuación puede hacer un complejo patrón de movimiento.” (p. 4)

### *3.3.2.2 Pinzas de vacío*

Este tipo de pinza robótica utiliza una ventosa de goma o poliuretano para recoger los artículos. Algunas pinzas de vacío utilizan una capa de goma espuma de celda cerrada, en lugar de ventosas, para completar la aplicación. Así de esta manera poder sostener firmemente el objeto. La ventaja de las pinzas de vacío es que tienen un alto nivel de flexibilidad, mientras que proporcionando un buen agarre de un objeto. Como el aire es limpio y puede ser transmitido a través de tubos y mangueras, este tipo de pinza es preferido en aplicaciones en las que la contaminación puede ser un problema (Samadikhoshkho et al., 2019).

### *3.3.2.3 Pinzas neumáticas*

Este actuador usa la presión del aire mediante válvulas para crear movimiento. En algunos escenarios como el implemento de robótica suave esto se aplica. En este tipo de robótica se usa el poder de la neumática para poder crear el movimiento.

Como explicaba Salem et al., (2018) en su diseño de una pinza a base de materiales suaves, “El actuador de flexión neumático suave se compone de una serie de cámaras de aire incrustadas dentro del cuerpo del actuador. Estos canales de aire se inflan al aplicar presión, creando movimiento.” (p. 2).

Estos actuadores son muy parecidos a los de vacío en términos de contaminación y entre otros beneficios están sus pequeñas dimensiones y peso aún menor. Son muy utilizadas en la robótica suave. Suelen rápidas pero no muy precisas y tienen un alto costo de operación (Samadikhoshkho et al., 2019).

### *3.3.2.4 Pinzas Hidráulicas*

Estas pinzas utilizan la fuerza líquida para crear el movimiento deseado. Estas suelen usarse en aplicaciones donde se requiere de fuerza. El líquido produce más fuerza que el aire debido a que este no se comprime.

Se han utilizado en prótesis y han demostrado tener algunas ventajas sobre las accionadas por servo motores. La fuerza que da el usuario a la interfaz se amplifica según el principio de Pascal. Con este enfoque, la pinza desarrollada intenta resolver los problemas de peso pesado, inadecuación para trabajar cerca de la mano y ruido de conducción en las manos protésicas eléctricas. El actuador hidráulico se ha utilizado en varios campos, incluyendo manos de robot, ortesis y prótesis de piernas (Yamanaka & Yoshikawa, 2020).

### *3.3.2.5 Pinzas servo eléctricas*

La pinza servo eléctrica tiene un alto nivel de flexibilidad. Por tanto, no se limita a tratar con un objeto especial. La parte más importante de la pinza servo eléctrica es un motor electrónico, utilizado para controlar dedos o mandíbulas. Fácilmente controlable, bajo costo de mantenimiento y la alta flexibilidad son las principales ventajas para este tipo de pinzas (Samadikhoshkho et al., 2019).

## **3.3.3 Clasificación basada en aplicación**

Las pinzas tienen un alto rango de aplicaciones. Por ende su clasificación basada en aplicación. Algunos de esos ejemplos se mencionan en este segmento.

### *3.3.3.1 aplicación quirúrgica*

Las pinzas también se utilizan bastante en el sector médico. El agarre quirúrgico es un aspecto crucial en muchos procedimientos quirúrgicos. En los que herramientas convencionales de agarre de tejidos, como pinzas de metal y pinzas laparoscópicas se emplean para facilitar los procedimientos de la observación, biopsia, escisión y anastomosis. Se puede emplear bastante la robótica suave dentro de esta clasificación de pinzas. Esto es para situaciones quirúrgicas delicadas. Los actuadores blandos basados en elastómeros son

muy prometedores como manipuladores de objetos delicados debido al hecho de que sus cuerpos que están hechos de materiales completamente blandos pueden absorber gran parte de la energía causada por una colisión en comparación con los robots de cuerpo rígido. Para accionar estos robots blandos, se han propuesto varias técnicas de actuación como sistema basado en cable, aleación con memoria de forma (SMA), fluido magnetorreológico, polímeros electro activos (EAP) y neumáticos accionamiento (Guo et al., 2017).

### *3.3.3.2 Aplicación de asistencia*

Según Samadikhoshkho et al. (2019) “Algunos ejemplos de pinzas auxiliares son las diseñadas para personas con discapacidad, las utilizadas en los exoesqueletos e incluso otro ejemplo de estas podría ser las montadas en vehículos aéreos no tripulados (UAVs) para búsqueda y rescate.” (p. 3).

Para el caso del ejemplo que se implementó en los UAVs se hizo el diseño de una pinza compacta, destinada a manipular vehículos aéreos no tripulados en misiones de búsqueda y rescate. La pinza se cierra en una interfaz personalizada, que está montada en el vehículo aéreo, y logra un cierre de forma segura mediante una combinación de un mecanismo de enganche pasivo y un mecanismo de permanencia de conducción. El procedimiento de agarre se ve facilitado por la forma de la pinza, que lo guía a la interfaz, lo que facilita la operación de recoger que es resistente a pequeñas desalineaciones entre pinzas e interfaz. Esto sirve para permitir que los UAV tengan un alto grado de autonomía y para operar más allá de su limitada duración de la batería, un rover terrestre, que sirve como estación de base móvil para la misión completa, está equipada con un brazo robótico capaz de agarrar los UAV y colocarlos en el rover, donde se intercambian sus baterías (Barrett et al., 2016).

### *3.3.3.3 Aplicación industrial*

El nivel de recursos físicos de la fábrica inteligente, los cuales representan un sistema de unidades inteligentes combinadas para realizar múltiples tareas. Una unidad de manufactura reconfigurable consiste en un grupo de diferentes dispositivos inteligentes como las plataformas móviles con manipuladores robóticos equipados con un dispositivo de agarre

universal. Ya que el nivel de recursos físicos es una base de la fábrica inteligente, deberá recibir especial atención el desarrollo de una pinza versátil, la cual ayudara a asegurar la rápida reconfiguración y adaptación, y a reducir la intervención manual en una estación de trabajo. La habilidad de la pinza a realizar diferentes tipos de agarres, permite implementar una altamente automatizada fábrica inteligente (Borisov et al., 2018).

La cantidad de utilidad de una pinza dentro de esta categoría de aplicación es inmensa. Una pinza universal es la más deseada. Capaz de poder manipular cualquier objeto, buscando simular la mano humana en cuestión de versatilidad. Esta investigación se centra en esta categoría de aplicación, buscando la solución más viable para la manipulación de alimentos más específicamente. Dentro de esta categoría, como se había mencionado antes en el documento, existen diferentes funciones y aplicaciones de las pinzas dentro de la aplicación industrial, estas son: pick and place, empaque y paletizado e incluso para servir alimentos.

#### *3.3.3.4 Aplicación subacuática*

Para esta aplicación se utilizan pinzas que van en vehículos no tripulados subacuáticos. La pinza puede realizar la función básica de agarrar, sostener y agarrar objetos de forma irregular. Los manipuladores subacuáticos deben poder trabajar de manera adecuada en ciertos niveles de profundidad sin presentar problemas. Estas pinzas usualmente solo tienen 2 grados de libertad pero se presentó un diseño de 3 grados de libertad eventualmente (Aras et al., 2017).

La aplicación subacuática tiene mucha oportunidad de implementación de pinzas suaves y de agarre delicado. La tecnología rígida de efectores finales submarinos tiene límites en términos de delicadeza y versatilidad. Debido a esto, la ejecución de varias operaciones subacuáticas, como arqueológicas recuperación y muestreo biológico, a menudo todavía requiere la intervención directa de operadores humanos, exponiendo a los riesgos de trabajar en un entorno difícil. También en el muestreo biológico subacuático, la mayoría de los especímenes consisten de organismos frágiles de cuerpo blando, como anémonas, esponjas y corales. Por eso, los científicos deben abordarlos con el mayor posible cuidado. Esta capacidad de agarre y la mecánica de robótica suave presenta que el diseño de SoftHand

parece adaptarse bien a las operaciones subacuáticas finas, considerando en particular lo siguiente: El diseño accionado por tendones ya ha demostrado su fiabilidad en uso subacuático. Las articulaciones SoftHand son capaces de soportar incluso las desarticulaciones que la presión hidrostática puede crear sin perder su adaptabilidad. No hay espacios cerrados en el mecanismo de agarre, por lo que no existe diferencia de presión que pueda causar deformaciones y roturas. Esto hace muy rentable el uso de pinzas dentro de esta aplicación (Mura et al., 2018).

### **3.3.4 Clasificación por tamaño**

Las pinzas robóticas conectadas al efector final del manipulador robótico están diseñadas y fabricadas en diferentes tamaños, desde tamaño miniatura y micro, hasta pinzas enormes. Su tamaño es determinado en base a la escala de manipulación y precisión necesaria. Por ejemplo, para una cirugía, pick and place u otras tareas delicadas, la precisión de cientos de micrómetros es necesaria. A estas escalas, las fuerzas superficiales se vuelven dominantes en comparación con otras fuerzas. Por tanto, desde este punto de vista, el diseño de las micro pinzas se convierten en un desafío. Por otra parte, las pinzas de robot grandes se utilizan comúnmente para fines industriales y adecuados para objetos voluminosos (Samadikhoshkho et al., 2019).

### **3.3.5 Clasificación basada en la rigidez**

En esta clasificación existen únicamente dos grupos. Basado en la rigidez, tenemos las pinzas rígidas y las suaves. Siendo las rígidas las fabricadas con materiales como el metal y poco flexibles. Las suaves son un implemento nuevo que más adelante tocaremos a fondo.

#### *3.3.5.1 Pinzas rígidas*

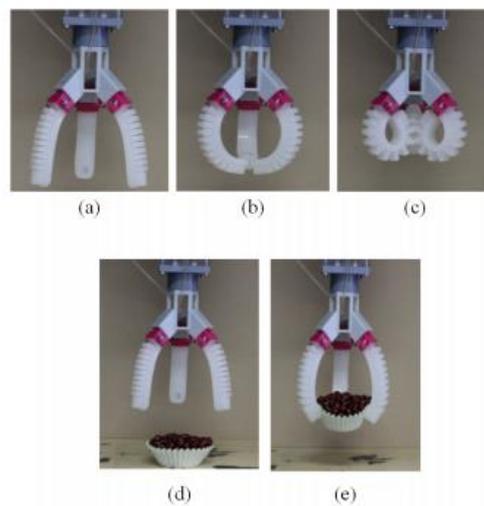
Las pinzas robóticas tradicionales consisten principalmente en un conjunto de articulaciones y enlaces. Dado que estas pinzas se utilizaron en aplicaciones industriales,

cumplen con el entorno industrial para proporcionan alta precisión y gran fuerza con menos necesidad de ser flexible. Estas son las más comunes y más antiguas, y son las que están hechas de materiales duros y totalmente rígidos como el metal o el plástico sólido (Samadikhoshkho et al., 2019).

### 3.3.5.2 *Pinzas suaves*

Ha habido un impulso de las actividades de investigación en robótica utilizando materiales blandos en los últimos diez años. Se espera que el uso y control de los materiales blandos pueden ayudar a realizar sistemas robóticos más seguros, más económicos y más adaptable que el nivel del material rígido convencional de los robots puede lograr (L. Wang et al., 2017).

Este tipo de pinza es una completa implementación de la robótica suave la cual ha demostrado tener una gran cantidad de aplicaciones que antes no se consideraban posibles con los materiales de robótica convencional. Estas están hechas usualmente de un elastómero y son accionadas por neumática. Su predicción de movimiento es un poco difícil debido a que tienen un gran número de grados de libertad. En el siguiente segmento se hablara de este tipo de robótica a profundidad.



*Ilustración 4: Pinzas suaves*

Fuente: (Zhu et al., 2017)

### **3.4 Robótica suave**

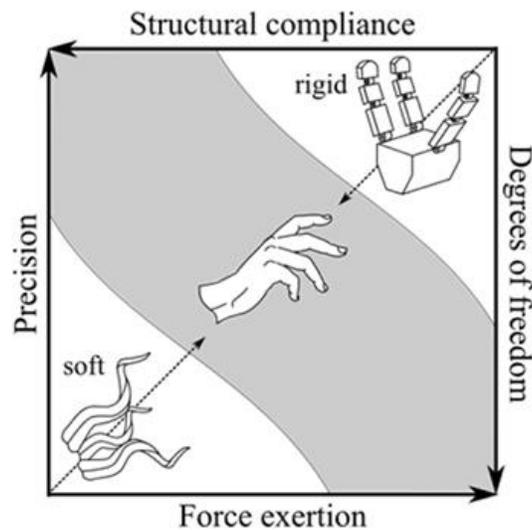
La robótica blanda es un área de investigación en crecimiento que utiliza el cumplimiento y la adaptabilidad de las estructuras blandas para desarrollar una robótica altamente adaptativa para interacciones blandas. Un área en la que la robótica blanda tiene la capacidad de tener un impacto significativo es en el desarrollo de manipuladores y pinzas blandas. Con un mayor requisito de automatización, los sistemas robóticos deben realizar tareas en entornos no estructurados y no bien definidos; condiciones en las que la robótica rígida convencional no es la más adecuada. Esto requiere un cambio de paradigma en los métodos y materiales utilizados para desarrollar robots de modo que puedan adaptarse y trabajar de forma segura en entornos humanos. Una solución a esto es la robótica suave, que permite interacciones suaves con el entorno mientras mantiene la capacidad de aplicar una fuerza significativa. Este artículo de revisión evalúa los materiales y métodos actuales, los métodos de actuación y los sensores que se utilizan en el desarrollo de manipuladores suaves. Se evalúan los logros y las deficiencias de la tecnología reciente en estas áreas clave, y este documento concluye con una discusión sobre los impactos potenciales de los manipuladores suaves en la industria y la sociedad (Hughes et al., 2016).

#### **3.4.1 Manipuladores suaves**

Los materiales avanzados y los componentes blandos se estudian cada vez más para el diseño de pinzas más ligeras, más simples y posiblemente más universales. La importancia del cumplimiento en el agarre se ha reconocido desde hace mucho tiempo. A menos que se controle con mucho cuidado, hacer contacto entre una pinza dura y un objeto duro provoca golpes que podrían dañar el objeto o empujarlo fuera del camino deseado. Una solución simple pero solo parcial, ampliamente empleada en efectores finales robóticos, es agregar materiales compatibles a los elementos de agarre (por ejemplo, en forma simple de almohadillas de goma) (L. Wang et al., 2017).

Existe mucha variabilidad en el diseño de un manipulador suave, ya que existe un espectro continuo entre manipuladores suaves y rígidos. Encontrar el punto óptimo a lo largo

de esta escala para lograr la funcionalidad deseada, los materiales asociados y los métodos de actuación es clave para el éxito del desarrollo de manipuladores. La figura 5 es la descripción general del espacio de diseño del manipulador de acuerdo con la elección de los materiales utilizados en el diseño. Los cuatro ejes que muestran precisión, cumplimiento estructural, grados de libertad y esfuerzo de fuerza no representan resultados cuantitativos, pero muestran compensaciones de diseño y, por lo tanto, sugieren una elección de diseño para tareas o entornos específicos.



*Ilustración 5: Cuatro parámetros clave: precisión, cumplimiento estructural, grados de libertad (DOF) y ejecución de fuerza definen el diseño del manipulador. Los ejes solo muestran cambios cuantitativos. Las manos humanas se encuentran en la línea diagonal (color gris) de todo el espacio de diseño que combina materiales duros y blandos.*

Fuente: (Hughes et al., 2016)

Como se puede observar en la imagen, existen dos posibles pares de estas cuantitativas medidas: La primera es la precisión y los grados de libertad (como muestra la figura en la esquina izquierda y derecha respectivamente). Entre más grados de libertad tenga el manipulador más difícil es controlar los movimiento y así la precisión se ve afectada. La segunda pareja es el cumplimiento estructural y la fuerza ejercida. Entre mayor la fuerza capaz de realizar por el sistema menor será el cumplimiento estructural y por lo tanto el menor cumplimiento y adaptación esta mostrara.

El manipulador neumático suave se compone de una serie de cámaras de aire incrustadas dentro del cuerpo del actuador. Los canales de aire se inflan al aplicar presión, creando movimiento. Cuando se infla el actuador, las cámaras de aire se expanden, esto causaría que el actuador se expandiera en la dirección axial, pero dado que la capa inferior no se expande, el actuador se dobla en lugar y así se componen sus diferentes dedos que con este movimiento axial logran simular dedos humanos cerrándose (Salem et al., 2018).

Los manipuladores de cuerpo continuo hechos con materiales blandos explotan grandes capacidades de deformación; por lo tanto, heredan características como un DOF y un cumplimiento estructural más alto. Aunque el control preciso requerido para las aplicaciones del mundo real puede ser un desafío, el cumplimiento ofrecido por los manipuladores suaves supera la necesidad de alta precisión y potencia computacional (Hughes et al., 2016).

### **3.4.2 Tecnologías de agarre**

Se ha categorizado el agarre suave en tres tecnologías: 1) por actuación, 2) por rigidez controlada y 3) por adherencia controlada. Estas tres categorías no son exclusivas y muchos dispositivos hacen uso de combinaciones de dos clases de tecnología para alcanzar un mayor rendimiento. La tecnología y los materiales preferidos para una tarea determinada dependerán de las propiedades del objeto que se manipula, el entorno operativo (por ejemplo, húmedo, seco, limpio), la fuerza requerida, la velocidad requerida, el consumo de energía y el peso permitidos, la biocompatibilidad y el sistema. Limitaciones que incluyen la integración o el uso de sensores externos y métodos de control. Dado que las pinzas blandas proporcionan una excelente adaptación de la forma a una amplia gama de objetos, el control se maneja de manera diferente que para las pinzas más convencionales basadas en tecnologías rígidas (Shintake et al., 2018).

En la tabla 2, se observan la comparación de las tecnologías de agarre para las pinzas de materiales suaves. Así como algunos parámetros que ofrece cada tecnología.

Tabla 2: Comparación de las tecnologías de agarre.

Fuente: (Shintake et al., 2018)

Categoría	Tecnología	Relación de elevación masa del objeto/masa de la pinza	Longitud del dedo / manipulación diámetro de la bolsa (cm)	Tamaño del objeto (cm)	Velocidad de agarre (s)	Consumo (W)	Condición de superficie Cualquiera(C) Seco (S) Limpio (L)
-----------	------------	--	--	------------------------	-------------------------	-------------	---

Actuación	Estructura pasiva con motores externos	4.5 – 16.3	1.2 – 15.8	0.01 a $\approx 60$	No disponible	$10^1$	(c)
	Actuadores de elastómeros de fluido	2 - 68	0.5 – 120	0.1 a $\approx 100$	0.1 – 6	$10^1$	(C)
	Polímeros electroactivos: actuadores de elastómero dieléctrico	8.7	2 – 10.3	$\approx 1$ a $\approx 8$	0.1 – 1	$10^{-1}$	(C)

	Polímeros electroactivos: Compuestos iónicos de polímero-metal (IPMC)	2 - 3.5	0.5 - 8	0.1 a $\approx 4$	1 - 10	$10^{-1}$	(C)
	Material es de memoria de forma	15 - 25.8	0.9 - 11.5	0.2 a $\approx 20$	0.67 - 11	$10^0$	
<b>Control de rigidez</b>	Atasco granular	7.6 - 15.1	4.3 - 35.5	0.43 a $\approx 30$	0.1 - 1.1	$10^1$	(C)
	Aleaciones de bajo punto de fusión	2.2 - 5.5	3.5 - 9	$\approx 5 - 12$	30 - 40	$10^0$	(C)
	Fluidos electroreológicos (ER) y magnetoreológicos (MR)	No disponible	$\approx 5$	$\approx 5$	0.001 - 0.46	$10^{-1}$ (ER) 100(MR)	(C)
	Material es con	30 - 925	$\approx 0.5 - 15.6$	$\approx 0.5 - 8$	5 - 60	$10^0$	(C)

	memoria de forma: polímeros con memoria de forma						
<b>Adhesión controlada</b>	Electro adhesión	54.7	3 – 4-8	3 a $\approx$ 100	0.1	$10^{-1}$	(S), (L)
	Adhesión Gecko	39 – 286.7	1.8 – 8	0.16 a $\approx$ 60	0.09	No disponible	(S), (L)

### 3.4.2 Cinemática, Estática y Dinámica

Los robots de materiales suaves se pueden modelar como robots híper redundantes o robots continuos. La cinemática de los robots continuos se modela de dos maneras: Curvatura constante por partes (CCP) y curvatura (noCCP). Los modelos de robots continuos estáticos y dinámicos son más raros. CCP es simple, pero solo es válido cuando no se consideran cargas externas incluyendo el peso del robot. Estas pueden crear unas significantes desviaciones de la constante de curvatura llevándolo a un error de posición. CCP también falla al modelar brazos de robot accionados por cable debido al tendón acoplado. La condición NoCCP es más precisa y válida pero se vuelve más complicada (L. Wang et al., 2017).

Los robots continuos no tienen enlaces rígidos ni juntas giratorias. En cambio, sus estructuras se doblan constantemente a través de formación a lo largo de su longitud. Imitan la naturaleza en su movimiento, como brazos y tentáculos de pulpo. Ellos pueden estar construido con más de una sección. Por tanto, ellos teóricamente pueden tener infinitos grados de libertad. Los robots continuos pueden ser accionados por diferentes métodos, como accionado neumáticamente (Moussa et al., 2019).

### 3.4.2.1 Apéndices de material blando acanalados mediante neumática

Como menciona Wang et al. (2017), el método de CCP modela en un plano bidimensional la cinemática del doblaje de curvatura de cuerpos suaves hechos de múltiples canales o células. Cuando estos canales y células son inflados o desinflados por fluidos, una relación de tensión-deformación de la membrana de material puede dar modelos estáticos. Este puede describir modelos para membranas de elastómeros incorporando canales de fluido incrustados basados en una relación tensión-deformación lineal del elastómero para un régimen de baja deformación, que es el caso en los manipuladores suaves. Los canales son representados por círculos. La capa inferior cuando no se aplica presión por el fluido se mantiene completamente horizontal. Cuando los canales son presurizados ( $P_1 > P_{atm}$ ): donde  $P_1$  es la presión aplicada en los canales por el fluido. Los canales se expanden para adoptar la nueva presión, lo que lleva a un desajuste entre las longitudes de la membrana a lo largo del centro de los canales y a lo largo de la capa inferior sin estirar. Creando un radio en la capa inferior, una curvatura. La Correlación cinemática entre el radio de curvatura de la membrana y la expansión de los canales viene dada por:

$$\frac{R_m}{R_m - R_1} = \frac{R_1}{R_{atm}}$$

*Ecuación 1: Relación del radio de la curva de la membrana y la expansión de los canales.*

Fuente: (L. Wang et al., 2017)

Donde,  $R_m$  es el radio creado por la capa inferior al doblarse,  $R_1$  es el radio del canal de fluido al aplicar presión, y  $R_{atm}$  es el radio del canal sin aplicar presión.

La relación estática entre la expansión y la presión aplicada puede derivarse en función de la

condición de equilibrio de cada canal. La fuerza de tensión T por unidad de longitud a lo largo del eje z de la pared del canal es:

$$2T = 2R_1(P_1 - P_{atm})$$

*Ecuación 2: Tensión por unidad de longitud*

Fuente: (L. Wang et al., 2017)

Suponiendo una relación tensión-deformación lineal para elastómeros, la ecuación constitutiva para la fuerza de tensión de longitud unitaria T es:

$$T = E t \epsilon$$

*Ecuación 3: Fuerza de tensión de longitud unitaria*

Fuente: (L. Wang et al., 2017)

Donde E, t, y  $\epsilon$  son el modulo elástico del elastómero, grosor y deformación respectivamente.

También se presentó un modelo del ángulo de flexión total y desplazamiento de un apéndice con varios canales. Considera canales con secciones transversales rectangulares y una relación tensión-deformación no lineal. En donde hay una presión aplicada P dentro de estos canales de fluido con una altura y un largo determinado, que crea un estrés axial en el material con la determinada altura y largo (Onal et al., 2017).

### **3.4.3 Materiales y fabricación**

La elección del material y las técnicas de fabricación utilizadas en la construcción, es clave para el desarrollo de manipuladores suaves. Al eliminar los principios y reglas de diseño utilizados para los robots rígidos, la robótica blanda deja espacio para la inspiración y la creatividad en los métodos de diseño y fabricación de dichos robots. La robótica blanda también hace uso de técnicas de fabricación rápidas y adaptables que permiten un diseño rápido y un ciclo de prueba, que a menudo es necesario ya que puede ser difícil de modelar y predecir completamente su comportamiento. Los robots blandos se componen principalmente de materiales con un módulo de Young comparable con los de materiales biológicos blandos, como músculos, tendones y piel, que normalmente se puede considerar

alrededor de 1 GPa. Esto incluye materiales como silicona, caucho u otros polímeros elastoméricos que se pueden fabricar fácilmente con diferentes factores de forma y propiedades del material. No solo se logra la deformabilidad y la "suavidad" mediante el uso de materiales intrínsecamente blandos, sino también mediante el aprovechamiento de la morfología y las propiedades del material (por ejemplo, considerando la orientación y las interacciones entre los materiales). A pesar de las muchas ventajas de los materiales blandos, su uso presenta desafíos en términos de respuesta no lineal, dificultad en el modelado, requerimiento de auto reparación, desempeño a fatiga y límites potenciales de fabricación. Se están desarrollando nuevos materiales como las espumas para aplicaciones robóticas blandas y tienen un potencial significativo con propiedades innovadoras como la capacidad de ajuste térmico y las propiedades de auto curación (Hughes et al., 2016).

Material blando (también llamado materia blanda) incluye líquidos, polímeros, espumas, geles, coloides, granulado materiales, así como la mayoría de los materiales biológicos blandos, de acuerdo con la revista científica Nature 2. La característica común del material blando es que consta de grandes moléculas o conjuntos de moléculas que se mueven colectivamente y, como resultado, da una respuesta grande, lenta y no lineal a pequeñas fuerzas (L. Wang et al., 2017).

Los materiales utilizados para los actuadores inflables elásticos de carrera grande se caracterizan por grandes deformaciones y bajos módulos elásticos. Los módulos elásticos típicos están en el rango de 105-107 Pa para materiales deformables (usualmente siliconas) y 108-1010 Pa para capas limitadoras de deformación. Además de las tensiones hiperelásticas extremadamente grandes para las siliconas de hasta el 1000% (Ecoflex 5), las propiedades del material dependen de la velocidad de deformación y varían de un lote a otro. Además, estos materiales muestran efectos de relajación del estrés y de esfuerzo inicial. Sin embargo, después del efecto de deformación inicial, las propiedades del material prácticamente no se ven afectadas por la carga cíclica y los informes de rendimiento del actuador permanecen estables durante más de un millón de ciclos. Cabe señalar que estas pruebas cíclicas solo se han realizado a niveles de deformación moderados y el comportamiento cíclico de alta deformación requiere más investigación. Además, la frecuencia a la que se pueden realizar estas pruebas cíclicas está limitada por el fluido de actuación que necesita pasar a través de

una tubería relativamente estrecha, lo que da como resultado anchos de banda de carrera completa reportados máximos en el orden de 10 Hz, 31, 32 o 20 Hz cuando la tubería es eliminada (Gorissen et al., 2017).

Para la fabricación de estos actuadores, la forma de ellos se adquiere mediante moldes, el molde varía según el diseño y movimiento que esperamos obtener. Como se observa en el diseño de Zhang et al. (2019), el menciona que el actuador suave se fabrica principalmente mediante un proceso de moldeo de varios pasos, que incluye principalmente cuatro pasos de procesamiento: el moldeo de la cavidad elástica interna, la envoltura de fibra de aramida, el moldeo de la matriz del actuador y la encapsulación del sello final. (p. 2).

Para este caso se definieron esos 4 procesos de fabricación dentro del moldeo. En términos generales el moldeo es parte fundamental y siempre estará presente como proceso de fabricación para estos actuadores.

Uno de los métodos más simples para crear robótica blanda es utilizar procesos de fundición o moldeo de materiales, en los que se utilizan moldes, a menudo impresos en 3D, para fundir estructuras a base de silicona o elastómeros. Esto puede conducir a la creación de robots utilizando un solo proceso de fundición que elimina cualquier problema con la unión o unión de materiales de diferentes propiedades. Los manipuladores creados con este método incluyen manipuladores neumáticos ya que este método permite una fácil integración de cámaras neumáticas. Se pueden usar otros métodos de actuación con la fabricación, con robots de locomoción impulsados por tendones también creados usando métodos similares. Este es un método extremadamente rápido de creación de prototipos y un método de desarrollo de bajo costo, pero puede dar lugar a manipuladores de estructura plana. Este método también se puede utilizar o combinar con algunos de los otros procesos y técnicas utilizados en robótica blanda (Hughes et al., 2016).

#### **3.4.4 Aplicaciones**

A pesar que este documento tiene como base el implemento en la industria, mas específicamente en el sector alimenticio, cabe destacar las múltiples aplicaciones que pueden

tener la robótica suave y todo el potencial que tiene en diferentes áreas. Algunas de ellas serán mencionadas acá.

#### *3.4.4.1 Robótica usable*

Los robots usables se pueden definir generalmente como una máquina que se puede usar por humanos para ayudarlos a realizar tareas particulares y, por lo tanto, diseñados según la forma y función del cuerpo humano. El campo de la robótica portátil ha crecido rápidamente en los últimos años y ha demostrado su capacidad para ayudar a los seres humanos en aplicaciones médicas, militares o industriales. Varios ejemplos icónicos incluyen HAL (Hybrid Assistive Limb), un exoesqueleto de cuerpo completo cuya función es ayudar físicamente a las personas a moverse permitiéndoles ejercer una energía motora mayor de la habitual, o HULC (Human Universal Load Carrier), previsto ayudar a los soldados en combate a transportar sus cargas durante períodos prolongados de tiempo. Sin embargo, los robots portátiles actuales se basan en el uso de enlaces rígidos, presenta varios desafíos que a menudo interrumpen la biomecánica natural del usuario. Por ejemplo, los eslabones rígidos resisten el movimiento de articulaciones biológicas si no están perfectamente alineadas, tienen una gran inercia y pueden requerir un voluminoso sistema de auto alineación. Para hacer frente al desafío, el uso de suaves "exo-trajes" se propone. Los exo-trajes están diseñados para ser livianos y no estar restringidos por estructuras rígidas externas para permitir la interacción sinérgica con los usuarios y minimizar la interferencia no intencionada con la biomecánica natural de su cuerpo. Ha sido demostrado que el exo-traje puede ayudar a caminar aplicando fuerzas de tracción al cuerpo con tejidos compuestos por los robots portátiles suaves, conectados a un motor montado basado en actuador de correas enrolladas. Además de proporcionar asistencia para caminar, los robots portátiles suaves también tienen propuesto aumentar la rehabilitación de la mano mediante el uso de diferentes tipos de actuadores suaves. Los ejemplos representativos incluyen guantes robóticos suaves con elastómero moldeado. Se ha demostrado que las aristas con refuerzos de fibra pueden soportar un rango de movimiento para dedos individuales, así como "exo-guante", un robot de mano de asistencia suave y portátil que se centra en uso de un sistema de enrutamiento de tendones blandos y un mecanismo adaptativo de baja activación (L. Wang et al., 2017).

#### *3.4.4.2 Robótica médica*

A diferencia de los tradicionales manipuladores quirúrgicos basados en agujas metálicas orientables, mecanismos accionados por tendones o eslabones motorizados articulados, combinamos actuadores fluídicos flexibles para obtener flexión multidireccional y alargamiento con un mecanismo de rigidez variable basado en interferencia granular. La idea fue desarrollar un manipulador basado en una serie de módulos, cada uno compuesto por una matriz de silicona con cámaras neumáticas para movimiento en 3-D, y un canal central para la integración de mecanismo de refuerzo basado en atascos granulares. Una forma de fuelle estructura trenzada se utiliza para contener la expansión lateral del actuador fluídico flexible y para aumentar su rango de movimiento (Ranzani et al., 2016).

Otra aplicación de los robots de cuerpo blando en robótica médica es la palpación robótica. El término palpación en sí mismo se puede definir como un procedimiento de examen intuitivo que utiliza las sensaciones cinestésicas y táctiles del médico examinador. A este respecto, la palpación robótica se convierte en un interés importante en los últimos años, ya que podría superar la palpación subjetiva y la sensación táctil. Los avances recientes muestran cómo el uso de materiales blandos puede traer beneficios a la palpación robótica. Las láminas flexibles se utilizan en un dispositivo háptico diseñado para el entrenamiento virtual de la palpación abdominal, mientras que los patrones estrés-velocidad durante el sondaje de tejidos se ha caracterizado para mejorar la efectividad de los sensores táctiles artificiales para lograr un óptimo comportamiento de palpación en el examen de tejidos blandos y localización de tumores (L. Wang et al., 2017).

#### *3.4.4.3 Agarre, manipulación e interacción segura*

Esta aplicación es el enfoque de la investigación. Donde se aprovechan los materiales blandos para poder aplicar la robótica donde los materiales rígidos convencionales no podrían y se podrán manipular objetos que de otra manera sería muy difícil. Esto sin causar ningún daño en los objetos y completar la acción de manera segura. Entre algunos ejemplos se mostraran a continuación.

Entre los ejemplos esta la aplicación de toma de ejemplares en arrecifes donde pinzas submarinas que utilizan la tecnología de robótica suave para manipular delicadamente y muestrear especies frágiles en el arrecife profundo. Las soluciones existentes para la manipulación robótica en aguas profundas históricamente han sido impulsadas por la industria petrolera, lo que ha resultado en interacciones destructivas con la vida submarina. La robótica de materiales blandos se basa en materiales compatibles que tienen una impedancia inherente adaptada a los entornos naturales y a los organismos blandos o frágiles. El resultado es el primer uso de la robótica blanda en las profundidades marinas para el muestreo no destructivo de la fauna bentónica (Galloway et al., 2016).

Otra dirección relacionada e importante es la interacción física segura entre humanos y robots, que es uno de los mayores desafíos en la robótica centrada en el ser humano. El uso de robots de cuerpo blando es una solución natural para realizar una interacción robótica física humana segura y confiable. Un ejemplo sería un módulo 3D de piel suave imprimible, diseñado para cumplir con los criterios de tamaño y seguridad apropiados para un robot interactivo del tamaño de un juguete (L. Wang et al., 2017).

#### *3.4.4.4 Locomoción de robot*

La robótica ha tratado de simular movimientos de seres vivos por mucho tiempo. Los seres vivos están hechos con una textura suave lo cual esto crea el reto de tratar simular estos movimientos con materiales rígidos de la robótica convencional. La implementación de la robótica rompe barreras al crear nuevas posibilidades y mayor capacidad de locomoción. Como se muestran algunos ejemplos.

La importancia del uso de materiales blandos en la locomoción de robots ha sido discutida en muchos estudios, debido a su papel en la estabilización del cuerpo o en el manejo del impacto al caminar. Existen estudios de robots que combinan materiales blandos con materiales suaves, sin embargo, en los últimos años, también hay estudios que se centran en la locomoción de robots hechos casi en su totalidad o incluso exclusivamente de materiales blandos. Por ejemplo, un robot blando de accionamiento neumático compuesto de polímeros elásticos sin esqueleto interno duro muestra que pueden realizar locomoción multigait.

Debido a la suavidad, habilidad para pasar por debajo de una pequeña apertura y un precio relativamente bajo, el robot puede, por ejemplo, potencialmente utilizar para aplicaciones de búsqueda y rescate. Como robots totalmente hechos de materiales suaves, hay muchos estudios sobre robots inspirados en pulpos. Mientras algunos se centran en la capacidad de agarre, otros se centran en su capacidad de locomoción, o ambos, con una aplicación potencial de exploración submarina y robótica marina. Los estudios sobre la capacidad de locomoción también se pueden dividir en gatear y nadar (L. Wang et al., 2017).

## **IV Metodología**

En este capítulo se definirá la metodología a seguir para el diseño y fabricación del proyecto, también se estipularán las variables dependientes con su variable independiente. Se detallan todos los procesos a seguir para la realización del proyecto y se enlistarán los materiales necesarios para la implementación dentro de la realización del efector final. Este se diseñará mediante el software Solidwork y también se simulará y diseñará el circuito de lectura del sensor mediante Proteus.

### **4.1 Enfoque**

El enfoque dentro de esta investigación es de carácter cuantitativo, donde se debe aplicar la metodología en V. Así mismo se podrá, mediante esta metodología, implementar un efector final capaz de manipular alimentos sin dañarlos. Con el uso de la robótica suave se obtiene un agarre delicado y firme, también se logra obtener una alta capacidad de agarre sin importar mucho las muy variadas formas de los alimentos. Esto consigue crear un efector final óptimo para la industria alimenticia y facilitar la implementación robótica dentro de esta.

*Tabla 3: Resumen de parámetros de investigación.*

Fuente: Propia (2020)

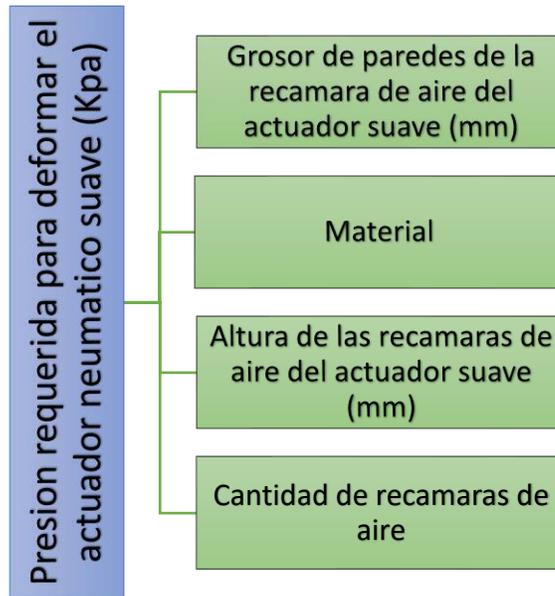
PROBLEMA	OBJETIVO GENERAL	PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	VARIABLE DEPENDIENTE	VARIABLE INDEPENDIENTE
<b>DIFICULTAD DE MANIPULACIÓN SEGURA Y OPTIMA DE ALIMENTOS MEDIANTE PINZAS RÍGIDAS</b>	Diseñar y fabricar un efector final mediante el uso de robótica suave que pueda	¿Cómo se puede implementar la robótica suave en la industria alimenticia y qué ventajas tiene?	Determinar la utilidad y ventajas de la robótica suave dentro de los efectores finales.	Presión requerida para deformar el actuador neumático suave (Kpa)	Grosor de paredes de la recámara de aire del actuador suave (mm)
	implementarse en la industria panadera.	¿Cuáles son los pasos para diseñar un efector final suave?	Implementar una metodología con las herramientas y procedimientos para construir un efector final suave.		Material
		¿Cuáles son los materiales a utilizar para la creación	Determinar los materiales a utilizar para la implementación		Altura de las recámaras de aire del actuador suave (mm)

	de un efector final suave?	ión de la robótica suave.	Cantidad de recamaras de aire
	¿Cómo se puede mejorar la funcionalidad de un efector final mediante sensores?	Evaluar el comportamiento de un efector final suave mediante sensores.	

## 4.2 Variables de investigación

Las variables de investigación definen los parámetros que varían dentro del proyecto, en la siguiente ilustración tenemos las variables dependientes y las independientes del efector final a realizar. Donde las dependientes cambian de valor mediante las independientes y así definir un comportamiento, como lo es en el caso de esta investigación, que guiara lo deseado a realizar.

La presión de entrada será la variable dependiente, la cual depende directamente del material seleccionado y de algunos parámetros de diseño del efector final el cual es accionado mediante neumática.



*Ilustración 6: Variables de investigación*

Fuente: Propia (2020)

Para el diseño del efector final. Los dedos neumáticos que agarran tendrán un diseño específico en el cual hay una recámara de aire que al aplicar aire a presión este actuador se dobla. La fuerza con la que este se doblara será dependiente del diseño de la recámara de aire. Entre más delgadas las paredes de la recámara mayor será la fuerza de salida y al incrementar la altura de esta recámara también se aumentara la fuerza de salida o de agarre. Por ende la variable dependiente es la fuerza de salida.

### **4.3 Técnicas e instrumentos aplicados**

El diseño del actuador se realiza mediante la fabricación de un molde, ya que se verterá un elastómero en líquido dentro de él y así obtendrá su forma deseada. El molde se diseña mediante el programa de Solidworks donde se podrán diseñar las características deseadas de este actuador. También se diseñaran los acoples, carcasa y demás piezas necesarias para la fabricación del efector final.

Para la parte de medición del efector final, se utilizara Proteus para la simulación y diseño del circuito y se programara en el IDE de Arduino donde se utilizara una Attiny como microcontrolador y así poder realzar las medidas necesarias con el sensor.

#### **4.4 Materiales**

Dentro de la selección de materiales necesarios para la fabricación del proyecto se encuentran los siguientes:

1. Elastómero
2. Compresor
3. Sensor de curvatura flexible
4. Microcontrolador
5. Mangueras
6. Borneras

#### **4.5 Metodología de estudio**

En la realización de este proyecto, debido a que este posee componentes mecánicos y electrónicos, la metodología más adecuada a utilizar es la V. Usualmente usada para proyectos de ingeniería en mecatrónica, esta cumple lo con los requisitos que entran en la categoría de este proyecto. Adecuada para los diferentes sistemas de este mismo.

#### **4.6 Requerimientos**

Los puntos necesarios para hacer de este proyecto un éxito es la capacidad de manipular alimentos sin causar daños. Este proyecto será de utilidad dentro de la industria alimenticia y la robótica aplicada en ella. Así se mejora la implementación tecnológica en dicha industria. Esto se lograra con el uso de robótica suave. Al saber todo esto se mejora el entendimiento para el diseño del proyecto, siendo esto los requerimientos.

## **4.7 Efecto final suave**

Para el efecto final y su fabricación se dividirá en diferentes sistemas, para así poder unirlos todos juntos al final. Estos sistemas son:

### **4.7.1 Nivel de sistemas**

➤ Sistema mecánico

En el sistema mecánico se encuentra la carcasa y los actuadores. Todo lo que se diseñara mediante Solidworks es parte de este sistema. La carcasa o acople tiene la función de ser la unión al robot y al actuador, también llevara los dedos de elastómero unidos a ella. Esta es la unión de todo el sistema. Luego la otra pieza parte de este sistema es el diseño del elastómero (robótica suave) estos vienen siendo los dedos acoplados a la carcasa, estos se mueven mediante neumática. Un compresor les suministra aire a ellos y al ellos recibir ese flujo, estos crean un movimiento que este será dictado por la forma con la que se diseñaron los dedos de elastómero.

➤ Sistema Electrónico

Este sistema consta de un sensor y un microcontrolador. EL sensor es de medición de curvatura y este tiene la característica de ser un sensor flexible. Se dobla junto con el material. La función de este será medir la curvatura en la que se doblan los dedos de elastómero. El microcontrolador se encargara de tomar esas mediciones y encender un led cuando este agarre un objeto.

### **4.7.2 Niveles de subsistemas**

➤ Subsistema de robótica suave

Esta es la parte que tendrá contacto directo con los alimentos. Los dedos de elastómero se encargaran de manipular estos productos. Accionados por otro sistema neumático y estos se fabrican mediante un molde y el material en líquido es vertido

dentro del molde y así dejando secar para hacer las formas. La forma final consta de dos capas: la capa de la recámara y la capa base. Entre ellas se pone una hoja de papel para poder crear la curvatura deseada.

➤ Subsistema de housing

El subsistema de housing esta sujetado a la parte final del robot, en la que hay unos agujeros para tornillos lo cual hace que la sujeción sea mediante estos. El housing es impreso en 3D y diseñado en solidworks. El peso de este y la longitud son dos parámetros importantes en su diseño, debido al límite de carga del robot y a su momento de inercia juntos con su centro de gravedad.

➤ Subsistema neumático

El accionamiento del actuador de elastómero es mediante neumática. Las válvulas y el compresor serán controlados mediante el robot, un viper 650. Este se encarga del control del sistema neumático. Las válvulas se abren y cierran dejando pasar el aire cuando los dedos de elastómero requieren cerrarse y así mismo después abrirlos. Para cerrarlos se suministra aire y para abrirlos se deja salir el aire suministrado, esto hace que regrese a su forma normal.

➤ Subsistema de control

El sistema de control será desde el robot. Este se encargara de controlar las válvulas y así el flujo neumático suministrado al efector final.

➤ Subsistema de medición

Para el sistema de medición se evitaron los sensores de materiales rígidos ya que pueden dañar el elastómero. La solución a esto es que se utilizó un sensor flexible que se dobla con el actuador suave y así mide la curvatura que este adopta. Este sensor es controlado por un microcontrolador Attiny85 el cual recibe los datos del sensor y así poder saber cuándo esta accionado el actuador.

- Subsistema de programación

La programación de este proyecto es de mucha sencillez. Se encarga de leer los datos del sensor, que es completamente analógico, y hace que mediante condiciones de valores encienda un led para saber que este actuador está activado y ha agarrado algo.

### **4.7.3 Realización de partes**

- Se realizaron diferentes pruebas con el diseño del molde para el elastómero para así encontrar el diseño con el comportamiento óptimo deseado. El comportamiento de estos es muy difícil de predecir. La manera más precisa es por la experimentación.
- Una vez determinado el diseño del actuador suave, se realizó el diseño del housing para poder montarlo con el elastómero. Así se montan individualmente los dedos en un extremo del housing y en el otro extremo se atornilla al robot. Este demostró quedar muy fijo y el robot lo maneja de manera óptima.
- Se realizan las pruebas de medición en Proteus, estas demuestran la funcionalidad del sensor y así se puede integrar el circuito físicamente en el housing del efector final donde quedara fijo mientras este trabaja.

### **4.7.4 Integración de subsistemas**

Para este segmento, después de probar los subsistemas por separado estos son unidos y se probó su funcionamiento como un conjunto o un solo sistema que estará formado por los diferentes subsistemas mencionados.

### **4.7.5 Integración de sistemas**

Para esta etapa se unieron todos los subsistemas y así los sistemas completos serán integrados en uno solo haciendo de esto el proyecto. El sistema electrónico se unió al sistema mecánico para así poder completar la fabricación de este prototipo y poder proceder a los análisis y resultados de las pruebas a realizar dentro de este.

#### **4.7.4 Resultado del prototipo**

El prototipo logra cumplir los estándares necesarios para terminar exitosamente la tarea. Mediante fabricación desde subsistemas a la integración como un solo conjunto en un sistema completo logra de manera exitosa implementarse para industria objetivo, también logra completar la funcionalidad del robot en el que se monta.

#### **4.8 Metodología de validación**

Se realizaron pruebas después de su fabricación en el robot las cuales determinaron y validaron el éxito del trabajo final. Este efector logra la manipulación de los productos alimenticios de manera eficaz y todo esto que para hacer dentro de las pruebas justo después de su fabricación.

#### **4.9 Cronograma de actividades**

Nombre de tarea	Duración	Comienzo	Fin	Predecesoras	octubre 2020 28 03 08 13 18 23 28	noviembre 2020 02 07 12 17 22 27	diciembre 2020 02 07 12 17 22
<b>Proyecto Fase I</b>	<b>59 días</b>	<b>lun 12/10/20</b>	<b>vie 18/12/20</b>				
<b>Semana 1</b>	<b>6 días</b>	<b>lun 12/10/20</b>	<b>sáb 17/10/20</b>				
Plantemiento del problema	6 días	lun 12/10/20	sáb 17/10/20				
<b>Semana 2</b>	<b>6 días</b>	<b>lun 19/10/20</b>	<b>sáb 24/10/20</b>				
Marco teorico	6 días	lun 19/10/20	sáb 24/10/20				
<b>Semana 3</b>	<b>6 días</b>	<b>lun 26/10/20</b>	<b>sáb 31/10/20</b>				
Metodologia	6 días	lun 26/10/20	sáb 31/10/20				
<b>Semana 4</b>	<b>5 días</b>	<b>mar 03/11/20</b>	<b>sáb 07/11/20</b>				
Diseño Solidworks	5 días	mar 03/11/20	sáb 07/11/20				
<b>Semana 5</b>	<b>6 días</b>	<b>lun 09/11/20</b>	<b>sáb 14/11/20</b>				
Fabricacion	6 días	lun 09/11/20	sáb 14/11/20	9			
<b>Semana 6</b>	<b>6 días</b>	<b>lun 16/11/20</b>	<b>sáb 21/11/20</b>				

Nombre de tarea	Duración	Comienzo	Fin	Predecesoras	octubre 2020 28 03 08 13 18 23 28	noviembre 2020 02 07 12 17 22 27	diciembre 2020 02 07 12 17 22
Pruebas	6 días	lun 16/11/20	sáb 21/11/20	11			
<b>Semana 7</b>	<b>6 días</b>	<b>lun 23/11/20</b>	<b>sáb 28/11/20</b>				
Analisis y resultados	3 días	lun 23/11/20	mié 25/11/20	13			
Conclusiones	3 días	jue 26/11/20	sáb 28/11/20	15			
<b>Semana 8</b>	<b>6 días</b>	<b>lun 30/11/20</b>	<b>sáb 05/12/20</b>				
Correcciones	6 días	lun 30/11/20	sáb 05/12/20	16			
<b>Semana 9</b>	<b>6 días</b>	<b>lun 07/12/20</b>	<b>sáb 12/12/20</b>				
Entrega avance final	3 días	lun 07/12/20	mié 09/12/20	18			
Presentacion	3 días	jue 10/12/20	sáb 12/12/20	20			
<b>Semana 10</b>	<b>5 días</b>	<b>lun 14/12/20</b>	<b>vie 18/12/20</b>				
Presentacion final	5 días	lun 14/12/20	vie 18/12/20	21			

## V. Análisis y resultados

En este capítulo se discutirán los resultados mediante un análisis adquirido en el proceso de desarrollo del proyecto con el uso de la metodología en V que se menciona en el capítulo anterior a este.

### 5.1 Análisis de sustento del marco teórico

Algunos conceptos necesarios para el desarrollo de este proyecto que se encuentran en el marco teórico son los que se mencionaran a continuación:

- a) Robótica suave
- b) Manipulador suave
- c) Actuación por neumática
- d) Moldes
- e) Polímeros

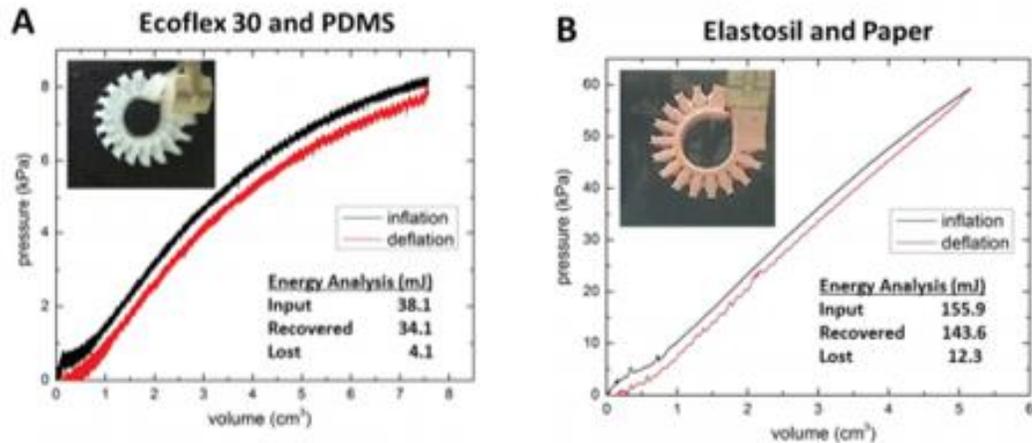
Se analizaron 3 polímeros para fabricación del actuador:

1. Ecoflex 30
2. Elastosil M4601
3. OOMOO 25

Para el desarrollo de este manipulador suave se utilizó de polímero el OOMOO 25, el cual es un compuesto de caucho de silicona. El motivo por el cual se seleccionó este polímero, es por la falta de necesidad de degasificación al vacío y así no se necesitó una cámara de vacío para curar el material. Este puede curarse a temperatura ambiente. Otro beneficio fue la proporción de mezcla por volumen que es de 1:1. Este material viene en parte A y parte B las cuales se mezclan y se deja curar la mezcla dentro del molde. Cabe mencionar que su accesibilidad fue otro beneficio.

Los materiales afectan el comportamiento del actuador sin embargo, este no es el único parámetro que afectara su comportamiento. Este se puede alterar también con la morfología del manipulador, más adelante se hablara de ella. El Ecoflex en comparación con el Elastosil tiene una menor rigidez, esto hace que este se doble a una menor presión proporcionada por

la actuación neumática. Como se puede observar en la figura 1. Donde se compara el Elastosil con el Ecoflex. Se puede ver como el Ecoflex adquiere su forma final con menos presión requerida. Esto es debido a las propiedades del material como su rigidez.



*Ilustración 7: Comparación de histéresis de actuador suave con diferentes elastómeros y una misma morfología, donde la presión requerida para lograr su deformación máxima se muestra.*

Fuente: (Mosadegh et al., 2014)

Sin embargo entre sus propiedades tenemos de comparación la siguiente tabla.

*Tabla 4: Comparación de elastómeros.*

Fuente: Propia (2020)

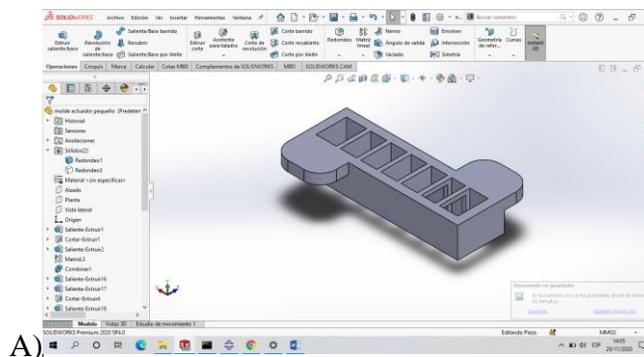
<b>Elastómero</b>	<b>Módulo de Young (Modulo de elasticidad)</b>	<b>Dureza en el shore A</b>	<b>Precio/Kg</b>
<b>Elastosil M4601</b>	7MPa	28	895.07 + <b>envío</b>
<b>Ecoflex 30</b>	0.1MPa	00-30	783.67 + <b>envío</b>
<b>OOMOO 25</b>	1MPa	25	709.98 + <b>envío</b>

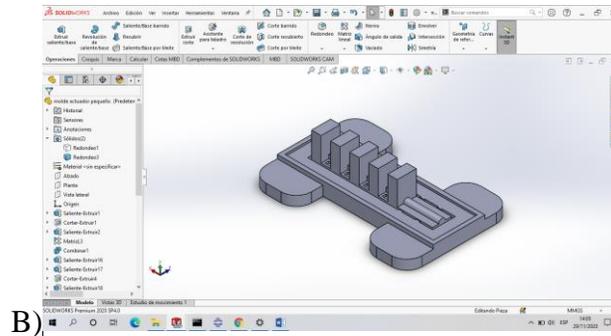
Con estos valores comparados para cada polímero, se llegó a la conclusión que el OOMOO 25 es candidato de punto medio entre el Ecoflex y el Elastosil. Como se puede observar en la tabla anterior. Su módulo de elasticidad no es tan bajo como el del Ecoflex y no tan alto que el del Elastosil, así mismo el precio de este es el más bajo.

Entonces, como mencionaba Mosadegh et al. (2014), el actuador fabricado con el elastómero más rígido (Elastosil) requiere casi 8 veces más presión, pero por otro lado también ocupa 1.5 veces menos cambio de volumen para doblarse completamente. Debido a ese menor cambio de volumen requerido, aumenta la velocidad con que se doblara completamente el actuador. Los actuadores fabricados con elastómeros más blandos ejercen menos fuerza y se doblan más lentamente con una dada velocidad de inflación debido a ese volumen extra a llenar.

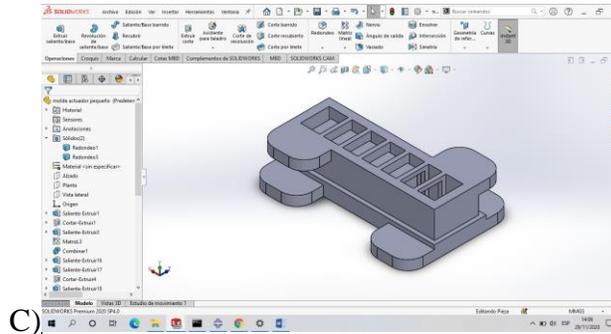
Como se mencionó, el comportamiento del actuador se define con su material de fabricación y su morfología. Dentro de la temática del material, son dos a utilizar. Uno de alta tensión/baja dureza (elástico), que se refiere al elastómero, y otro de baja tensión/alta dureza (rígido), que en este caso se utilizó el papel, por su extremadamente fácil disposición.

Para la morfología de este actuador en las medidas de las paredes de las recamara, estas tienen un grosor de 1.5 mm. El diseño de este actuador tiene 5 recamaras de aire que se deforman al aplicar presión. Para su construcción primero se diseñó el molde en solidworks con las dichas características, por medio de cavidad. El molde son 2 solidos que uno se encarga de la parte principal del actuador y el otro la base donde unirá la capa de papel con el elastómero y así cubriendo todas las recamaras. En la figura 8, se puede observar el diseño del molde.

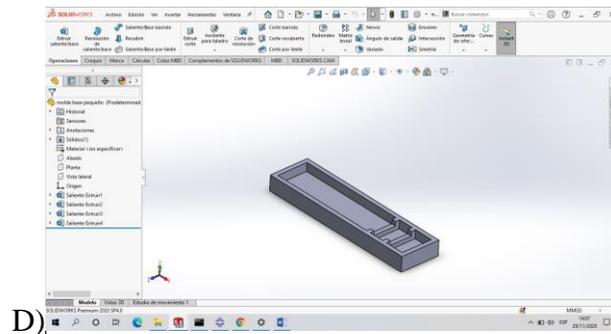




B),



C),

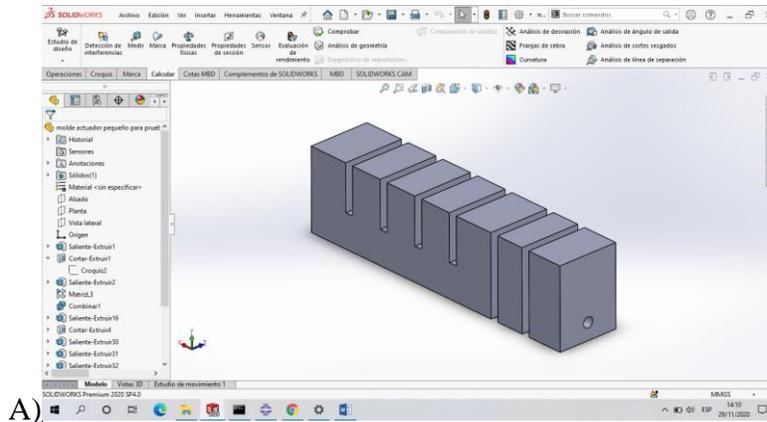


D),

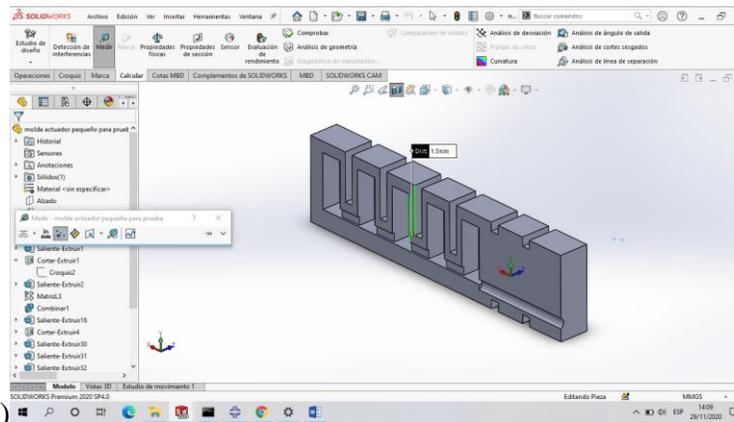
*Ilustración 8: Parte superior del molde para el actuador, b) Parte inferior del molde para el actuador c) Ensamble de molde principal, D) molde de la base del actuador*

Fuente: Propia (2020)

Con el uso de este molde, la morfología de este actuador es de esta manera como se muestra en la figura 9. Donde tenemos también las medidas utilizadas para esta fabricación. Que son de 1.5 mm para las paredes y 12.5 para la altura de las recamaras. El resultado de la impresión de estos moldes se puede observar en la siguiente figura 10.



A)



B)

*Ilustración 9: Diseño de manipulador suave, b) vista interna del manipulador suave con vista a las recamaras y la medida de sus paredes.*

Fuente: Propia (2020)



A)



*Ilustración 10: Resultado de ensamble de moldes, B) Piezas de moldes por separado.*

Fuente: Propia (2020)

El resultado adquirido mediante estos moldes se muestra en la figura 11. El material logra resistir los pequeños maltratos del molde al retirarlo de este. Sin embargo, cabe mencionar que al retirarlo se tiene que tener mucho cuidado ya que el material tiene una muy baja resistencia al corte. Se realizaron varios intentos antes de lograr conseguir el primer actuador suave exitoso. Se revisó que no tuviese burbujas o puntos débiles en caso de que si, se les aplica más material en la zona para poder reforzarlo.

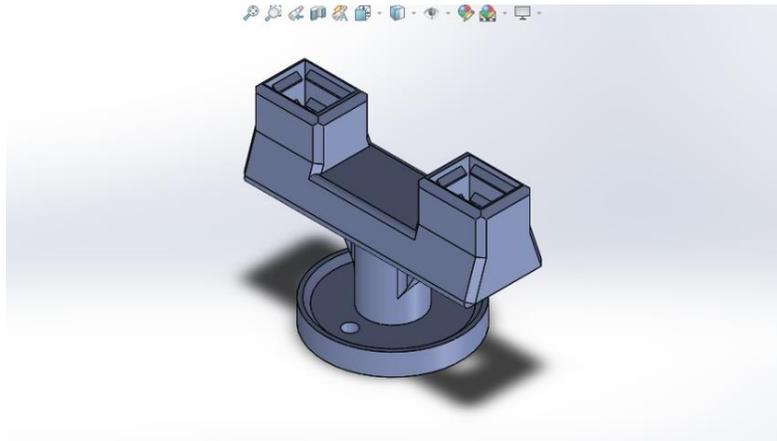


*Ilustración 11: Actuador suave con OOMOO 25.*

Fuente: Propia (2020).

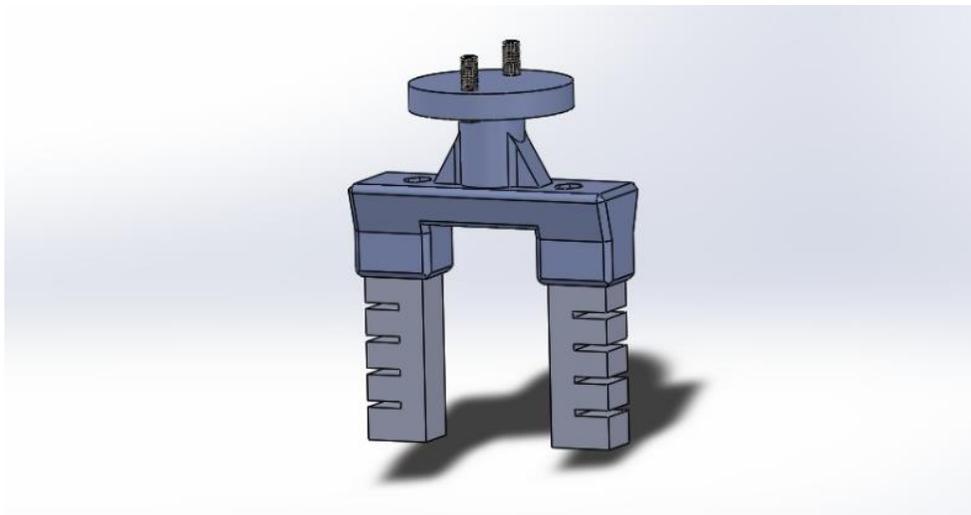
Para el tipo de manipulador suave se diseñó uno de dos dedos, que estos son los actuadores suaves, Figura 12. En el diseño del housing del manipulador suave, están las

ranuras donde se ensamblan los dedos de elastómero en este, Figura 13. Este fue impreso en 3D y también tiene la ranura donde entran las mangueras para el suministro de flujo de aire otorgado por el sistema neumático, mediante el compresor, las válvulas y directo a ambos dedos.



*Ilustración 12: Diseño de housing*

Fuente: Propia (2020)

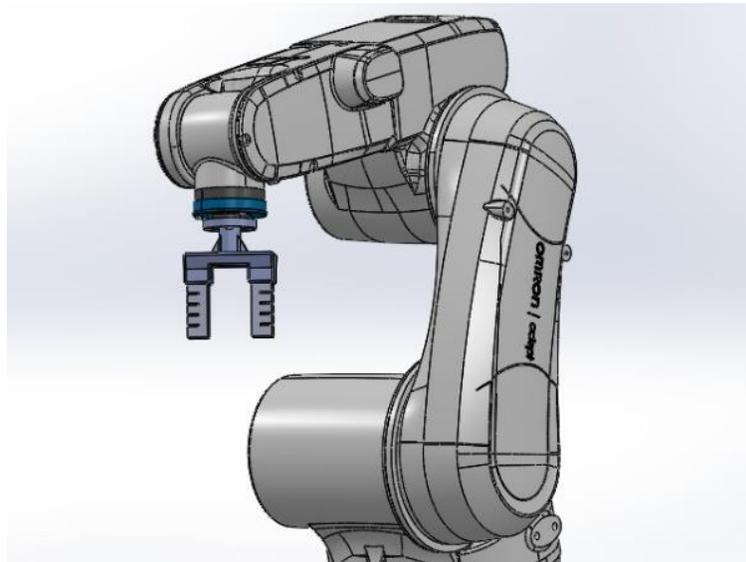


*Ilustración 13: Ensamble de actuadores suaves con el housing*

Fuente: Propia (2020)

Por medio de 2 tornillos podremos ensamblar el manipulador suave en el robot, estos tornillos son M5x18. En la figura 14, podemos observar el ensamble con el Viper 650, que

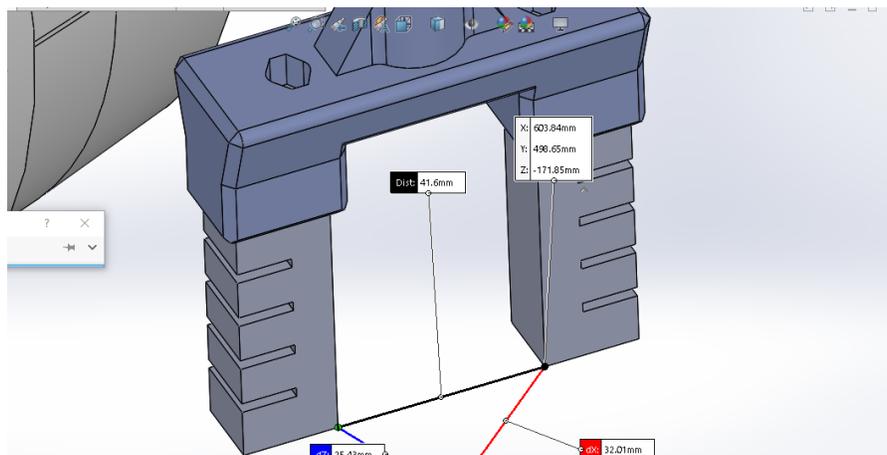
se utilizara con la función de “pick and place” tomando alimentos y colocándolos en otra posición estos sin dañarlos por medios de los actuadores suaves.



*Ilustración 14: Ensamble completo del efector final con el Viper 650.*

Fuente: Propia (2020)

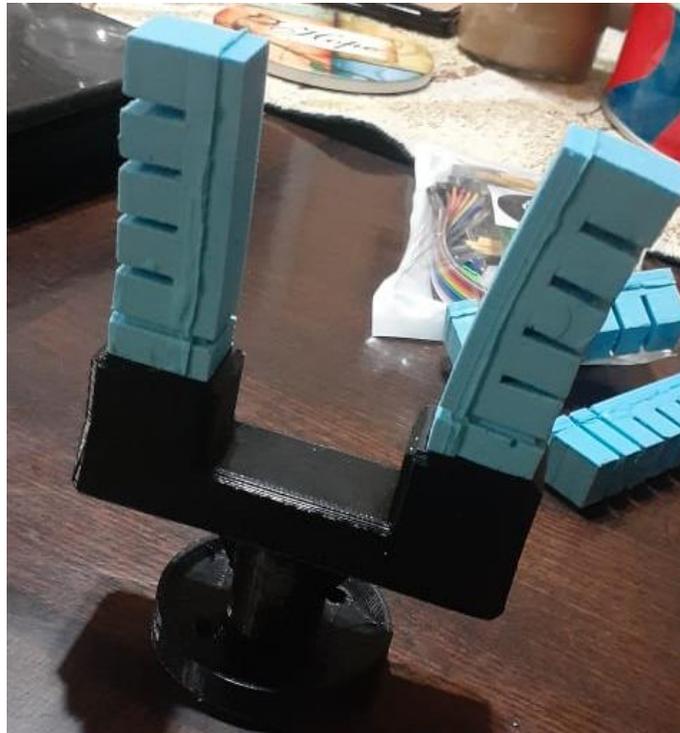
También cabe mencionar que el área de agarre del manipulador suave es de 41.6 mm, como se puede observar en la figura 15, esto quiere decir que podrá agarrar objetos que tengan esta medida, si estos son más grandes que este valor se le dificultara manipularlos. Esta medida se puede cambiar fácilmente alterando un poco el diseño del molde y del housing de manera práctica. Aumentando el número de recamaras de aire y alargando el housing.



*Ilustración 15: Distancia entre los dedos de agarre.*

Fuente: Propia (2020)

Como resultado final del efector final, con los dedos ensamblados, se observa en la figura 16. Al imprimir las piezas con PLA, estas fueron pulidas para dejarlas con un acabado más exacto a las medidas diseñadas por el factor de tolerancia de las impresoras. Se logró con éxito el ensamble de los dedos en housing y las ranuras de aire quedan justas con la entrada de los actuadores neumáticos suaves.



*Ilustración 16: Efector final.*

Fuente: Propia (2020)

## **5.2 Pruebas en SolidWorks**

El diseño no está completo sin la asignación del material en las piezas y los moldes. Estos ya para este punto tienen la forma diseñada pero aún no se pueden fabricar sin antes determinar el material más óptimo para nuestra aplicación. Estos serán impresos en 3D. La asignación de material es parte fundamental en el diseño y en la fabricación. Para poder tener una idea muy cercana a la realidad con el comportamiento que cualquier material va a tener

antes de construirlo y tener que realizar doble gasto en el caso de falla, a este diseño se le asigna un material y así se podrá simular. Esto nos da una idea de las fuerzas que este es capaz de soportar también las áreas de la pieza en donde se concentra el estrés.

Mediante solidworks se realizaron las pruebas de esfuerzo sobre el housing. El material con el que estas simulaciones se lograron realizar fue el PLA debido a su accesibilidad. Se sometió a 3 diferentes fuerzas, se mostrara los resultados de cada una de las fuerzas en el análisis estático del housing.

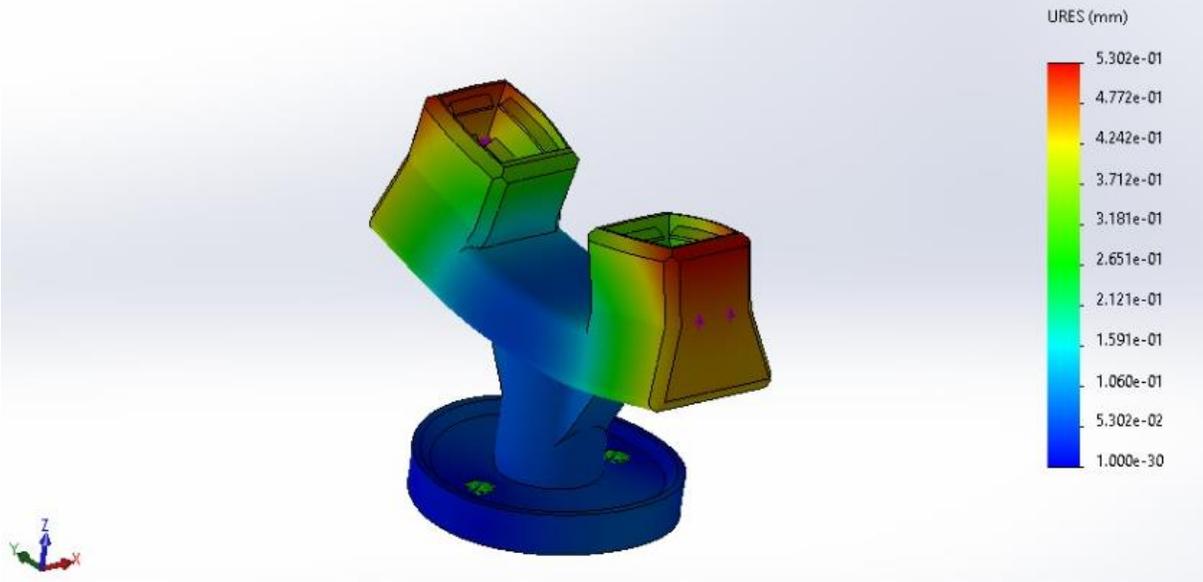
El diseño virtual se ha convertido en una de las fases más importantes dentro de todo el proceso de diseño en general. Este se puede definir simplemente como "diseño en el computador". Su atractivo se debe a la conveniencia y aspectos económicos y lo más importante, todo puede ser hecho en la computadora antes de la construcción real del prototipo (B. Wan Mohd Raziff et al., 2018).

SolidWorks Simulation es una herramienta muy útil para poder predecir comportamientos y realizar estudios de diseños mediante (FEA) por sus siglas en inglés, de análisis de elemento finito. En el cual se hacen pruebas estáticas, de frecuencia, de fatiga, térmicas, de caída e incluso estudios no lineales (Chirita et al., 2017).

Lo realizado dentro de SolidWorks Simulation fue introducir los valores de las propiedades físicas del material (PLA) luego de esto, se prosigue con aplicarle el material a la pieza diseñada y así se selecciona el SolidWork Simulation y se crea el nuevo estudio. Este estudio es uno de carácter estático. En donde se seleccionó la sujeción que en este caso será en los agujeros de los tornillos con los que el efector final se ensambla al robot.

Para las pruebas con el ensamble del actuador suave y el housing la fuerza se distribuirá en las áreas de agarre del housing, en donde se acopla mediante una ranura en el actuador suave y las salientes del housing. Mediante estas pruebas se podrá saber si las salientes del acople son capaces de aguantar los esfuerzos necesarios. En la figura 11, se puede observar que la pieza soporta una libra fuerza en esta área de ensamble, demostrando poco desplazamiento debido a la fuerza sometida.

Nombre del modelo: housingFIJ000000corto  
Nombre de estudio: Análisis estático 4(-Predeterminado-)  
Tipo de resultado: Desplazamiento estático Desplazamientos1  
Escala de deformación: 18.7362



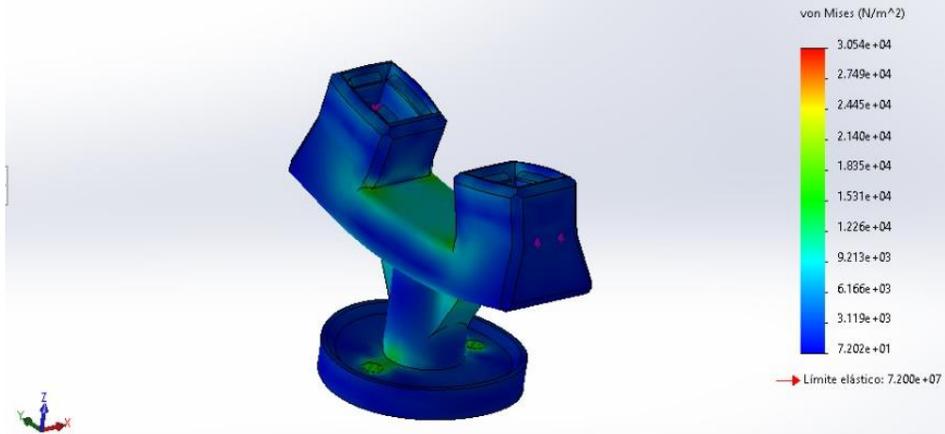
*Ilustración 17: Prueba de desplazamiento*

Fuente: Propia (2020)

El desplazamiento máximo es de  $5.302e-1$  con 1 libra fuerza. Esto quiere decir que podrá manipular un objeto con una masa de 32.17 libras. Los requisitos necesarios de fuerza con este efector final no son altos. Su propósito no es mover objetos de gran peso. Su propósito es manipular objetos delicados sin dañarlos y sin forma definida. Sin embargo es de importancia saber su capacidad mediante estas pruebas.

También se realizaron pruebas de estrés, donde podemos observar los puntos donde el estrés se concentra con dada fuerza aplicada en dicho lugar. En la figura 18, se puede observar los puntos donde hay más estrés.

Nombre del modelo: housingF1000000corto  
Nombre de estudio: Análisis estático 4(-Predeterminado-)  
Tipo de resultado: Análisis estático tensión nodal Tensiones1  
Escala de deformación: 18.7362



*Ilustración 18: Pruebas de estrés*

Fuente: Propia (2020)

Como se observa en la imagen anterior los puntos de mayor estrés se concentran en los agujeros donde van los tornillos de ensamble al robot. El estrés causado en esa área no obtiene un valor peligroso para la pieza. No alcanza su límite elástico de  $7.2e+7$ , por lo tanto no causaría un daño permanente en la pieza. El resto del housing se presenta de color azul, lo cual demuestra las áreas menos afectadas por el estrés.

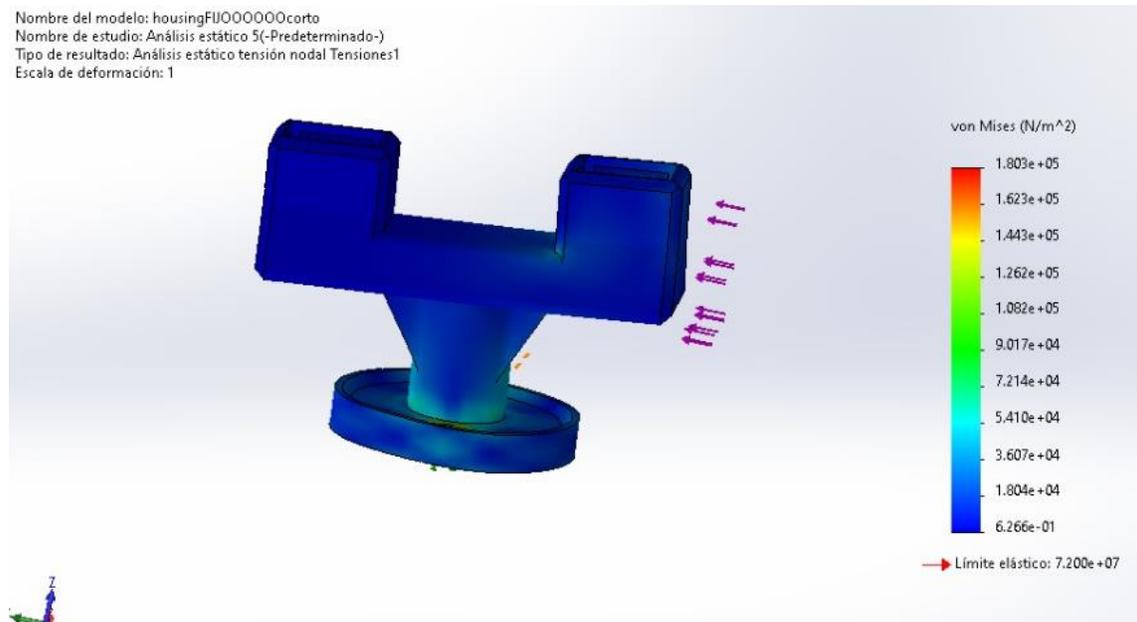
Al realizar estas pruebas con otros valores de fuerza, como 2lbf y 1.5lbf, estos demostraron crear un desplazamiento mayor de poco más de 1mm, sin embargo, estas fuerza no causaron superar el límite elástico del material. Esto siempre demostró aguantar a esas magnitudes de fuerza, pero no se consideró seguro por el nivel de desplazamiento.

### **5.3 Pruebas de impacto**

Al operar el robot este puede causar algún impacto de manera no intencional en el efector final. Algunas de las pruebas que se realizaran a continuación serán con fuerzas aplicadas a posibles áreas de impacto accidental en este. Todas las pruebas se realizaron con 1lbf de golpe en diferentes áreas del housing. Esta fuerza no es muy alta, pero el ambiente de trabajo para el que se diseñó este efector final, es el alimenticio y no se espera golpes

significantes. El propósito de este es lo suave para la segura manipulación de alimentos. Estos siendo delicados.

En la figura 19, podemos observar una prueba de golpe en el lado lateral de la pieza, siendo estos los lugares de mayor probabilidad de golpe. Tanto las áreas laterales como las frontales y traseras tienen la mayor probabilidad de golpe.



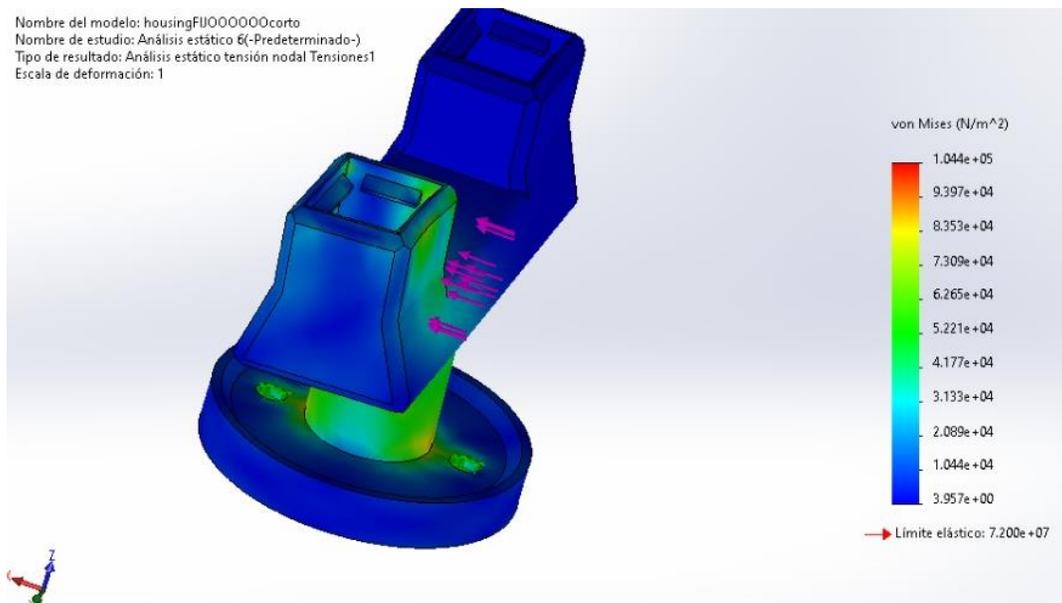
*Ilustración 19: Pruebas de golpe lateral.*

Fuente: Propia (2020)

Como se puede observar en la figura 19, el impacto de 11bf en esa dirección de la pieza acumula el estrés provocado por el impacto en el tubo saliente de esta. En este caso se concluyó que hay un desplazamiento alto provocado en la pieza, sin embargo el estrés mayor que se muestra aplicado en la pieza fue menor que su límite elástico. Esto quiere decir que el material no tendrá deformaciones permanentes y se comportara de manera elástica.

El siguiente punto de golpe es de en las uniones de los dedos elásticos, donde se introducen los actuadores suaves. De manera lateral, un impacto solo en uno de ellos será el simulado. De igual manera que el caso anterior podemos concluir que con 11bf, de impacto

este no supera su límite elástico, sin embargo, esta pieza sufrirá un considerable desplazamiento. Como se observa en la figura 20.

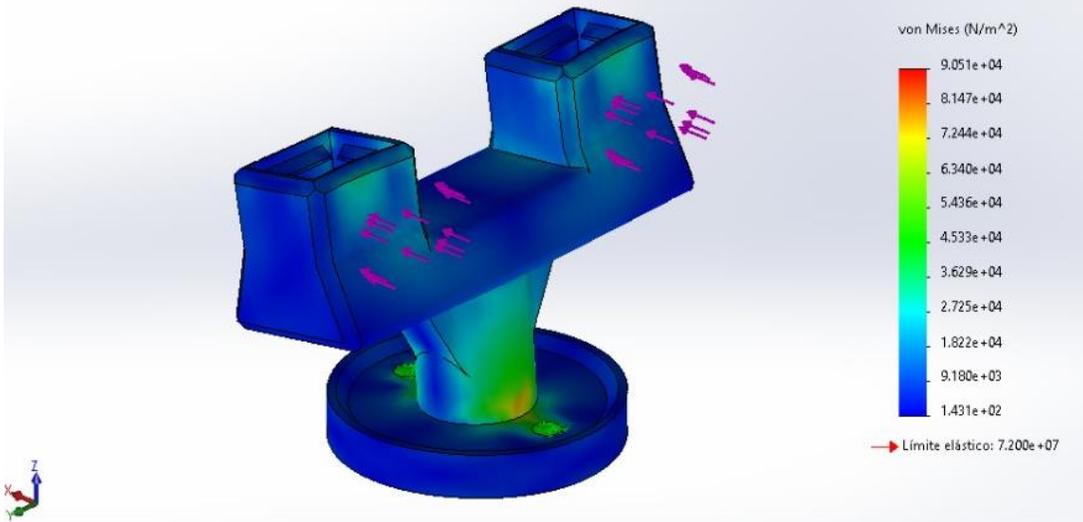


*Ilustración 20: Impacto en acople de manipulador suave.*

Fuente: Propia (2020)

Como se puede observar el punto de unión del tubo con el área de tornillos tiene las mayores tensiones aplicadas en la pieza con esta magnitud de golpe. Siendo la mayor magnitud sufrida de  $1.044e+5$ . Inferior a su límite elástico, pero muy cercano. Un golpe completamente frontal sufre el mismo caso que los demás. Este se puede observar en la siguiente imagen.

Nombre del modelo: housingFII000000corto  
Nombre de estudio: Análisis estático 7(-Predeterminado-)  
Tipo de resultado: Análisis estático tensión nodal Tensiones1  
Escala de deformación: 2.8179



*Ilustración 21: Impacto frontal*

Fuente: Propia (2020)

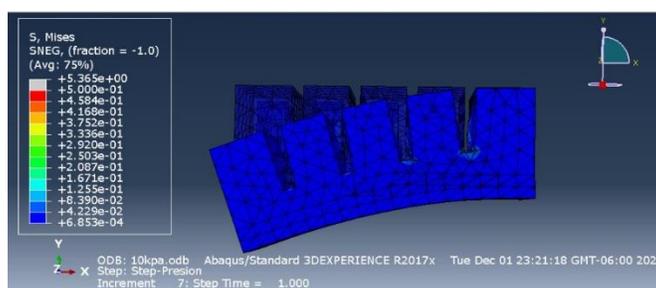
Se concluyó que, con los estudios de impacto hacia el housing, la fuerza máxima de aguante sería de una lbf, esta crea un desplazamiento significativo, sin embargo, esta no es suficiente para causar un esfuerzo mayor al del límite elástico por ende en cualquier dirección de impacto esta magnitud no causara deformación permanente. Así mismo cabe destacar que el enfoque de diseño de este efector final no es su dureza, porque su aplicación será con materiales blandos o delicados.

## 5.4 Simulación de actuador suave

La simulación de los actuadores suaves es de suma importancia ya que se puede predecir el comportamiento del actuador, sin tener que construir y cambiar su morfología o el material a prueba y error. Esto nos ahorra recursos y hace más eficiente la fabricación. Para el modelo de estos actuadores, se utiliza el análisis estático de materiales elásticos e híper elásticos. La dificultad del modelo de ellos está en su comportamiento no lineal. La simulación se hace mediante el análisis de elemento finito. El programa a utilizar para estos modelos es llamado ABAQUS.

ABAQUS es un software que se utiliza para modelo y análisis de componentes mecánicos y estructurales. Visualiza los resultados del análisis de elementos finitos. El comportamiento físico de los materiales constituyentes en una estructura compuesta en capas se explora con la ayuda del software. Esto tiende a mejorar el rendimiento, fiabilidad y seguridad de los sistemas lo que reduce el tiempo y el costo de procesamiento. El software ejecuta el análisis detallado de la correlación entre estructura y propiedades mecánicas de los materiales constituyentes con el fin de visualizar el conjunto predeterminado de propiedades. Esto calcula los efectos sobre la estructura de un material que relaciona la visualización de deformidades en disposición de sus componentes internos (Ghosh et al., 2016).

Los datos a insertar en el programa, en el caso de los necesarios para los materiales, son la densidad, el módulo de Young y el coeficiente de poisson. Nuestro material elástico es definido como el papel. Luego para los híper elásticos, también tenemos la necesidad de definir su densidad y su potencial de energía de tensión. Junto con el diseño realizado en solidworks donde este se guarda como archivo STEP y se importa a ABAQUS. Con estas pruebas también podemos determinar la presión necesaria para poder deformar el actuador hasta su punto límite que en este caso es lo deseado. Como primer análisis, se probara con 10kpa primero y desde ese valor se podrá analizar la presión necesaria para doblar este actuador al nivel deseado. En la figura 16. Se puede observar el modelo con 10kpa.

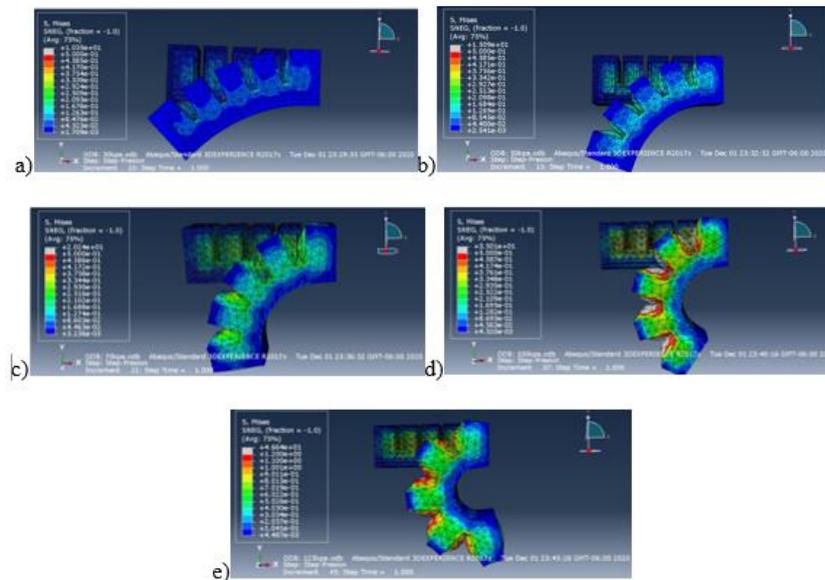


*Ilustración 22: Deformación y tensiones con 10kpa.*

Fuente: Propia (2020)

Como podemos observar 10kpa no son suficiente para poder deformar el actuador al punto en que se desea. La presión necesaria para este actuador termino siendo, mediante múltiples pruebas, de 125kpa para lograr obtener la deformación adecuada. En la siguiente

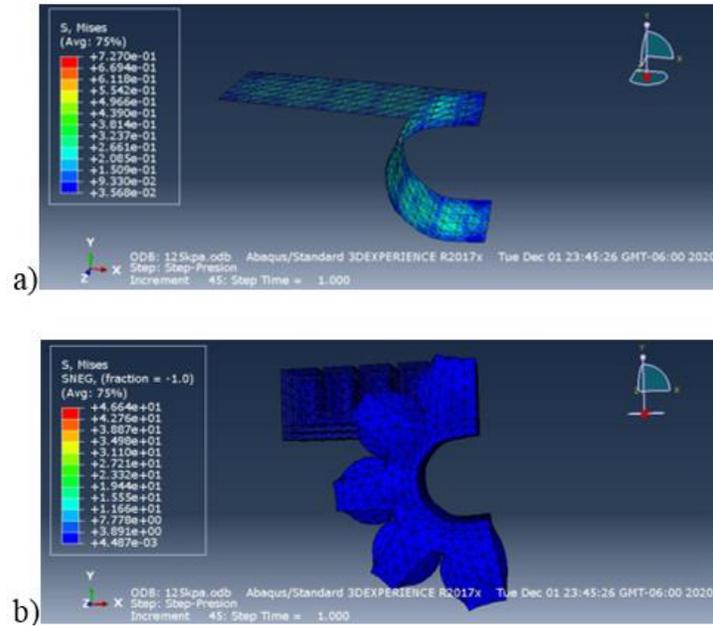
imagen se puede observar el efecto que se obtiene a dicha presión y también podemos observar sus efectos con presiones de 30kpa, 50kpa, 70kpa, 100kpa y la final de 125kpa.



*Ilustración 23: a) deformación con 30 kpa, b) deformación con 50 kpa, c) deformación con 70 kpa d), deformación con 100 kpa y e) deformación con 125 kpa*

Fuente: Propia (2020)

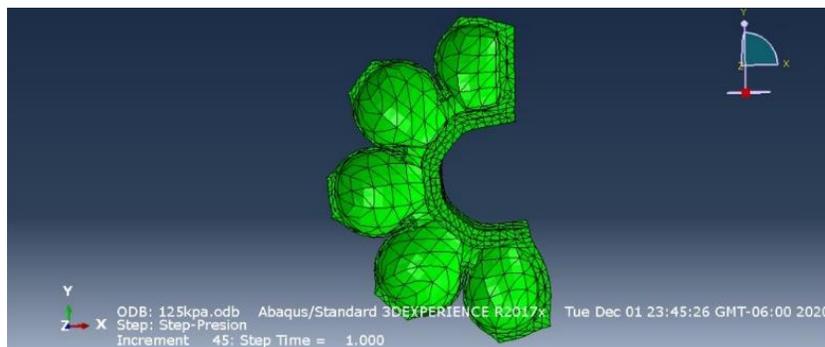
Las marcas de tensiones podemos observar que se concentran en las paredes de las recamaras, estas tienen una dimensión de 1.5mm. Estas tensiones en esas áreas no son suficientes para romper el material, se concluye con esto que la presión necesaria para deformarlo al máximo es de 125kpa y este adopta la forma que deseamos. Cabe mencionar que para obtener un deseado cambio de color en las tensiones, la escala se debió ajustar, ya que si esto no se hace, la figura aparecerá completamente azul y no se podrá apreciar el mapa de colores para las tensiones. Este se mantiene en azul ya que las mayores tensiones de todo este actuador se concentran en el papel que esta entre la parte inferior y la de las recamaras del elastómero. En la figura 24 se puede observar la deformación del papel en el actuador a una presión de 125.



*Ilustración 24: a) Vista de deformación y tensiones en el papel, b) vista del actuador sin ajuste de escala de tensión*

Fuente: Propia (2020)

Otro aspecto importante para observar dentro de nuestro modelo es en la sección interna del actuador. Como las recamaras de aire se expanden y se observan por dentro mientras reciben la presión máxima de deformación. En la figura 25 se podrá observar este efecto.

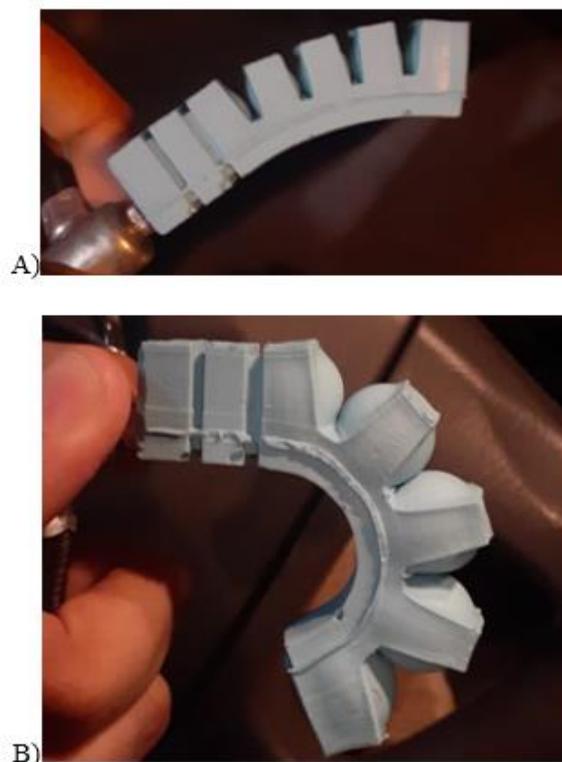


*Ilustración 25: Recamaras internas del actuador suave.*

Fuente: Propia (2020)

Como antes se mencionaba, se logra concluir con estos análisis que la morfología y la selección del material requieren una presión de 125kpa para lograr adquirir la deformación

máxima de este actuador. Los datos del material, son aproximados por ende el modelo puede no ser muy preciso, pero nos ayuda a comprender y tener una proximidad de la realidad de este comportamiento con tales fuerzas antes de su fabricación. Dicho esto el panorama es claro para su fabricación. Como consecuencia de esto en la realidad el efector final se deforma a su máximo punto con una presión de 70kpa. Este adquirió la forma demostrada en la simulación y esto se puede observar en la figura 26. En el siguiente segmento se podrá observar el circuito neumático para la alimentación de este actuador.



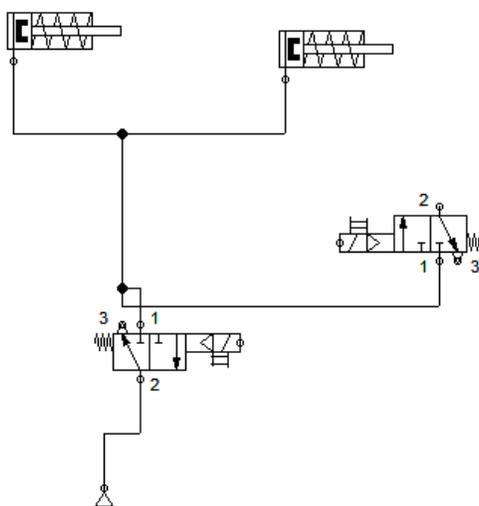
*Ilustración 26: Actuator suave, doblado parcialmente. B) Actuator suave doblado casi a su punto máximo con 70kpa.*

Fuente: Propia (2020)

## **5.5 Circuito neumático**

Los manipuladores suaves comúnmente son accionados de manera neumática. Los componentes necesarios para lograr crear y simular el circuito neumático son: una fuente de aire comprimido, que en este caso será un compresor, y válvulas operadas por solenoides. Estas elecciones son mayormente dadas para este caso debido a la accesibilidad. La función

necesaria que se busca lograr realizar en este circuito, es poder suministrar cierta cantidad de aire en el actuador hasta lograr obtener la presión necesaria dentro de las recamaras del actuador y mantener este aire dentro. El suministro de aire se debe cortar antes de que la presión sea tan grande que cause daños permanentes en el elastómero. También lograr mantener el aire dentro del actuador sin suministrárselo constantemente es de suma importancia. Otro aspecto que se toma en cuenta es la liberación del aire mantenido para que el actuador pueda volver a su forma inicial. El programa con el que se creara y simulara el circuito neumático es FESTO FluidSIM. Las válvulas a utilizar son de 3/2 pasos. El total de estas necesarias será de 2. La primera conectada al compresor será la encargada de controlar el suministro de la fuente neumática y de mantener el aire suministrado en el actuador. Luego la siguiente válvula se encargó de la liberación de la presión suministrada al actuador. Para simular los actuadores se utilizaron cilindros de simple acción ya que tienen un comportamiento similar al de los actuadores suaves. En la figura 27, se observa el circuito neumático.

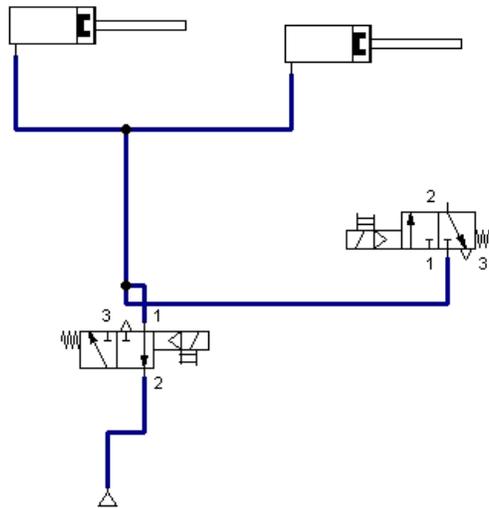


*Ilustración 27: Circuito neumático*

Fuente: Propia (2020)

En la imagen anterior se puede observar el circuito necesario para la operación de estos actuadores, los solenoides que controlan estas válvulas, serán accionados mediante la programación del robot y son controlados por timers. El funcionamiento de este circuito es

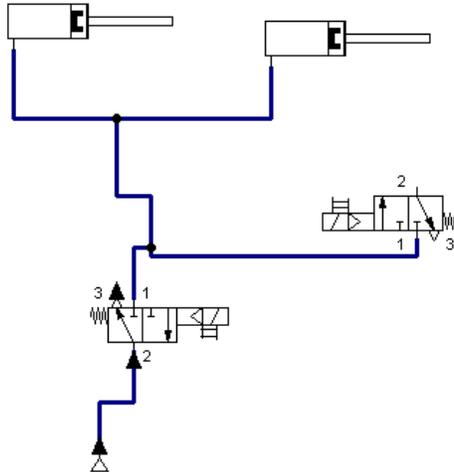
simple. En la siguiente imagen se observa cuando la válvula de suministro se abre y esto acciona los actuadores.



*Ilustración 28: Actuadores accionados con la válvula conectada directa a la fuente.*

Fuente: Propia (2020)

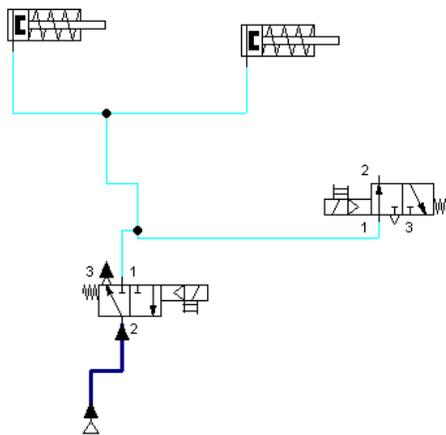
Las áreas azules en las uniones muestran donde hay aire comprimido, o mejor dicho aun, presión de aire. El siguiente pasó después de pasar el aire comprimido hacia los actuadores, que también en la imagen se observan ambos accionados, es cerrar el suministro de aire, es decir cerrar la válvula conectada a la fuente. Así esto evita que el actuador siga recibiendo aire y su presión aumente indefinidamente hasta dañarlo. Este segmento se puede observar a continuación.



*Ilustración 29: Suministro de aire comprimido cortado*

Fuente: Propia (2020)

Como se puede observar el resultado al cortar el suministro de aire, el actuador se mantiene accionado, cumpliendo así el primer requisito del éxito del circuito. Debido a las direcciones permitidas de flujo de aire en las válvulas, el aire se puede retener y liberar. El siguiente paso es liberar el aire para así poder regresar los actuadores a su punto inicial. Para este segmento se acciono la válvula conectada entre los actuadores y la válvula que está conectada en la fuente. En la siguiente figura se observa el resultado al activar esta válvula.



*Ilustración 30: Liberación de aire comprimido en los actuadores.*

Fuente: Propia (2020)

El resultado al accionar la válvula mencionada, como se observa en la figura 30, se puede ver como los actuadores retornan a su posición inicial. Completando el segundo requisito del circuito, de esta manera se obtiene un control de las deformaciones de los actuadores suaves. Estos se accionan suministrándoles aire por un muy breve momento hasta deformarlos lo suficiente y que estos puedan sostener la presión adquirida, y poder soltarla para que así estos puedan volver a su posición inicial. Su accionamiento si monitorea por el sensor de curva, que detecta cuando los actuadores se deforman. El circuito de este se observa a continuación.

## **5.5 Sistema electrónico**

El circuito diseñado para la utilización del sensor de curvatura flexible, será demostrado y simulado en este segmento. La función que se necesita de parte de este circuito es simple, lograr encender un led que indica cuando el actuador esta accionado. Esto se logra mediante el sensor de curvatura que detecto cuando los actuadores se doblan debido a la presión ejercida. Este mida la curvatura provocada en el sensor debido a la adquirida por el actuador.

El sensor flexible es capaz de moverse en ambas direcciones. La resistencia del sensor varía con la curva que este adquiere en ambas como compresión y tensión. Los valores resistivos son medidos mediante las entradas analógicas de los microcontroladores. Esto se logra por un circuito de divisor de voltaje que este, es un circuito formado por dos resistencias en serie, una es el sensor y la otra es una resistencia de 10k. Cuando aplicamos el voltaje de entrada al circuito, el voltaje se distribuye entre estas dos resistencias y produce correspondientes voltajes de salida, luego esta señal de voltaje se le da al microcontrolador y, según el programa escrito en su interior, produce una salida (Dhepekar & Adhav, 2016).

Para el caso del manipulador suave, el programa se encarga de mandar una señal digital hacia un led cuando el sensor detecte el más mínimo movimiento. Así se sabrá cuando

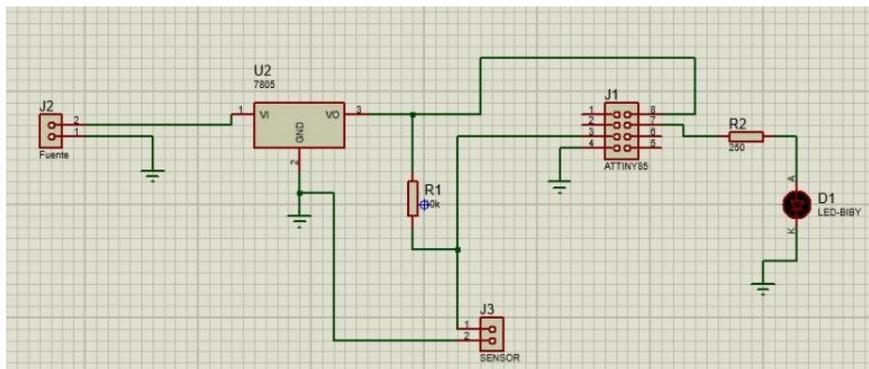
este, sin necesidad de observar directamente al robot, esta accionado. El sensor flexible tira valores resistivos con el cambio de ángulo de curvatura, en la tabla 4, se observa los valores resistivos cada 10 grados.

*Tabla 5: Valores resistivos cada 10 grados.*

Fuente: (Dhepekar & Adhav, 2016)

<b>Posición de sensor (En grado)</b>	<b>Valor resistivo en compresión (Kohm)</b>	<b>Valor resistivo en tensión (Kohm)</b>
<b>0</b>	10.5	10.4
<b>10</b>	10.4	10.5
<b>20</b>	10.3	10.6
<b>30</b>	10.1	10.8
<b>40</b>	9.8	11
<b>50</b>	9.7	11.2
<b>60</b>	9.6	11.5
<b>70</b>	9.5	11.8
<b>80</b>	9.4	12.2
<b>90</b>	9.4	12.6
<b>100</b>	9.4	14
<b>110</b>	9.4	14.6
<b>120</b>	9.3	14.9
<b>130</b>	9.3	15.5
<b>140</b>	9.3	15.8
<b>150</b>	9.3	16
<b>160</b>	9.2	16.4
<b>170</b>	9.2	16.5
<b>180</b>	9.2	16.7

El microcontrolador se encarga de leer el voltaje obtenido en la salida del divisor de voltaje entre una resistencia de 10k y la resistencia del sensor. El circuito diseñado para el control del sensor es el siguiente:



*Ilustración 31: Circuito con regulador de voltaje, sensor flexible con attiny85.*

Fuente: Propia (2020)

El circuito es alimentado mediante una fuente de 12 voltios DC y el microcontrolador ocupa 5 voltios para funcionar. Mediante un regulador de voltaje, el 7805, se logra obtener el voltaje deseado de alimentación para el microcontrolador, el sensor es conectado al pin analógico 2, que se ubica en el pin #3 y la salida digital que fue utilizada fue la numero 2, que se encuentra en el pin #7 del microcontrolador. Tal y como se observa en la imagen, se utiliza una resistencia de 250 para no quemar el led y una de 10k para crear el divisor de voltaje entre esta y el valor de la resistencia del sensor que este varia y el microcontrolador lee el voltaje adquirido en ese punto. El voltaje lo lee con la entrada analógica. Este valor se puede calcular mediante la siguiente ecuación.

$$V_{salida} = V_{Entrada} \left( \frac{R_{sensor}}{R_{sensor} + 10k} \right)$$

*Ecuación 4: Voltaje de salida en divisor de voltaje.*

Fuente: (Dhepekar & Adhav, 2016)

Debido a que las resistencias están en serie, la corriente es la misma, igualando las corrientes que pasan por la salida del regulador de voltaje, la resistencia de 10kohm y la

corriente que pasa por el sensor y directo a tierra, son una misma. De esta manera se obtiene la ecuación 4. Para el caso que el sensor que se tense a 30 grados. El voltaje que se obtiene es de 2.596. Como se observa en la figura 32.

$$V_{out} = (5V) \left( \frac{10.8k\Omega}{10k + 10.8k\Omega} \right)$$

$$V_{out} = 2.596V$$

Ilustración 32: Voltaje de salida con 30 grados de tensión en el sensor.

Fuente: Propia (2020)

El microcontrolador lee este dato y según el valor de este, arriba de los 20 grados, encenderá el led. Como podemos ver en la simulación de Proteus en la siguiente imagen.

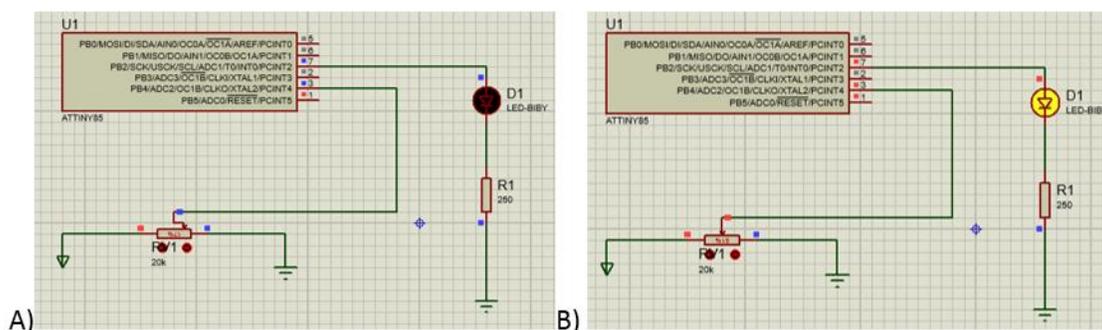


Ilustración 33: Circuito simulado en funcionamiento, a) led apagado debido a la falta de curvatura necesaria en el sensor, b) led encendido debido al valor de curvatura medido por el sensor.

Fuente: Propia (2020)

Una vez tenemos seguridad que el circuito funcione este se adaptó como en la figura 33, para poder diseñar la placa. Es importante crear un diseño lo más compacto posible, así este se vuelve más eficiente y no se desperdicia material ni espacio. La posición del sensor es de suma importancia este se coloca con una capa de elastómero en el actuador suave. La capa tiene que ser lo suficientemente gruesa para que no se rompa por el sensor y lo suficientemente delgada para no alterar su comportamiento.



*Ilustración 34: Posición del sensor.*

Fuente: Propia (2020)

Las borneras para la placa deben quedar en las esquinas de la placa dando espacio para la conexión fácil de la fuente y del sensor flexible, así mismo, esto también deja al led en una posición donde se puede notar más. El cual es un código muy simple que se puede observar en la imagen siguiente.

```
void setup() {  
  pinMode(2, OUTPUT);  
}  
  
void loop() {  
  int val = analogRead(A2);  
  
  if(val > 200){  
    digitalWrite(2,HIGH);  
  }  
  else{  
    digitalWrite(2,LOW);  
  }  
}
```

*Ilustración 35: Código del microcontrolador.*

Fuente: Propia (2020)

Lo primero que se realizó en el código es establecer el pin #2, que se utilizara como digital, como salida y este se encargara de encender el led. Luego se leerá la señal analógica del sensor y un “if” se establece la condición con la que se manada la señal digital al led.

En términos generales, se concluyó que el diseño del circuito es capaz de tener la funcionalidad adecuada, y este demuestra funcionar de manera esperada como el diseño. Cabe mencionar que el circuito es simple y compacto, lo cual sirve para ahorrar recurso y espacio. Este solo se encarga de monitorear el comportamiento del efector final. Para el control del robot se hicieron simulaciones en ACE ADEPT, que en el siguiente segmento se pueden observar.

## 5.6 Pruebas de agarre

Algunas pruebas realizadas para el agarra fueron con dos alimentos. Estos no son los más apropiados para este efector pero dicho esto, siempre logro conseguir un agarre en estos dos. El primero probado fue un huevo ya que este es pesado y delicado. Así probar que es capaz de no causar daño en el alimento y manipular algo pesado relativamente. El huevo es grande para el efector final lo que dificulta un poco la posición de este para poder manipularlo. Sin embargo en la figura 36, se observa como este fue agarrado.



*Ilustración 36: Primer agarre de un huevo.*

Fuente: Propia

Otro intento realizado en otro momento fue fotografiado en la siguiente figura. Donde se logró con éxito manipularlo también. Cabe mencionar que para el agarre de objetos con esta geometría es más conveniente una pinza de 4 dedos. Esto le da más firmeza de agarre, más seguridad y más facilidad.



*Ilustración 37: Segundo agarre de un huevo.*

Fuente: Propia (2020)

La siguiente prueba se realizó con una rodaja de pan, para poder demostrar su delicadeza al sostener objetos. Este alimento fue más fácil de manipular ya que su peso es mínimo y su tamaño también. Su geometría es más óptima para una pinza de dos dedos. En la figura 38, se observan los resultados.



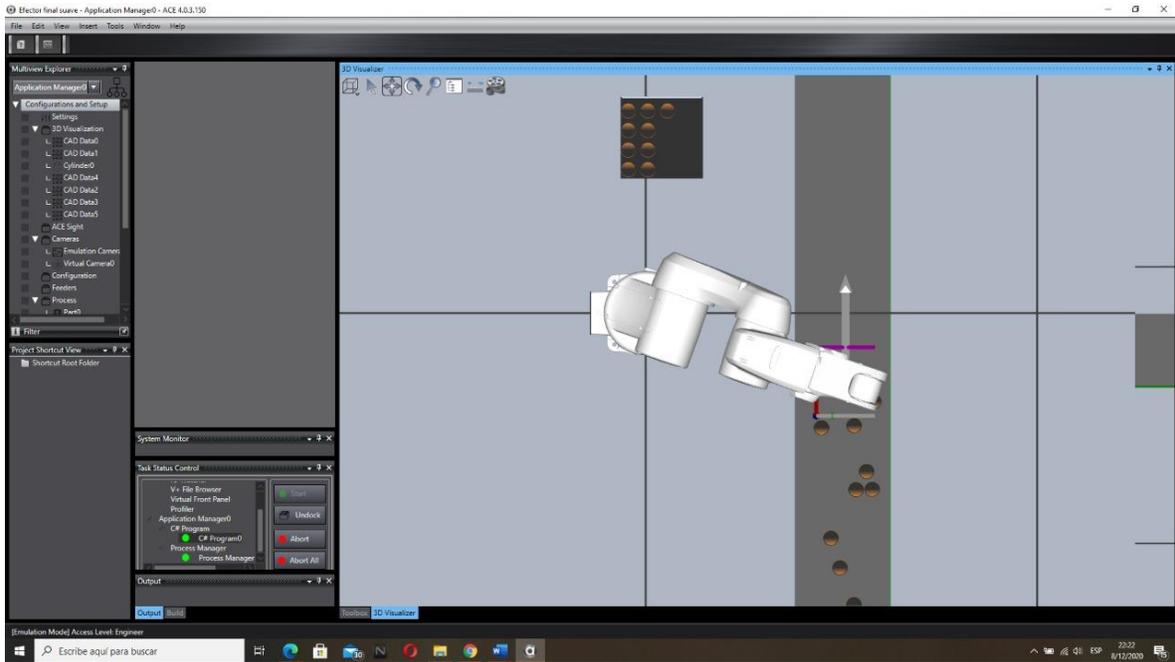
*Ilustración 38: Prueba con rodaja de pan.*

Fuente: Propia (2020)

Con esta prueba se demuestra la capacidad de incluso poder manipular emparedados en bolsa sin causarles daño. Ya que la parte más débil de estos es el pan. De esta manera se concluye que el efector final es capaz de manipular alimentos. Sin embargo, algunas dificultades se mostraron con el material. Este es muy delicado. El elastómero presenta, luego de no muchos usos, cortadas que van deteriorando el estado y llegando hasta las recamaras de aire, creando fugas. Su muy baja fuerza de corte hace que este pierda la confiabilidad. Este material es la opción más barata de los 3 y también este no requiere de una cámara de vacío para contrarrestar las numerosas burbujas que puede surgir al colocarlo en el molde. Los materiales más utilizados para la robótica suave son el ecoFlex y el Elastosil. Para el OOMOO25 no se encontró algún registro de antes haber sido utilizado en esta aplicación. Se demostró que es posible crear un efector final capaz de manipular alimentos con dicho material. Su fiabilidad será baja pero también sus costos.

## **5.7 Simulaciones en ACE**

Las simulaciones del robot Viper 650 se realizaron en el programa ACE 4.0, en donde se muestra como el robot tomo el alimento, que en este caso se diseñó un cupcake en solidworks para el muestreo y como ejemplo de alimento. Se simula el robot tomando el alimento de la banda transportadora hasta una bandeja. En la cual la cual el robot los coloca uno por uno. En la figura 39, se puede observar la bandeja y la banda de la que recoge los pasteles. Estos se simularon de manera que lleguen aleatorios en desorden y el robot los busque con una cámara y así poder manipularlos.



*Ilustración 39: Pick and place de robot viper 650, de la banda a la bandeja.*

Fuente: Propia (2020)

El tiempo en accionarse el actuador es de 0.2s, con un caudal de aire de 50,000 milímetros cúbicos. Este valor se calculó mediante el volumen de la cavidad del actuador suave, que es de  $3,205\text{mm}^3$ , y el valor del caudal. Estos divididos nos dan el tiempo obtenido con el que se llena de aire. El porcentaje de elongación del material es de 250% de volumen antes de romperse. Con este valor se estima cuando se tardaría en inflarse hasta este valor. La suma de estos nos da el tiempo total.

$$V = \frac{3,205\text{mm}^3}{50,000 \frac{\text{mm}^3}{\text{s}}} = 0.0641\text{s}$$

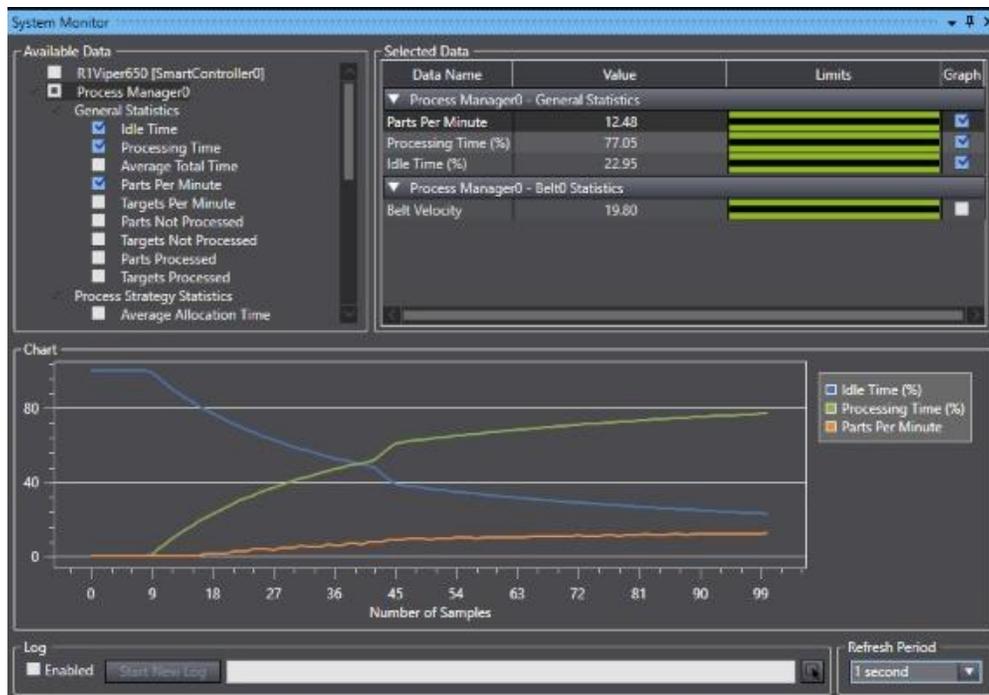
*Ecuación 5: Tiempo de llenado*

Este siendo el tiempo con el que se llena de aire la cavidad del actuador, luego se calculó el tiempo con el que se llena de aire al alongarse en un 200%. Que es sería un volumen 6,410 milímetros cúbicos.

$$V = \frac{6,410mm^3}{50,000 \frac{mm^3}{s}} = 0.1282s$$

*Ecuación 6: Tiempo de elongación de volumen*

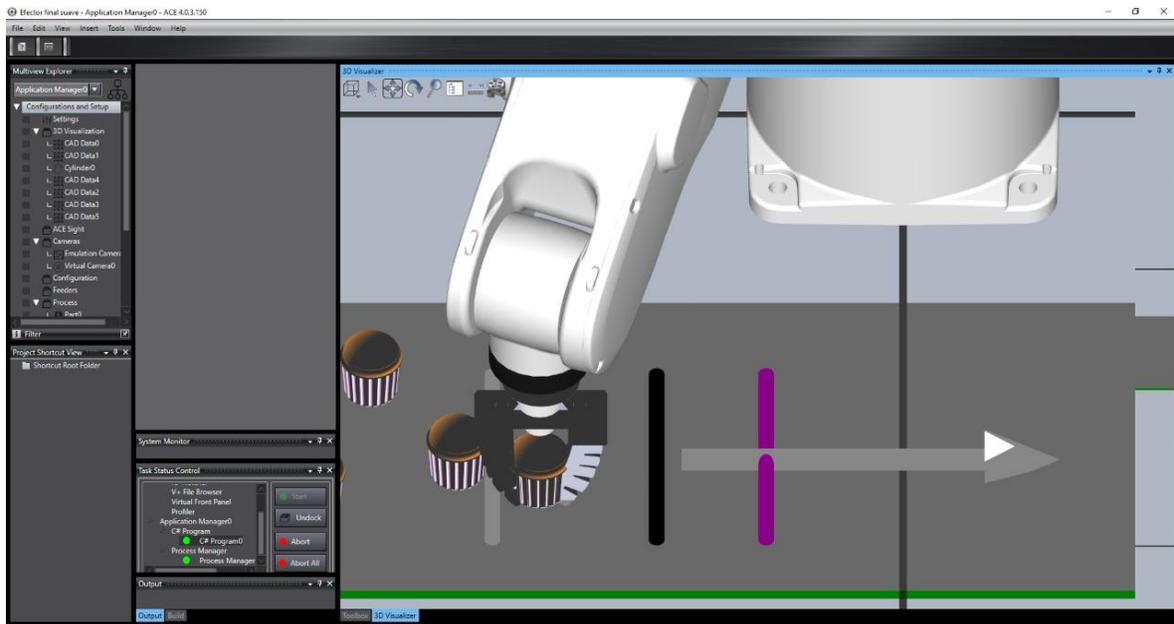
Estos dos valores sumados nos dan el tiempo total para accionar el actuador. Que este sería de 0.1923s. Con este valor obtenemos las gráficas de tiempo muerto del robot, tiempo de procesamiento y parte por minuto a manipular. Esta grafica se puede observar en la figura 40.



*Ilustración 40: Partes por minuto, tiempo muerto y tiempo procesando.*

Fuente: Propia (2020)

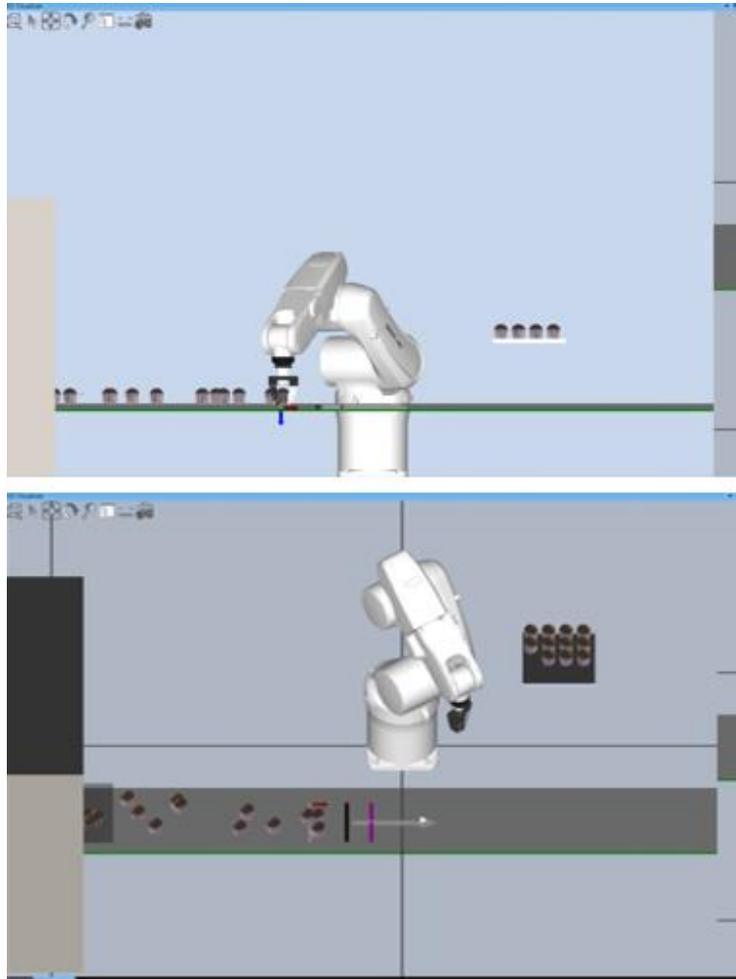
Se concluyó que se manipulan alrededor de 12 partes por minuto. Con el 77.05% del tiempo en procesamiento y un 22.95% de tiempo muerto. Se observa como en la gráfica el tiempo muerto es alto debido a que el robot está en posición de apagado antes de iniciar la secuencia. En la simulación también se puede observar como el actuador manipula los alimentos. En la figura 41 este efecto se puede observar.



*Ilustración 41: Simulación de efector final manipulando el alimento.*

Fuente: Propia (2020)

De esta manera el efector final logra sostener los alimentos al doblar los actuadores de elastómero, aplicando presión de aire. Se observan los movimientos del robot para efectuar el pick and place con éxito. Los movimientos son programados según las posiciones de la banda y la bandeja. La bandeja se encuentra un poco más elevada que la banda. El robot logra cumplir estos movimientos con éxito sin ningún problema, dejando todo en la bandeja como se observa a continuación.



*Ilustración 42: Posición de la bandeja y la banda y movimiento del robot.*

Fuente: Propia (2020)

Se concluyó que el robot logra realizar los movimientos necesarios y manipular los objetos de manera óptima. También este logra perseguir y detectar la posición de los alimentos para agarrarlos de la banda y colocarlos en la bandeja. El tiempo de procesamiento es de 77% el robot estando activo y su tiempo muerto es del 23% con una cantidad de 12 partes por minuto manipuladas.

## **VI. Conclusiones**

Al realizar el prototipo planteado se establecieron algunas ideas finales y con esto, en este segmento se exponen las conclusiones adquiridas con este dicho trabajo.

1. Entre los puntos importantes, se logró implementar la robótica suave como solución a la complicada tarea de manipular los alimentos. Esta propuesta logra causar ningún daño a estos delicados productos. Donde los materiales rígidos por exceso de fuerza causarían daños en dicho objetos. También la geometría poco definida de los alimentos es otro factor que es contrarrestado en comparación a las pinzas rígidas. Como se demostró en las pruebas del análisis y resultados.
2. Entrando en las conclusiones de fabricación de estos actuadores suaves. Para la manipulación de un objeto en específico con una geometría en específico se tendrá que analizar cuál será la configuración de la pinza más adecuada. Esto quiere decir que, la cantidad de dedos y la posición de estos varían con el objeto que se desee manipular. Objetos esféricos por ejemplo, su configuración más óptima será de 3 o más dedos ya que será más fácil para el efector final sostener la pieza que uno de solo 2 dedos de elastómero como se observó en las pruebas realizadas de este proyecto. También, la morfología de este actuador afecta drásticamente su comportamiento y su fuerza de salida como la presión requerida para accionar este actuador neumático suave. Al alterar las dimensiones y cantidad de recamaras esto hace que aumenta su fuerza de salida como, debido a que entre mayor cantidad de aire el actuador retiene este se cerrara con mayor firmeza. El proceso de fabricación a seguir es mediante el diseño de un molde, donde con este diseño se adquiere la morfología deseada. Esta morfología y la selección del material antes se prueban en programas de simulación ya que crear estos actuadores consume tiempo y esto hace útil saber su comportamiento antes de fabricarlos. Debido a que estos actuadores sufren de grandes deformaciones, en estos altos niveles su comportamiento se vuelve muy impredecible. Los materiales empleados para fabricar estos actuadores exhiben un comportamiento no lineal hiperelástico, viscoelástico complejo, lo cual al momento de simularlos es la parte más compleja ya que se requiere la curva de estrés y deformación del material para poder crear un modelo preciso. Debido a esta complejidad entre algunas de las herramientas para simular estos actuadores se

encuentra ABAQUS CAE que fue el utilizado. Estos programas para simular estos actuadores suaves utilizan el método de elemento finito.

3. Para el material seleccionado, se concluyó que es posible crear actuadores suaves con el OOMOO25, siendo una alternativa más barata, sin embargo este tiene ciertas desventajas y no sería muy recomendado hacerlo ya que su resistencia a las fuerzas cortantes es muy baja. El material después de doblarse numerosas veces se comienza a cortar por las esquinas y todo esto debido a su débil habilidad de soportar los cortes. Este tiene una expansión muy buena siendo del 250% de su volumen. Con la morfología que se diseñó y el elastómero seleccionado este se accionaba completamente con una presión de alrededor de 70 a 80 psi, con lo cual logro manipular un peso máximo de 63 gramos (un huevo). Cabe mencionar que entre las demás opciones más comúnmente utilizadas está el Ecoflex30 y el Elastosil. Que son un poco más costosos y difíciles de conseguir en Honduras, pero estos tienen una mayor resistencia de desgarramiento y corte.
4. Los sensores al seleccionarlos para este tipo de efector final tienen que ser los más flexibles y poco rígidos posibles. Ya que las partes rígidas pueden cortar el elastómero y así dañar nuestro efector final. Volviendo con los problemas del elastómero seleccionado el OOMOO25, ya que su resistencia al corte es muy baja, incluso nuestro sensor de curvatura flexible logra dañar un poco el actuador suave. Lo vuelve muy propenso al daño provocado por este sensor. Sin embargo el sensor prueba cumplir su función para esta complicada aplicación. Elastómeros más resistentes lograrán contrarrestar este percance. Sin embargo al aplicar una capa más gruesa para cubrir el sensor en el actuador neumático suave este efecto es mucho menor.

## **VII. Recomendación**

La configuración de la pinza para cada objeto a manipular se puede alterar. Se puede agregar un tercer dedo o incluso más para poder tener un mejor agarre de objetos.

Esto cambiara el diseño del housing pero puede mejorar considerablemente el agarre para algunos objetos en específicos por la variación de geometría de estos. La posición de estos dedos también se puede alterar a conveniencia según el objeto a manipular.

## Bibliografía

Aras, M. S. M., Aripin, M. K., Azmi, M. W. N., Khamis, A., Zambri, M. K. M., & Halim, M. F. M. A. (2017). 3DOF small scale underwater manipulator—Gripper for unmanned underwater vehicle. *2017 IEEE 7th International Conference on Underwater System Technology: Theory and Applications (USYS)*, 1-4.

<https://doi.org/10.1109/USYS.2017.8309437>

B. Wan Mohd Raziff, W. M. A., Sam, R., Masrie, M., & Janin, Z. (2018). Design and Simulation of Pick and Place System Using Solidworks Simulation. *2018 IEEE 5th International Conference on Smart Instrumentation, Measurement and Application (ICSIMA)*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/ICSIMA.2018.8688800>

Bader, F., & Rahimifard, S. (2018). Challenges for Industrial Robot Applications in Food Manufacturing. *Proceedings of the 2nd International Symposium on Computer Science and Intelligent Control - ISCSIC '18*, 1-8. <https://doi.org/10.1145/3284557.3284723>

Ballard, L., Sabanovic, S., Kaur, J., & Milojevic, S. (2012). George Charles Devol, Jr. [History]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 19(3), 114-119.

<https://doi.org/10.1109/MRA.2012.2206672>

Barrett, E., Reiling, M., Fumagalli, M., & Carloni, R. (2016). The SHERPA gripper: Grasping of small-scale UAVs. *2016 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR)*, 384-389. <https://doi.org/10.1109/SSRR.2016.7784331>

Bassi, L. (2017). Industry 4.0: Hope, hype or revolution? *2017 IEEE 3rd International Forum on Research and Technologies for Society and Industry (RTSI)*, 1-6.

<https://doi.org/10.1109/RTSI.2017.8065927>

Birglen, L., & Schlicht, T. (2018). A statistical review of industrial robotic grippers. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 49, 88-97.

<https://doi.org/10.1016/j.rcim.2017.05.007>

Borisov, I. I., Borisov, O. I., Gromov, V. S., Vlasov, S. M., & Kolyubin, S. A. (2018). Versatile Gripper as Key Part For Smart Factory. *2018 IEEE Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS)*, 476-481. <https://doi.org/10.1109/ICPHYS.2018.8390751>

Chirita, I., Tanase, N., Apostol, S. E., Ilie, C., & Popa, M. (2017). Design optimization of a flywheel using solidworks modeling and simulation capabilities. *2017 International Conference on ENERGY and ENVIRONMENT (CIEM)*, 344-348.

<https://doi.org/10.1109/CIEM.2017.8120858>

- Choi, M.-S., Lee, D.-H., Park, H., Kim, Y.-J., Jang, G.-R., Shin, Y.-D., Park, J.-H., Baeg, M.-H., & Bae, J.-H. (2017). Development of multi-purpose universal gripper. *2017 56th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE)*, 1421-1424. <https://doi.org/10.23919/SICE.2017.8105739>
- Christian Wurrll. (2016). *Mixed Case Palletizing with Industrial Robots*. <https://scihub.do/10.0000/ieeexplore.ieee.org/7559186>
- Coronel-Escamilla, A., Torres, F., Gómez-Aguilar, J. F., Escobar-Jiménez, R. F., & Guerrero-Ramírez, G. V. (2018). On the trajectory tracking control for an SCARA robot manipulator in a fractional model driven by induction motors with PSO tuning. *Multibody System Dynamics*, 43(3), 257-277. <https://doi.org/10.1007/s11044-017-9586-3>
- Dhepekar, P., & Adhav, Y. G. (2016). Wireless robotic hand for remote operations using flex sensor. *2016 International Conference on Automatic Control and Dynamic Optimization Techniques (ICACDOT)*, 114-118. <https://doi.org/10.1109/ICACDOT.2016.7877562>
- Galloway, K. C., Becker, K. P., Phillips, B., Kirby, J., Licht, S., Tchernov, D., Wood, R. J., & Gruber, D. F. (2016). Soft Robotic Grippers for Biological Sampling on Deep Reefs. *Soft Robotics*, 3(1), 23-33. <https://doi.org/10.1089/soro.2015.0019>
- Ghosh, S., Yadav, A., Sharma, S., Urooj, S., & Bhadoria, V. S. (2016). Computational analysis of composite layered structure using ABAQUS software for engineering applications. *2016 International Conference on Innovation and Challenges in Cyber Security (ICICCS-INBUSH)*, 236-239. <https://doi.org/10.1109/ICICCS.2016.7542310>
- Gorissen, B., Reynaerts, D., Konishi, S., Yoshida, K., Kim, J.-W., & Volder, M. D. (2017). Elastic Inflatable Actuators for Soft Robotic Applications. *Advanced Materials*, 29(43), 1604977. <https://doi.org/10.1002/adma.201604977>
- Guo, J., Sun, Y., Liang, X., Low, J.-H., Wong, Y.-R., Tay, V. S.-C., & Yeow, C.-H. (2017). Design and fabrication of a pneumatic soft robotic gripper for delicate surgical manipulation. *2017 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, 1069-1074. <https://doi.org/10.1109/ICMA.2017.8015965>
- Hughes, J., Culha, U., Giardina, F., Guenther, F., Rosendo, A., & Iida, F. (2016). Soft Manipulators and Grippers: A Review. *Frontiers in Robotics and AI*, 3. <https://doi.org/10.3389/frobt.2016.00069>
- Iqbal, J., Islam, R. U., Abbas, S. Z., Khan, A. A., & Ajwad, S. A. (2016). Automating industrial tasks through mechatronic systems – a review of robotics in industrial perspective. *Tehnički Vjesnik*, 23(3), 917-924. <https://doi.org/10.17559/TV-20140724220401>
- IQBAL, J., KHAN, Z. H., & KHALID, A. (2017). Prospects of robotics in food industry. *Food Science and Technology*, 37, 159-165.

- Lamon, E., Leonori, M., Kim, W., & Ajoudani, A. (2020). Towards an Intelligent Collaborative Robotic System for Mixed Case Palletizing. *2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 9128-9134. <https://doi.org/10.1109/ICRA40945.2020.9196850>
- Liu, S., Wang, F., Zhang, G., Tian, Y., & Zhang, D. (2019). A Novel Soft-Robotic Gripper with Vertically Plane Contact of the Object. *2019 IEEE 9th Annual International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER)*, 1381-1385. <https://doi.org/10.1109/CYBER46603.2019.9066461>
- Mahalik, N. P., & Nambiar, A. N. (2010). Trends in food packaging and manufacturing systems and technology. *Trends in Food Science & Technology*, *21*(3), 117-128. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2009.12.006>
- Minsch, N., Nosrat-Nezami, F., Gereke, T., & Cherif, C. (2016). Review on Recent Composite Gripper Concepts for Automotive Manufacturing. *Procedia CIRP*, *50*, 678-682. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.04.175>
- Mosadegh, B., Polygerinos, P., Keplinger, C., Wennstedt, S., Shepherd, R. F., Gupta, U., Shim, J., Bertoldi, K., Walsh, C. J., & Whitesides, G. M. (2014). Pneumatic Networks for Soft Robotics that Actuate Rapidly. *Advanced Functional Materials*, *24*(15), 2163-2170. <https://doi.org/10.1002/adfm.201303288>
- Moussa, O. A., Mira, M. A., Fahmy, A. H., Morgan, E. I., & Shehata, O. M. (2019). Behavioral Assessment of Various Control Laws Formulations for Position Tracking of Multi-sectioning Modeled Continuum Robots. *2019 7th International Conference on Control, Mechatronics and Automation (ICCMA)*, 191-196. <https://doi.org/10.1109/ICCMA46720.2019.8988780>
- Mura, D., Barbarossa, M., Dinuzzi, G., Grioli, G., Caiti, A., & Catalano, M. G. (2018). A Soft Modular End Effector for Underwater Manipulation: A Gentle, Adaptable Grasp for the Ocean Depths. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, *25*(4), 45-56. <https://doi.org/10.1109/MRA.2018.2871350>
- Noor Hasnan, N. Z., & Yusoff, Y. Md. (2018). Short review: Application Areas of Industry 4.0 Technologies in Food Processing Sector. *2018 IEEE Student Conference on Research and Development (SCORED)*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/SCORED.2018.8711184>
- Onal, C. D., Chen, X., Whitesides, G. M., & Rus, D. (2017). Soft Mobile Robots with On-Board Chemical Pressure Generation. In H. I. Christensen & O. Khatib (Eds.), *Robotics Research* (Vol. 100, pp. 525-540). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-29363-9\\_30](https://doi.org/10.1007/978-3-319-29363-9_30)
- Ranzani, T., Cianchetti, M., Gerboni, G., Falco, I. D., & Menciassi, A. (2016). A Soft Modular Manipulator for Minimally Invasive Surgery: Design and Characterization of a Single Module. *IEEE Transactions on Robotics*, *32*(1), 187-200. <https://doi.org/10.1109/TRO.2015.2507160>

- Ruiz, R. (2018, abril 5). Robot Grippers: Types and Applications in the Industry. *Ennomotive*. <https://www.ennomotive.com/robot-grippers-industrial-applications/>
- Rüttimann, B., & Stöckli, M. (2016). Lean and Industry 4.0—Twins, Partners, or Contenders? A Due Clarification Regarding the Supposed Clash of Two Production Systems. *Journal of Service Science and Management*, *09*, 485-500. <https://doi.org/10.4236/jssm.2016.96051>
- Salem, M. E. M., Wang, Q., Wen, R., & Xiang, M. (2018). Design and Characterization of Soft Pneumatic Actuator for Universal Robot Gripper. *2018 International Conference on Control and Robots (ICCR)*, 6-10. <https://doi.org/10.1109/ICCR.2018.8534483>
- Samadikhoshkho, Z., Zareinia, K., & Janabi-Sharifi, F. (2019). A Brief Review on Robotic Grippers Classifications. *2019 IEEE Canadian Conference of Electrical and Computer Engineering (CCECE)*, 1-4. <https://doi.org/10.1109/CCECE.2019.8861780>
- Shintake, J., Cacucciolo, V., Floreano, D., & Shea, H. (2018). Soft Robotic Grippers. *Advanced Materials*, *30*(29), 1707035. <https://doi.org/10.1002/adma.201707035>
- Stefan Schrauf, & Philipp Bertram. (2016). *Industry 4.0: How digitization makes the supply chain more efficient, agile, and customer-focused*. PwC. <https://www.strategyand.pwc.com/gx/en/insights/2016/digitization-more-efficient.html>
- Sun, D.-W. (2016). *Computer Vision Technology for Food Quality Evaluation*. Academic Press.
- Thanh, V. N., Vinh, D. P., Nghi, N. T., Nam, L. H., & Toan, D. L. H. (2019). Restaurant Serving Robot with Double Line Sensors Following Approach. *2019 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, 235-239. <https://doi.org/10.1109/ICMA.2019.8816404>
- Ullah, M., Ajwad, S., Irfan, M., & Iqbal, J. (2016). Non-linear Control Law for Articulated Serial Manipulators: Simulation Augmented with Hardware Implementation. *Elektronika ir Elektrotechnika*, *22*. <https://doi.org/10.5755/j01.eee.22.1.14094>
- Wan, Y., Stombaugh, T. S., & Wang, N. (2014). Human-subject tracking and localization for a hand hygiene monitoring system. *2014 Ubiquitous Positioning Indoor Navigation and Location Based Service (UPINLBS)*, 128-132. <https://doi.org/10.1109/UPINLBS.2014.7033719>
- Wang, L., Nurzaman, S. G., & Iida, F. (2017). Soft-Material Robotics. *Foundations and Trends in Robotics*, *5*(3), 191-259. <https://doi.org/10.1561/23000000055>
- Wang, Z., & Hirai, S. (2018). A Soft Gripper with Adjustable Stiffness and Variable Working Length for Handling Food Material. *2018 IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics (RCAR)*, 25-29. <https://doi.org/10.1109/RCAR.2018.8621676>

- Wolf, A., Steinmann, R., & Schunk, H. (2005). *Grippers in Motion: The Fascination of Automated Handling Tasks*. Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/3-540-27718-8>
- Wurll, C. (2016). Mixed Case Palletizing with Industrial Robots. *Proceedings of ISR 2016: 47st International Symposium on Robotics*, 1-6.
- Xiang, Z., Hongwei, L., Bingxiao, D., Lu, C., Xiaoqian, C., & Yiyong, H. (2019). Design and experimental validation of a cable-driven continuum manipulator and soft gripper. *2019 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, 1965-1968. <https://doi.org/10.1109/ROBIO49542.2019.8961502>
- Yamanaka, Y., & Yoshikawa, M. (2020). A Prosthetic Gripper with Three Opposing Fingers Driven by a Hydraulic Actuator. *2020 42nd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC)*, 4947-4950. <https://doi.org/10.1109/EMBC44109.2020.9175945>
- Zhang, J., Zhou, J., Yuan, S., & Jing, C. (2019). Design, Fabrication and Experiments of a 3D-motion Soft Elastomer Actuator. *2019 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, 497-501. <https://doi.org/10.1109/ICMA.2019.8816517>
- Zhu, M., Wang, Z., Hirai, S., & Kawamura, S. (2017). Design and fabrication of a soft-bodied gripper with integrated curvature sensors. *2017 24th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice (M2VIP)*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/M2VIP.2017.8211521>





