



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

**PROGRAMA DE DOCTORADO EN AUTOMÁTICA,
ROBÓTICA E INFORMÁTICA INDUSTRIAL**

**Garras con Sensores Táctiles Intrínsecos para
Manipular Alimentos con Robots**

TESIS DOCTORAL PRESENTADA POR

Carlos Blanes Campos

DIRECTOR.

Dr. Martín Mellado Arteché.

Instituto de Automática e Informática Industrial

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática.

Valencia, Junio 2016.

Agradecimientos

A pesar de que una tesis es un reconocimiento a una persona sobre una investigación de carácter original el éxito de esta contribución se debe a un esfuerzo de un trabajo en equipo. El enfoque multidisciplinar de esta tesis hace que no haya sido fácil profundizar en determinadas áreas de conocimiento y por eso el trabajo en equipo con personas de diversas disciplinas ha sido imprescindible.

En este equipo hay gente con la que he trabajado muy estrechamente y que son mis compañeros más directos de trabajo. Destaco el incansable y constante Pablo Beltrán y el gran apoyo de mis compañeros de electrónica Miguel Albero y Miguel Ángel Martínez siempre resolviendo dudas y planteando alternativas. Tengo claro que sin el apoyo y la oportunidad de Martín Mellado no habría podido disponer de los medios, tiempo y conocimiento para poder realizar esta tesis. En el área de alimentos están Victoria Cortes y Pau Talens siempre con gran disposición para hacer nuevas pruebas y experimentos, en agricultura María Coral Ortiz perseverante siempre con propuestas nuevas. Evidentemente hay mucha más gente que me dejó en el tintero pero que sin ellos difícilmente habría conseguido esta tesis.

Y claro mi familia que siempre está ahí con su apoyo para lo que necesite. Gracias a mis padres por haberme permitido estudiar. Mis estudios y logros son el resultado de vuestro apoyo.

Resumen

La manipulación primaria de alimentos con robots precisa del desarrollo de nuevos sistemas de manipulación especialmente cuando los productos son sensibles al daño y presentan una amplia variabilidad de formas y texturas. En el sector agroalimentario las dificultades son aún mayores ya que la manipulación manual sirve además para inspeccionar los productos durante el proceso. Esta tesis aporta soluciones a estos problemas facilitando la incorporación de la robótica.

En la tesis se recopilan y analizan diversas soluciones para poder manipular alimentos proponiendo soluciones concretas que luego son validadas con prototipos. La investigación se centra en aquellos sistemas que son capaces de auto adaptarse a las formas de los productos sin incrementar la complejidad del mecanismo. Tras analizar diversas técnicas se propone el uso de mecanismos infra-actuados, mecanismos flexibles y dedos con fluidos granulares que, al estar encerrados dentro de una membrana, se comportan como cuasi-líquidos o cuasi-sólidos gracias a la transición *jamming*, permitiendo un agarre inicial suave y la posibilidad de transmitir esfuerzos elevados durante los movimientos del robot.

En la búsqueda de garras más ligeras, sencillas, flexibles y económicas se aprovecha la oportunidad que brinda la tecnología de fabricación aditiva de material. Gracias a este proceso se fabrican mecanismos flexibles realizados en una única pieza y que equivalen a mecanismos de garras realizados con varias piezas rígidas unidos por articulaciones. Mediante el sinterizado por láser, se fabrican actuadores neumáticos, con diversos tipos de movimiento, basados en la flexibilidad del material empleado en su fabricación. En conjunto se simplifican los sistemas llegando a realizar garras flexibles de varios dedos fabricadas en una única pieza.

Para evaluar la calidad y frescura de los productos agroalimentarios durante el agarre se emplean acelerómetros localizados en los dedos de varias garras. Los acelerómetros son económicos y se comportan como sensores táctiles intrínsecos, están fuera del contacto directo con el producto evitando desgastes por contacto y permiten identificar las distintas fases de agarre. Para lograr esto se desarrolla un proceso específico del robot con la garra, que palpa varias veces el producto. Se fabrican diversos tipos de garra con distintas tecnologías de mecanismos infra-actuados y sistemas *jamming* y se programa un algoritmo original de procesado de señal que con diversas técnicas es capaz de extraer parámetros de los acelerómetros que sirven para evaluar la calidad de los productos. Estos parámetros son correlacionados con los datos de ensayos destructivos que son habitualmente empleados como referencia. Las mejores capacidades se consiguen empleando garras con *jamming* lográndose coeficientes de correlación de 0.937 en índices de madurez con mangos y 0.872 en firmeza de berenjenas.

Resum

La manipulació primària d'aliments amb robots precisa del desenvolupament de nous sistemes de manipulació especialment quan els productes són sensibles al dany i presenten una àmplia variabilitat de formes i textures. En el sector agroalimentari les dificultats són encara més grans ja que la manipulació manual serveix a més per a inspeccionar els productes durant el procés. Aquesta tesi aporta solucions a aquests problemes facilitant la incorporació de la robòtica.

En la tesi es recopilen i analitzen diverses solucions per a poder manipular aliments proposant solucions concretes que després són validades amb prototips. La investigació es centra en aquells sistemes que són capaços d'auto adaptar-se a la forma dels productes sense incrementar la complexitat del mecanisme. Després d'analitzar diverses tècniques es proposa l'ús de mecanismes infra-actuats, mecanismes flexibles i dits amb fluids granulars que, tancats dins d'una membrana, es comporten com quasi-líquids o quasi-sòlids gràcies a la transició *jamming*, permetent una pressió inicial suau i la possibilitat de transmetre esforços elevats durant els moviments del robot.

En la recerca d'urpes més lleugeres, senzilles, flexibles i econòmiques s'aprofita l'oportunitat que brinda la tecnologia de fabricació additiva de material. Gràcies a aquest procés es fabriquen mecanismes flexibles realitzats en una única peça i que equivalen a mecanismes d'urpes realitzats amb diverses peces rígides unides per articulacions. Mitjançant el sinteritzat per làser, es fabriquen actuadors pneumàtics, amb diversos tipus de moviment, basats en la flexibilitat del material emprat en la seva fabricació. En conjunt es simplifiquen els sistemes arribant a realitzar urpes flexibles de diversos dits fabricades en una única peça.

Per a avaluar la qualitat i frescor dels productes agroalimentaris durant la manipulació s'empen acceleròmetres localitzats en els dits de diverses urpes. Els acceleròmetres són econòmics i es comporten com a sensors tàctils intrínsecs, sense estar en contacte directe amb el producte evitant desgast per aquest motiu, i permeten identificar les diferents fases d'pressió. Per aconseguir això es desenvolupa un procés específic del robot amb l'urpa, que palpa diverses vegades el producte. Es fabriquen diversos tipus d'urpa amb diferents tecnologies de mecanismes infra-actuats i sistemes *jamming* i es programa un algoritme original de processat de senyal que, amb diverses tècniques, és capaç d'extreure paràmetres dels acceleròmetres que serveixen per a avaluar la qualitat dels productes. Aquests paràmetres són correlacionats amb les dades d'assajos destructius que són habitualment emprats com a referència. Les millors capacitats s'aconsegueixen emprant urpes amb *jamming* assolint-se coeficients de correlació de 0,937 en índexs de maduresa amb mangos i 0,872 en fermesa d'albergínies.

Abstract

The primary handling of food with robots calls for the development of new manipulation devices, especially when products are easily damaged and have a wide range of shapes and textures. These difficulties are even greater in the agricultural industry because the quality of the products is also checked during the manual handling process. This PhD dissertation provides solutions to these issues and helps to further introduce robotics into the handling of food.

Several methods for handling food are included and analyzed, and specific solutions are proposed and then validated with prototypes. The research focuses on devices capable of adapting themselves to the shapes of the products without increasing the complexity of the mechanism. After analyzing several different solutions, the method chosen involves the use of under-actuated mechanisms, compliant mechanisms and fingers with pads filled with granular fluids. These fluids can behave as quasi-liquids or quasi-solids due to the jamming transition, which provides a soft initial grasp and can support high stresses during fast movements performed by the robot.

The additive manufacturing process provides an opportunity to develop robot grippers that are lighter, simpler, more flexible and cheaper. By using this process, elastic mechanisms are manufactured in a single part, which are equivalent to mechanisms with several rigid parts connected by joints. Laser sintering is employed to produce pneumatic actuators, with different types of motions, based on the elastic properties of the materials used in this manufacturing process. As a result, the systems can be simplified to achieve grippers, with several fingers, that are produced as a single part.

In order to estimate the freshness and quality of agricultural products while they are being grasped, accelerometers are added to the fingers of several grippers. Accelerometers are economical and act as intrinsic tactile sensors. They can be easily embedded, thereby reducing the risk of getting damaged due to contact with the product, and allow each of the grasping phases to be identified. To achieve good performance of the accelerometers, a specific process is defined for the robot gripper, which touches the products a few times. In addition, several gripper prototypes are manufactured with diverse under-actuated mechanisms, jamming systems, and a new program that processes the signals from the accelerometers using different procedures in order to obtain parameters that can be used to estimate the quality of products. These parameters are correlated with data from destructive tests that are commonly used as a reference. The best performance of the accelerometers is achieved when the finger employs a granular fluid, a correlation coefficient of 0.937 being accomplished for the ripeness of mangoes and 0.872 for the firmness of eggplants.

Índice

Capítulo 1	Introducción.....	1
1.1.	Contexto	1
1.2.	La investigación en manipulación y sensores.....	3
1.3.	Entorno de trabajo y aportaciones científicas.....	5
1.4.	Resumen de aportaciones	8
1.5.	Objetivos y estructura de la tesis.....	9
Capítulo 2	Estado del arte de la manipulación robótica en agroalimentación..	12
2.1.	Situación actual del sector de alimentación y bebidas	13
2.2.	La robótica en la alimentación y en la industria agroalimentaria.....	14
2.2.1.	Procesos susceptibles de automatizarse con robots en la industria agroalimentaria.....	15
2.2.2.	Oportunidades y dificultades para el uso de la robótica en el sector alimentario	17
2.3.	Manipulación.....	18
2.4.	Manipulación robótica de alimentos	18
2.5.	Clasificación de técnicas de manipulación.....	21
2.5.1.	Estrategias basadas en el aire	25
2.5.2.	Estrategias basadas en el contacto.....	26
2.5.3.	Otras estrategias	31
2.5.4.	Mejora en la adaptación a los productos por medio de “jamming”	33
2.6.	Discusión y conclusiones	35
Capítulo 3	Nuevas garras flexibles y autoadaptables a los alimentos.....	37
3.1.	Introducción	37

3.2.	Beneficios de la fabricación aditiva en garras para manipular productos agroalimentarios	38
3.3.	Fabricación aditiva de actuadores neumáticos.....	40
3.3.1.	Clasificación de los actuadores según el tipo de movimiento	41
3.3.2.	Actuadores con movimiento lineal.....	41
3.3.3.	Actuadores con movimiento de rotación y lineal	42
3.3.4.	Actuador de doble efecto.....	44
3.3.5.	Fabricación aditiva de material para mecanismos flexibles	46
3.3.6.	Garras neumáticas producidas por fabricación aditiva de material	48
3.4.	Discusión	55
3.5.	Conclusiones.....	57
Capítulo 4	Aplicación de los acelerómetros como sensores táctiles intrínsecos en garras.....	59
4.1.	Introducción.....	59
4.2.	Estudio de las posibilidades de los acelerómetros en una garra neumática ..	62
4.2.1.	Descripción de la garra, componentes y proceso	62
4.2.2.	Caracterización de las fases de agarre	66
4.2.3.	Monitorización de los dedos de la garra.....	67
4.2.4.	Caracterización de la presión neumática	69
4.2.5.	Estudio de la señal de deceleración durante el agarre de cilindros con distintas durezas	69
4.2.6.	Estudio de la señal de deceleración durante el agarre de cilindros de goma con distintas durezas.....	77
4.3.	Estudio de la garra con un fruto electrónico	93
4.4.	Discusión	95
4.5.	Conclusiones.....	98
Capítulo 5	Estimación de propiedades de productos agroalimentarios en garras para robot	99
5.1.	Introducción.....	99
5.2.	Descripción general de las garras utilizadas y metodología empleada.....	101
5.2.1.	Operativa robot.....	102
5.2.2.	Sincronización entre el robot, la garra y los dispositivos	103

5.2.3.	Procesado de señales.....	104
5.3.	Garra experimental para berenjenas	105
5.3.1.	Primer caso: garra sin jamming	106
5.3.2.	Segundo caso: garra con jamming	111
5.3.3.	Resultados y discusión	118
5.4.	Garra experimental para mango	120
5.4.1.	Adaptación de la garra a los mangos.....	121
5.4.2.	Garra diseñada para manipular mangos	124
5.4.1.	Procesado de las señales de los acelerómetros.....	130
5.5.	Comparativa entre los distintos modelos de garra.....	143
5.5.1.	Procedimiento empleado y resultados.....	144
5.5.2.	Discusión.....	145
5.6.	Conclusiones	147
Capítulo 6	Conclusiones	149
6.1.	Principales contribuciones.....	150
6.2.	Publicaciones resultado de la tesis	151
6.3.	Nuevas acciones y propuestas futuras	153
Bibliografía	155

Capítulo 1

Introducción

1.1. Contexto

Los consumidores demandan cada vez más productos agroalimentarios frescos, seguros, con mayor calidad y en distintos formatos de presentación. Están más sensibilizados con la frescura de los productos y quieren saber los principales parámetros de calidad de los productos que consumen, esto fomenta actividades de investigación que desarrollen métodos que suministren esa información (Butz et al. 2005). Se hace necesario asegurar la calidad de los productos durante los procesos poscosecha (Kader 2001).

La automatización con robots en la industria agroalimentaria ofrece claros beneficios que permiten reducir costes, aumentar la higiene del proceso, incrementar la eficiencia de los recursos empleados y adaptarse a la demanda y a los distintos formatos del mercado. La robótica en el sector alimentario tiene una clara oportunidad de desarrollo en el empaquetado primario, o de manipulación directa de productos en crudo, de productos agroalimentarios (Wilson 2010; Kondo 2010; Davey 1999; Bogue 2009; Kusuda 2010). El uso de robots con la ventaja del contacto directo con el producto puede permitir la posibilidad de incorporar sensores capaces de evaluar parámetros de calidad en frutas y verduras como puede ser la firmeza. La automatización y la robótica están ya presentes en algunas operaciones de la industria alimentaria (Ruiz-Altisent et al. 2010; Chua et al. 2003; Kusuda 2010), en el área de pastelería y dulces (Wallin 1997; Tallian & Weinstein 1998), carne (Holmes 2010; Zhou et al. 2007), y pescado (Buckingham et al. 1996), quedando mucho trabajo por hacer en el sector agroalimentario, especialmente en el caso de productos delicados en los que la manipulación manual es mayoritaria y aún no se han podido llevar con éxito la manipulación directa del producto con robots. Las soluciones a los problemas de mecanización agrícola con robots son de carácter multidisciplinario. Cada solución desarrollada está especializada debido a la naturaleza única del sistema. Las soluciones

más viables pasan por la realización de esfuerzos multidisciplinares entre ingenieros y expertos en horticultura (Flood et al. 2005). En el empaquetado primario de productos agroalimentarios se emplea principalmente la manipulación manual debido a la destreza con la que la mano humana es capaz de manipular productos de formas distintas, con cuidado, a alta velocidad y al mismo tiempo clasificarlos según su respuesta táctil. Mecánicamente hablando, la destreza de la mano humana es referencia de las posibilidades potenciales que se pueden alcanzar en un sistema de manipulación. En el aspecto sensorial las manos disponen de una amplia variedad de sensores táctiles cuya rapidez de respuesta, procesamiento, integración mecánica y robustez siguen siendo aún un umbral difícil de alcanzar con los sensores táctiles actuales. Aunque es posible conseguir sistemas de agarre más precisos, rápidos o fuertes y con sensores de alta precisión para determinados parámetros específicos aún no se ha conseguido llegar a sistemas capaces de poder compararse con la destreza humana y su capacidad táctil. Además de la destreza la capacidad de control, su número de grados de libertad y la cantidad de sensores están muy por encima de la tecnología actual. A estas cualidades se une la capacidad motora y habilidad del cuerpo humano que en su conjunto pueden realizar multitud de tareas. Los robots y sus sistemas de manipulación tienen en el cuerpo humano y en sus manos una referencia de posibilidades potenciales que se pueden llegar a desarrollar. En muchos procesos como el agroalimentario la manipulación humana es la solución actual rápida y sencilla. Desarrollar nuevos sistemas de manipulación y sensores más robustos es imprescindible para poder llegar a automatizar procesos en los que hasta la fecha es imprescindible la manipulación manual.

La manipulación manual se adapta a las formas irregulares de los productos agroalimentarios y los manipulan suavemente, pero estas juegan un papel primordial en la potencial contaminación microbiana y su diseminación en productos frescos y pueden estar implicados en la difusión de enfermedades infecciosas (Todd et al. 2010). De acuerdo con la Organización para la Agricultura y la Alimentación de las Naciones Unidas (Kader & Rolle 2004) las buenas prácticas de higiene y salud de los trabajadores durante la producción, cosecha, clasificación, empaquetado y transporte juegan un papel crítico para reducir al mínimo el potencial de contaminación microbiana de los productos frescos. El contacto de robots puede reducir este riesgo. Los robots se adaptan a movimientos repetitivos, no se ven afectados por diferentes condiciones ambientales y son capaces de trabajar con una calidad, velocidad y fiabilidad constantes (Petterson et al. 2010). Actualmente en el sector de la manipulación alimentaria de frutas y verduras frescas se emplean distintos tipos de máquinas de envasado. La robótica en los procesos de coger y colocar puede ayudar a automatizar los procesos de envasado poscosecha y asegurar una calidad uniforme. Para automatizar estos procesos con robots, tanto los robots como los sistemas de manipulación deben ser fáciles de limpiar, tener un diseño higiénico, ser de bajo coste, rápidos y seguros para trabajar con humanos (Masey 2010). Las necesidades y características del robot varían según el tipo de sector alimentario (Holmes 2010).

Existen numerosas consideraciones que deben tenerse en cuenta durante el diseño de una garra (Zaki et al. 2010) incluso hay libros completos dedicados al diseño de garras para robots (Monkman et al. 2007). Sin embargo, hay requisitos específicos a la hora de manipular productos alimentarios. Un correcto funcionamiento de la garra que manipule alimentos es vital para poder reemplazar la manipulación manual. Las garras deben tener la suficiente destreza para manipular la diversidad dimensional de los productos con rapidez, alta fiabilidad, suavidad y sin generar daño alguno en los productos. Existen estudios de los diversos tipos de garras usados para la manipulación alimentaria según el sector (Chua et al. 2003) y propuestas específicas para el diseño de garras en la manipulación de productos agroalimentarios (Blanes et al. 2011). A pesar de los esfuerzos y avances aún no hay una tecnología o método completamente definido para la correcta manipulación con robots de cualquier tipo de producto agroalimentario.

En las líneas de empaquetado, los operadores manualmente clasifican los productos según características como la forma, tamaño, presencia de defectos o color y otros relacionados con la textura. La automatización con robots en la fase de empaquetado primario requiere de sistemas de visión artificial que localicen el producto antes de su manipulación, este sistema puede clasificar los productos según su aspecto visual pero no en aspectos relacionados con la textura. Para completar la sustitución del proceso manual es necesario incorporar en la garra sensores táctiles que permitan la clasificación realizada manualmente. Es en las capacidades sensoriales humanas donde los sensores táctiles tienen la referencia de potencial desarrollo (Dahiya et al. 2010). Las aplicaciones robóticas rara vez usan sensores táctiles y cuando lo emplean tienden a usar soluciones básicas y sencillas que sean fiables, duraderas y de bajo coste (Girao et al. 2013a). Los actuales desarrollos de sensores táctiles en garras presentan una elevada complejidad y falta de robustez como para poder extrapolarse en soluciones directas en la industria. En sectores como el médico, agrícola, alimentario se están desarrollando numerosos estudios en la búsqueda de sensores táctiles más robustos y fiables para ser incorporados en garras para robots (Dargahi & Najarian 2005). Los futuros desarrollos de los sensores táctiles son prometedores y poco a poco van jugando un mayor papel en ambientes indefinidos (Lee 2000) y con sistemas simplificados y robustos que puedan implementarse como soluciones industriales.

1.2. La investigación en manipulación y sensores.

Existen numerosos proyectos de investigación llevados a cabo y muchos otros en curso en búsqueda de soluciones a esta problemática. Uno de los aspectos destacados es el conocimiento del problema de la manipulación y del agarre según un estudio teórico que sea medible tanto en sistemas humanos como artificiales. Proyectos pasados como GRASP (EU-FP7-ICT-Ref.215821 2008), HANDLE (EU-FP7-ICT-Ref.231640 2009) o DEXMART (EU-FP7-ICT-Ref.216239 2008) buscan incrementar el conocimiento del proceso de manipulación. Ambos parten de la necesidad de intentar imitar la

destreza y capacidad sensorial de la manipulación manual. Han desarrollado sistemas que buscan adaptarse a diversidad de situaciones imprevistas, con incertidumbres, que reconozcan y se readapten ante fallos en la percepción o el agarre. Los logros conseguidos en manos robotizadas son un referente de las posibilidades que los sistemas multicuerpo rígidos son capaces de alcanzar, así como las posibilidades que estas manos robotizadas ofrecen cuando están unidas a robots y diversos sistemas sensoriales.

El empleo de sólidos rígidos limita la posibilidad de manipular con suavidad, sin puntos de contacto de altas presiones, y destreza productos sensibles a ser dañados o irregulares como son los agroalimentarios. Hay una clara tendencia investigadora en la búsqueda de nuevos mecanismos flexibles sencillos que sean capaces de manipular una amplia variedad de productos con destreza, sin necesidad de sistemas de control complejos y en entornos no definidos. Hay proyectos pasados como (EU-FP7-ICT-Ref.619319 2013) centrados en desarrollar estructuras y dispositivos flexibles, activos y adaptables para replantear nuevos sistemas robóticos fuera de las técnicas convencionales. En el proyecto Octopus (EU-FP7-ICT-Ref.231608 2009) se desarrollan nuevos sistemas robóticos con un número infinito de grados de libertad (DoF) por medio de sistemas de rigidez variable y controlable, con alta destreza, capacidad de manipulación amigable y sistemas de control distribuido. Actualmente con una línea investigadora parecida está el proyecto Stiff Flop (EU-FP7-ICT-Ref.287728 2012) en donde desarrollan robots que pueden deformarse, pasar por zonas estrechas, manipular los órganos blandos o cambiar la rigidez. El proyecto pretende la fabricación de un manipulador blando, con sensores distribuidos inspirados en arquitecturas biológicas, capaz de manipular objetos blandos en entornos complejos e indefinidos. Hay proyectos que se centran en el trabajo colaborativo entre robots blandos y humanos (NSF-1226883 2012). En manos robotizadas con arquitecturas deformables y flexibles también hay proyectos como Soft Hands (EU-FP7-IDEA-IRC-Ref.291166 2012) y SoMa (EU-H2020-EU.2.1.1.5.Ref.645599 2015). La idea es construir manos artificiales más simples y más eficaces, basadas en actuadores con impedancia variable embebidos en los mecanismos de agarre, actuadores capaces de ajustar su impedancia para adaptarse al entorno y la tarea. Con SoMa se buscan desarrollos de sistemas de manipulación sencillos, adaptables, pero fuertes, robustos y fáciles de programar que sean capaces de aprovecharse del propio entorno. Se busca el agarre pre configurado y auto adaptativo. El proyecto Rodyma (EU-FP7-IDEAS-IRC-Ref.320992 2013) estudia la manipulación no prensil y no rígida de objetos deformables. La investigación en manipulación de productos irregulares ha sido y es un problema aún por resolver y del cual aún se está investigando. Esta línea de investigación ha pasado de emplear sistemas mecánicos muy complejos que buscan imitar las manos antropomórficas a simplificar la solución empleando garras con nuevos materiales flexibles y de mecanismos sencillos capaces de manipular productos irregulares en entornos indefinidos.

El desarrollo de los sensores también constituye un gran foco de proyectos de investigación. Actualmente Happiness (EU-H2020-EU.2.1.1.1.Ref.645145 2015) busca la integración de polímeros electro-activos (PEA) dispuestos matricialmente como actuadores mecánicos en láminas de plástico que permitan reproducir sensaciones como rugosidad, vibración o confort. El ya finalizado proyecto Roboskin (EU-FP7-ICT-Ref.231500 2009) trabajó en la implementación de grandes áreas táctiles en el cuerpo del robot. En Cont Act (EU-H2020-EU.1.1.Ref.637935 2015) actualmente se está trabajando en el conocimiento del entorno por medio del contacto y en la búsqueda de una mejor robustez en el comportamiento del robot. Leacon (EU-H2020-EU.1.3.2.Ref.659265 2014) es un proyecto en el que actualmente se trabaja para que los robots puedan aprender de la manipulación y desarrollar los sensores en distintos aspectos para aumentar la robustez ante un imprevisto en una manipulación. Aún queda mucho campo por desarrollar en el área de sensores táctiles para lograr simplificar estos sistemas con nuevos materiales, incrementar su robustez y mejorar su respuesta.

Actualmente el proyecto Picknpack (EU-FP7-KBBE.Ref.311987 2012) está centrado en la búsqueda de una mayor automatización de la industria alimentaria. Tres son los módulos en los que se focaliza; la calidad, la manipulación robótica y el sistema de embalaje. Específicamente en el área de agroalimentación el recientemente extinto proyecto Crops (EU-FP7-NMP-Ref.246252 2010) desarrolla diversos sensores y sistemas de agarre para la recolección, este proyecto cuenta con una extensión en curso Sweeper (EU-H2020-EU.2.1.1.5.Ref.644313 2015) con la idea de incorporar sensores en la garra y la velocidad de esta. Estos proyectos están en la misma línea investigadora que la presente tesis enfrentándose a los retos de lograr la correcta manipulación a velocidades elevadas y con posibilidad de clasificar los productos al mismo tiempo.

Por medio de estos distintos proyectos queda latente que tanto los sistemas para la manipulación robotizada de productos agroalimentarios como la incorporación de sensores en estos sistemas de manipulación aún no disponen de soluciones definitivas. Es necesario un esfuerzo investigador en ambas áreas.

1.3. Entorno de trabajo y aportaciones científicas

A continuación se presentan, por orden cronológico, todos los proyectos de I+D en los que se ha participado con un pequeño resumen del mismo. En todos los proyectos, el investigador principal ha sido el Director de la Tesis Dr. Martín Mellado.

La presente tesis está basada en el conocimiento adquirido a lo largo de la participación en diversos proyectos de investigación competitivos públicos y convenios de transferencia tecnológica con empresas. Aunque parte de estos proyectos no han derivado en publicaciones científicas, todos ellos han sido importantes para desarrollar las bases que han permitido lograr esta tesis. El principal motor ha sido el proyecto MANI-DACSA en el cual se han publicado los resultados más significativos. Como

parte de los resultados también está en trámite una patente en Estados Unidos con número de solicitud 62/190,134. ID 027318.00113.

PROYECTO: Sistemas de manipulación robotizada para envasado de productos hortofrutícolas

- Entidad financiadora: ULMA PTC, proyecto CENIT financiado por Ministerio Industria
- Duración: Marzo 2007– Marzo 2010

La colaboración dentro del proyecto CENIT MEDIODIA (Multiplicación de Esfuerzos para el Desarrollo e Innovación de Invernaderos Avanzados) ha permitido conocer en profundidad la metodología de diseño de garras para robots en el sector agroalimentario, así como conocer el estado del arte en tecnologías de manipulación de alimentos con robots y las futuras tendencias. En el proyecto se generó una base de datos de modelos virtuales para la manipulación de diversos productos agroalimentarios, facilitó el conocimiento de las herramientas empleadas para el desarrollo de esta tesis con programas de CAD, escáner 3D, programas CAE tanto de simulaciones por elementos finitos como uso de simuladores de sistemas dinámicos y comienzo del uso de la programación en entorno LabVIEW para captación y procesado de señales. Publicaciones:

- C. Blanes, M. Mellado, C. Ortiz, A. Valera. Technologies for robot grippers in pick and place operations for fresh fruits and vegetables, *Spanish Journal of Agricultural Research*. 9 (2011) 1130-1141.

PROYECTO: Tecnologías de agarre de productos de bollería industrial

- Entidad financiadora: Dulcesa S.A. con proyecto financiado por el CDTI.
- Duración: Octubre 2008 – Diciembre 2008

Este proyecto tiene una clara orientación a la aplicación directa de sistemas robotizados para el empaquetado primario, donde la garra contacta con el producto en crudo, aplicada a productos de bollería y pastelería industrial. Permite establecer revisar y reflejar las tecnologías potenciales que pueden emplearse para la manipulación con robots de productos de pastelería y bollería industrial.

PROYECTO: Inspección y Manipulación de Productos Alimenticios (IMPA)

- Entidad financiadora: MICINN
- Duración: Enero 2011 – Diciembre 2011

Este proyecto asienta las bases y posibilidades que los acelerómetros tienen como sensores táctiles. Los acelerómetros no están en contacto directo con los productos y por ello no pueden sufrir desgastes debidos a ese contacto. Los acelerómetros se fijan a

la parte externa de los dedos de una garra logrando resultados muy prometedores para determinar la dureza del producto agarrado en función del análisis de las señales recogidas. Se estudian las limitaciones que tienen los acelerómetros como sensores táctiles y, se definen diversos algoritmos para procesar las señales de los acelerómetros y conseguir parámetros que sirvan para evaluar la dureza de los productos manipulados. En paralelo se trabaja con frutos electrónicos para evaluar la agresividad de la garra. Publicaciones:

- C. Blanes, C. Ortiz, M. Mellado, P. Beltrán. Determinación de la posición adecuada del fruto electrónico respecto a la garra robot para la estimación del impacto en el agarre pick and place de productos hortofrutícolas (2011) *VI Congreso Ibérico de Agroingeniería* 5-7 Septiembre.

PROYECTO: Desarrollo de nuevos sistemas de manipulación robotizada en el sector de pastelería industrial

- Entidad financiadora: Juan y Juan con proyecto financiado por el CDTI
- Duración: Noviembre 2011 – Octubre 2014

Este proyecto desarrolla diversos modelos de garras para productos de pastelería industrial. Se emplean cuatro estrategias para el diseño de las garras; sistemas neumáticos, garras de mecanismos articulados, sistemas por electroadhesión y tecnologías que permitan modificar las propiedades físicas de los materiales empleados en la garra. Durante este proyecto se comienza a trabajar con las técnicas de fabricación por aditiva de material. Esta tecnología permite realizar nuevos diseños que hasta la fecha eran imposibles de fabricar. En este proyecto se diseñan, fabrican, montan y prueban en robots una cantidad considerable de modelos de garra. Gran parte de la información conseguida en este proyecto no ha sido publicada. Los intereses propios de la empresa y la existencia de una cláusula de confidencialidad hacen que los resultados directos del proyecto no sean publicables ni patentables. Publicaciones:

- C. Blanes, M. Mellado, P. Beltran. Novel additive manufacturing pneumatic actuators and mechanisms for food handling grippers, *Actuators*. 3 (2014) 205-225.

PROYECTO: Nuevas Técnicas de Manipulación usando Sensorización Integrada para la Estimación de Propiedades y Determinación Automática de la Calidad y Sanidad de la Producción Agroalimentaria en Líneas de Inspección y Manipulación (MANI-DACSA).

- Entidad financiadora: INIA
- Duración: Mayo 2013 – Mayo 2016

El proyecto MANI-DACSA forma parte de uno de los cuatro sub-proyectos del proyecto coordinado DACSA. Este proyecto desarrolla prototipos de garras con acelerómetros diseñadas para manipular y evaluar propiedades mecánicas de los productos agroalimentarios que manipula. Tres son las áreas en donde se trabaja, adaptación a los productos, mejora en los datos de los acelerómetros y en el proceso del robot con la garra. Las garras están diseñadas para ser capaces de adaptarse a la forma de berenjenas y mangos. Se prueban sistemas infra-actuados (mecanismos con más grados de libertad que número de actuadores) y fluidos granulares con transición *jamming* para conseguir una buena adaptación a los productos. Las señales de los acelerómetros son procesadas con nuevos algoritmos para lograr un mayor número de parámetros y mejor respuesta de estos. El proceso empleado en el robot y la garra esta específicamente diseñado para conseguir mejorar la información que los acelerómetros proporcionan. Fruto de este proyecto se han conseguido las publicaciones:

- C. Blanes, M. Mellado, P. Beltrán. Tactile sensing with accelerometers in prehensile grippers for robots. *Mechatronics*. 33 (2016), 1–12.
- C. Blanes, V. Cortés, C. Ortiz, M. Mellado, P. Talens. Non-destructive assessment of mango firmness and ripeness using a robotic gripper. *Food and Bioprocess Technology*. 8 (2015) 1914-1924.
- C. Blanes, C. Ortiz, M. Mellado, P. Beltrán. Assessment of eggplant firmness with accelerometers on a pneumatic robot gripper. *Computers and Electronics Agriculture*. 113 (2015) 44-50.
- C. Blanes, C. Ortiz, V. Cortes, P. Talens, M. Mellado. Robot gripper sensor operation in fresh mango postharvest handling for non-destructive firmness assessment. (2015) *Avecta, 1st International Student Congress of Food Science and Technology*, Universidad de Valencia 5-6 Marzo.
- V. Cortes, C. Blanes, M. Navarro, M. Mellado, et al. Non-destructive firmness assessment of mango “Osteen” with a robot gripper. (2015) *VIII Congreso Ibérico de Agroingeniería* 1-3 Junio.
- C. Blanes, M.C. Ortiz, P. Talens, M. Mellado. Mango postharvest handling and firmness assessment with a robotic gripper. (2014) *International Conference of Agricultural Engineer*, Zurich.
- C. Blanes, M.C. Ortiz Sánchez, M. Mellado Artech. Aubergine (*Solanum melogena*) firmness detection using a robot gripper during handling. (2013) *VII Congreso Ibérico de Agroingeniería*, Madrid.

1.4. Resumen de aportaciones

La presente tesis es el resumen de 10 publicaciones científicas como resultado de 5 proyectos de investigación.

- Publicaciones en revistas indexadas en JCR:
 - Artículo en SJAR. *Agriculture, Multidisciplinary* Q2 (26/56).
 - Artículo en CEA. *Agriculture, Multidisciplinary* Q1 (6/56); *Computer Science, Interdisciplinary Applications* Q2 (32/102).
 - Artículo en FABT. *Food Science & Technology* Q1 (20/123)
 - Artículo en MECH. *Automation & Control Systems* Q2 (22/58); *Computer Science, Artificial Intelligence* Q2 (49/123); *Engineering, Electrical & Electronic* Q2 (86/249); *Engineering, Mechanical* Q1 (29/130).
- Publicación en revista de acceso abierto:
 - Artículo Actuators. *MDPI Open Access Journals*.
- 5 artículos en Congresos Internacionales con aceptación por revisión.
- 1 solicitud de patente en Estados Unidos.

1.5. Objetivos y estructura de la tesis

El presente trabajo de tesis se centra en la automatización robótica para la manipulación directa y clasificación de productos del sector agroalimentario, concretamente en berenjenas y mangos. La complejidad de esta área es notable debido a la gran variabilidad de productos y la sensibilidad al daño de estos. El trabajo tiene un notable potencial de uso en aplicaciones de empaquetado primario.

El objetivo general de la presente tesis es generar conocimiento científico con nuevas técnicas para la inspección, por medio de acelerómetros, incorporados en sistemas manipulación para robots de productos agroalimentarios. Se pretenden resolver los problemas inherentes a esta tarea debidos a las características de estos productos, tales como la alta variabilidad de dimensiones, baja resistencia mecánica y susceptibilidad al daño. Para lograr este objetivo general se elaboran una serie de objetivos específicos desarrollados en diversos capítulos.

La tesis está dividida en dos partes. La primera, compuesta por los capítulos 2 y 3, describe las distintas posibilidades y requerimientos para diseñar y fabricar garras para la manipulación de productos agroalimentarios mediante la fabricación aditiva de material. La segunda parte, capítulos 4 y 5, muestra diversos prototipos de garras y desarrolla la capacidad de los acelerómetros como sensores táctiles.

Capítulo 2 – Estado del arte de la manipulación robótica en alimentos

Este capítulo introduce la base de la tesis resaltando la importancia y el potencial de la automatización con robots en el sector agroalimentario. Igualmente desarrolla de forma conceptual el proceso de manipulación y las necesidades específicas del sector. Por último, muestra diversas posibilidades que se pueden emplear para manipular amigablemente productos agroalimentarios.

Objetivos específicos

- Revisar y estudiar las diversas técnicas de manipulación, empleadas actualmente y con potencial uso, que son capaces de adaptarse a multitud de formas de los productos sin dañarlos.
- Seleccionar y explicar aquellas tecnologías que permitan una rápida y suave manipulación de productos agroalimentarios con robots.
- Contrastar las dificultades para fabricar sistemas de agarre flexibles capaces de adaptarse a diversidad de formas de manera suave.

Capítulo 3 – Nuevas garras flexibles y autoadaptables a los alimentos

Este capítulo muestra el potencial de las nuevas tecnologías de fabricación para desarrollar nuevos modelos capaces de manipular productos agroalimentarios. Presenta diversos ejemplos desarrollados y varias pruebas conceptuales de potencial uso.

Objetivos específicos

- Estudiar y realizar modelos con las posibilidades que presentan las nuevas tecnologías de fabricación aditiva para poder desarrollar sistemas de garras flexibles capaces de adaptarse a la forma de los productos.

Capítulo 4 – Aplicación de los acelerómetros como sensores táctiles intrínsecos en garras

En este capítulo se introducen las posibilidades que los acelerómetros tienen como sensores táctiles en un diseño específico de garra. Estudia la influencia del diseño de la garra y sus ajustes en la respuesta sensorial.

Objetivos específicos

- Estudiar las posibilidades que presentan los acelerómetros como sensores táctiles en una garra neumática.
 - Estudiar las señales de deceleración en los dedos de una garra.
 - Estudiar la variación de la respuesta táctil de los acelerómetros ante: productos de distintas durezas, variaciones en la fuerza en el actuador y ante distintas posiciones de garra-producto.
 - Estudiar y definir distintos procesos que permitan extraer parámetros de las señales de los acelerómetros que puedan usarse como respuesta táctil.

Capítulo 5 – Estimación de propiedades de productos agroalimentarios en garras para robots

Este capítulo estudia varios prototipos de garra capaces de manipular y clasificar por firmeza berenjenas y mangos. En él se detalla cómo procesar las señales de los acelerómetros, así como la influencia de la respuesta de los acelerómetros en función del diseño de la garra. El capítulo busca la integración mecánica, electrónica y del

proceso robot para lograr un diseño que agarre productos delicados sin generar daños y que consiga una buena respuesta sensorial.

Objetivos específicos

- Realizar garras con acelerómetros para berenjenas y mangos, que empleadas en un robot, sean capaces de manipular sin dañar los productos y al mismo tiempo determinar sus propiedades.
 - En base a los conocimientos desarrollados diseñar un proceso robótico que permita el uso de acelerómetros para extraer propiedades de berenjenas y mangos manipulados.
 - Búsqueda de nuevos algoritmos de tratamiento de las señales de los acelerómetros para mejorar la respuesta sensorial.
 - Analizar la influencia de diversas configuraciones mecánicas de los dedos de una garra para mejorar la respuesta sensorial y evitar que esta dañe los productos.

Capítulo 6 – Conclusiones

Resume las principales aportaciones de la Tesis y analiza las necesidades complementarias para lograr una adecuada integración de los sistemas robotizados en el sector agroalimentario. Por último, se perfilan los futuros trabajos a realizar para dar continuación a este trabajo.

Capítulo 2

Estado del arte de la manipulación robótica en agroalimentación

2.1. Situación actual del sector de alimentación y bebidas

De acuerdo con un reciente estudio de datos y tendencias del sector industrial de alimentación y bebidas de 2013-2014 de la Unión Europea (FoodDrinkEurope 2014) este es el sector líder en empleos en Europa dentro del área de manufactura constituyendo uno de los sectores clave en las economías de los estados miembros de la Unión Europea. Los tres grandes productores mundiales del sector son Estados Unidos, China y la Unión Europea, siendo la Unión Europea la que facturo entre 2011 y 2012 más del doble que el siguiente gran productor. A pesar de ser el mayor productor mundial el nivel de gasto del sector en investigación y desarrollo es muy bajo con un gasto medio en 2010 del 0,27%. Esta cifra está muy por debajo de países como Japón, Estados Unidos o Corea, siendo la distribución del gasto muy dispar entre los países del norte y sur de Europa. El consumo doméstico en alimentación y bebidas ocupa el segundo puesto detrás del gasto en vivienda, agua y energía. La productividad de este sector es menor que otros sectores manufactureros. Esto puede ser debido en gran medida a la reducida inversión en investigación, maquinaria y tecnologías, así como el gran número de empresas que operan a pequeña escala. Entre los años 2011 y 2013 este sector incrementó el número de personas empleadas un 0,4% con 4,24 millones y aumento la facturación un 3,1 % hasta los 1,048 billones de euros. En términos de productividad laboral por empleado dentro del sector industrial de alimentación y bebidas el subsector de bollería y pastelería tiene la peor ratio en gran parte debido por la elevada cantidad de empresas. A este le siguen de cerca los

productos cárnicos, pescado y no a mucha distancia el subsector de procesado de frutas y vegetales. Estos parámetros son indicadores de la necesidad de inversión en estos subsectores para lograr incrementar su productividad y rentabilidad. En la Unión Europea el incremento en los costes laborales respecto a países menos desarrollados implica una necesaria mejora en la productividad que permitiría mejorar la competitividad facilitando un incremento de las exportaciones.

2.2. La robótica en la alimentación y en la industria agroalimentaria

La automatización con robots está presente en muchas de las operaciones de diversos sectores manufactureros. El sector de manufactura automovilístico es el que tradicionalmente más ha empleado la robótica para la automatización de su producción. Este sector se ha visto beneficiado por el alto nivel de especialización con compañías centradas en este sector e ingenieros dedicados al desarrollo de aplicaciones. Los proveedores de robots han desarrollado productos específicos para determinadas necesidades del sector como pueden ser la soldadura o pinturas.

Las regulaciones impuestas por la Unión Europea y Administración de Estados Unidos impulsan la trazabilidad alimentaria a lo largo de todo el proceso de la cadena alimentaria obligando a las compañías a automatizar sus procesos. Este proceso facilita el control de las líneas de producción, mejora la eficiencia y la productividad, permite una economía de escala con bajos márgenes en los productos pero altas carencias de producción y ayuda a mejorar la presentación tal y como demanda el consumidor. La calidad y seguridad alimentaria son uno de los pilares en el sector alimentario (Grunert 2005).

Existen normativas higiénicas específicas para el diseño de equipos de manipulación de alimentos. Hay diferentes instituciones que regulan esto. La FDA (*Food and Drug Administration* de EEUU) o la EHEDG (*European Hygienic Equipment Design Group*) que es un consorcio establecido por los fabricantes de equipos para la industria alimentaria y las autoridades de la salud. El objetivo es establecer un marco de regulación y estándares para la producción de alimentos. También existen necesidades específicas en el diseño de robots para la industria alimentaria (Masey 2010; Davis et al. 2007).

El sector agroalimentario tiene un enorme potencial para automatizar procesos con robots pero la robótica adolece de falta de soluciones desarrolladas específicas (Wilson 2010). La falta de conocimiento de posibles aplicaciones, la limitada funcionalidad del robot y su coste dificulta el uso de la robótica en este sector. Dentro del sector de alimentación y bebidas los subsectores de procesado de frutas y vegetales y, bollería y pastelería, a pesar su importancia económica, son los que presentan un menor grado de automatización por su menor productividad debida en gran parte a la gran cantidad de empresas pequeñas. Estos subsectores tienen una mayor oportunidad y potencial para automatizar sus procesos productivos con robots.

Con el empleo de robots se consigue aumentar la productividad siendo está más constante y controlada. La robótica además de permitir automatizar procesos puede al

mismo tiempo conseguir una gran cantidad de información del proceso productivo logrando con ello información útil para el control y mejora del producto y proceso. Los robots facilitan un proceso productivo más flexible y con mayor facilidad a la realización de cambios. Al automatizar con robots se disminuyen los riesgos laborales por la eliminación de trabajos repetitivos en ambientes poco saludables como pueden ser cámaras frigoríficas. Un proceso automatizado mejora su control para evitar contaminación alimentaria. El conjunto de la automatización con robots se realiza con el objetivo final económico de lograr un menor coste del producto pudiendo lograrse rápidos retornos de la inversión. Sin embargo, para automatizar la manipulación de productos agroalimentarios con robots es necesario comprender su diversidad y complejidad.

2.2.1. Procesos susceptibles de automatizarse con robots en la industria agroalimentaria

En el sector de agroalimentario existen diversos procesos susceptibles de ser automatizados con robots, operaciones de coger y colocar, colocación en pallets, sistemas de almacenamiento intermedio de productos, de clasificación, manipulación por empuje o colocación en bandejas. El empaquetado de productos es uno de los procesos en los que más se usan los robots y en donde el sistema de agarre para manipular el producto es un elemento clave. Los procesos de empaquetado se dividen en (Figura 2.1):

- **Primario** o de primera envoltura del producto. Precisa de la manipulación directa de los productos. La garra del robot debe estar capacitada para manipular directamente los productos.
- **Secundario**: se coloca sobre el empaquetado primario. Se usa normalmente para agrupación de productos con empaquetado primario. La garra robot no contacta directamente con el producto sino con su envoltorio. El robot se encarga de tareas como colocar en cajas o agrupar los productos.
- **Terciario**: empleado para el transporte y almacenaje. El más usual es la colocación de los productos en pallets.

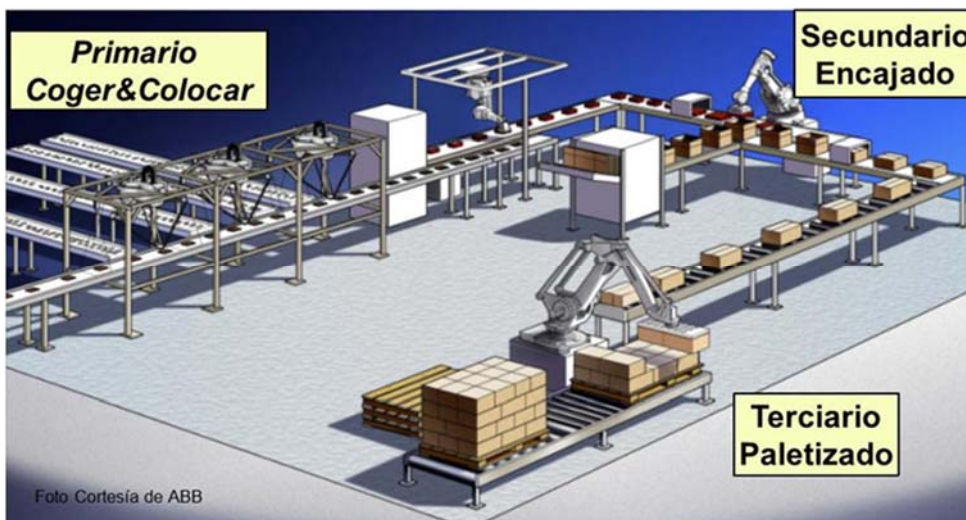


Figura 2.1. Esquema de los tipos de automatizaciones posibles con robots en el área de empaquetado.

Para que la automatización robotizada de operaciones de empaquetado sea rentable los robots han de tener determinadas prestaciones de velocidad y capacidad de carga en función del proceso de empaquetado a realizar (Figura 2.2).

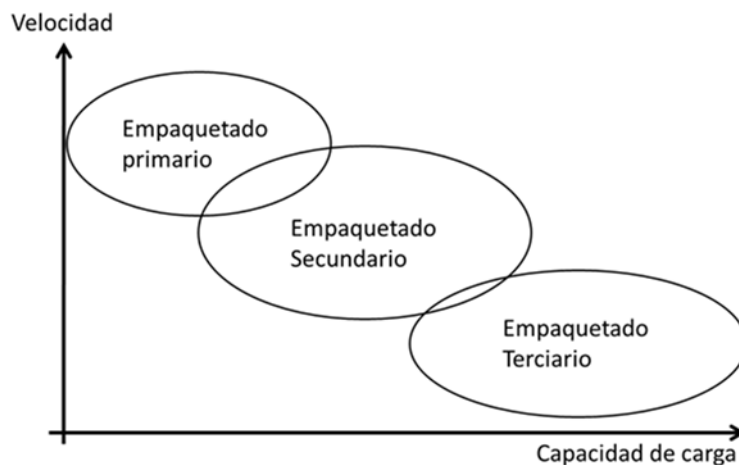


Figura 2.2. Características del robot según tipo de proceso de empaquetado.

Hay soluciones completas desarrolladas por ingenierías especializadas para el empaquetado terciario con equipos que emplean diversos sistemas de agarre estándar, incluso existen guías que indican el tipo de garra y sus especificaciones para la manipulación de determinados productos rígidos (Causey & Quinn 1998). Los mismos equipos o con ligeras modificaciones se pueden adaptar a diferentes procesos de

empaquetado terciario. En menor medida existen integradores que disponen de soluciones para el empaquetado secundario con robots. El empaquetado primario es el que mayor dificultad tiene de ser automatizado con robots. Este requiere diseños específicos de sistemas de agarre para cada producto o gama de productos.

2.2.2. Oportunidades y dificultades para el uso de la robótica en el sector alimentario

La mayor oportunidad, por las dificultades que presenta, de la robótica en el sector alimentario es en el empaquetado primario. En estos procesos es habitual la manipulación manual. Con la manipulación manual también se realiza una inspección visual y táctil que es capaz de adaptarse a una gran variedad de productos de forma rápida.

Para automatizar cualquier proceso es necesario que este sea rentable. A pesar de la alta velocidad de la manipulación manual los robots actuales son capaces de competir por velocidad y aceleración con los operarios. A la necesidad de alta carencia se unen las dificultades para manipular productos alimentarios. Los actuales sistemas de garras para robots no son lo suficientemente versátiles como para competir con la habilidad de la manipulación manual. Las garras para robots deben mejorar la capacidad de manipulación de productos irregulares e incorporar una robusta respuesta de sus sensores táctiles. Las propiedades físicas y fisiológicas de muchos de los productos alimentarios y la necesidad de evitar daños en los productos, hacen necesaria la búsqueda de sistemas de manipulación flexibles capaces de manipular un amplio rango de productos. Los sistemas de visión artificial son un elemento necesario para la localización e inspección de los productos antes de su manipulación con los robots y pueden sustituir las operaciones de inspección visual. La visión artificial precisa de ajustes específicos y programados para un correcto funcionamiento teniendo este sistema una menor flexibilidad respecto a la visión humana. La visión artificial puede llegar a conseguir frecuencias de muestreo mucho más elevadas además esta no sufre fatiga alguna logrando la misma consistencia de los resultados a lo largo del tiempo.

La robótica tradicionalmente se ha centrado en la manipulación de productos rígidos, su empleo en productos flexibles es incipiente a pesar de su crecimiento en determinados sectores alimentarios como el cárnico, bollería industrial o pescado. Sin embargo, en el sector agroalimentario la robótica no ha experimentado el mismo desarrollo. Este sector tiene un reducido coste (Tillet 1995) de los productos, una alta estacionalidad del trabajo necesitando procesos de automatización con muy bajos tiempos de ciclo y costes contenidos. En este sector la variabilidad dimensional, de formas, textura, sensibilidad al daño y desconocimiento de propiedades mecánicas de los productos limitan el desarrollo de sistemas de agarre para robots.

2.3. Manipulación

En fabricación los productos necesitan ser manipulados, para ello pueden emplearse robots. La manipulación de un objeto requiere como mínimo alguno de los siguientes subprocesos.

- **Agarre.** El objeto se encuentra en una posición fija respecto a otro sistema que puede desplazarse o simplemente hay un contacto o referencia fija entre el producto y un sistema, que puede ser la garra de un robot.
- **Transporte.** Desplazar el producto según coordenadas lineales desde un punto de origen a destino sin considerar la orientación y normalmente en base a tres ejes cartesianos. No contempla la orientación.
- **Orientación.** Colocar el objeto en el espacio según alguno o algunos de los tres giros posibles.
- **Suelta o colocación.** El objeto es liberado. Pierde la referencia fija con el sistema de manipulación.

Los procesos más complejos de manipulación son los que requieren más de estos subprocesos. Orientar de forma concreta el producto es lo más complejo de lograr. La manipulación sin agarre también se emplea habitualmente en cintas transportadoras, que pueden disponer de sistemas de orientación, en conductos, en sistemas de vibración, por medio de soplar o succionar por efecto Coanda o sistemas de sustentación por Bernoulli.

La exactitud en posición y orientación del producto y la repetitividad de la manipulación influyen en la complejidad del sistema de manipulación. Una orientación y localización previa a la manipulación del producto es necesaria para poder manipular un producto. En la manipulación con robots normalmente se emplean sensores o cámaras de visión artificial para localizar los productos. La visión artificial está ampliamente extendida en operaciones de empaquetado primario y secundario de alimentos.

Este estudio parte de la base de que la localización del producto agroalimentario viene definida por un sistema de visión artificial el cual debe proporcionar la localización, orientación y altura necesarias para la correcta manipulación del producto. Este sistema imprescindible determina la posición de la garra para manipular el producto.

2.4. Manipulación robótica de alimentos

Debido al reducido coste de muchos de los productos alimenticios y, especialmente en el caso de productos agroalimentarios, los procesos de coger y colocar con robots deben ser lo suficientemente rápidos para lograr una alta carencia que permita una automatización rentable. Las características de la garra, del robot y la distribución de los distintos elementos periféricos interaccionan conjuntamente y su diseño debe ser considerado para lograr una buena efectividad (Bloss 2006). La Figura 2.3 muestra el flujograma de los pasos del proceso de manipulación robótica tipo coger y colocar y su influencia sobre los distintos elementos de la célula robotizada. Cada una de los pasos

de este proceso debe estudiarse y ser optimizado para reducir el tiempo ciclo. La selección o el diseño de la garra también depende de otros factores como son los componentes que emplea, el tipo de tarea o el medio ambiente de trabajo (Pham & Yeo 1991).

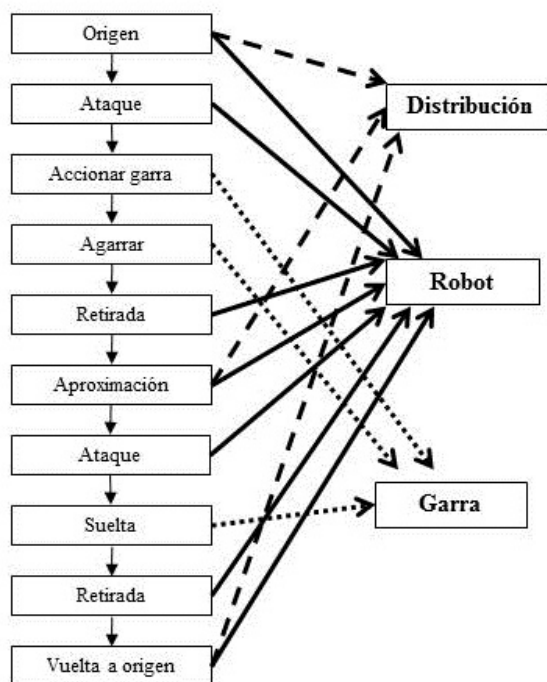


Figura 2.3. En la izquierda el flujograma del proceso robot de coger y colocar, en la derecha áreas de la célula robotizada y las relaciones entre ambos.

Una correcta distribución de los componentes y dispositivos de la célula robotizada ayuda a mejorar los tiempos ciclo gracias a la reducción de los movimientos necesarios. El diseño de células compactas es deseable y solo posible cuando se estudia toda la célula en conjunto considerando las distintas combinaciones. Normalmente en los sistemas robot de coger y colocar se emplean cámaras de visión artificial para reconocer la forma y orientación de los productos. El sistema de visión esta interconectado al de la cinta transportadora para poder conocer la posición de los productos a lo largo del tiempo.

Existen en el mercado robots específicamente diseñados para operaciones de coger y colocar. Robots que cumplen con los requisitos específicos del diseño de maquinaria para procesado de alimentos. El diseño conjunto del robot con el sistema de manipulación precisa de una selección concreta de materiales y homologaciones para una correcta implementación (Zhou et al. 2007). Si el conjunto es el adecuado a las

necesidades concretas es posible una reducción en los costes y reducción de los tiempos de manipulación (Davis et al. 2007). En el mercado hay robots pensados para la manipulación de alimentos con distintas configuraciones y grados de libertad. Los robots de cadena cerrada con estructuras paralelas o tipo delta son los que mejor se adaptan a altas aceleraciones con baja carga (Brantmark & Hemmingson 2001). Actualmente hay un gran número de fabricantes que ofertan este tipo de estructura de robots para la manipulación de alimentos. Los robots de cadena abierta articulados cilíndricos permiten mayores cargas a costa de una menor velocidad. En aplicaciones que requieren menores velocidades y cargas mayores se emplean los articulados antropomórficos. Para el tipo de aplicaciones robotizadas de coger y colocar en determinados proyectos de investigación como Picknpack (EU-FP7-KBBE.Ref.311987 2012) apuntan a soluciones de robots muy rápidos que estén actuados con cables.

El sistema de agarre, o garra, en agroalimentación es un elemento imprescindible para la correcta manipulación de productos a alta velocidad, de sus características dependerá en gran medida el tiempo ciclo. Un diseño incorrecto de este puede dañar los productos con la consecuente merma en su calidad final. Según Blanes et al. 2011 es deseable un sistema de agarre que tenga:

- Alta velocidad de cierre y apertura. Solo posible si la energía de los dedos que impactan sobre el producto es lo suficientemente reducida como para no dañarlo. Dos son las variables que influyen en esto, la velocidad a la que se contacta con el producto y las fuerzas inerciales que golpean sobre él.
- Adaptación a variedad de formas. A mayor adaptación la forma del producto menores presiones puntuales se ejercen sobre él y más fácilmente se pueden manipular productos sensibles a ser dañados.
- Mínima presión necesaria y máxima adherencia. Una alta adherencia logra aumentar el umbral máximo de tensión cortante entre el dedo y el producto y, permite una menor fuerza de cierre y presión sobre el producto. En algunos productos con baja resistencia a esfuerzos cortantes una adherencia excesiva se pueden generar daños en su superficie.
- No debe producir daños en el producto. Cualquier daño producido significa una merma en la calidad o apariencia del producto disminuyendo el valor del producto manipulado.
- Bajo mantenimiento. El reducido coste de los productos agroalimentarios hace que el sistema de manipulación deba tener una alta resistencia al desgaste y debe de soportar un elevado número de ciclos para que los costes asociados a mantenimientos preventivos y correctivos sean reducidos.
- Alta fiabilidad. Si el agarre no es robusto la automatización con robots se pone en entredicho.
- Peso reducido. La reducción del peso permite ir a mayores aceleraciones en el robot y reducir la energía que impacta contra el producto.

- Homologación para contacto alimentario.
- Mínimo consumo de recursos. El coste energético de determinados sistemas que emplean aire comprimido para generar vacío es muy significativo y debe considerarse en el estudio de viabilidad.
- Precisión adecuada en la posición del producto tanto en agarre como en suelta. Muchas veces no es necesaria una buena precisión como por ejemplo en productos que tienen una alta flexibilidad o que son deformables elásticamente.
- Fácil limpieza. Requisito de las normas estándar.
- Expulsión fácil y rápida del producto. A estudiar en caso de productos con escaso peso, alta adherencia o que tengan superficies pegajosas.

Un bajo tiempo de ciclo es también posible de alcanzar en sistemas de agarre múltiple a pesar del incremento de la complejidad y peso del sistema. En estos procesos la aceleración del robot disminuye por el incremento de peso del sistema de agarre y la operativa de la garra puede ser más lenta. El tiempo ciclo por unidad manipulada puede mejorar respecto a la manipulación unitaria. Los productos muy delicados tienen limitada la máxima aceleración por las características físicas del propio producto, en estos casos la manipulación con agarre múltiple de varios productos a la vez puede mejorar los tiempos ciclo respecto a una manipulación unitaria.

La solución final es un compromiso entre todas las características que forman el conjunto de la distribución de equipos, el robot y el sistema de agarre. En general, una mejor eficiencia del conjunto se consigue reduciendo las necesidades de manipulación final del producto simplificando la complejidad de todo el sistema.

2.5. Clasificación de técnicas de manipulación

Los sistemas de manipulación que son de potencial uso en robótica se pueden clasificar en diversos grupos. Según la tecnología de agarre empleada es posible distinguir entre un sistema de agarre mecánico, neumático, adhesivo y electrostático (Seliger & Stephan 1998). Otra posible clasificación es en base al principio físico de la garra (Seliger et al. 2000). Este método de clasificación permite distinguir entre agarre por fricción; fuerzas de fricción, presión, magnéticas o electrostáticas, agarre por fuerzas moleculares; adhesivos, congelación o pegamentos, agarre por fuerzas que abrazan o recogen el producto; dedos flexibles, moldes, agujas o velcros.

Las propiedades físicas de los productos a manipular son una información necesaria para diseñar y definir las características del sistema de agarre. Este es uno de los motivos por los que los productos agroalimentarios son especialmente difíciles de manipular ya que en gran medida se desconocen sus propiedades físicas. Existe un esfuerzo significativo por encontrar sistemas de agarre para manipular alimentos no rígidos (Chua et al. 2003). Algunos autores (Saadat & Nan 2002) clasifican las aplicaciones industriales para la manipulación de productos flexibles según la forma de

los productos sea lineal, plana o tridimensional. Otros (Stone & Brett 1995) buscan la manipulación por medio de dedos flexibles que se adapten a la forma de los productos.

De acuerdo con estos estudios no existe un método claramente definido para solucionar el problema de la manipulación de alimentos, la solución apunta a la particularización del sistema de agarre por productos (Kaneko & Higashimori 2013). La estrategia de manipulación seleccionada es el principio fundamental del sistema de manipulación y un punto base en su diseño. Cada estrategia dispone de diversos métodos de manipulación. El conjunto de estrategias y métodos deben satisfacer las especificaciones de agarre, transporte, orientación y colocación que el proceso de la célula robotizada requiere. La siguiente Tabla 2.1 es una orientación sobre las capacidades de las diversas estrategias y métodos propuestos para la manipulación primaria de productos agroalimentarios con robots. La Tabla 2.2 evalúa los posibles daños que se pueden producir en los alimentos clasificándolos en magulladuras, rascaduras, roturas y deformaciones. Esta evaluación de daños es generalista por lo que se debe evaluar cada diseño específico garra y producto a manipular ya que los daños finales pueden discrepar de los mostrados. En el caso de productos muy delicados el uso combinado de distintas estrategias y métodos ayuda a encontrar la mejor solución posible.

Tabla 2.1. Clasificación de las estrategias, métodos de manipulación y sus capacidades.

Estrategia	Método	Capacidad de manipulación				
		Agarrar	Transportar	Orientar	Colocar	
Aire	Aspiración	Ventosas	Alta	Muy baja	Muy baja	Alta
		Conductos	Muy baja	Alta	Muy baja	Alta
	Impulsión	Bernoulli	Alta	Baja	Muy baja	Alta
		Soplado	Muy baja	Alta	Baja	Alta
Contacto	Garras	Eléctricas	Alta	Muy baja	Alta	Alta
		Neumáticas	Alta	Muy baja	Alta	Alta
	Hidráulicas	Alta	Muy baja	Alta	Alta	
	De goma	Alta	Muy baja	Muy baja	Alta	
	Manos articuladas	Alta	Muy baja	Alta	Alta	
	Mecanismos articulados	Alta	Muy baja	Baja	Alta	
	Ganchos y velcros	Alta	Muy baja	Muy baja	Muy baja	
Penetración en el producto	Engastar	Alta	Muy baja	Muy baja	Muy baja	
	Agujas	Alta	Muy baja	Muy baja	Alta	
Unión química	Soldadura	Alta	Muy baja	Muy baja	Muy baja	
	Adhesivos (sistema LAAG)	Alta	Muy baja	Muy baja	Baja	
Magnetismo	Atracción	Alta	Baja	Alta	Alta	
	Repulsión	No	Alta	Baja	Alta	
Carga eléctrica	Fuerzas electrostáticas entre piezas	Alta	Muy baja	Muy baja	Alta	
Fluido	Congelación de vapor Cryo	Alta	Muy baja	Muy baja	Alta	
	Cambio reológico (<i>Jamming</i>)	Bajo	Alta	Muy baja	Alta	
	Magneto-reológico	Alta	Muy baja	Baja	Alta	
Propiedades físicas del objeto	Gravedad o caída	Muy baja	Alta	Baja	Alta	
	Apilar/Empujar	Muy baja	Alta	Baja	Alta	
	Dinámica	Muy baja	Alta	Baja	Alta	
	Recoger	Muy baja	Alta	Baja	Alta	
	Vibración orientada	Muy baja	Alta	Baja	Baja	
	Abrazar	Alta	Muy baja	Baja	Alta	
Levitación sustentación	Aerodinámica	Muy baja	Alta	Muy baja	Baja	
	Electrostática	Muy baja	Alta	Muy baja	Baja	
	Óptica	Muy baja	Alta	Muy baja	Baja	
	Acústica	Muy baja	Alta	Muy baja	Baja	
	Magnética	Muy baja	Alta	Muy baja	Baja	
	Superconductor	Muy baja	Alta	Muy baja	Baja	

Tabla 2.2. Capacidades y características generales de diversas estrategias y métodos para la manipulación robótica de alimentos en procesos de coger y colocar.

Estrategia	Método	Aptitud para manipular alimentos	Riesgo de daño				
			Magulla	Rasga	Rompe	Deforma	
Aire	Aspiración	Ventosas	Alta	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo
		Conductos	Alta	Alto	Alto	Bajo	Bajo
	Impulsión	Bernoulli	Alta	Muy bajo	Alto	Bajo	Bajo
		Soplado	Alta	Muy bajo	Muy bajo	Bajo	No
Contacto	Garra	Eléctricas	Alta	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo
		Neumáticas	Alta	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo
		Hidráulicas	Alta	Alto	Bajo	Alto	Alto
		De goma	Alta	Muy bajo	Bajo	Muy bajo	Bajo
	Manos articuladas	Alta	Bajo	Bajo	Muy bajo	No	
	Mecanismos articulados	Alta	Bajo	Bajo	Muy bajo	Bajo	
Penetración en el producto	Ganchos y velcros	Baja	Alto	Bajo	Alto	Bajo	
	Engastar	Baja	Alto	Alto	Alto	Alto	
	Agujas	Alta	Alto	Bajo	Alto	Bajo	
Unión química	Soldadura	Baja	Alto	Muy bajo	Alto	Muy bajo	
	Adhesivos (sist. LAAG)	Baja	Alto	Muy bajo	Alto	Muy bajo	
Magnetismo	Atracción/Repulsión	Nula					
Carga eléctrica	Fuerzas electrostáticas entre piezas	Baja	No	Muy bajo	Bajo	Muy bajo	
Fluido	Congelación de vapor Cryo	Baja	Alto	Muy bajo	Bajo	Alto	
	Cambio reológico (JAMMING)	Alta	Bajo	Bajo	Muy bajo	Alto	
	Magneto-reológico	Alta	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	
Propiedades físicas del objeto	Gravedad o caída	Alta	Alto	Bajo	Alto	Alto	
	Apilar/Empujar	Alta	Alto	Bajo	Bajo	Alto	
	Dinámica	Alta	Alto	Bajo	Alto	Alto	
	Recoger	Alta	Bajo	Alto	Muy bajo	Muy bajo	
	Vibración orientada	Baja	Alto	Alto	Muy bajo	Muy bajo	
	Abrazar	Alta	Alto	Alto	Bajo	Bajo	
Levitación sustentación	Aerodinámica	Baja	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	
	Electrostática	Baja	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	
	Óptica	Nula					
	Acústica	Baja	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	
	Magnética	Nula					
	Superconductora	Nula					

2.5.1. Estrategias basadas en el aire

El uso de ventosas es muy usual en la automatización con robots. La ventosa crea las fuerzas necesarias por diferencia de presión. La presión negativa o succión se genera por medio de bombas volumétricas si se requieren altas depresiones y bajo caudal, bombas centrífugas para bajas presiones y alto caudal, sistemas basados en efecto Venturi o Coanda (Lien 2008; Lien et al. 2009) así como otros sistemas diversos como los basados en la succión por vibración (Zhu et al. 2007) o la depresión generada por las corrientes de vórtice (Ma et al. 2010). Las características del producto deben permitir la generación de vacío. La ventosa debe cerrar bien sobre el producto y este debe tener baja porosidad. La capacidad de transmisión de esfuerzos varía según la depresión, el tipo de esfuerzo o la ventosa empleada (Mantriota 2007b; Mantriota 2007a). Es muy común el uso de varias ventosas cuando una no es suficiente. En general existe una amplia estandarización de ventosas y sistemas de vacío adecuados a la manipulación de alimentos, las ventosas se adaptan bien a distintas temperaturas y permiten el uso de varios labios para productos más irregulares o para mejorar la carga dinámica o para productos con distintas alturas. El uso de un reducido número de labios mejora la precisión de posición y capacidad de carga. Con las ventosas es fácil lograr una garra para manipular varios productos al mismo tiempo. Sin embargo, el uso de ventosas está condicionado a la calidad superficial del producto adaptándose mal a productos muy irregulares con superficies rugosas o con suciedad. El empleo de ventosas puede dañar la superficie del producto que suele ser la parte más visible de este. La ventosa no soporta bien los esfuerzos cortantes por lo que en las traslaciones con el robot a altas aceleraciones el producto puede desprenderse. El consumo energético es muy elevado y mayor cuanto más caudal o vacío se necesite. En el caso de la manipulación directa de productos agroalimentarios las ventosas pueden marcar los productos, romper o dañar la piel o generar daños internos.

Una de las grandes ventajas de estos sistemas es la posibilidad de uso combinado con otros. Para la recolección de tomates con robots se puede emplear una garra paralela con una ventosa (Monta, Kondo, Ting, et al. 1998; Monta, Kondo & Ting 1998). Un sistema parecido se usa en la recolección de pepinos (Van Henten et al. 2003). Las ventosas también se han empleado en la recolección de fresas (Hayashi et al. 2010) o champiñones (Connolly 2003), manipulación de cebollas (Morales et al. 2014) o tomates (Zhi Guo et al. 2009). El uso combinado de ventosa con varios labios y actuadores lineales permite una gran versatilidad a la hora de manipular productos de formas muy distintas (Sdahl & Kuhlenkoetter 2005). La complejidad del proceso de recolección de frutos hace necesario el empleo de diversas tecnologías que deben desarrollarse (Sarig 2005) e implica una adecuada configuración del área de recolección e identificación del terreno (Rovira-Más et al. 2008) así como el correcto reconocimiento del fruto que es más difícil cuando estos están agrupados como en el caso de los racimos de uva (Diago et al. 2015). El uso de ventosas en la manipulación

de alimentos es bastante común en la industria. Algunos sistemas son destacables como la garra capaz de manipular y clasificar según sexo el jurel (Fatronic Tecnalía) o sistemas específicos para la manipulación de manzanas (Inmotx) donde la ventosa dispone de unos alveolos específicos que aumentan la superficie de contacto y se adaptan a la forma de la manzana. Un diseño interno de canales evita el bloqueo del aire mejorando la distribución de fuerzas en el producto e incrementado la capacidad de agarre.

Generar vacío es el uso más común del empleo de aire como método de manipulación sin embargo por medio del efecto Bernouilli se puede generar depresión cuando una corriente sopla a alta velocidad. Varios fabricantes ofrecen ya su propia gama de productos basados en este principio (SMC, Festo). En general estos sistemas se adaptan bien a productos planos, ligeros y con relativa rigidez. El sistema es rápido y permite la manipulación sin contacto teórico o con un contacto puntual sobre la superficie del producto aunque en la manipulación de alimentos puede llegar a deshidratarlos (Davis et al. 2008). Con el mismo sistema se han conseguido manipular productos con formas tridimensionales como uvas, tomates *cherry*, manzanas, fresas... (Pettersen et al. 2010; Sam & Nefti 2010), placas de silicio (Brun & Melkote 2006), pieles (Dini et al. 2009) o productos de repostería (Rawal et al. 2008). Este mismo sistema se ha empleado en la fabricación de robots capaces de subir por paredes (Wagner et al. 2008). Incluso se han desarrollado sistemas de garra basados en este principio que no precisan de presión neumática y que están actuados directamente por un motor eléctrico (Li & Kagawa 2013).

El soplado de aire puede usarse para la manipulación de productos delicados como obleas de silicio o productos alimentarios planos. Por medio de un delgado cojín de aire se pueden transportar los productos controlando el aire inducido (Laurent et al. 2011).

2.5.2. Estrategias basadas en el contacto

El uso del contacto para manipular productos es uno de los más importantes y empleados en el diseño de garras para robots (Monkman et al. 2007). Los fabricantes disponen de una amplia gama de garras estándar con actuadores neumáticos, eléctricos e hidráulicos. La configuración mecánica empleada para mover los dedos es muy variada (Penisi et al. 2003). Las garras pueden seleccionarse en base a diversos parámetros como: el rango de apertura desde abierto a cerrado, la fuerza de cierre y/o apertura, tipo de movimiento de los dedos (angular, paralelo o auto-centrada), tipo de actuador (neumático, hidráulico, eléctrico, magnético...), la forma de los dedos y la estrategia de agarre externo o interno. El empleo de actuadores eléctricos permite controlar la posición de los dedos, su aceleración y la fuerza a aplicar son muy versátiles, pero más complejos, menos robustos y más caros que sistemas neumáticos. Los actuadores neumáticos son económicos, sencillos, trabajan a alta velocidad a posiciones de completamente abierto o cerrado, son adaptables en su actuación soportan cambios bruscos o golpes sin sufrir daños, se controlan fácilmente con electroválvulas, su velocidad es ajustable con reguladores de caudal, disponen de una

ratio fuerza-peso elevado y algunos diseños permiten el lavado con agua a presión. Las características de estos los hace muy adecuados en los procesos robotizados de coger y colocar cuando estos presentan una amplia diversidad de formas como son las frutas y los vegetales. Los actuadores hidráulicos requieren de complejos sistemas de alimentación y suministro, permiten un fácil control de la velocidad, tienen una gran capacidad de realizar esfuerzos elevados, pero son pesados y lentos. Principalmente se emplean en sistemas que requieran grandes esfuerzos.

El contacto con el producto permite que los dedos de la garra puedan transmitir los esfuerzos necesarios para la manipulación. Las garras prensiles o de contacto tienen una alta repetitividad, buena precisión y posibilidad de regular la fuerza. Tienen un fácil mantenimiento y control con buena fiabilidad y alta velocidad. La alta velocidad del contacto puede dañar los productos sensibles como pueden ser las frutas u otros alimentos sensibles a golpes. La complejidad del sistema de agarre aumenta cuando se manipulan productos con geometrías complejas y variadas como son los productos agroalimentarios, al incrementarse esta complejidad las garras pueden ser menos robustas, más pesadas y de mayor tamaño. Los dedos contactan con el producto por tanto deben estar realizados con un material homologado para contacto con alimentos, tener buena resistencia a la erosión, abrasión y fatiga. El diseño del sistema de agarre debe ser de fácil lavado, sin recovecos y con buen índice de protección (*ingress protection*). En una garra por contacto los dedos se aproximan al producto por los laterales, los productos no pueden encontrarse muy juntos y deben tener el suficiente espacio como para que los dedos no toquen los productos adyacentes al que manipula.

Cuando los productos son similares y tienen formas regulares pueden ser manipulados suavemente por garras de movimiento angular si los dedos están específicamente diseñados para estos productos. En este caso, la garra tiene pocos componentes y sus dedos tienen un reducido número de grados de libertad, pero aun así puede lograr una manipulación suave si consigue zonas de contacto contra el producto amplias. Cuando los productos son más irregulares, sensibles a sufrir daños y de formas complejas, como pueden ser los agroalimentarios, una garra con dos dedos con movimiento angular puede crear zonas con puntos de contacto muy localizados que concentran la presión sobre el producto. En estos casos incrementar los grados de libertad de los dedos de la garra permite que estos se adapten a la forma del producto para lograr una manipulación más suave y efectiva. Existen diversas formas de conseguir garras con dedos de múltiples grados de libertad. Los mecanismos articulados de agarre con múltiples sólidos rígidos en movimiento o mecanismos multicuerpo disponen de un mayor número de piezas móviles que una garra simple pudiendo con ello aumentar la cantidad de puntos de contacto durante el agarre del producto. La tecnología de fabricación aditiva de material también permiten simplificar la fabricación de dedos en una única pieza que incluye el conjunto de articulaciones (Lotti & Vassura 2002) esto permite una simplificación notable del número de componentes. Se han logrado realizar diseños de manos robóticas infra-actuadas con distintos materiales por medio de la tecnología de fabricación por deposición o aporte de material *Shape Deposition Manufacturing*, el diseño logra manipular con éxito una amplia variedad de objetos (Dollar 2010).

Empleando sólidos rígidos la cinemática del conjunto de piezas del mecanismo de garra puede estar definida según el movimiento del actuador o, indefinida o infra-actuada. Si el mecanismo está definido por el movimiento del actuador o de los actuadores, los dedos de la garra teóricamente se detendrán cuando encuentren el primer obstáculo que será al entrar en contacto con el producto. Si el esfuerzo es lo suficientemente alto los dedos moverán el producto hasta encontrar el equilibrio estático o hiperestático del conjunto. En este caso es fácil encontrarse con altas presiones en determinadas áreas del contacto. El conjunto de fases de manipulación para una pinza de dos dedos (Ceccarelli & Nieto 1993) se pueden dividir en:

1. Choque inicial de uno de los dedos contra el objeto al realizarse el movimiento de cierre de los dedos de la garra.
2. Impacto del segundo dedo y arrastre del objeto mientras sigue el movimiento de cierre, hasta lograr una posición estática del objeto entre los dedos ya sea por las fuerzas existentes o por vínculos geométricos.
3. Choque final al cerrarse los dedos y aplicar fuerza. Los dedos de la garra se detienen.
4. Agarre estático, el objeto está en un equilibrio estático entre los dedos.
5. Agarre dinámico, el objeto permanece en equilibrio entre los dedos mientras hay carga dinámica debida al transporte del objeto.
6. Perturbaciones debidas a movimientos externos como por ejemplo un impacto ocasional.

El uso de más partes móviles con dedos con grados de libertad indefinidos o infra-actuados puede permitir que estas se adapten al producto mientras se produce el contacto. Esta adaptación a la forma del producto reparte los esfuerzos necesarios para manipularlo y evita que altas presiones dañen el producto.

Cuando en un sistema mecánico la cinemática de todos sus componentes no está definida, esto es, el número de actuadores es menor que el número de grados de libertad, el mecanismo está infra-actuado. La infra-actuación se caracteriza por la indefinición en la posición de los componentes del mecanismo. Ante una posición determinada del actuador o los actuadores existen diversas soluciones en las posiciones de los dedos que contactan con el producto. Si la configuración en un sistema agarre de estos mecanismos infra-actuados es la adecuada, los dedos del sistema pueden llegar a adaptarse a la forma del producto y reducir las zonas de contacto con altas presiones incrementando la capacidad para agarrar y sostener objetos (Kragten & Herder 2010). La falta de control de la trayectoria de garras infra-actuadas puede convertir el mecanismo en un sistema inestable. Hay numerosos estudios que emplean mecanismos infra-actuados para el diseño de manos robóticas (Yang et al. 2009; Wu et al. 2009; Rossi & Savino 2014; Laliberte & Gosselin 1998; Zhang et al. 2009), incluso algunos se centran en su aplicación industrial (Meijneke et al. 2011), en la reducción de los actuadores a uno único (Gosselin et al. 2008), en el empleo de actuadores neumáticos infra-actuados (Bégoc et al. 2007) o que emplean cables como actuadores (Hirose & Umetani 1978), en el uso con sistemas combinados de uniones flexibles que permiten mejorar la capacidad de adaptación de los dedos (Odhner et al. 2014; Ciocarlie & Allen

2010). Hay ya en el mercado algunos fabricantes que ofrecen modelos de garra multi-dedo con mecanismos infra-actuados (Robotiq, Lacquey).

A pesar de los avances logrados aún las principales dificultades de estos mecanismos de agarre infra-actuado para ser empleados en procesos robotizados de coger y colocar productos agroalimentarios es el incremento en la complejidad del mecanismo, el mayor peso, la velocidad de actuación y las dificultades para encontrar soluciones que se adapten en la forma deseada a los productos. Diseñar dedos infra-actuados requiere de una ardua tarea en la búsqueda de la combinación más adecuada (Larouche & Birglen 2013) siendo la experiencia del diseñador un pilar básico. A pesar de estas limitaciones se pueden encontrar aplicaciones industriales para la manipulación de frutas y vegetales (Lacquey). Como alternativa a esto se pueden emplear sistemas infra-actuados realizados con materiales que tienen cierta flexibilidad como son los plásticos (Rohm) o realizados en silicona altamente flexible y que se deforman bajo presión (Softpic) o depresión (piGRAB de Piab). Con esta combinación es posible lograr un reducido peso del conjunto, una alta robustez de agarre y capacidad para resistir impactos (Nielsen & Dancu 2014). También se pueden usar mecanismos flexibles en garras para recolectar pimientos (Bac et al. 2014).

El uso de materiales rígidos en los dedos de la garra hace que se incrementen las fuerzas de impacto durante el agarre, limitando la fiabilidad del agarre de productos irregulares debido a la baja adaptación de los dedos y reduciendo la vida útil de la garra al estar sometidos a cargas repetitivas con elevados esfuerzos que no son disipados por los dedos de la garra (Shimoga & Goldenberg 1992). Los materiales flexibles en los actuadores permiten lograr una elevada resistencia de los dedos ante colisiones o situaciones imprevistas (Catalano et al. 2014). Los actuadores con rigidez variable pueden permitir la interacción directa con humanos. Existe una amplia variedad de estos actuadores según su capacidad para variar la rigidez y el amortiguamiento (Vanderborgh et al. 2013). El uso de materiales flexibles que se deforman por medio del contacto de los dedos permite la manipulación de una amplia variedad de productos con formas irregulares y que son sensibles a sufrir daños. Mediante el inflado de balones es posible conseguir la manipulación de objetos de formas diversas, con pesos distintos y distintas características mecánicas (Choi & Koë 2006). En la industria este sistema se emplea para la manipulación de botellas, también esta técnica es empleada en sistemas de agarre (Sigpack Delta Robotics) o con garras de 4 dedos (Inmotx) para manipular pasteles de manzana. Inflando un tubo se pueden manipular manzanas (Setiawan et al. 2004). La deformación de los dedos de la garra se puede conseguir por medio de otros sistemas como electropolímeros (Bar-Cohen 2000) o con aleaciones con memoria de forma (Zhong & Yeong 2006) o por medio de mecanismos flexibles realizados en silicona (Petkovic et al. 2012). Al emplear dedos con distintos materiales blandos deformables se consigue incrementar la destreza manipuladora (Matsuno et al. 2006). Estos métodos actualmente no disponen de la velocidad suficiente para conseguir procesos robot de coger y colocar rentables, pero constituyen un gran potencial si se emplean en combinación con otros procesos.

Normalmente se emplean robots de estructuras rígidas para la manipulación de productos, estos precisan de información precisa del producto a manipular presentando dificultades cuando el entorno no está definido. Una alternativa a este tipo de robots es el uso de sistemas robóticos con estructuras rígidas pero con sistemas de actuación autoadaptables con flexibilidad capaces de tolerar impactos (Tagliamonte et al. 2012). Otra posibilidad es emplear robots con estructuras blandas capaces de adaptarse al entorno. Estos robots tienen un gran potencial para su empleo en entornos poco definidos o para manipular productos con una amplia variedad de formas o donde se precise una destreza del robot para acceder a lugares poco accesibles. Estos robots blandos están inspirados en estructuras biológicas (Trivedi et al. 2008; Sangbae et al. 2013; Mazzolai et al. 2012) y también han sido empleado directamente en sistemas para manipulación de objetos (Giannaccini et al. 2014) incluso en el desarrollo de manos antropomórficas simples (Deimel & Brock 2013) capaces de trabajar en una amplia variedad de condiciones ambientales con humedad, polvo o temperaturas oscilantes. Por medio de estos mismos conceptos se ha logrado el desarrollo de una mano capaz de aumentar la capacidad funcional en personas con discapacidad (Polygerinos et al. 2015). Los robots blandos presentan por el contrario dificultades en su control y precisión (Sangbae et al. 2013) y necesitan de un desarrollo de nuevos materiales con elastómeros de gran capacidad de deformación que no lleguen a romperse (Ilievski et al. 2011). La mayoría de los robots blandos no tienen una elevada velocidad de actuación aunque se han conseguido diseños de dedos que han alcanzado altas velocidades en sus movimientos (Mosadegh et al. 2014).

La combinación de un robot móvil de estructura rígida con un robot blando, o sistema de manipulación blando, para agarrar un producto permite mejorar las capacidades de los primeros para manipular productos deslocalizados (Stokes et al. 2013), irregulares y sensibles a ser dañados durante su manipulación. Para la correcta integración de estos mecanismos se debe trabajar en la incorporación de sensores flexibles (Drimus et al. 2014), en conseguir mayor robustez, fiabilidad y mejora de los procesos de fabricación (Trivedi et al. 2008), en la incorporación de la estandarización de componentes y en métodos de diseño estándares o en la creación de nuevas herramientas de simulación (Lipson 2013). Existe la posibilidad de construir estos robots por medio de bloques flexibles que unidos permiten una configuración personalizada (Morin et al. 2014). Como alternativa se están desarrollando sistemas mixtos que emplean articulaciones flexibles que facilitan la adaptación a diversidad de productos (Howe et al. 2014) o la simplificación mecánica por medio de la infra-actuación de mecanismos (Rossi & Savino 2014).

Las manos robóticas tratan de imitar las capacidades de la mano humana para ello precisa de un elevado número de grados de libertad por medio de dedos con varias falanges que contactan con el producto e incorporan sensores. Recientemente la investigación en manipulación ha avanzado notablemente en el desarrollo de manos robotizadas antropomórficas. Las manos antropomórficas actuales han mejorado notablemente sus capacidades y destrezas a la par que su complejidad. La complejidad de estas es notable respecto a otros sistemas de agarre utilizados por robots. Existe una tendencia a simplificar las manos robóticas para reducir su coste y aumentar su

versatilidad para que pueda ser incorporada a procesos industriales (Bicchi 2002) y con ello se posibilita su uso en la manipulación primaria de productos agroalimentarios.

A pesar ello aún es difícil emplear estos sistemas en agroalimentación por su alto coste, complejidad, falta de robustez y velocidad de agarre aunque existen diseños de que consiguen grandes velocidades (Kaneko & Higashimori 2013). Ante la complejidad de estos mecanismos con componentes rígidos unidos por articulaciones y las limitaciones de este cuando trabajan de forma colaborativa con humanos (Vermeulen & Wisse 2008) se está investigando en nuevos sistemas de manos antropomórficas deformables con alta flexibilidad y capacidad de adaptación. Estas tienen una ventaja natural sobre las realizadas con componentes rígidos para agarrar y manipular objetos desconocidos, porque suavemente se pueden adaptar a una gran variedad de objetos por medio de un control sencillo (Rus & Tolley 2015).

Otra alternativa de sistema de manipulación es colgar el producto. Los ganchos son ampliamente empleados para la manipulación de cargas especialmente pesadas, pero la necesidad encontrar una zona que permita el acople del gancho en el producto limita su uso en la manipulación robotizada de alimentos. Los velcros constituyen otro ejemplo de micro ganchos dispuestos a lo largo de una superficie y solo son adaptables a superficies muy concretas siendo difícil liberar el producto.

2.5.3. Otras estrategias

Los sistemas intrusivos se introducen en el producto para manipularlo. El uso de clips para colocar y fijar elementos de forma rápida y económica está muy extendido en la industria debido a la versatilidad, velocidad y calidad de posicionamiento. Este sistema es intrusivo y puede emplearse como elemento intermedio para manipular determinados alimentos como por ejemplo comidas ensartadas. Su uso está muy extendido en la manipulación de productos porosos tejidos, mallas, fieltros... En el sector alimentario se emplean garras de agujas para manipular pescado congelado y productos de panadería industrial. Hay diversos proveedores de garras de agujas con diseños específicos para manipular productos concretos. La manipulación de alimentos con agujas genera daños en los productos siendo muchas veces estos daños admisibles o no apreciables. Las agujas están ampliamente extendidas en la manipulación de productos de pastelería industrial en donde los daños que se generan son reducidos, admisibles y no percibidos por el consumidor final. El sistema solo es válido para productos de peso reducido, se adapta mal a superficies curvas, precisa que el producto tenga características mecánicas muy concretas (blandos, consistentes, sin fragilidad...) y hay riesgo de contaminación alimentaria si se rompen las agujas. Las agujas dispuestas en una matriz también se han empleado para reorientar objetos aprovechando la gravedad (Blind et al. 2001).

Manipular un producto por medio de adhesión o soldadura es un proceso poco común en la manipulación con robots. El uso de estos métodos implica un alto tiempo ciclo, dificultad para liberar el producto y deja restos en él. A pesar de las dificultades existen soluciones que emplean adhesivos con sistemas láser para el curado o rotura del enlace

con el producto (Edward 2004). El tiempo ciclo conseguido es de en torno a 30 segundos.

La atracción generada por fuerzas electrostáticas puede ser usada para la manipulación. El método puede emplearse para la manipulación de objetos muy pequeños (Wierzbicki et al. 2007; Monkman 2003) relacionados con la nano-ingeniería. La electroadhesión sirve para manipular cargas en micro-garras (Monkman 2003) o incluso cargas mayores (Prahlad et al. 2012) o para diseñar de robots capaces de trepar muros (Prahlad et al. 2008). En la industria ya hay fabricantes que ofrecen esta tecnología (GrabIt).

Los líquidos pueden emplearse por diversos métodos en sistemas de manipulación robótica. Se pueden emplear como sistemas capaces de manipular de forma delicada productos con alta fragilidad o ductilidad o incluso con el mismo sistema se pueden manipular objetos pesados (Maruyama et al. 2013). Un fluido tiene la capacidad de adaptarse a la forma de los productos y los cambios en sus propiedades reológicas pueden ser beneficiosos para ser usados en sistemas de agarre. Las fuerzas de tensión superficial o los sistemas hidro-adhesivos se pueden usar para manipular productos (Seliger et al. 2000). El cambio sufrido durante la congelación de un fluido incrementa la cohesión estructural de este propiedad que se puede emplear para manipular tejidos (Stephan & Seliger 1999; Kordi et al. 2007). Existen fluidos que cambian sus propiedades reológicas, como su viscosidad, al estar sometidos ante un campo magnético. Estos fluidos se emplean en amortiguadores para controlar el coeficiente de amortiguamiento (Walker et al. 2009; Spencer et al. 1997). Este principio se puede emplear para que los dedos de una garra se adapten a la forma de diversos productos alimenticios con formas irregulares (Pettersen et al. 2010). Una forma de mejorar la capacidad de transmisión de esfuerzos en garras con fluidos magneto-reológicos es la inclusión de partículas que no son ferromagnéticas. La mejora en capacidad de carga aumenta al disminuir el tamaño de las partículas y los mejores resultados se consiguen con una concentración de entorno al 50% (Okatani et al. 2014). La principal dificultad de estos sistemas reside en el notable peso del fluido que contiene partículas ferromagnéticas y el riesgo de contaminación alimentaria caso de rotura de la membrana que envuelve el líquido.

Aprovechando las características físicas del producto a manipular se puede encontrar un método para manipular productos de la forma deseada sin necesidad de agarrarlo, de esta forma se pueden manipular láminas flexibles de lasaña (Masey & Caldwell 2007) enrollando directamente el producto. La gravedad se emplea normalmente para manipular por caída libre muchos productos. Se usa para llenar recipientes de líquidos o de semillas. Recoger el producto desde su parte inferior permite no tener que usar los esfuerzos normales para manipular los productos evitando con ello realizar esfuerzos excesivos sobre los laterales del producto, o sobre la parte superior, en el caso de agarrarlo por medio de ventosas. En determinados casos se evita el tener que emplear un sistema de agarre lateral. También se recoge el producto al introducir una superficie o cinta transportadora por la parte inferior de este. Este método se ha empleado en robótica, el sistema SWITL (desarrollado por Furukawa Kiko) (Kusuda 2011) emplea

una cinta transportadora para poder manipular una amplia variedad de cremas y masas. La cinta está hecha de un material hidrofóbico evitando así que el producto se adhiera. Este método permite a la vez que manipular recolectar productos como pueden ser coles (Foglia & Reina 2006). El mismo método se puede emplear para la manipulación de otros productos alimenticios delicados en los que la presión sobre sus laterales puede dañarlos o para para manipular tejidos en los que no se puede hacer presión sobre sus laterales.

La manipulación dinámica de productos con robots también es factible incluso cuando los robots tienen un solo grado de libertad (Lynch & Mason 1999; Mason 1999). La manipulación dinámica está muy condicionada por las propiedades físicas de los productos y por el desarrollo de algoritmos y dispositivos de control que dispongan de una velocidad de respuesta lo suficientemente rápida. Con manipulación dinámica se logra rotar, trasladar, girar sobre sí mismo, recoger y deslizar productos (Amagai & Takase 2002). Con desarrollos específicos de manos robotizadas se consiguen dedos capaces de operar a aceleraciones de 91 veces la gravedad para agarrar una pelota en el aire (Kaneko et al. 2003).

La vibración se emplea habitualmente para manipular y posicionar pequeños objetos. Con una adecuada configuración del sistema vibratorio es posible lograr que los productos se muevan de formas muy diversas (Vose et al. 2009). En el sector agroalimentario es un sistema ampliamente usado para clasificar, transportar o separar semillas. La clasificación de los productos por medio de la vibración necesita de determinadas propiedades físicas (forma, posición del centro de gravedad, rugosidades...) de los productos.

Abrazar el producto por medio de cintas o cuerdas permite manipular productos de forma sencilla. El método se adapta bien a diferentes formas, pesos y tamaños de los productos. La superficie del producto debe ser capaz de soportar el contacto de la cinta sin que se generen daños y en general la cinta o cuerda se deja rodeando el producto tras su manipulación.

Hacer levitar un cuerpo logra mantener el objeto flotando sin ningún aporte aparente de material. Por medio de soplado de chorro de aire controlado se puede hacer levitar esferas y lograr la manipulación del objeto (Becker et al. 2009). Existen diversos métodos para hacer levitar productos (Vandaele 2005) pero todos ellos precisan de un control activo del sistema y tienen gran dependencia de las características físicas del cuerpo.

2.5.4. Mejora en la adaptación a los productos por medio de “jamming”

Las recientes investigaciones mostradas con los robots blandos y su tecnología demuestran las oportunidades que presentan los materiales blandos, como las siliconas, para la manipulación productos con diversidad de formas. Los materiales blandos son capaces de adaptarse a los productos que manipula. La principal limitación del empleo de estos materiales para la manipulación es la falta de control de la rigidez ya que sin rigidez no se pueden, en muchos casos, transmitir los esfuerzos necesarios para

manipular los productos rápidamente o manipular productos más pesados. Si la zona de contacto se rigidiza tras el contacto con el producto esta mantendrá más fácilmente la forma al transmitirle esfuerzos y por tanto los productos podrán ser manipulados con mayores aceleraciones. Una forma de conseguir controlar la rigidez del sistema es encerrar pequeñas partículas en una membrana elástica. Estas presentan un comportamiento cuasi-fluido cuando se encuentran sueltas, esto es, la presión en el interior de la membrana es idéntica a la exterior o ligeramente mayor. Caso de que la presión en la cara interna de la membrana sea menor que en la cara exterior las partículas contactarán entre si rigidizando el conjunto y consiguiendo un comportamiento cuasi-sólido. Esta diferencia de presión entre la parte interna y externa de la membrana se puede controlar por medio de un sistema neumático o hidráulico de la membrana (Jiang et al. 2013). Este cambio de fase es isoterma, tiene una pequeña variación de la densidad y provoca el atasco o transición de las partículas consiguiendo con ello un cambio de estado de cuasi-líquido a cuasi-sólido. El cambio en el argot se denomina *jamming*.

El uso de sistemas *jamming* que permiten controlar la rigidez es bastante prometedor, tiene una gran perspectiva de crecimiento para diversas aplicaciones robotizadas (Jaeger 2014). La rigidez varía según el tamaño y tipo de gránulos, tamaño, material, forma... así como la membrana utilizada y depresión aplicada (A. Jiang et al. 2012; Nishida et al. 2014; Reitelshöfer et al. 2014). Incluso el ratio forma de los gránulos y su coeficiente de fricción influyen en las características que se alcanzan (Bekku & Nakajima 2015).

Esta propiedad ha sido empleada para desarrollar una garra universal que se adapta a los productos antes de manipularlos copiando su forma y cambiando el comportamiento del interior a cuasi-sólido generando con ello esfuerzos cortantes residuales entre la superficie de la garra y el producto suficientes para manipularlo (Brown et al. 2010). El empleo de estas garras basadas en esta propiedad respecto a las garras paralelas tradicionales presenta ventajas al manipular productos con formas irregulares. Hay desarrollados algoritmos que utilizan los datos de una cámara de visión artificial y que no requieren de ningún modelo físico de la propia garra para la manipulación de diversos objetos con un garra de *jamming* mostrando las ventajas y simplificación de estas respecto a garras paralelas tradicionales (Y. Jiang et al. 2012). Los avances logrados por estos sistemas de agarre permiten manipular una amplia variedad de productos quizás refutando la teoría del empleo de garras personalizadas a cada producto (Kaneko et al. 2003).

Como una de las aplicaciones más maduras de robótica con materiales blandos, hay empresas que ya han comenzado a producir manipuladores de robótica blanda (empresas como Pneubotics, Otherlab, Empire Robotics, Soft Robotics o Festo con su Flex-Shape-Gripper).

La transición *jamming* se puede lograr con pequeñas partículas sólidas o con láminas consiguiendo con ello distintas propiedades mecánicas mejorando la rigidez ante determinados esfuerzos (Wall et al. 2015). En general la mayoría de desarrollos han sido realizados con partículas pero existen algunos logros en el uso de láminas para

crear un robot de mínima cirugía invasiva (*minimally invasive surgery*) (Kim et al. 2013). Este mismo principio se ha empleado en estudios para laparoscopias en cirugía endoscópica transluminal por medio de un robot flexible capaz de controlar su rigidez (Jiang et al. 2013). El cambio de fase o transición *jamming* se puede emplear para detectar y estimar la rigidez por medio de palpación (Genecov et al. 2014) de determinados tejidos. El uso de sistemas *jamming* con membrana de látex es adecuado a aplicaciones donde se requiera un estado muy blando o un mayor rango de durezas (Jiang et al. 2014). Además, las membranas de látex están homologadas para contacto directo con alimentos. La membrana de látex tiene una menor histéresis del módulo de elasticidad que otras membranas como el vinilo, vitrilo y polietileno. Los sistemas *jamming* en combinación con diversas estructuras de robots blandos (Yao et al. 2013) pueden llegar a lograr el movimiento deseado de dedos en un sistema de agarre capaz de manipular productos irregulares y sensibles como son los agroalimentarios. Los sistemas *jamming* también se emplean en labios de ventosas permitiendo que se adapten a la forma de los productos y facilitando la posibilidad de succionar el producto al mismo tiempo (Bekku & Nakajima 2015).

2.6. Discusión y conclusiones

Las propiedades físicas de los productos, como su geometría, textura, dimensión, superficie de contacto, material empleado en los dedos, coeficiente de fricción, centro de gravedad y susceptibilidad al daño de los productos pueden afectar significativamente al proceso de manipulación. La clasificación de los productos alimenticios según sus características (Wurdemann et al. 2011; Wurdemann et al. 2009; Jimenez 1997; Erzincanli & Sharp 1997) ayuda a definir el sistema de agarre. Los procesos de agarre y colocación con robots cuando se realizan con elevadas aceleraciones pueden afectar a los productos agroalimentarios ya que estos son sensibles a sufrir daños. Cuando los productos se dañan se reduce su calidad y valor en el mercado. Esta es una de las razones por las que no están extendidas automatizaciones con robots que manipulen directamente frutas y vegetales.

El diseño del sistema de agarre precisa del conocimiento de las propiedades mecánicas del producto y de su posición y orientación previas antes de manipular un producto. Las especificaciones de diseño del sistema de agarre determinan las máximas aceleraciones permitidas cuando este manipula un producto agroalimentario con robots. Estas aceleraciones máximas variarán según el tipo producto, su orientación y la presión establecida sobre el producto. En muchos casos es necesario considerar otros componentes para proteger el sistema de colisiones, sobrecargas o desalineamientos. Todas estas consideraciones no solo afectan a la garra sino también a la selección del robot y distribución de componentes en la celda.

Materiales más flexibles resistentes a la abrasión y nuevos procesos de fabricación son una oportunidad e innovación en el diseño de sistemas flexibles o de ventosas con formas específicas. Las garras de contacto presentan mejor comportamiento para manipular productos sucios o en medio ambientes sucios. El contacto con el producto puede aprovecharse para conseguir información sobre el estado del mismo como por

ejemplo el estado de firmeza de una fruta. Los mecanismos infra-actuados permiten manipular una amplia variedad de formas, pero precisan de diseños específicos en donde es importante la destreza y el saber hacer del diseñador. Estos mecanismos deben estar basados en sistemas simples, fiables y robustos de bajo coste que permitan rentabilizar su instalación.

Las garras basadas en el contacto con ventosas y sistemas de inflado se emplean en la recolección de frutas y vegetales. Los sistemas de garras universales basadas en el contacto y que emplean fluidos granulares en las zonas de contacto con el producto tienen un gran potencial para la manipulación de productos con formas irregulares, sin embargo, los sistemas actualmente desarrollados aún son demasiado lentos y poco fiables para operaciones robot de coger y colocar determinados productos agroalimentarios.

Una posible solución para sustituir la manipulación manual directa de muchos de los productos agroalimentarios, en donde la inspección del operador es clave, es la combinación de ventosas junto con mecanismos infra-actuados basados en el contacto y que dispongan de sensores capaces de obtener información del estado de producto. Sin embargo, el incremento en la complejidad y aumento de peso de los sistemas combinados requieren un gran esfuerzo por parte del diseñador que debe encontrar mecanismos sencillos que permitan simplificar esa complejidad y reducir el peso de la garra (Wilson 2010).

El sistema de manipulación debe lograr incorporar sensores robustos y fiables capaces de sustituir la inspección táctil de los operarios. La incorporación de nuevas técnicas no destructivas de incorporación de sensores en los sistemas de agarre (Naghdy & Esmaili 1996; Bandyopadhyaya, Babu, Bhattacharjee, et al. 2014) permiten que el sistema de agarre tenga nuevas destrezas y capacidades para realizar controles de calidad y trazabilidad del producto a lo largo del proceso.

Una alternativa a manipular por agarre directo de los productos es considerar la manipulación sin agarre empujando, recogiendo, trasladando, rotando o depositando el producto hasta lograr la manipulación deseada. Como paso previo al diseño de esta estrategia, es necesario el estudio tanto del producto como del sistema de manera global en donde debe de primar una simplificación de las necesidades de manipulación.

El uso las nuevas técnicas de fabricación directa de piezas realizadas con materiales flexibles y resistentes abre el camino a diseñar nuevos sistemas de agarre imposibles de mecanizar y que pueden ser capaces de adaptarse a una amplia variedad de formas y texturas como son los productos agroalimentarios. Como conclusión final, es aún necesario seguir estudiando las características de los productos agroalimentarios y desarrollar las tecnologías emergentes para poder diseñar sistemas de agarre para robots que permitan la correcta manipulación a alta velocidad y sin generar daños.

Capítulo 3

Nuevas garras flexibles y autoadaptables a los alimentos

3.1. Introducción

Tal y como se menciona en el Capítulo 2 para manipular delicadamente productos agroalimentarios es necesario que la garra se pueda adaptar a la forma de los productos. En ese capítulo se investigan las ventajas y limitaciones de la técnica de fabricación aditiva, con materiales plásticos homologados para contacto alimentario, en la fabricación de garras o componentes de garras que puedan adaptarse a los productos agroalimentarios aprovechando la flexibilidad del material y las posibilidades de fabricación. Se han diseñado y comprobado, por la técnica de elementos finitos, todos los modelos mostrados. Es importante anotar que para analizar por elementos finitos los modelos diseñados estos están simplificados para que puedan resolverse matemáticamente de manera eficaz y rápida. Gran parte de estos modelos han sido fabricados y su funcionamiento real comprobado. Dos de ellos se utilizaron para realizar test de fatiga. El capítulo concluye con ejemplos de diseños realizados, las dificultades encontradas y las posibles soluciones para trabajos futuros.

La mayoría de las limitaciones geométricas de diseño de piezas provienen de los procesos de fabricación y su coste. Con la fabricación aditiva por medio de sinterizado de polvo con láser estas limitaciones prácticamente desaparecen. Este proceso de fabricación dispone de una alta funcionalidad, un coste contenido de producción frente a piezas mecanizadas y una independencia del coste de las piezas con la complejidad

geométrica de estas. Las restricciones geométricas son muy bajas y la velocidad de fabricación es muy elevada al partir del modelo tridimensional. Esta tecnología se ha empleado en el desarrollo completo de una garra neumática (Grzesiak et al. 2011) realizada en poliamida PA2200. Este material plástico además de homologado para contacto alimentario y de tener baja densidad, presenta características elásticas peculiares que permiten fabricar con el actuadores neumáticos y mecanismos deformables. La tecnología de fabricación aditiva de polvo por sinterizado láser abre nuevas perspectivas para desarrollar de forma personalizada actuadores neumáticos, piezas deformables elásticas y componentes de peso reducido. Permite también la realización de un sistema complejo de agarre con varios actuadores y con componentes flexibles y rígidos en una única pieza. Gran parte de los resultados de este capítulo se pueden consultar en la publicación (Blanes et al. 2014). Debido al potencial del modelo de actuador desarrollado está en trámite la patente de este producto en Estados Unidos con referencia de solicitud 62/190,134. ID 027318.00113.

3.2. Beneficios de la fabricación aditiva en garras para manipular productos agroalimentarios

Una de las soluciones propuesta para manipular productos agroalimentarios es el empleo de mecanismos articulados multicuerpo en lugar de los sistemas más sencillos de garras angulares o paralelas. Estos están constituidos por la unión articulada de varios sólidos rígidos para lograr un elevado número de grados de libertad y que se aumenten los puntos de contacto, pero son más complejos que soluciones más simples, tienen un coste mayor, son más difíciles de controlar, pesan más y en muchos casos tienen una menor robustez. Es necesario buscar nuevas soluciones que reduzcan la complejidad del sistema de manipulación. Una posible solución es emplear la tecnología de fabricación aditiva de material. La mayoría de los componentes que se diseñan en un mecanismo están pensados para poder ser fabricados por los métodos tradicionales de arranque de viruta. El diseño debe considerar como se fabricarán las piezas. La fabricación aditiva por sinterizado láser de polvo elimina gran parte de estas barreras y además tiene la posibilidad de poder realizar las piezas directamente en materiales plásticos. El empleo de plásticos facilita que estos se puedan deformar bajo el contacto logrando una presión más uniforme sobre el producto durante la manipulación.

Una alternativa a los sistemas multicuerpo son los mecanismos infra-actuados que buscan reducir la complejidad del mecanismo y de su control empleando un menor número de actuadores. Estos mecanismos son más difíciles de diseñar. Aún con esta solución la complejidad del mecanismo de agarre es muy elevada. Al emplear la fabricación aditiva es posible lograr un mecanismo deformable con deformación concentrada o distribuida que logre un comportamiento parecido al del sistema infra-actuado. Otra gran ventaja de este proceso de fabricación es la posibilidad de realizar dedos con formas complejas imitando la forma del producto que se desea manipular.

Los dedos también se pueden diseñar para que se deformen mientras manipulan el producto.

Todo mecanismo precisa de uno o más actuadores para poder moverse. De él o ellos y de las características sistema de agarre dependen la fuerza, rango y velocidad de la garra robot. El acoplamiento de los actuadores tradicionales a los mecanismos precisa o de juntas flotantes o con holguras que absorban los errores y desalineamientos del mecanismo o de una buena precisión de los componentes móviles de la garra. Los sistemas adaptables facilitan la reducción de la complejidad de los mecanismos de agarre evitando la necesidad de acoplamientos flexibles que absorban los errores y desalineamientos. Esto simplifica la construcción del mecanismo y reduce el número de componentes al poder conectar directamente el actuador sin que este se bloquee por desajustes mecánicos. La posición de equilibrio de un actuador flexible depende de las fuerzas aplicadas y no de la posición y trayectoria predefinida (Van Ham et al. 2009). Por medio de la fabricación aditiva es posible diseñar un actuador neumático fabricando directamente una cavidad cerrada que bajo la presión del fluido logra ser el actuador una garra para robots (Grzesiak et al. 2011).

Una alternativa a los actuadores neumáticos tradicionales son los músculos neumáticos o McKibben que son inherentemente flexibles y autoadaptables al no requerir la alineación mecánica, son de coste contenido, trabajan de forma suave y simplifican la construcción del mecanismo donde se emplean evitando el uso de juntas flotantes. Su mayor inconveniente en el uso de estos para garras en robots y manipulación de alimentos es su comportamiento no lineal, la histéresis, su baja dinámica y que son de simple efecto pudiendo solo trabajar en contracción (Vanderborght et al. 2013). Algunos avances existen para emplear músculos neumáticos de doble efecto colocándolos uno encerrado en otro (Zheng & Shen 2013).

Otra opción mencionada es el uso de robots blandos que tienen la capacidad de lograr una interacción flexible con ambientes no estructurados o indeterminados y por ello son capaces de manipular productos no conocidos a priori (Sangbae et al. 2013) como pueden ser los productos agroalimentarios. Los materiales elastoméricos usados en robots blandos están principalmente realizados en siliconas que permiten altas deformaciones, son adecuados al contacto con alimentos y permiten un comportamiento autoadaptable a bajo costo. Las formas de los robots blandos están limitadas por los procesos de fabricación. La robótica blanda puede avanzar notablemente gracias a los nuevos procesos de fabricación que eliminan parte de las barreras de construcción de los métodos tradicionales de mecanizado de piezas (Lipson 2013). El desarrollo de la tecnología de fabricación aditiva con la incorporación de nuevos materiales y la mejora de la calidad de las piezas fabricadas puede ser determinante para lograr avances significativos en la robótica blanda.

3.3. Fabricación aditiva de actuadores neumáticos

Los actuadores lineales y angulares son usados normalmente en la industria para diseñar garras para robots. Estos actuadores generalmente se basan en el movimiento de un pistón que, encerrado en una cámara aislada, se somete a una presión distinta a la exterior. La cámara debe estar cerrada para evitar pérdidas de aire y tanto el pistón como el vástago friccionan para evitar la fuga de aire. Los actuadores pueden ser de simple o doble efecto. Un actuador neumático puede ser creado basándose en la deformación de la cámara. Los músculos artificiales emplean este principio que deforma una membrana elástica, sus movimientos son lineales y pueden trabajar con desalineamientos o desplazamientos. También existen dedos realizados con elastómeros que se deforman bajo la presión interna.

Con la fabricación aditiva es posible hacer un actuador neumático basado en la deformación de cámaras elásticas fabricadas en plásticos. La forma de la cámara, el espesor de sus paredes y la presión interna definen el movimiento, la carrera y la fuerza. Los actuadores propuestos para fabricación aditiva están hechos en PA2200, material aprobado para contacto alimentario por la FDA (*Food and Drug Administration*) y han sido realizados con la máquina de sinterizado láser EOSint P380. Este plástico tiene entre tres y ocho veces menos peso que actuadores neumáticos actuales realizados en metal. La velocidad de estos actuadores está condicionada por el volumen de cámara, el módulo de elasticidad del material, las propiedades mecánicas del material, su comportamiento ante sollicitaciones a alta velocidad y la dificultad del introducir o expulsar el aire. Ante idénticas formas estos actuadores tienen una mayor velocidad de retorno que los que están fabricados en silicona. Comparando con la silicona, a pesar de las limitaciones de deformación de la poliamida, los actuadores por fabricación aditiva pueden lograr alcanzar el movimiento buscado, con el rango, la velocidad y la fuerza necesaria para desarrollar garras para robot en la manipulación de alimentos.

Los actuadores elaborados por fabricación aditiva están hechos de una única pieza y son fácilmente personalizables. Esto facilita su integración en el mecanismo de agarre, respecto a los actuadores estándar. El diseñador ajusta el actuador a sus necesidades sin tener que adaptarse a un modelo concreto. La longitud de estos actuadores es menor que los estándares ya que no necesitan vástago, solo precisan de una toma de aire que puede ser colocada a decisión del diseñador y no es necesario reservar un espacio para colocar el muelle de retorno del actuador. Estos actuadores son flexibles y autoadaptables, no precisando de juntas flotantes para ser conectados a un mecanismo. El control de la fuerza es complejo, con la misma presión interna de alimentación la fuerza que realizan es función de la posición del actuador. La poliamida puede sufrir deformaciones permanentes bajo cargas aplicadas durante largos periodos de tiempo (efecto *creep* o deformación por fluencia lenta) por ello deben de comprobarse sus prestaciones caso de necesitar un elevado número de ciclos como puede ser en las aplicaciones industriales.

3.3.1. Clasificación de los actuadores según el tipo de movimiento

Las características mecánicas de los actuadores industriales están definidas y los ingenieros se adaptan a ellas para conseguir el movimiento, carrera y fuerza necesaria del sistema de agarre. La forma de la cámara y la presión interna de los actuadores realizados por fabricación aditiva define su movimiento, rango y fuerza. El ingeniero diseña el actuador según sus requerimientos. Estos actuadores no tienen que fabricarse como componentes aislados ya que pueden ser integrados dentro del chasis de la garra sin necesidad de empleo de sistemas de acople como tornillos, ejes o juntas flotantes que normalmente se emplean con actuadores industriales estándar. El tipo de movimiento de estos actuadores puede ser complejo y distinto a los movimientos circulares o lineales de los modelos estándar. Esta característica puede ser utilizada para hacer un actuador que tenga el movimiento deseado de los dedos de la garra. Los actuadores realizados por fabricación aditiva son flexibles y autoadaptables. Pueden absorber fácilmente pequeños desalineamientos y desplazamientos y no precisan del empleo de juntas flotantes o barras de transmisión extra para unir el actuador al mecanismo. Las siguientes figuras que se presentan son el resultado del análisis por elementos finitos de diversas propuestas de actuadores.

3.3.2. Actuadores con movimiento lineal

El movimiento lineal de los actuadores permite reemplazar el uso de cilindros neumáticos o incluso ser usados para realizar garras con movimiento paralelo de dedos. Para lograr un movimiento lineal tanto la cámara como las tensiones a las que esta está sometida deben tener una simetría axial como por ejemplo con fuelles. La Figura 3.1 muestran distintas posibilidades de actuadores lineales y su deformación con una presión positiva de 0,3 MPa. La máxima deformación conseguida con la poliamida 2200 empleada en estos actuadores es del 20% respecto la longitud total del actuador. Los fuelles pueden disponer de diversas formas consiguiendo recorridos parecidos (Figura 3.1). Si no existe una geometría axial se consiguen otro tipo de deformaciones que pueden ser aproximadamente lineales (Figura 3.1d). Estos modelos presentados son teóricos y su funcionamiento está comprobado por medio de la técnica de elementos finitos.

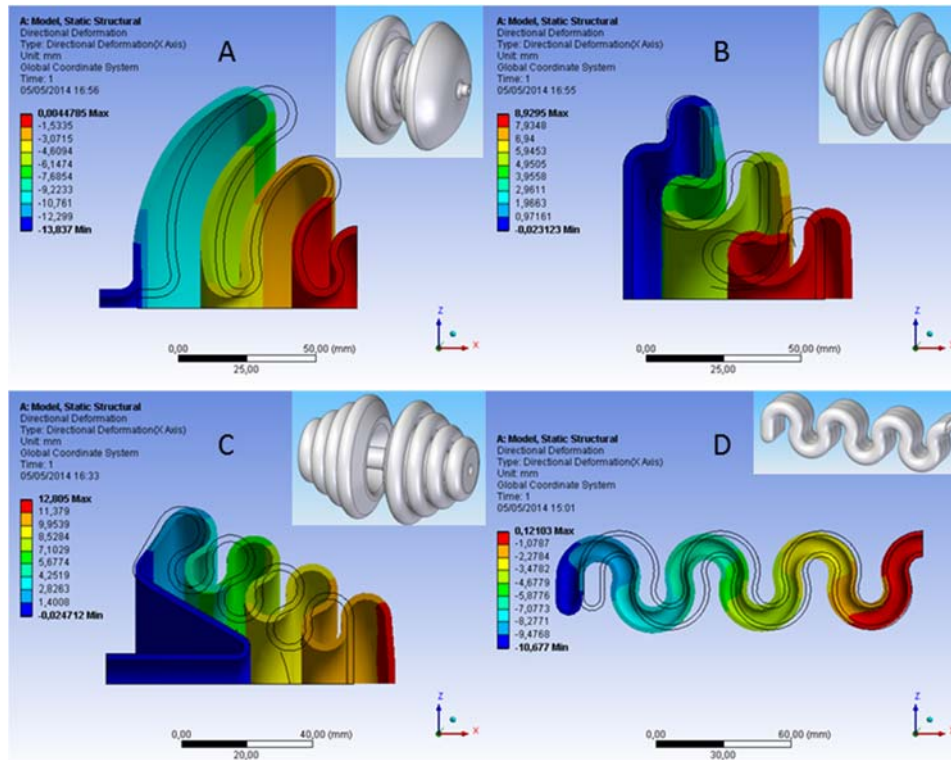


Figura 3.1. Modelos analizados por elementos finitos a deformación estática con presión interna de 0,3 Mpa y que pueden ser realizados con la tecnología de fabricación aditiva de material. (a-c) Modelos que tienen deformación lineal y que trabajan en expansión, (d) modelo con deformación cuasi-lineal.

3.3.3. Actuadores con movimiento de rotación y lineal

Los actuadores lineales se adaptan muy bien para diseñar sistemas de garras con movimiento paralelo de dedos. Los modelos presentados trabajando a contracción pueden usar sus caras exteriores para que los dedos agarren el producto. Aplicar fuerzas de contacto sobre las caras externas del producto es el método de manipulación más usualmente utilizado en garras para robots. La Figura 3.2 muestra la deformación real del modelo de actuador oval hueco con forma helicoidal fabricado. El actuador se contrae y gira cuando la presión interna generada dentro de él es mayor que la externa.

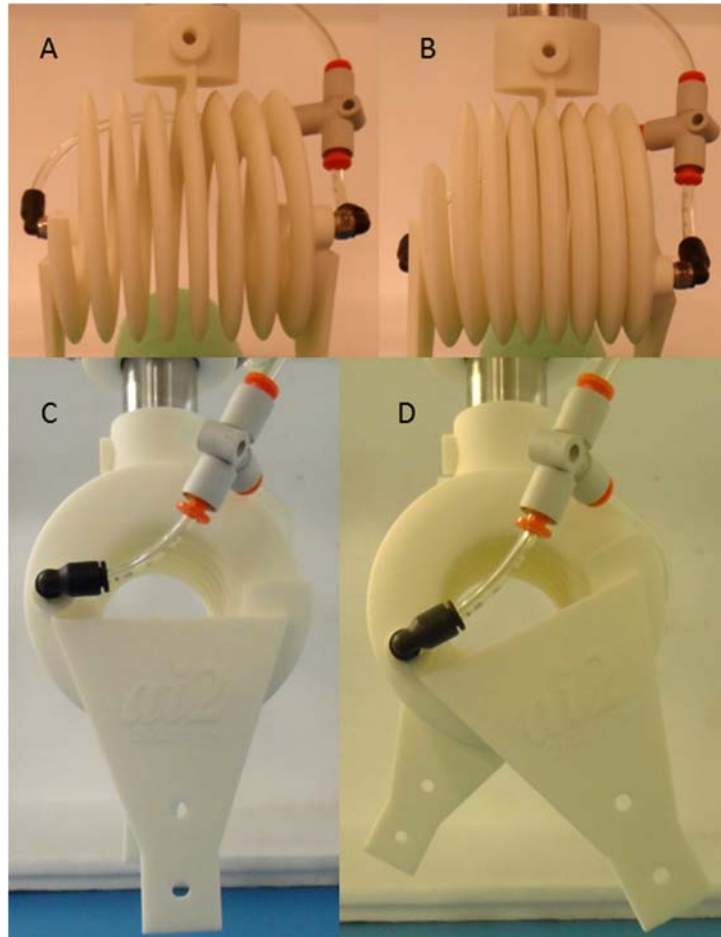


Figura 3.2. Actuador realizado en poliamida 2200 por medio de fabricación aditiva de sinterizado láser de polvo. (a, c) Figuras con el actuador sin presión interna, (b) contracción del actuador, (d) rotación del actuador. Experimento realizado a 0,3 MPa.

Considerando la ventaja de la libertad de diseño de la forma de la cámara es posible lograr un movimiento que sea el deseado de los dedos de una garra. La Figura 3.3 muestra la deformación de una espiral hueca analizada por elementos finitos cuando es sometida a una presión interna. La parte inferior del dedo se desplaza prácticamente de manera horizontal mientras el dedo rota un pequeño ángulo. Este tipo de movimiento puede emplearse en el dedo de una garra para presionar el producto por su cara externa y al mismo tiempo levantarlo. El diseño reduce la cota vertical de la garra y sus dedos logran el movimiento necesario sin necesidad de un mecanismo de barras articuladas o deslizaderas. La garra con este método puede ser más pequeña y ligera que con otro tipo de actuadores.

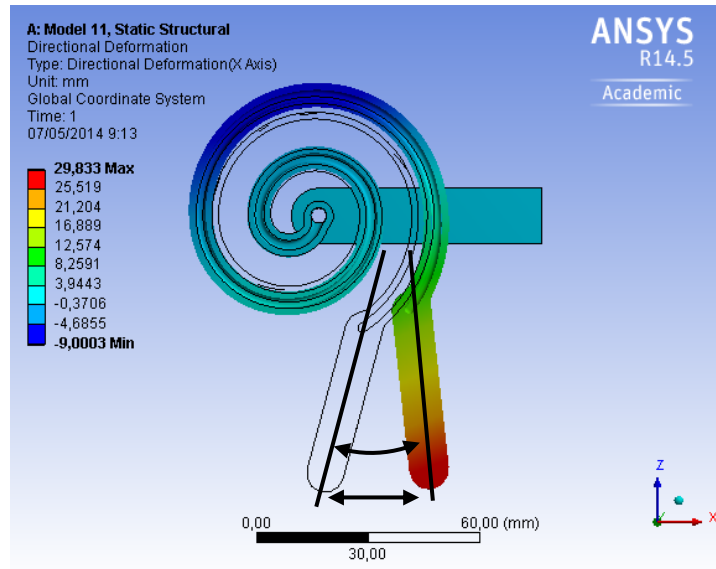


Figura 3.3. Actuador de dos grados de libertad que permite un movimiento horizontal junto con una pequeña rotación del dedo.

3.3.4. Actuador de doble efecto

Los actuadores mostrados son de simple efecto. Las propiedades elásticas del material actúan como resorte que permite el retorno del actuador y por ello de los dedos de la garra a la posición original. La velocidad de retroceso del actuador está limitada por el volumen de la cámara, el módulo elástico del material y las dificultades del aire para salir de la cámara. Cuando se precisan altas velocidades en actuadores neumáticos se emplean actuadores de doble efecto.

El movimiento de los actuadores producidos por fabricación aditiva se genera por la diferencia de presiones entre el interior y el exterior de la cámara que habitualmente es la atmósfera. Sin embargo, si la presión externa se controla es posible lograr un actuador de doble efecto. La Figura 3.4 es un actuador de doble efecto que puede ser realizado por fabricación aditiva de material. Dispone de dos cámaras encerradas a las cuales se puede suministrar aire a presión de forma independiente, según la presión que se ejerza en cada una de las cámaras se obtienen distintos desplazamientos (Tabla 3.1). Esta solución aumenta la complejidad del actuador ya que precisa de un cierre que evite la fuga de aire entre la cámara externa y la atmósfera, por el contrario, presenta la ventaja de que el actuador dispone de tres posiciones distintas.

Tabla 3.1. Relación entre las presiones en las cámaras y la posición del vástago.

Presión en cámara interna	Presión en cámara externa	Desplazamiento
Atmosférica	0,4 MPa	A
Atmosférica	Atmosférica	B
0,4 MPa	Atmosférica	C

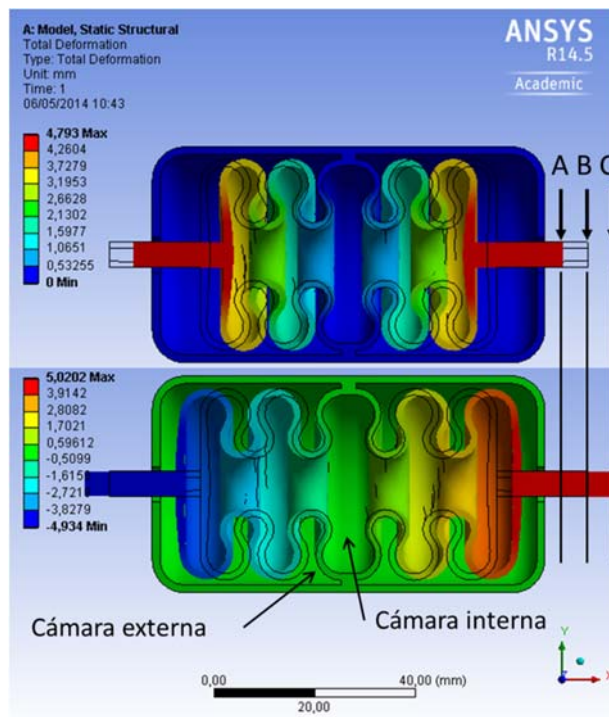


Figura 3.4. Análisis por elementos finitos de un actuador de doble efecto. En la parte superior se muestra el resultado cuando la presión interna en la cámara es atmosférica y la intermedia está a presión de 0,4 MPa. En la parte inferior se muestra la cámara interna con una presión positiva de 0,4 MPa y la intermedia a presión atmosférica.

3.3.5. Fabricación aditiva de material para mecanismos flexibles

Un mecanismo de una garra robot normalmente está compuesto por sólidos rígidos unidos por articulaciones de revolución y prismáticas. Las uniones articuladas permiten conectar dos cuerpos según determinados grados de libertad. Por ejemplo, una articulación esférica permite todas las rotaciones, pero ninguna traslación. El uso de estas articulaciones supone rozamiento entre ambas piezas con su consecuente desgaste y necesidad de lubricación. Estas articulaciones pueden ser reemplazadas por una única pieza hecha en material flexible que consiga la deformación deseada. Los mecanismos flexibles no precisan de lubricación, son más compactos, se dimensionan según necesidades, son de fácil fabricación y tienen un menor mantenimiento. Existen muchos modelos de geometrías que con su flexibilidad se pueden emplear para lograr mecanismos flexibles (Howell et al. 2013). Estos modelos deben adecuarse a las características mecánicas del material con el que se construyan.

Para conseguir reemplazar las articulaciones y correderas o juntas prismáticas de mecanismos con sistemas deformables es necesario diseñar geometrías específicas capaces de lograr la deformación elástica deseada. Normalmente la solución implica geometrías relativamente complejas que no son un problema si las piezas se realizan por el proceso de fabricación aditiva. Las propiedades elásticas de la poliamida empleada en el proceso aditivo de fabricación permite realizar geometrías capaces de lograr reemplazar correderas por medio de barras paralelas unidas en su extremo Figura 3.5a. Para lograr altas deformaciones de esta unión es necesario reducir el espesor de las barras e incrementar la longitud de estas. También es posible realizar uniones de rotación por medio de diversas geometrías. Para pequeños ángulos se puede emplear una barra delgada Figura 3.5b o el cruce de dos barras en un punto Figura 3.5c y para ángulos mayores espirales Figura 3.5d. Por medio del estudio de los espesores de estas barras o espirales y su longitud es posible conseguir mayores ángulos de rotación con la misma carga tensional en el material.

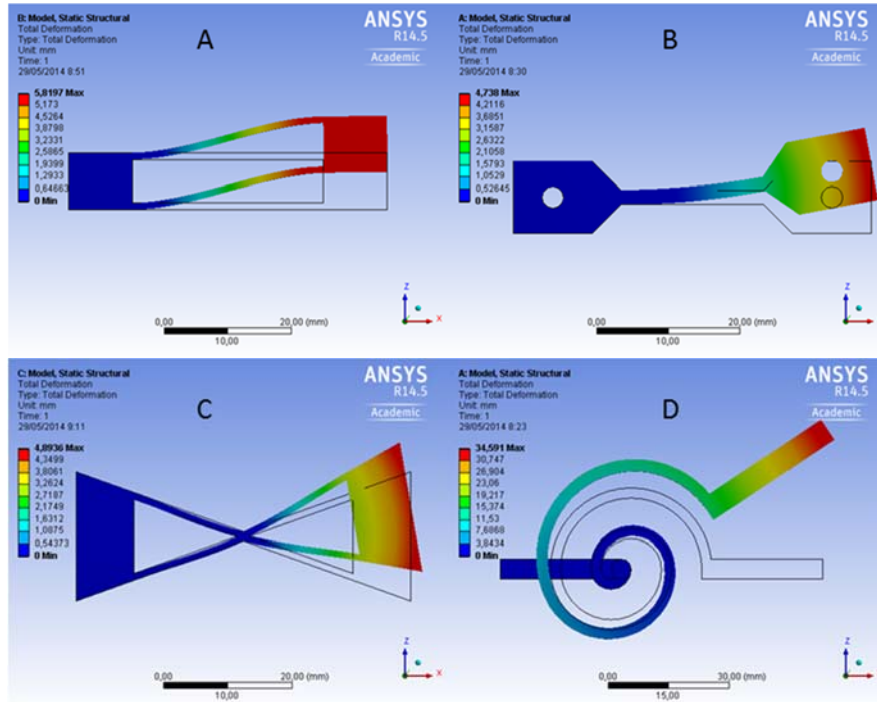


Figura 3.5. Modelos teóricos de posibles uniones de traslación (a) y de rotación (b, c, d).

Existen diversos tipos de uniones deformables de rotación con geometrías más complejas (Howell et al. 2013) (Figura 3.6) que pueden emplearse y producir fácilmente por fabricación aditiva de material.

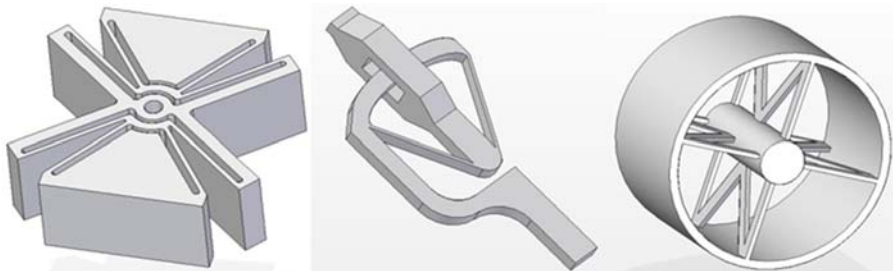


Figura 3.6. Sistemas de uniones deformables de rotación.

Por medio del empleo de este tipo de uniones es posible realizar y diseñar una garra completa que emplee estas articulaciones flexibles (Figura 3.7). Esta garra presenta limitaciones por pandeo del material en alguna de sus articulaciones cuando la deformación es elevada.

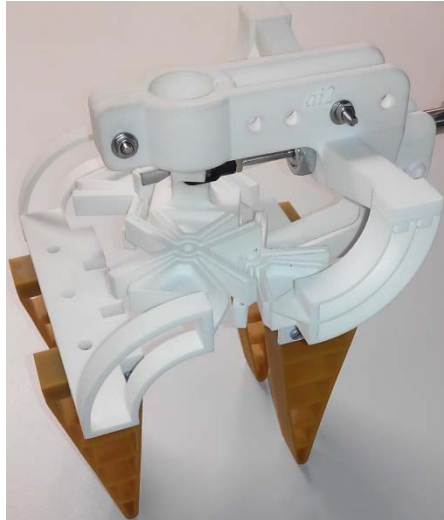


Figura 3.7. Ejemplo de garra que usa mecanismos de giro flexibles

3.3.6. Garras neumáticas producidas por fabricación aditiva de material

La manipulación de productos agroalimentarios con robots puede dañarlos cuando la presión que se ejerce sobre ellos es elevada. Esta precisa de movimientos rápidos para que sea rentable. Las garras deben ser lo suficientemente rápidas y la masa de los componentes en movimiento del mecanismo y, especialmente, de los dedos deben tener baja inercia y por ello una masa reducida que reduzca los efectos del impacto sobre el producto.

Las garras neumáticas estándar pueden llegar a cumplir los requisitos para manipular con robots determinados alimentos, estas se fabrican para movimientos de dedos paralelo o angular. Las garras paralelas tienen una fuerza constante de agarre a lo largo de todo el movimiento de los dedos, por lo que la presión que ejercen no depende del tamaño del producto y evitan que la fuerza sobre el producto dependa de la distancia entre el actuador y el producto. Las garras angulares pueden ejercer mucha presión sobre el producto y la fuerza que se ejerce sobre él depende de la distancia, se adaptan mal a productos con distintos tamaños, pero son mecanismos más sencillos que no emplean correderas en donde se puedan depositar restos de los productos. Para manipular alimentos con robots en la mayoría de los casos las garras neumáticas estándar no cumplen con los requisitos necesarios y los ingenieros tienen que desarrollar adaptaciones de estas o crear nuevos mecanismos de garra que tenga la carrera, fuerza y tipo de movimiento necesario. Para alcanzar las características buscadas de la garra los ingenieros diseñan mecanismos de agarre que emplean cilindros neumáticos estándar. La cinemática del mecanismo define los movimientos de los dedos, su fuerza, la velocidad de estos según posición del actuador. Los

componentes del mecanismo deben fabricarse según especificaciones del diseñador y con la suficiente calidad. Las uniones entre sus componentes requieren del uso de articulaciones y correderas. La unión del cilindro neumático debe adecuarse al movimiento del mecanismo y en muchos casos incorporar juntas flotantes para absorber los desalineamientos. Si los componentes no tienen la tolerancia suficiente entre ellos durante todo su recorrido el mecanismo se ralentiza o bloquea. Según se emplean más componentes aumenta la inercia del mecanismo y para conseguir velocidades elevadas la energía aportada se incrementa y está debe ser en gran parte absorbida por producto que se manipula pudiendo provocar puntos de contacto con presiones elevadas.

Una garra para robot realizada con componentes elásticos (chasis, actuador, uniones y dedos) puede adaptarse más fácilmente a las formas irregulares de los productos, agarrándolos de manera más suave, aumentando el área de contacto de los dedos contra el producto, aumentando la fiabilidad del agarre y reduciendo los puntos en donde puedan existir presiones excesivas. Los actuadores neumáticos, componentes, uniones y dedos pueden diseñarse para que sean flexibles durante el agarre de un producto. La garra debe diseñarse para que sea sencilla y con un reducido número de componentes logrando con ello un peso contenido. Los actuadores neumáticos realizados por fabricación aditiva en poliamida consiguen un desplazamiento pequeño debido a las propiedades de la poliamida y para la manipulación de alimentos en muchos casos este desplazamiento no es suficiente como para mover directamente el dedo con la carrera y fuerza deseada. Es necesario incorporar un mecanismo para conseguir mayor rango de movimiento. La fabricación aditiva permite realizar dedos de garras con formas complejas parecidas a los productos a manipular y con flexibilidad para que se deformen mientras agarran los productos. Esto permite aumentar el área de contacto y reducir la presión sobre el producto. Un mecanismo con sólidos rígidos que disponga de uniones flexibles trabajará según lo diseñado siempre que estas uniones no superen el límite elástico. Estas uniones flexibles permiten que la garra se auto adapte a productos con formas irregulares como ocurre con los productos agroalimentarios. Por medio de la fabricación aditiva las uniones flexibles se incorporan sobre la misma pieza reduciendo el número de componentes.

La Figura 3.8a es un modelo teórico analizado por elementos finitos de una garra angular en donde los ejes de los dedos han sido sustituidos por espirales y las barras que interconectan el vástago actuador con los dedos han sido reemplazadas por dos delgadas y flexibles barras elásticas. La garra está diseñada para ser movida por un actuador neumático estándar de SMC modelo CUJB-10-10D. Los dedos están unidos elásticamente al chasis por lo que más fácilmente se pueden adaptar a la forma de los productos mientras los agarra. La Figura 3.8b es el mecanismo equivalente diseñado como un sistema cinemático multicuerpo con elementos rígidos. Este necesita de seis ejes y cinco piezas rígidas: el chasis, dos barras intermedias de transmisión y dos dedos. La simplificación lograda por medio de la fabricación aditiva permite reducir el número de componentes de la garra sin el mecanismo a una única pieza.

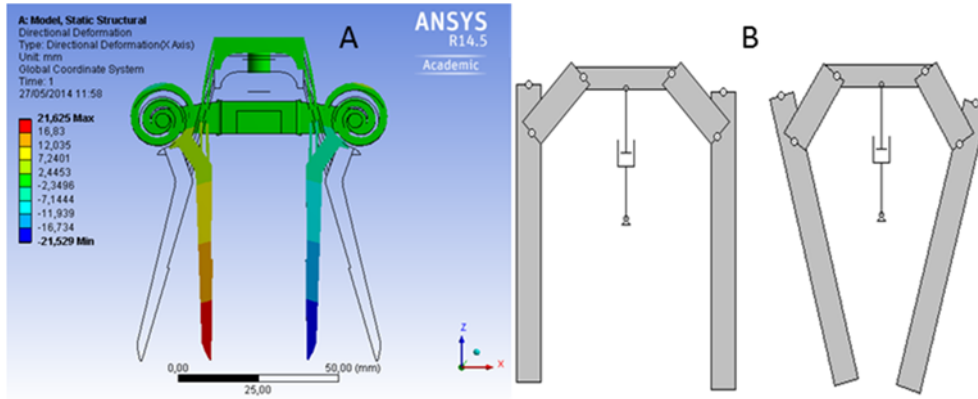


Figura 3.8. (a) Mecanismo flexible de una garra angular, el chasis y los dedos están diseñados para ser fabricados en una única pieza sin ejes que emplea un cilindro neumático estándar como actuador. (b) Diseño equivalente de la garra con sólidos rígidos unidos por articulaciones.

La Figura 3.9a es un modelo teórico analizado por elementos finitos de una garra completa desarrollada en una única pieza de plástico y que dispone de dos actuadores neumáticos realizados por fabricación aditiva. La garra equivalente realizada con componentes rígidos precisa de un chasis, dos barras de interconexión, dos dedos y cuatro ejes por cada dedo (Figura 3.9b). Esta garra es muy ligera, simple y compacta ya que todo está integrado en una única pieza de plástico. No hay barras intermedias articuladas de conexión entre los dedos y el actuador reduciendo así la longitud de la garra ya que los dedos salen directamente del actuador. Las barras que funcionan como articulación de los dedos son flexibles y están en el interior de la garra, su configuración permite un movimiento de dedos paralelo al plano horizontal en su parte inferior mientras rotan hacia el interior. El actuador neumático está diseñado para que trabaje linealmente, pero puede moverse ligeramente respecto a la vertical siguiendo el movimiento del mecanismo elástico al cual está acoplado.

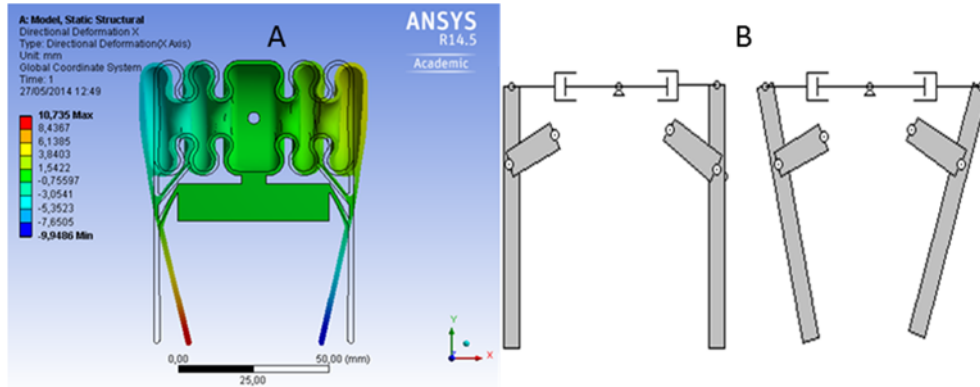


Figura 3.9. (a) Análisis de la deformación de una garra neumática para ser fabricada con una única pieza de poliamida. El actuador neumático está sometido a 0,4MPa. Los ejes han sido reemplazados por barras deformables. (b) Diseño equivalente de la garra con sólidos rígidos unidos por articulaciones rígidas.

Del análisis de la deformación vertical de los dedos de la garra según la Figura 3.10b se deduce que existe una zona de los dedos donde el movimiento vertical es muy reducido. Considerando este mecanismo de garra y aprovechando la existencia de no movimiento vertical de una zona se diseñó y fabricó una garra con movimiento completamente paralelo (Figura 3.10c). En la parte derecha de la Figura 3.10b se muestra la deformación vertical según el eje Y. La línea de trazos tiene un movimiento vertical cercano a cero. Ningún punto en esta se moverá verticalmente. Esta característica puede ser usada para colocar ejes cuyo centro esté en esta línea y conseguir una garra con movimiento paralelo de dedos. Las posiciones de los ejes se estiman en base a los análisis por elementos finitos. Está garra dispone de tres componentes y cuatro ejes. Incrementa el tamaño de la garra y su complejidad, pero aun así es mucho más simple que el mecanismo equivalente que se tendría que hacer en una garra con sólidos unida por articulaciones rígidas.

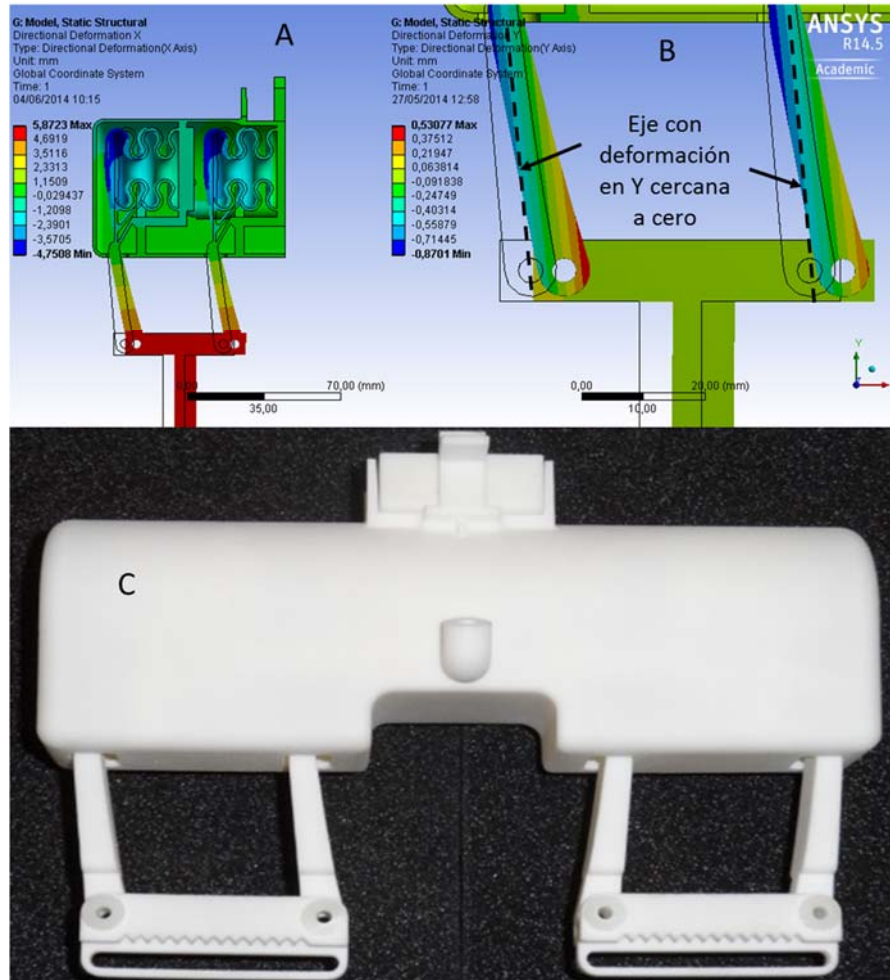


Figura 3.10. (a) Análisis de la deformación horizontal de la garra cuando los fuelles están sometidos a 0,4MPa, (b) deformación vertical del dedo y (c) imagen del prototipo fabricado.

Para lograr que el actuador neumático realizado por fabricación aditiva sea rápido es necesario reducir el volumen de la cámara. Si la cámara es pequeña tiene un movimiento más reducido y para incrementar el rango de movimiento es necesario emplear un mecanismo que aumente el rango de trabajo de los dedos. La Figura 3.11a es el modelo teórico que emplea un actuador neumático de poco volumen con un solo lóbulo. Cada dedo se mueve con un único actuador neumático. En este caso los dedos son rígidos y disponen de dos ejes que lo unen al chasis y a los actuadores. El mismo

tipo de garra con actuadores neumáticos estándar precisa de dos cilindros de simple efecto que se unen a los dedos o con correderas o con barras de interconexión intermedias Figura 3.11b. Esto implica un incremento notable del ancho de la garra, de la complejidad de la garra y de su peso. Este modelo de garra fue fabricado y su funcionamiento comprobado.

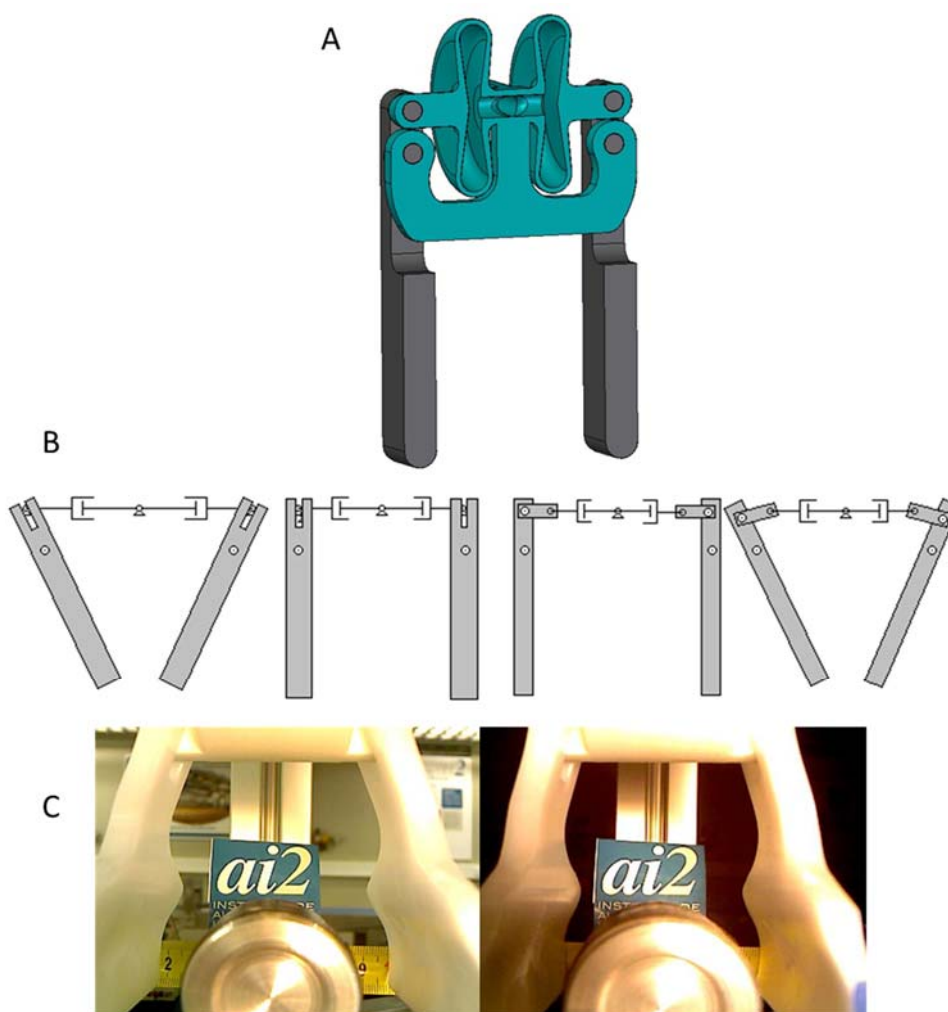


Figura 3.11. (a) Garra con un actuador realizado por medio de fabricación aditiva. (b) Distintas posibilidades de diseño equivalente si la garra está hecha con un cilindro neumático estándar. (c) Análisis a fátiga con 0 y 20.000 ciclos.

La poliamida tiene un comportamiento plástico que sufre fluencia lenta o deformaciones permanentes bajo cargas a largo plazo. En el caso de los actuadores realizados por fabricación aditiva este efecto se traduce en una pérdida de recorrido de los dedos de la garra. La Figura 3.11c muestra dos imágenes del resultado de un test de fatiga del modelo fabricado, empleando este diseño, desde los cero ciclos hasta los 20.000 en donde el rango de los dedos ha pasado de 81 a 69 mm.

Para diseñar una garra que sea capaz de manipular al mismo tiempo varios productos, garra multi-agarre, el mecanismo de la garra unitaria se tiene que multiplicar por el número de productos a manipular o buscar un sistema de transmisión del movimiento para cada uno de los dedos. Esto incrementa notablemente el volumen de las garras que están diseñadas a partir de piezas rígidas unidas por articulaciones, el número de componentes se multiplica así como su complejidad, coste y peso. La operativa del robot, al incrementar el volumen y peso, debe adaptarse. Por medio del uso de la fabricación aditiva se simplifica notablemente el diseño de garras multi-agarre. Una vez conseguido el diseño para manipular un producto este se duplica o triplica en el programa CAD de forma muy sencilla incorporándose en la misma pieza la garra multi-agarre. Lo mismo ocurre para garras multi-dedo. Una vez que se consigue diseñar un conjunto de mecanismo, dedo y actuador que funcionen según lo buscado se puede reproducir el conjunto para lograr una garra con dos, tres o más dedos que estén integrados en la misma garra y pieza. La Figura 3.12 es una garra con tres dedos que funcionan concéntricamente de manera independiente y se basan en la deformación de las espirales huecas ya mostradas. La garra está diseñada para la manipulación de productos con simetría de revolución como puede ser huevos o patatas pequeñas.

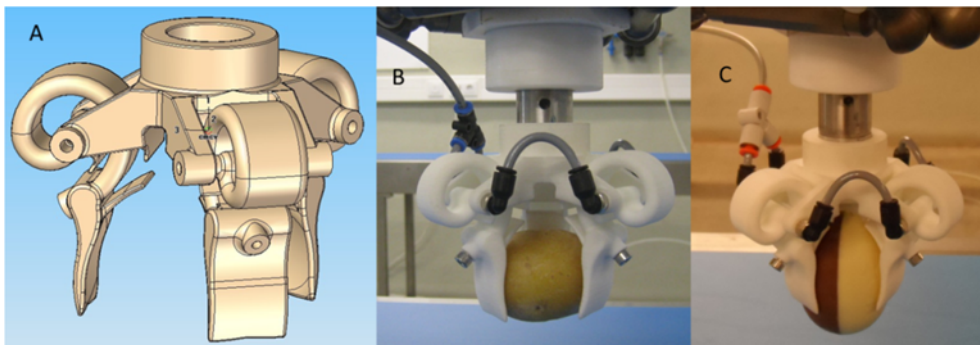


Figura 3.12. (a) Diseño de garra concéntrica de tres dedos realizada en una sola pieza por medio del proceso de fabricación aditiva. (b) La garra manipulando una patata y (c) un huevo de chocolate.

3.4. Discusión

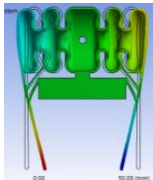

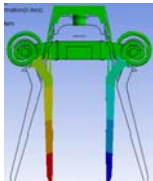
En este capítulo se han mostrado las diversas posibilidades que ofrece el uso de la fabricación aditiva por sinterizado con láser para diseñar garras capaces de manipular productos agroalimentarios. Los diseños presentados y prototipos realizados se han diseñado y fabricado en poliamida 2200 con la máquina EOSint P380. Este proceso de fabricación permite desde la fabricación de una garra compleja en una única pieza o de componentes más simples que constituyen la garra como; el chasis, actuador neumático, mecanismos flexibles o dedos capaces de adaptarse a la forma de los productos. Los actuadores neumáticos propuestos son de simple efecto mostrándose una posibilidad de uso de uno de doble efecto. La flexibilidad de la poliamida empleada ha permitido crear uniones de flexibles de sólidos rígidos en mecanismos de garras facilitando con ello la adaptación de la garra en la manipulación de productos irregulares. Los componentes deformables mostrados buscan una distribución de tensiones uniforme (*distributed compliant*) a lo largo del componente evitando la concentración tanto de la deformación como de las tensiones (*lumped compliant*). Del mismo modo se busca la configuración geométrica que logra maximizar la flexibilidad para conseguir el movimiento deseado al mismo tiempo que la rigidez del sistema sea capaz de soportar las cargas aplicadas (Yin & Ananthasuresh 2003).

Las ventajas de la flexibilidad de este proceso de fabricación brindan nuevas oportunidades para diseñar piezas de formas complejas facilitando que las garras manipulen productos irregulares y muy sensibles al daño como son los agroalimentarios.

La mayor dificultad de uso de la fabricación aditiva para el empleo de actuadores neumáticos son las deformaciones permanentes por efecto de deformación por fluencia lenta cuando las tensiones a las que se somete el actuador son elevadas y prolongadas en el tiempo. Tras un ensayo de unos 20.000 ciclos agarrando cilindros con la garra de la Figura 3.11c el actuador sufrió deformaciones permanentes. Una solución posible es la mostrada en la Figura 3.4 en donde las tensiones que sufren las paredes de la cámara cambian de tensión a compresión pudiéndose compensar el efecto de deformación por fluencia lenta. La propuesta también mejora el rango de trabajo y logra un mayor número de posiciones, de dos a tres, y un mayor rango en menor espacio. Las uniones deformables empleadas son muy fiables, el modelo de la Figura 3.8a se fabricó y fue testado logrando alcanzar 5.000.000 de ciclos sin aparente deformación permanente mientras se agarraba un cilindro rígido. Por el contrario, la flexibilidad de estas uniones puede afectar al movimiento de los dedos a alta velocidad ya que la flexibilidad impide una transmisión directa de la fuerza y, ante sollicitaciones rápidas, crear oscilaciones armónicas de los dedos con un amortiguamiento menor del crítico. Este efecto se puede paliar incrementando la rigidez de la unión a costa de necesitar mayor esfuerzo del actuador. El proceso de fabricación aditiva con polvo deja parte de este sin sinterizar dentro de las cámaras. El polvo se elimina con dificultad y puede contaminar las electroválvulas. Esto hace aconsejable el uso de filtros y precisa de una limpieza previa

exhaustiva antes de su uso. El acabado superficial es rugoso por lo que se pueden acumular desechos durante la manipulación de alimentos. Las superficies se deben pulir o pintar para mejorar su higiene. A modo de resumen se comparan en la Tabla 3.2 las garras realizadas más significativas.

Tabla 3.2. Principales modelos testados que se han realizado por sinterizado láser de polvo comparando sus ventajas e inconvenientes. Los dos primeros incluyen el actuador neumático en la misma pieza y el segundo precisa de un actuador neumático externo

Modelo	Ventajas	Inconvenientes
	<ul style="list-style-type: none"> - Diseño a medida - Ligereza - Compacidad - Autoadaptable 	<ul style="list-style-type: none"> - Fuerza depende de la distancia - Longevidad reducida - Precisa mecanismo
	<ul style="list-style-type: none"> - Diseño a medida - Alta ligereza - Compacidad - Autoadaptable - No precisa mecanismo - Fácil rediseño 	<ul style="list-style-type: none"> - Fuerza depende de la distancia - Longevidad reducida
	<ul style="list-style-type: none"> - Mecanismo ligero - Compacidad - Autoadaptable - Alta longevidad 	<ul style="list-style-type: none"> - Limitación de esfuerzos a transmitir - La espiral ocupa más espacio que un eje

La flexibilidad de diseño de la fabricación aditiva hace posible un diseño más higiénico de la garra. Las piezas pueden tener formas suaves evitando recovecos en donde se acumulen desechos. Los actuadores y uniones elásticas no precisan de engrase y pueden ser lavados directamente con agua a presión. Los dedos de la garra pueden moverse de forma distinta a los movimientos paralelo o angular de las garras estándar, esto puede facilitar la manipulación del producto ya que el producto se puede agarrar por un movimiento paralelo y recoger por otro vertical. Las piezas de geometría compleja son difíciles y caras de mecanizar. El coste de las piezas fabricadas por la fabricación aditiva no depende de su complejidad. Todos los modelos han sido desarrollados en poliamida homologada para contacto alimentario. La resistencia a la

abrasión y la baja fricción facilitan el uso de esta poliamida como cojinete o casquillo autolubricado. La deformación calculada de los dedos durante la manipulación de los productos reduce los puntos de contacto con altas presiones y facilita el manejo de formas complejas e irregulares.

3.5. Conclusiones

Este capítulo ha revisado las posibilidades, beneficios y riesgos del uso de la tecnología de fabricación aditiva de polvo sinterizado por láser en el desarrollo de garras para robots en la manipulación alimentos. La posibilidad de uso de plásticos con buena elasticidad como la poliamida incrementa el potencial de uso de este proceso. La flexibilidad permite compensar desviaciones del mecanismo de agarre, auto adaptarse por deformación a los productos o a situaciones de pequeñas colisiones.

En un sistema de agarre puede usarse este proceso de fabricación para hacer el chasis, los actuadores neumáticos, los mecanismos y los dedos flexibles. Los chasis pueden tener formas complejas personalizadas, imposibles de mecanizar, sin incremento de coste. La forma de la cámara de un actuador neumático realizado con este proceso permite movimientos lineales, rectos o combinados. Los mecanismos flexibles permiten usar su flexibilidad para facilitar el movimiento cuando hay desalineaciones entre componentes, reducir la complejidad del mecanismo, la cantidad de componentes y ser capaz de absorber pequeños impactos. Por último, pero no menos importante, la flexibilidad de los dedos permite adaptarse a los productos para poder manipularlos sin dañarlos. El capítulo muestra algunos ejemplos de cada uno de estos puntos.

La fabricación aditiva de material es una buena herramienta para realizar garras o componentes de estas para manipular productos agroalimentarios con robots, permite la reducción de los tiempos de fabricación, facilita el camino para lograr los requisitos del sistema de agarre y permite realizar garras más compactas. Este proceso abre la posibilidad de reducir la complejidad de los mecanismos de las garras, permitiendo el desarrollo de nuevos conceptos e ideas de garras flexibles y reduciendo notablemente las limitaciones del diseño de componentes pensado para ser fabricado por arranque de viruta. Para conseguir un adecuado dimensionado de la garra el diseñador debe estudiar con detalle las posibles deformaciones permanentes, sin embargo, las garras o componentes fabricados por este proceso son baratos, ligeros, pequeños, flexibles, adaptables a los productos, higiénicos y lavables con chorro de agua y, permiten encontrar nuevos diseños sistemas de agarre para manipular diversos productos con robots como pueden ser frutas, vegetales, pasteles y chocolates.

Las perspectivas de uso de la tecnología de fabricación aditiva para realizar sistemas de agarre flexibles para manipular alimentos se incrementarán notablemente según aparezcan nuevos materiales más flexibles con gran capacidad de deformación, esto permitirá desarrollar nuevas garras que trabajen bajo grandes deformaciones que hasta ahora no son posibles de fabricar.

Capítulo 4

Aplicación de los acelerómetros como sensores táctiles intrínsecos en garras

4.1. Introducción

En robótica un sensor táctil es un dispositivo o sistema que puede medir una propiedad de un objeto o caracterizar un contacto por medio del contacto físico entre el sensor y el objeto (Lee 1999). Las áreas más interesantes y de mayor desarrollo en aplicaciones de sensores táctiles son en medicina, agricultura, alimentación, sistemas de manipulación, prótesis y estudios del entorno (Dargahi & Najarian 2005). Los prototipos de sensores táctiles tipo piel desarrollados son torpes, tienen baja resolución, precisión y fiabilidad, lo cual limita su implementación en robots. La integración de estos sensores presenta notables dificultades de comunicación, controladores, software, cableado, consumo, robustez, fabricación y mantenimiento (Dahiya et al. 2013). Los sensores táctiles pueden utilizarse para optimizar la fuerza de agarre y al mismo tiempo detectar con algo de antelación cuando el objeto comienza a deslizarse dentro de la garra (Petchartee & Monkman 2008; Lowe et al. 2010).

Los sensores táctiles para las garras en robots pueden clasificarse en base a su localización (Dahiya et al. 2010). Los sensores intrínsecos no necesitan de contacto directo con el producto y al contrario que los sensores extrínsecos. Los sensores

intrínsecos tienen claras ventajas para garras en aplicaciones industriales con robots. El sensor no precisa de tener una alta resistencia al desgaste o el rozamiento ya que puede colocarse empotrado y protegido fuera de la zona de contacto directo contra el producto, el resultado de estos sensores está referido a todo el producto y no solo al sitio en donde el sensor contacta con el producto. Incluso tiene la ventaja de no necesitar emplear un sistema matricial de sensores lo cual simplifica su instalación y desarrollo. Por el contrario, los sensores intrínsecos al no contactar directamente contra el producto que agarra el material que hay entre el producto y el sensor y la distancia pueden afectar a la calidad de la respuesta o señales recibidas. Otra posible clasificación de los sensores táctiles es sensores estáticos o pasivos y dinámicos o activos (Tegin 2005). Los pasivos analizan las propiedades físicas del contacto estático y en general se basan en la medida de la presión normal o su deformación. Los activos aprovechan las circunstancias de movimientos para conseguir la información.

La mayoría de los sensores táctiles empleados son sensores extrínsecos, pero hay algunos casos en los que se emplean sensores intrínsecos. Se han desarrollado sensores táctiles intrínsecos de fuerza que permiten evaluar la dureza de los productos (Xu & Simaan 2008) en robots continuos (*continuum robot*). Los sensores táctiles intrínsecos se están estudiando para palpar órganos y evitar la necesidad de contacto directo reduciendo así el impacto de la cirugía (*minimally invasive surgery*). La textura del producto puede ser distinguida por medio de sensores intrínsecos activos que analizan la aceleración de una probeta que desliza por diversas superficies (Yoshioka et al. 2007). Una solución similar se ha desarrollado en robots humanoides (Sinapov et al. 2011). Los sensores intrínsecos se pueden incorporar dentro de piezas realizadas en polímeros fabricadas en impresoras 3D reduciendo el coste de incorporación de estos. Hay algunos ejemplos de esto con la incorporación de fototransistores y sensores de fuerza con galgas extensiométricas (Jentoft et al. 2014). Los acelerómetros al no estar en contacto con el producto se pueden emplear como sensores intrínsecos. En una garra neumática los acelerómetros pueden monitorizar el momento en el cual sucede el contacto y combinados con sensores de fuerza regular la fuerza de agarre (Lanni et al. 2009). Los acelerómetros también se han empleado en garras para robot capaces de clasificar berenjenas (C Blanes, Ortiz, et al. 2015) y mangos (C Blanes, Cortés, et al. 2015). Con acelerómetros triaxiales se pueden estimar las dimensiones tridimensionales de un objeto (Hoshi & Shinoda 2007). También es un sensor intrínseco la medida de la corriente del motor de una garra eléctrica capaz de clasificar diversas frutas (Naghdy & Esmaili 1996).

Algunos sensores táctiles extrínsecos pueden emplearse para evaluar la dureza de productos por medio de un transductor piezo-eléctrico (Kimoto & Matsue 2011) en combinación con un sensor de presión (Omata et al. 2004). Para detectar la firmeza de objetos blandos y medir la fuerza aplicada se puede usar la medida de la corriente inducida sobre un dispositivo con bobinas (Darvish et al. 2009). Por medio de transductores piezoeléctricos dispuestos matricialmente es posible identificar tumores ya que tienen una rigidez distinta (Murayama et al. 2008). El uso de sensores piezo-

resistivos colocados en los dedos de una garra permite la clasificación de tomates y pimientos según el estado de madurez (Bandyopadhyaya, Babu, Kumar, et al. 2014). Para incrementar el umbral mínimo de sensibilidad de los sensores capacitivos se pueden acoplar unos pequeños cepillos (Schmidt et al. 2006).

A medio camino entre sensor intrínseco e extrínseco la evaluación de la dureza de los productos puede ser estimada por medio de sensores intrínsecos cuasi-estáticos que miden el desplazamiento del sensor mientras la cámara interna se deforma bajo una actuación neumática (Shikida et al. 2003) o magnética (Hasegawa et al. 2006). La imagen formada por la deformación de un dedo de silicona también puede usarse como sensor táctil (Ali et al. 2010).

Existe una amplia gama de tecnologías resistivas, capacitivas, piezoeléctricas y ópticas que se pueden emplear como sensores táctiles para sistemas de manipulación en manos antropomórficas (Yousef et al. 2011). Hay sensores que son flexibles lo cual beneficia a la adaptación de estos a la forma de los productos. La silicona conductiva puede servir como sensor al incorporarse dentro de una garra flexible realizada en silicona no conductiva para la identificación del agarre y formas de los objetos (Petkovic et al. 2013). También con silicona tipo polidimetilsiloxano es posible realizar un sensor táctil capacitivo flexible que se puede distribuir matricialmente para medir la fuerza (Peng et al. 2009). La variación de la dureza conseguida por medio de la transición *jamming* permite realizar una palpación a distancia para estimar la dureza de tejidos blandos y poder identificar tumores (Li et al. 2014). Algunos autores han desarrollado sensores táctiles flexibles para clasificar productos rígidos y deformables (Drimus et al. 2014).

A pesar de los avances realizados en los sensores táctiles para aplicaciones robóticas, la entrada de estos en la automatización industrial es extremadamente baja, especialmente debido a la falta de soluciones fiables y sencillas (Girao et al. 2013b).

En este capítulo se estudian las posibilidades que los acelerómetros tienen como sensores táctiles en garras para robots cuando están colocados en los dedos de la garra. Para realizar este estudio se ha diseñado una garra angular que presenta un dedo infra-actuado. Con la garra se han estudiado las señales de diversos acelerómetros fijados en los dedos y vástago de la garra mientras se manipulan cilindros de distintas durezas y pesos.

Por medio del análisis de las señales de los acelerómetros es posible extraer parámetros que permitan evaluar la dureza del producto que la garra robot manipula, identificar las fases de agarre del producto, estimar la fuerza de los dedos y monitorizar la posición de los dedos. Los resultados varían cuando cambia la configuración de la garra y la posición relativa del producto respecto de la garra.

4.2. Estudio de las posibilidades de los acelerómetros en una garra neumática

En este estudio se evalúa la información que pueden suministrar las señales de acelerómetros cuando estos están colocados en los dedos de una garra. En general en sistemas robotizados se emplean garras con actuadores neumáticos o eléctricos. Las garras neumáticas son ampliamente empleadas en sistemas de agarre debido a su simplicidad, coste y robustez frente a garras eléctricas. Las garras también se pueden dividir según el movimiento de sus dedos sea angular o paralelo. Las garras angulares son mecánicamente más sencillas que las paralelas ya que no precisan de correderas, sin embargo, el movimiento angular de los dedos puede ser una limitación al manipular productos irregulares o de distintos tamaños. El recorrido más limitado de los dedos se puede mitigar empleando un punto de rotación con un mayor radio. Esto incrementa la longitud de la garra y con ello los esfuerzos inerciales y sobre las articulaciones. Un movimiento angular de los dedos no puede asegurar el mismo tipo de contacto independientemente del tamaño del producto. Si los productos tienen tamaños distintos el ángulo con el contactan los dedos variará. Durante el proceso de agarre, al pivotar los dedos, la garra no puede aproximarse tanto a cinta transportadora como con una garra de dedos de movimiento paralelo. Esto limita el uso de garras angulares en productos de tamaños diversos que tengan escasa altura.

A pesar de las diferencias entre garras paralelas y angulares, las angulares tienen mecanismos más sencillos con pocos componentes en movimiento, pueden lograr altas velocidades de apertura y cierre necesarias para lograr bajos tiempos ciclo en la manipulación con robots. Los bajos tiempos de ciclo se pueden alcanzar con garras que dispongan de componentes ligeros y con un rango de movimiento ajustado a las necesidades del movimiento.

4.2.1. Descripción de la garra, componentes y proceso

La garra diseñada es una mejora respecto a las garras angulares normalmente empleadas en robótica y conserva la simplicidad mecánica de estas. El dedo A de esta garra tiene un movimiento mixto entre angular y paralelo, los dedos B y C tienen movimiento angular (Figura 4.1).

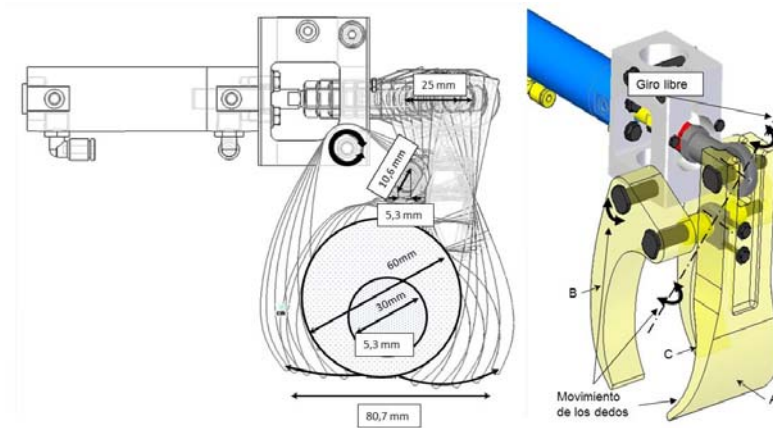


Figura 4.1. Movimiento y rango de los dedos de la grieta.

Respecto a una grieta angular normal esta grieta tiene un mayor rango de trabajo ya que el dedo de la parte derecha se desplaza y gira al mismo tiempo incrementando la capacidad de manipulación de productos con distintos diámetros. Comparando esta grieta con una angular convencional equivalente con el uso de esta combinación se incrementa un 7% el rango de apertura de los dedos y se pueden manipular productos de un diámetro 20% mayores. Los extremos de la grieta tienen un rango de movimiento de entre 5,3 y 80,7 mm. Este rango se puede ajustar levemente si la cabeza articulada se desplaza respecto al vástago del cilindro neumático.

La grieta tiene un número reducido de componentes. El dedo A es infra-actuado ya que está unido al resto del mecanismo por medio de dos articulaciones esféricas pudiendo rotar libremente en torno al eje que pasa por el centro de estas esferas (Figura 4.1). Este grado de libertad permite a la grieta adaptarse a formas irregulares reduciendo la agresividad de la grieta, mejorando la adaptación para manipular productos de formas distintas que eviten puntos de contacto duros en donde se concentren altas presiones.

Para conseguir una mejor dinámica de la grieta se emplean materiales ligeros. Los dedos y las rótulas son de plástico y el chasis es de aluminio. El cilindro neumático es de aluminio (SMC CG1BN20-25). Una electroválvula (SMC SY3120) de 2 posiciones y 5 vías controla la apertura y cierre de la grieta. Dos reguladores de caudal (SMC AS2201F-01-04S) permiten ajustar la velocidad de los dedos de la grieta. La presión de alimentación del cilindro permite definir la fuerza de cierre de los dedos. Cada uno de los dedos A, B y C, y en el vástago D, disponen de un acelerómetro iMEMS (*Intelligent Micro-Electro-Mechanical System*) ADXL 278 con rango de medida +/- 50g (Figura 4.2). Todo el sistema tiene siete señales analógicas de aceleración A_x , A_y , B_x , B_y , C_x , C_y y D_x que miden la aceleración dinámica o vibraciones y la estática

gravitatoria. La señal D_y no se considera ya que el movimiento del vástago solo puede ser uniaxial.

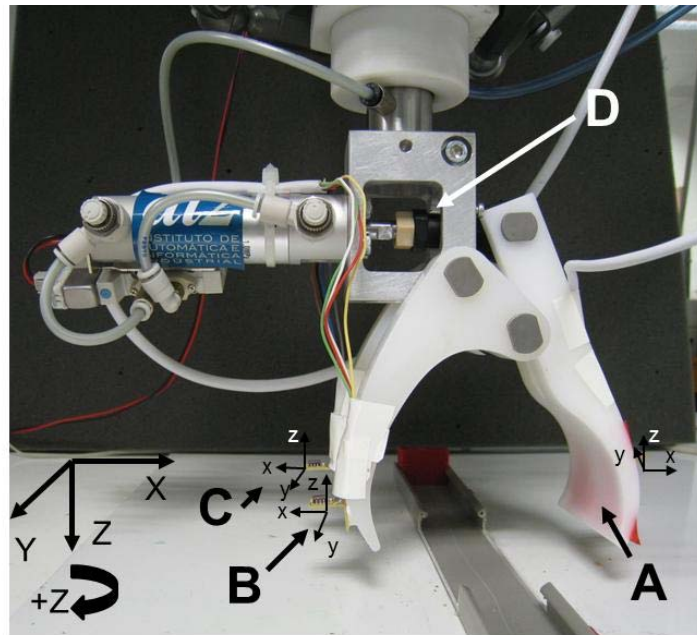


Figura 4.2. Configuración de los ejes de la garra y localización de los acelerómetros.

Para analizar los resultados de los acelerómetros al agarrar distintas durezas se emplean diversos cilindros. Un cilindro de madera recubierto con varias capas finas espuma (Figura 4.3) sirve para evaluar de forma preliminar la evolución de las señales de deceleración en función de la dureza del cilindro. Un cilindro de madera y otro de espuma se emplean para evaluar de forma preliminar la influencia de la posición relativa del agarre con los parámetros que estiman la dureza del producto agarrado. El cilindro de madera también sirve para analizar la evolución de las distintas fases de agarre que se pueden identificar con la señal del acelerómetro B_x . La señal previa al agarre de este mismo cilindro se emplea para correlacionar los valores de la presión neumática con parámetros de la deceleración y para monitorizar la posición de los dedos de la garra.



Figura 4.3. En la izquierda el cilindro envuelto con entre una y cinco láminas de espuma empleado para evaluar la evolución de la dureza. En el centro y en la derecha el cilindro de madera y de espuma lastrado con una barra de acero empleados para evaluar la influencia del punto de agarre con la estimación de la dureza.

La garra durante los ensayos está controlada y colocada en un robot ABB IRB 340. El programa robot realiza los movimientos de la garra y activa la señal digital para el funcionamiento de la electroválvula. Las distintas señales de los acelerómetros y señal de la activación digital de la electroválvula están conectadas a una tarjeta de adquisición de datos que recoge los datos para enviarlos a un ordenador. En los primeros estudios se usó la tarjeta de adquisición de datos USB NI 6009 con los acelerómetros de los dedos A y B. En los posteriores la tarjeta USB NI 6210 con acelerómetros en los dedos A, B, C y el vástago D. Las señales analógicas son grabadas en el ordenador por medio de un programa desarrollado en LabVIEW. Posteriormente otro software filtra las señales, las procesa y extrae variables para cruzar los datos con diversos parámetros como la dureza del producto que manipula. Para analizar los datos se emplea el programa SPSS 16.0. La misma señal de cierre de la garra sirve para activar la lectura de los acelerómetros en la tarjeta de adquisición. Todo el flujograma de este proceso está reflejado en la Figura 4.4.

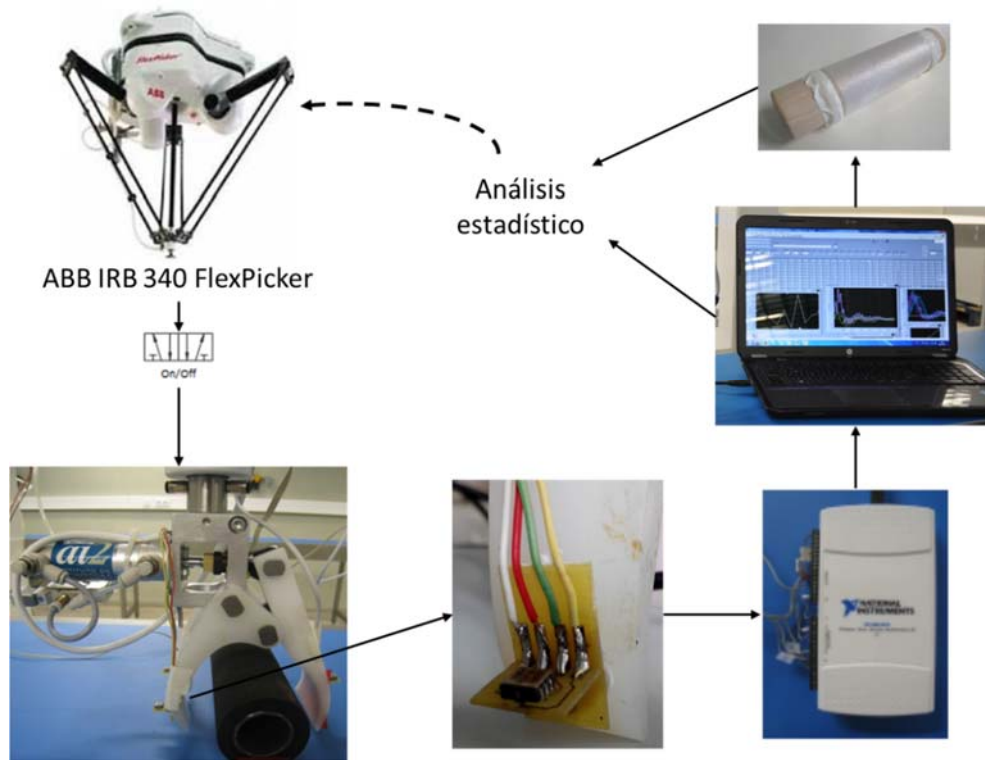


Figura 4.4. Esquema del proceso experimental empleado para usar acelerómetros como sensores en una garra.

4.2.2. Caracterización de las fases de agarre

Las señales de deceleración pueden ser utilizadas para reconocer la duración de la acción del agarre. La forma de esta curva permite también dividir el proceso en tres fases. Un caso típico de esta se muestra en la Figura 4.5.

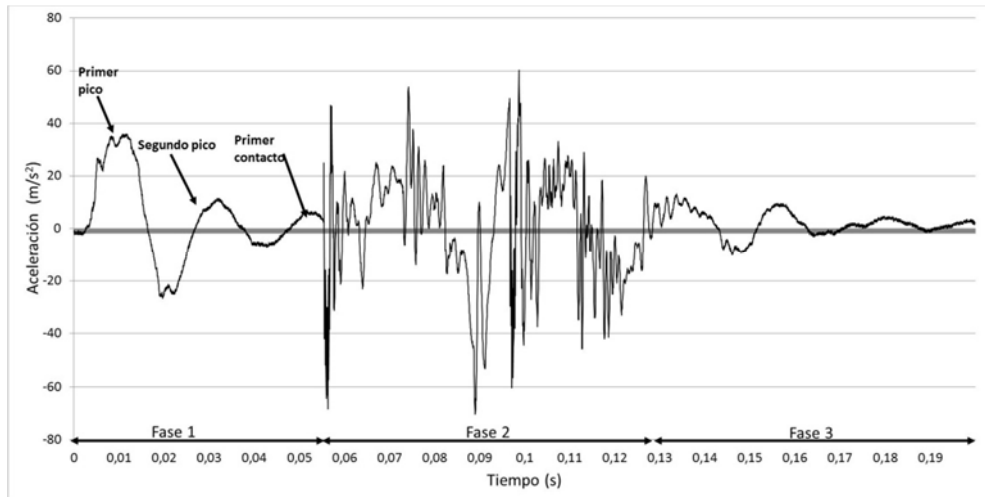


Figura 4.5. Señal de deceleración del acelerómetro B en el eje x durante el proceso de agarre de un cilindro de madera.

La primera fase es la de aproximación de los dedos al cilindro. Comprende el inicio del movimiento de los dedos hasta que se establece el primer contacto con el cilindro. En la Figura 4.5 se puede observar una función sinusoidal con amortiguamiento sub-crítico. El cilindro neumático dispone de unos reguladores de caudal que limitan a un valor determinado el flujo de aire. Esto se traduce en una fluctuación de la aceleración del vástago hasta que este logra una velocidad nominal.

La segunda fase recoge los golpes entre el producto y los dedos hasta que estos terminan de estar en contacto permanente con el producto. Durante esta fase los dedos y el producto se encuentran con distintas velocidades.

La tercera fase muestra una oscilación en conjunto de los dedos y el producto debido a los esfuerzos inerciales que se atenúan progresivamente.

4.2.3. Monitorización de los dedos de la garra

La primera fase del agarre es la que incluye todo el movimiento de los dedos hasta el contacto. Analizando esta fase es posible saber la aceleración, velocidad y desplazamiento del dedo en el cual está el acelerómetro.

La parte superior de la Figura 4.6 es la aceleración del canal B en el eje X que muestra la primera fase del agarre de la garra. En la gráfica se aprecian la aceleración, velocidad y desplazamiento del dedo B cuando este es impulsado por el cilindro neumático mientras está alimentado a la presión de 3MPa. La velocidad de los dedos

de la garra tiende a ser constante gracias al funcionamiento de los reguladores de caudal del cilindro neumático. Los dedos de la garra alcanzan un valor de velocidad aproximadamente estable en 0,03 segundos, durante este periodo de tiempo cada dedo se desplaza unos 8 mm por consiguiente si los productos tienen menos de 65 mm de diámetro los dedos de la garra entran en contacto con el cilindro a la misma velocidad y por consiguiente la energía disponible será similar. Este dato es importante a la hora de estudiar productos de distinto tamaño. Si la velocidad de los dedos, y por lo tanto su energía, es distinta y variará con el tamaño de los productos afectando a las señales de deceleración.

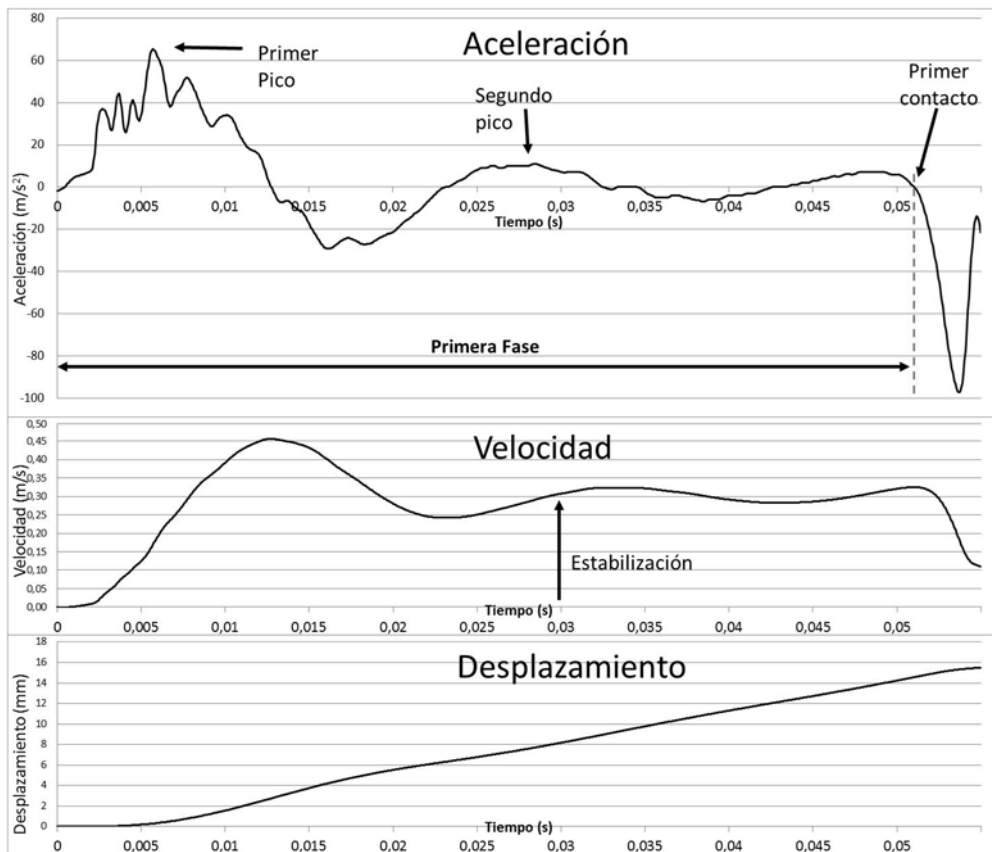


Figura 4.6. Aceleración, velocidad y desplazamiento del dedo B en la primera fase de agarre.

4.2.4. Caracterización de la presión neumática

Las señales de aceleración de los dedos cuando la presión de alimentación neumática disminuye son menores. Analizando la primera fase del agarre cuando los dedos se ponen en movimiento hasta que colisionan contra el producto se aprecian picos menores al disminuir la presión. Los picos de aceleración son mayores al subir la presión ya que hay más energía disponible para mover el mismo mecanismo. En la Figura 4.7 se muestra la evolución de la diferencia entre los valores positivos del primer y segundo pico cuando la presión varía desde 1,5 a 4 bares. Para 4 muestras tomadas a intervalos de 0,25 bares se aprecia una alta correlación entre la diferencia entre estos picos y la presión de alimentación. El coeficiente de determinación es mayor de 0,98 para todos los casos.

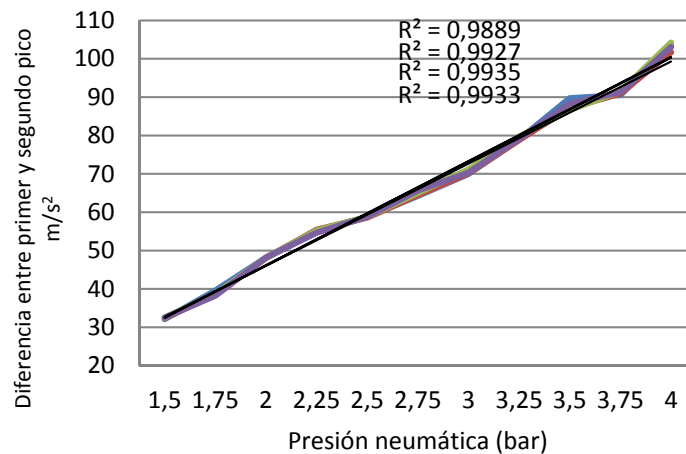


Figura 4.7. Evolución de la diferencia de presión entre primer y segundo pico según la presión neumática de alimentación.

4.2.5. Estudio de la señal de deceleración durante el agarre de cilindros con distintas durezas

La deceleración de los dedos de la garra es distinta según la dureza del objeto que se agarra. Ante objetos más blandos las deceleraciones alcanzadas son menores. En este estudio se emplearon dos acelerómetros situados en los dedos A y B. En la Figura 4.8 se muestran las señales de los acelerómetros Ax y Bx mientras la garra manipula un cilindro de madera que se recubre con una o dos capas de 0,7 mm de lámina de espuma de polietileno expandido. Dos ideas se pueden extraer de este gráfico. La señal del

acelerómetro Bx del dedo B es mayor que la del acelerómetro Ax. Esto puede deberse a que el dedo B tiene un movimiento angular definido y el dedo A es infra-actuado. Las señales son menores con dos láminas y pueden usarse para diferenciar cuál de los cilindros se manipula.

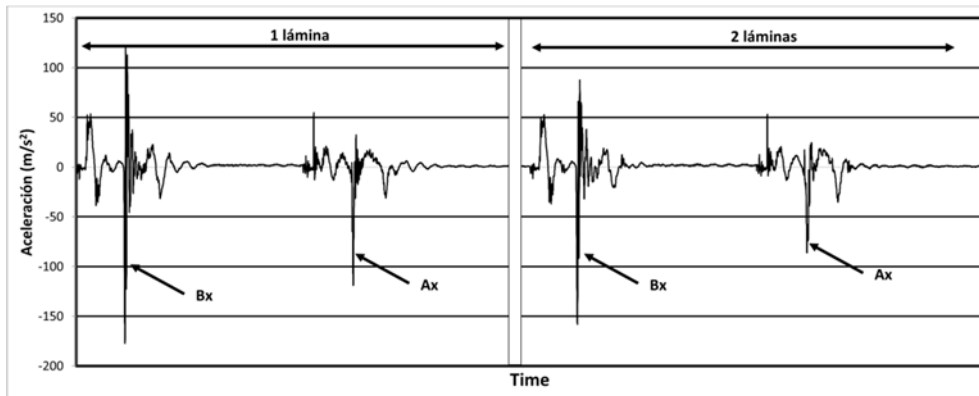


Figura 4.8. Señales registradas de los acelerómetros para los canales Ax y Bx mientras la garra manipula cilindros envueltos con distintas láminas de espumas.

Si se aumenta el número de láminas de espuma los cilindros estarán cada vez más blandos en su parte externa y las señales de los distintos acelerómetros son cada vez menores. La Figura 4.9 muestra cómo evolucionan disminuyendo las deceleraciones de Bx según el producto que manipula tiene más láminas de espuma.

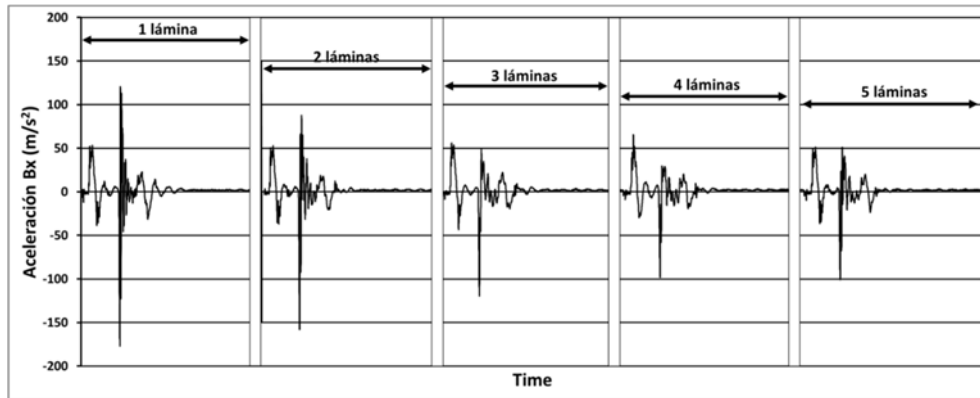


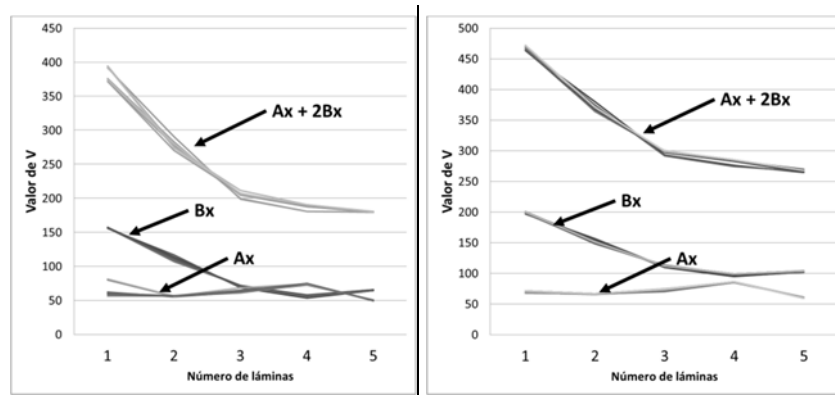
Figura 4.9. Evolución de la deceleración del canal Bx mientras agarra cilindros más suaves con mayores espesores de espuma que los envuelve.

Una forma de conseguir representar la evolución de estos valores es con el parámetro V representado por la ecuación (4.1) que integra los valores absolutos al cuadrado de la aceleración entre un determinado periodo de tiempo. La ventaja de uso de este parámetro es que estudia toda la señal en su conjunto evitando el uso de valores puntuales, es muy sencillo de calcular con elevada rapidez y es independiente de los valores negativos o positivos.

$$V = \int_{t_0}^{t_1} Ax^2 * dt + 2 * \int_{t_0}^{t_1} Bx^2 * dt \quad (4.1)$$

En este modelo inicial solo se emplean dos acelerómetros por lo que se hace la hipótesis de valores parecidos para Bx y Cx por lo que el valor de ambos se simplifica a dos veces el valor de Bx . El valor de V depende del periodo de tiempo analizado. En la Figura 4.10 se muestra como varía en los distintos acelerómetros Ax y Bx , cuando se aplica la ecuación (4.1) en solo la segunda fase del agarre desde que se inicia el contacto con el producto e incorporando también la fase primera previa al agarre. Al no variar significativamente las señales de aceleración durante la primera fase de agarre esta se puede sumar al resultado final. Esto evita tener que reconocer el punto exacto en el cual comienza el contacto con el producto y permite que se use la señal de activación de la electroválvula como señal de comienzo para extraer los valores de V . En la Figura 4.10 V está analizando de forma independiente Bx y Ax . Empleando de forma aislada el V de Ax no se puede distinguir entre cilindros con diversas láminas. Para el caso del V de Bx se reconocen claramente aquellos cilindros que tienen entre una y tres láminas

pero no cuando tienen cuatro o cinco. Si se usa de forma conjunta el valor de V con todos los acelerómetros de los dedos de la garra es posible distinguir entre todos los cilindros, encontrando valores más atenuados cuando el cilindro tiene un mayor número de láminas. En este análisis la masa es prácticamente constante ya que las láminas son muy ligeras en comparación con el peso del cilindro de madera. En este experimento la presión neumática es de 3.5 bares y los reguladores de caudal están en una posición fija. Las señales Ax y Bx son muestreadas a 20KHz y filtradas con un filtro de paso bajo de 1500Hz. Un total de 4000 muestras se registran en cada agarre con 8 repeticiones cada vez que se añade una lámina nueva al cilindro.



Número de láminas	Valores medios		Desviación típica		Valor medios		Desviación típica	
	Ax	Bx	Ax	Bx	Ax	Bx	Ax	Bx
1	69,02	198,94	1,14	1,11	70,14	156,65	10,76	0,50
2	66,55	151,99	0,45	2,63	56,32	111,11	0,51	2,89
3	73,22	112,06	1,41	0,95	63,85	70,72	2,25	1,17
4	86,03	97,91	0,50	1,69	74,17	56,42	0,75	1,66
5	60,69	103,35	0,39	0,91	50,08	64,98	0,46	0,40
Media	71,10	132,85	0,78	1,46	62,91	91,98	2,95	1,32

Figura 4.10. Evolución del parámetro V (ecuación (4.1)) en ordenadas contra el número de láminas de espuma en abscisas. A la izquierda el cálculo empleando solo la señal correspondiente a la fase segunda del agarre y a la derecha con todas las fases del agarre.

La Figura 4.11 muestra las deceleraciones encontradas durante el primer contacto con el cilindro. En este caso las señales han sido centradas respecto al valor máximo encontrado que coincide con la deceleración tras el primer contacto. Dos son las conclusiones que se pueden apreciar en la figura. En primer lugar, los valores de

máxima deceleración son menores al aumentar el número de láminas en el cilindro que se agarra. En el caso de cuatro o cinco láminas los valores son parecidos. El valor de máxima deceleración tras el contacto puede emplearse para distinguir la dureza del producto que se agarra siempre que la diferencia entre distintas durezas sea significativa. En segundo lugar, la brusquedad de la deceleración sufrida durante el primer contacto es menor si los cilindros tienen más láminas. Con el valor de esta pendiente es posible distinguir entre cilindros con distintas láminas excepto en el caso de cuatro y cinco láminas. Si existen diferencias significativas de dureza del producto durante el primer contacto de los dedos de la garra los valores de pendiente cambian.

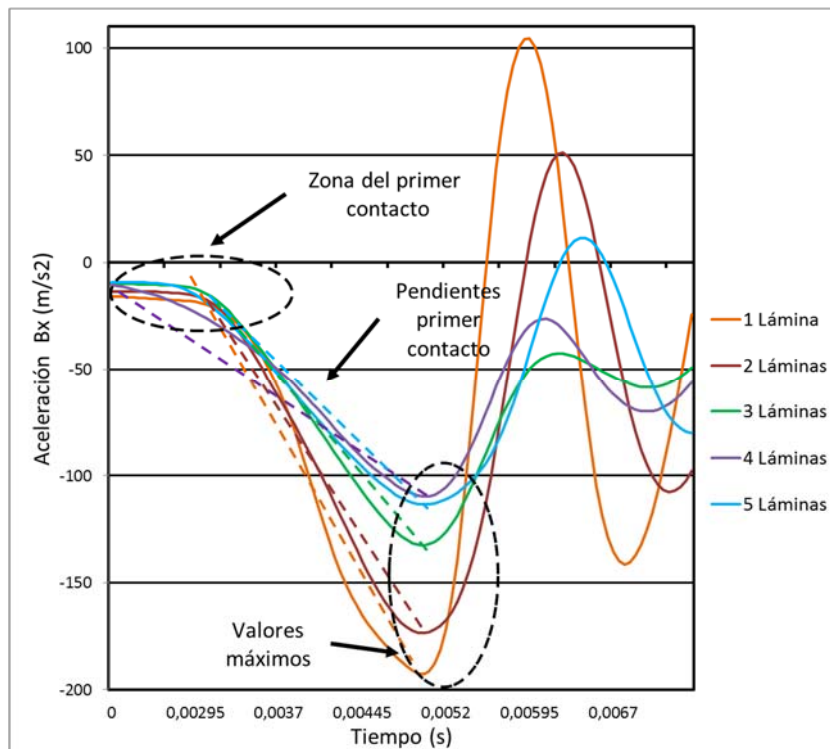


Figura 4.11. Estudio de las deceleraciones del canal Bx durante el contacto al agarrar un cilindro con diversas láminas.

4.2.5.1 Influencia de la posición relativa garra producto y la masa en las señales de deceleración

Tal y como se aprecia en la Figura 4.2 los distintos cilindros se colocan sobre la cuna situada y fijada en la parte inferior de la garra en una posición fija. La garra está también en la misma posición anclada al robot. Los cilindros tienen un diámetro muy

constante y mantienen siempre su forma geométrica. Al manipular productos alimenticios se incrementa la irregularidad del producto pudiendo esta irregularidad afectar a la respuesta de los sensores. Además, el peso de los productos es variable. En un sistema dinámico de coger y colocar productos con robots no se puede siempre asegurar la misma posición relativa entre la garra y el producto. La respuesta de los sensores debe, en la medida de lo posible, independizarse de la posición relativa del producto. Para conocer cómo afecta a las deceleraciones de los dedos de la garra la posición relativa se estudia su respuesta cuando el robot gira o desplaza la garra mientras se mantiene en el mismo sitio el cilindro. Este análisis emplea cilindros de madera y espuma y usa seis señales de los acelerómetros (A_x , A_y , B_x , B_y , C_x , C_y , D_x). Las señales son muestreadas a 7,5 KHz y filtradas con un filtro de paso bajo de 1500 Hz. Se toman 2048 muestras de cada agarre y los cilindros tienen el mismo diámetro de 50 mm. El robot y por lo tanto la garra se desplazan en dirección x y rotan alrededor del eje z. El experimento se repite 40 veces para cada posición, desplazamiento, rotación y tipo de cilindro. Los reguladores de caudal y la presión neumática se mantienen constantes durante el análisis. Para realizar este análisis se define el índice V_{total} (4.2) como la masa del producto que manipula la garra multiplicado por la suma de los módulos de las aceleraciones registradas de cada uno de los acelerómetros biaxiales localizados en cada dedo de la garra.

$$V_{total} = mass * \left[\int_{t_0}^{t_1} (A_x^2 + A_y^2) * dt + \int_{t_0}^{t_1} (B_x^2 + B_y^2) * dt + \int_{t_0}^{t_1} (C_x^2 + C_y^2) * dt \right] \quad (4.2)$$

La variación con la posición relativa del robot respecto de los cilindros según el robot se desplaza en el eje X y el parámetro V_{total} se analiza en la Figura 4.12. Los valores de V_{total} tienden a ser aproximadamente constantes cuando los cilindros están agarrados cerca del centro de herramienta de la garra. Los valores cercanos al centro tienen menor dispersión que aquellos más extremos. El parámetro V_{total} aumenta cuando el desplazamiento del robot es mayor mostrando valores mayores cuando los cilindros están más cerca de los dedos B y C, desplazamiento X negativo, que son los que tienen movimiento angular definido. Los cilindros que tienen mayor peso muestran un menor valor de V_{total} .

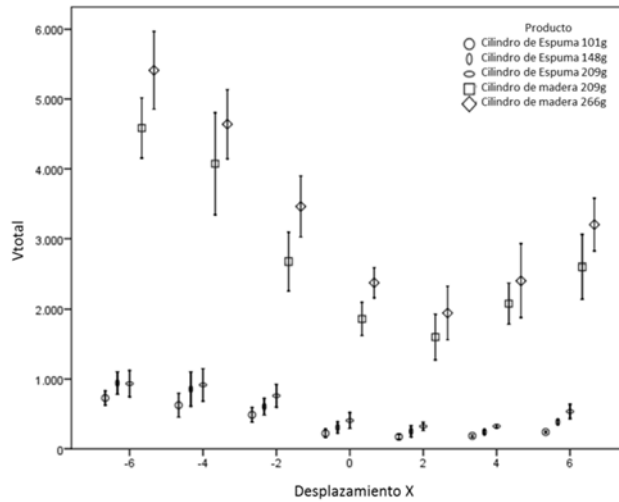


Figura 4.12. Parámetro V_{total} calculado con las señales de los acelerómetros según la ecuación (4.2) con cilindros de distintos pesos y durezas mientras la muñeca del robot se desplaza en dirección X. La gráfica muestra la desviación estándar de las 40 muestras tomada por cada punto.

El mismo estudio para el caso de que el robot gire su muñeca respecto al eje Z se muestra en la Figura 4.13. Los valores presentan una mayor dispersión incrementando la desviación estándar, aunque los valores no llegan a solaparse en los casos estudiados entre cilindros de espuma y de madera. Los valores mayores pertenecen a cilindros con mayor peso. La influencia de la rotación no está claramente definida, aunque la dispersión de los resultados es mayor.

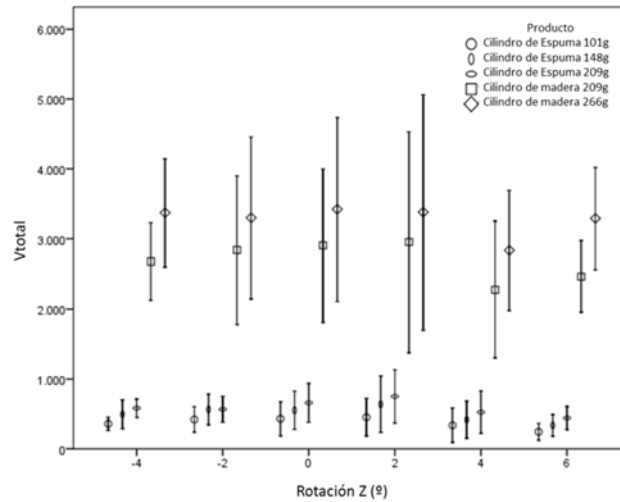


Figura 4.13. Parámetro V_{total} calculado con las señales de los acelerómetros según la ecuación (4.2) con cilindros de distintos pesos y durezas mientras la muñeca del robot gira alrededor del eje Z. La gráfica muestra la desviación estándar de las 40 muestras tomada por cada punto.

Un ejercicio similar realizado con desplazamientos en X e Y obtiene resultados similares. La Figura 4.14 muestra la pendiente de la recta que une el valor máximo respecto al inicio del contacto para la señal A_x . En este caso el valor de A_x es el único que tiene una capacidad relativa para poder situarse perpendicular al producto al poder girar libremente respecto a un eje inclinado. Para el caso estudiado siempre es posible distinguir entre los cilindros de madera y los de goma. Los valores con menor dispersión y más constantes están entorno al centro de la herramienta. En este caso la influencia del peso del cilindro no implica valores medios distintos.

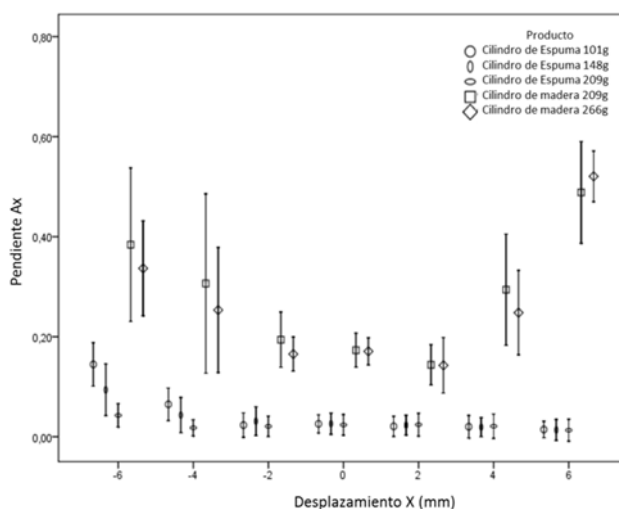


Figura 4.14. Pendiente de la recta que va desde el primer contacto con el producto hasta el valor máximo mientras se agarran cilindros de distintos pesos y durezas. La gráfica muestra la desviación estándar de las 40 muestras tomada por cada punto.

4.2.6. Estudio de la señal de deceleración durante el agarre de cilindros de goma con distintas durezas

En este caso el estudio emplea las señales de los acelerómetros Ax, Ay, Bx, By, Cx, Cy pertenecientes a los dedos A, B y C respectivamente y del acelerómetro Dx que se encuentra situado en el vástago del cilindro neumático. Se emplean cinco cilindros de distintas durezas y de 50 mm de diámetro para encontrar una correlación ajustada entre los datos de los acelerómetros y la dureza de los cilindros. Los cilindros tienen un núcleo de acero y están cubiertos de goma de durezas de 20, 30, 40, 50 y 60 Shore A y pesos 416, 435, 435, 447 y 457 gramos respectivamente. Con todos los cilindros se estudia la influencia de la posición relativa en desplazamiento y rotación del cilindro respecto de la garra. Una cuna fija permite asegurar que el cilindro es agarrado siempre desde un punto fijo. Las señales son muestreadas a 30KHz y filtradas posteriormente con un filtro de paso bajo de 1500Hz. En total se recogen 4KS por medio de la tarjeta de adquisición de datos NI USB 6210 que está conectada a un ordenador. Un software específico desarrollado en LabVIEW analiza las señales para extraer los parámetros que se analizan estadísticamente con SPSS 16.0.

Para este caso se emplean los parámetros V_{total} según la ecuación (4.2), VA, VB y VC según las ecuaciones (4.3), (4.4) y (4.5) y el parámetro V_{cil} de la ecuación (4.6) y que representa los valores extraídos de la deceleración sufrida por el vástago del cilindro neumático durante el agarre de los distintos cilindros.

$$VA = mass * \int_{t0}^{t1} (Ax^2 + Ay^2) * dt \quad (4.3)$$

$$VB = mass * \int_{t0}^{t1} (Bx^2 + By^2) * dt \quad (4.4)$$

$$VC = mass * \int_{t0}^{t1} (Cx^2 + Cy^2) * dt \quad (4.5)$$

$$Vcil = mass * \int_{t0}^{t1} Dx^2 * dt \quad (4.6)$$

Se incorporan al estudio los valores máximos absolutos registrados MaxAxy, MaxBx y MaxCx. La denominación xy es el módulo del vector con las componentes de los ejes x e y. En el caso del acelerómetro A que está situado en el dedo infra-actuado y que rota durante el contacto se emplea el valor máximo del módulo del vector que forman los componentes Ax y Ay. Del mismo modo se estudia el valor de la pendiente de la recta del primer contacto del dedo A. En el caso de los acelerómetros B y C solo se considera el valor máximo respecto a la dirección X ya que no puede moverse en dirección Y.

La Figura 4.15 es la evolución en escala logarítmica de los parámetros VA, VB, VC, Vtotal y Vcil en función de los cilindros de distintas durezas que agarra. Los valores de VB y VC registrados por los acelerómetros B y C y Vtotal siempre aumentan su valor con la dureza de los cilindros. En el caso VA, perteneciente al dedo infra-actuado, y Vcil, procedente de la deceleración del vástago del cilindro, no en todos los casos es posible distinguir la dureza de los distintos cilindros. Sin embargo, es posible con cualquiera de estos dos parámetros distinguir entre durezas muy distintas.

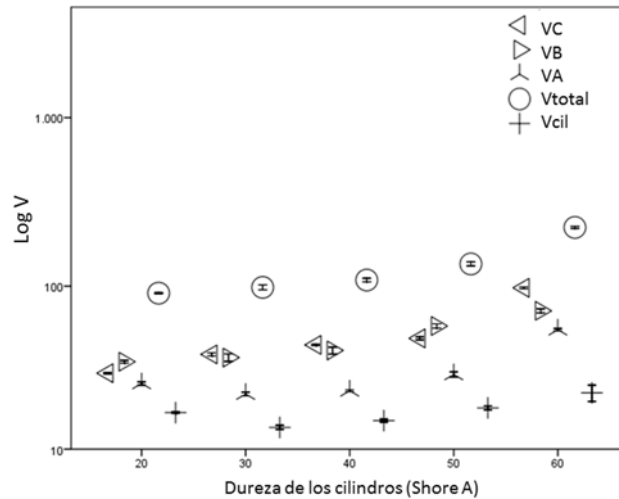


Figura 4.15. Evolución del parámetro V en los distintos acelerómetros situados en los dedos de la garra y en el vástago del cilindro mientras se agarran cilindros de distintas durezas. La barra de error muestra la desviación estándar sobre las 40 muestras tomadas por cada punto.

La Figura 4.16 es la evolución en escala logarítmica de los parámetros MaxAxy, MaxBx y MaxCx en función de los cilindros de distintas durezas que agarra. Los picos de máxima deceleración después del primer contacto son menores para productos más blandos. Con las deceleraciones máximas MaxBx y MaxCx siempre es posible distinguir entre cilindros de distintas durezas siendo los picos de deceleración siempre mayores para cilindros más duros. Con MaxAxy no siempre es posible distinguir entre durezas.

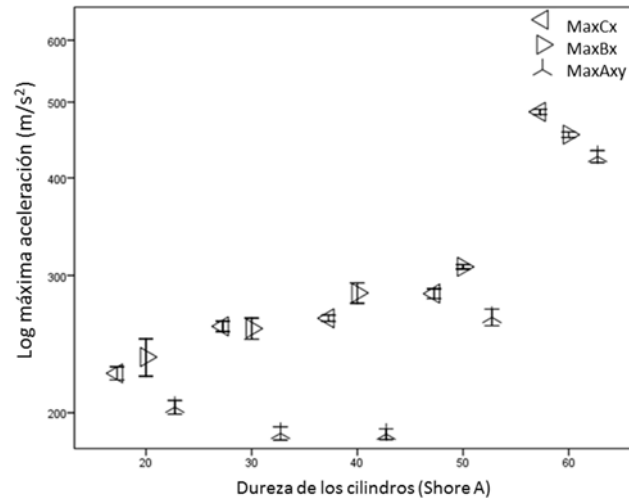


Figura 4.16. . Máxima aceleración alcanzada en los distintos canales de los acelerómetros después del primer contacto contra cilindros de distinta dureza. La barra de error muestra la desviación estándar sobre las 40 muestras tomadas por cada punto.

Tal y como muestra la Figura 4.11 existe una posible correlación entre productos más blandos con valores menores de la pendiente de la recta tras el contacto con el cilindro. La pendiente será menor para productos más blandos porque estos sufrirán más deformación bajo la misma presión de contacto que los productos más duros.

La Figura 4.17 es la evolución de la pendiente entre los valores máximos y el inicio del contacto al agarrar los cilindros con distintas durezas. Los valores de las pendientes son mayores para cilindros más duros encontrándose una mejor estimación de la dureza entre cilindros para los valores de Bx y Cx que para Axy. No en todos los casos se pueden usar estos parámetros para determinar la dureza entre cilindros cuando estos tienen una dureza similar. Estos parámetros estiman bien la dureza de los cilindros cuando esta varía significativamente.

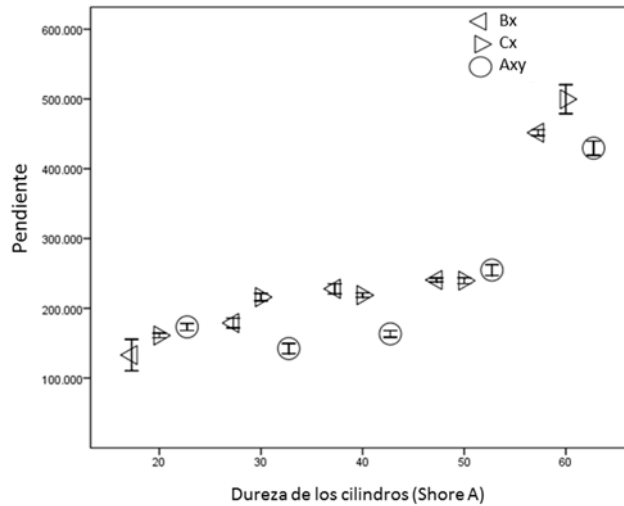


Figura 4.17. Valores de pendiente de la recta de la deceleración para los canales Bx, Cx y A tras el contacto con cilindros de distintas durezas. La barra de error muestra la desviación estándar sobre las 40 muestras tomadas por cada punto.

4.2.6.1 Influencia de la posición relativa garra producto en las señales de deceleración

La Figura 4.18 analiza la variación del parámetro V_{total} cuando el cilindro está desplazado en dirección x respecto de la garra. En cualquier punto de desplazamiento analizado el parámetro V_{total} es mayor cuando los productos son más duros. En un punto concreto de desplazamiento siempre es posible reconocer los cilindros de distintas durezas. Para todos los cilindros, excepto el de 60 Shores A, los valores de V_{total} suben si la garra se desplaza en dirección negativa del eje X.

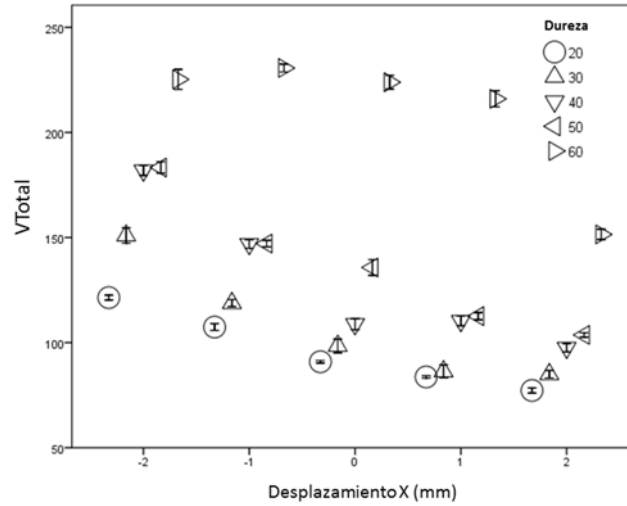


Figura 4.18. Parámetro V_{total} mientras los cilindros, de distintas durezas, se desplazan en dirección X. La barra de error muestra la desviación estándar sobre las 40 muestras tomadas por cada punto.

La Figura 4.19 muestra la evolución del valor de V_{cil} (Ecuación (4.6)) mientras la garra se desplaza en dirección X. En este caso los valores muestran una amplia desviación estándar y los valores medios son independientes del desplazamiento de la garra. En este caso no siempre se puede saber cuándo un cilindro es más duro, pero sí entre valores extremos.

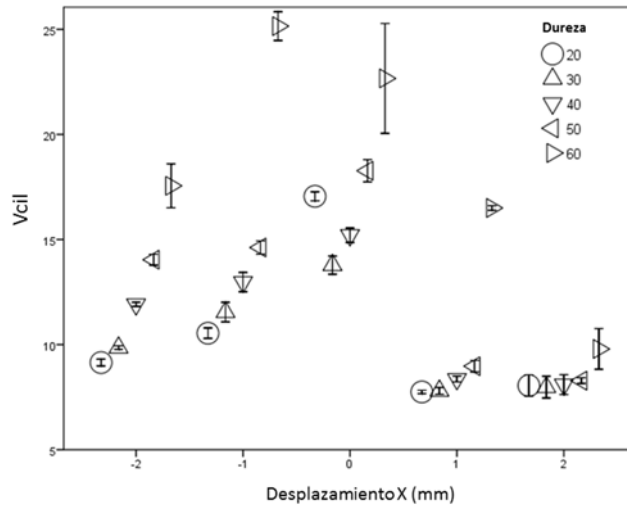


Figura 4.19. Parámetro Vcil mientras los cilindros, de distintas durezas, se desplazan en dirección X. La barra de error muestra la desviación estándar sobre las 40 muestras tomadas por cada punto.

La Figura 4.20 y la Figura 4.21 muestran las variaciones de las deceleraciones máximas alcanzadas en Axy y Bx. Los resultados de Bx son mejores que los de Axy ya que Bx es siempre capaz de distinguir, en la mayoría de los casos, entre todas las durezas independientemente del desplazamiento. Los valores de Bx muestran la tendencia de valores mayores según el cilindro está más alejado del dedo B antes del agarre. El mismo estudio realizado con el parámetro Cx (Figura 4.22) muestra un comportamiento similar al Bx mientras que con Dx (Figura 4.23) los resultados son muy dispares, no encontrando una correlación clara en la mayoría de los casos.

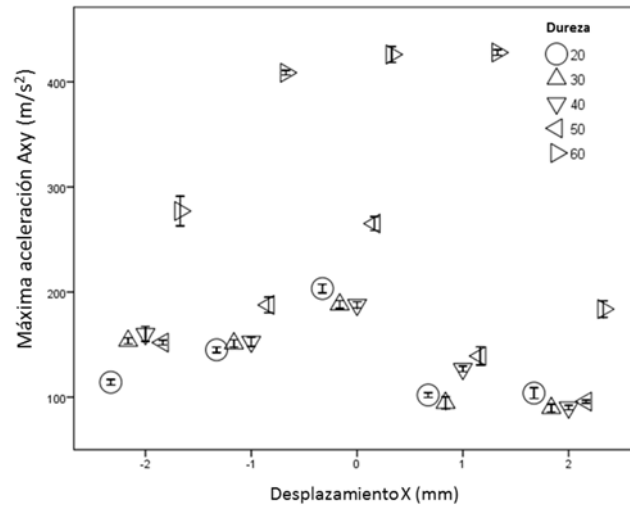


Figura 4.20. Máxima aceleración del canal A_{xy} con cilindros de distinta dureza mientras la garra se desplaza en dirección X. La barra de error muestra la desviación estándar sobre las 40 muestras tomadas por cada punto.

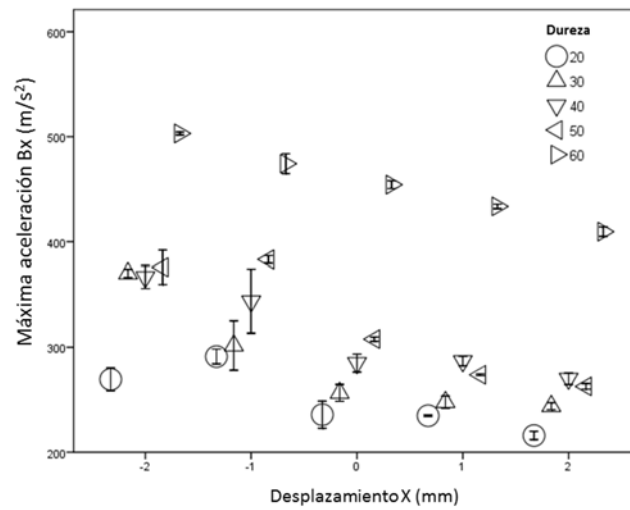


Figura 4.21. Máxima aceleración del canal B_x con cilindros de distinta dureza mientras la garra se desplaza en dirección X. La barra de error muestra la desviación estándar sobre las 40 muestras tomadas por cada punto.

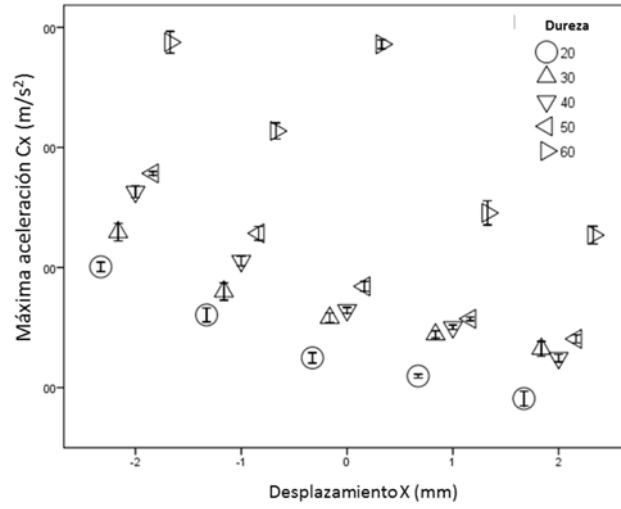


Figura 4.22. Máxima aceleración del canal Cx con cilindros de distinta dureza mientras la garra se desplaza en dirección X. La barra de error muestra la desviación estándar sobre las 40 muestras tomadas por cada punto.

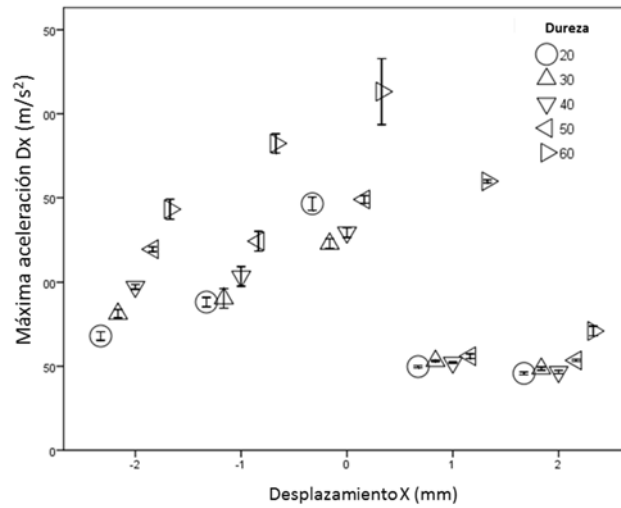


Figura 4.23. Máxima aceleración del canal Dx con cilindros de distinta dureza mientras la garra se desplaza en dirección X. La barra de error muestra la desviación estándar sobre las 40 muestras tomadas por cada punto.

Este mismo estudio realizado con las pendientes según la garra se desplazaba en dirección del eje X muestra, como en el caso anterior, resultados similares para el parámetro de pendiente en Bx (Figura 4.25) y Cx (Figura 4.26) siendo estos mejores que los valores de la pendiente de Axy (Figura 4.24). Con la pendiente en Bx, en la mayoría de los casos, se puede distinguir entre todas las durezas independientemente del desplazamiento. Idénticamente como en caso anterior, las pendientes de Bx y Cx tienden a tener valores mayores según el cilindro está más alejado del dedo B antes del agarre.

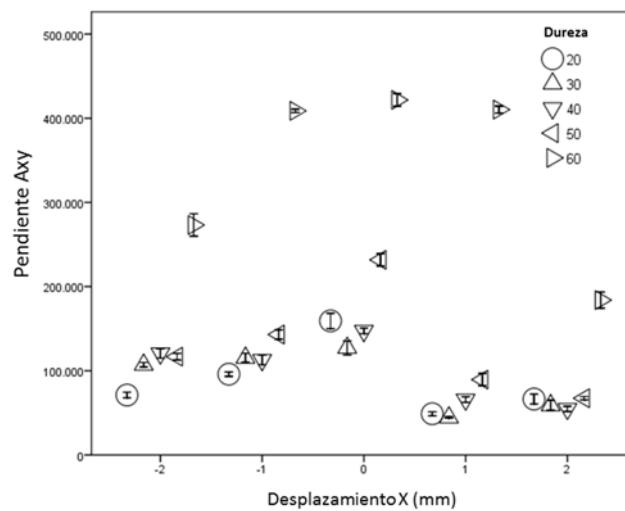


Figura 4.24. Valores de pendiente de la recta de la deceleración para el canal Axy tras el contacto con cilindros de distintas durezas. La barra de error muestra la desviación estándar sobre las 40 muestras tomadas por cada punto.

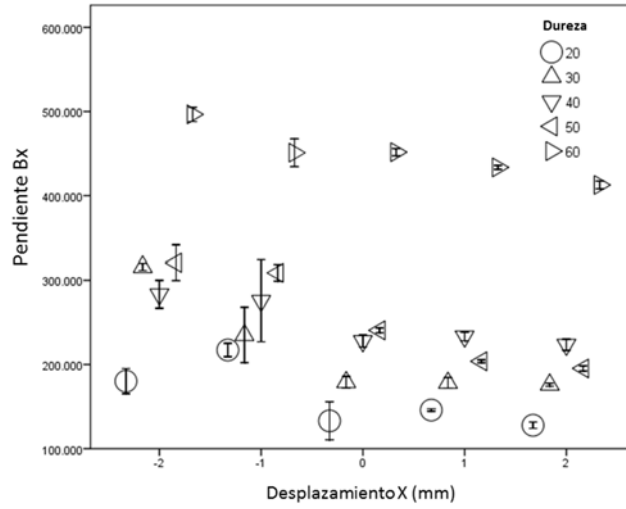


Figura 4.25. Valores de pendiente de la recta de la deceleración para el canal Bx tras el contacto con cilindros de distintas durezas. La barra de error muestra la desviación estándar sobre las 40 muestras tomadas por cada punto.

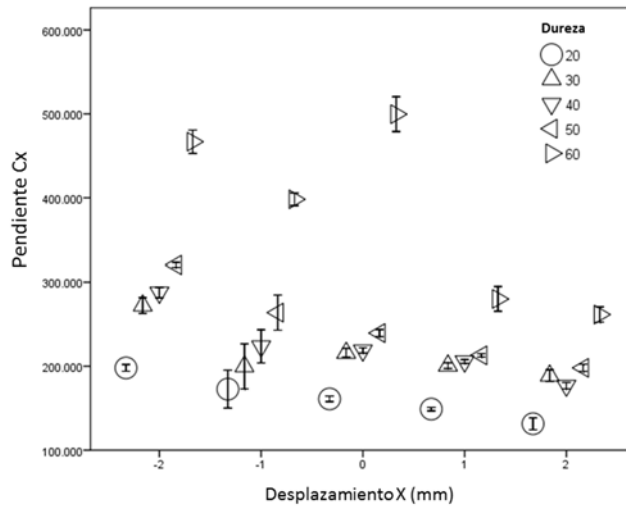


Figura 4.26. Valores de pendiente de la recta de la deceleración para el canal Cx tras el contacto con cilindros de distintas durezas. La barra de error muestra la desviación estándar sobre las 40 muestras tomadas por cada punto.

Un estudio similar para el caso de la rotación de la garra respecto del producto y se puede ver en las Figura 4.27-4.35. El parámetro V_{total} (Figura 4.27) estima mejor la dureza de los productos que V_{cil} (Figura 4.28). Las máximas deceleraciones y líneas de pendiente muestran un comportamiento similar con mejores estimaciones de la dureza para los canales Bx (Figura 4.30, Figura 4.33) y Cx (Figura 4.31, Figura 4.34) que para el vástago del cilindro Dx (Figura 4.35) y el canal Axy (Figura 4.29, Figura 4.32).

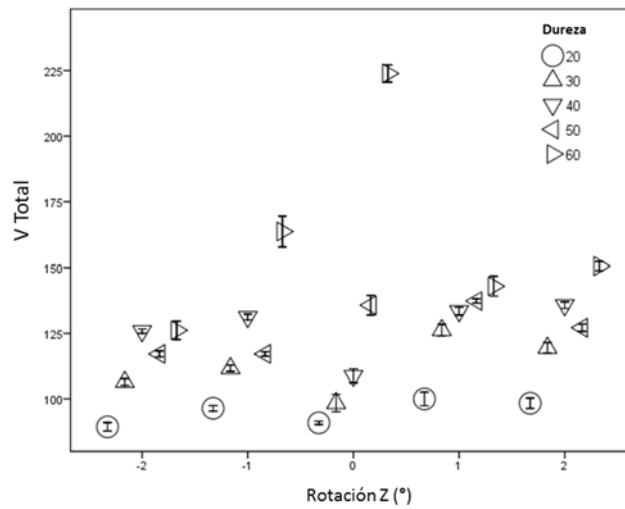


Figura 4.27. Parámetro V_{total} extraído mientras se agarran cilindros de distintas durezas y la muñeca robot gira alrededor del eje Z. La barra de error muestra la desviación estándar sobre las 40 muestras tomadas por cada punto.

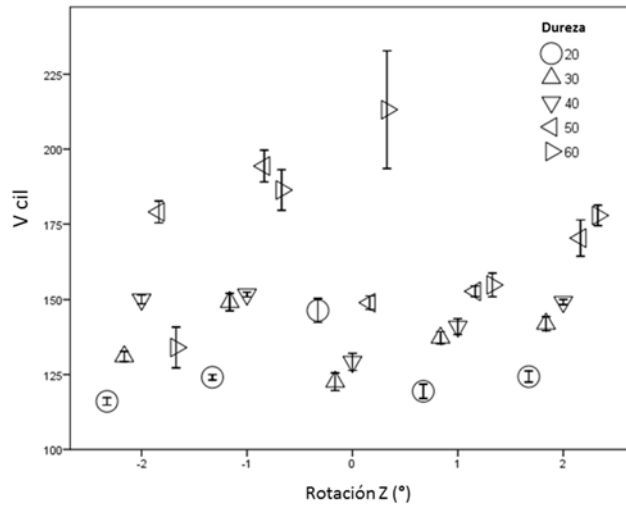


Figura 4.28. Parámetro Vcil extraído mientras se agarran cilindros de distintas durezas y la muñeca robot gira alrededor del eje Z. La barra de error muestra la desviación estándar sobre las 40 muestras tomadas por cada punto.

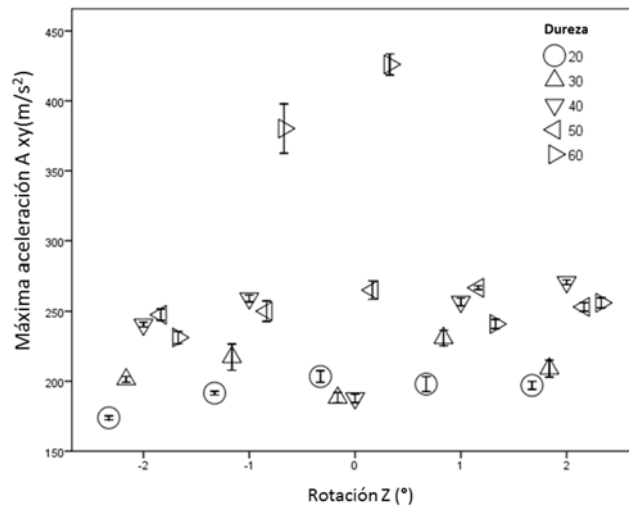


Figura 4.29. Máxima aceleración del canal A con cilindros de distinta dureza mientras la muñeca robot gira alrededor del eje Z. La barra de error muestra la desviación estándar sobre las 40 muestras tomadas por cada punto.

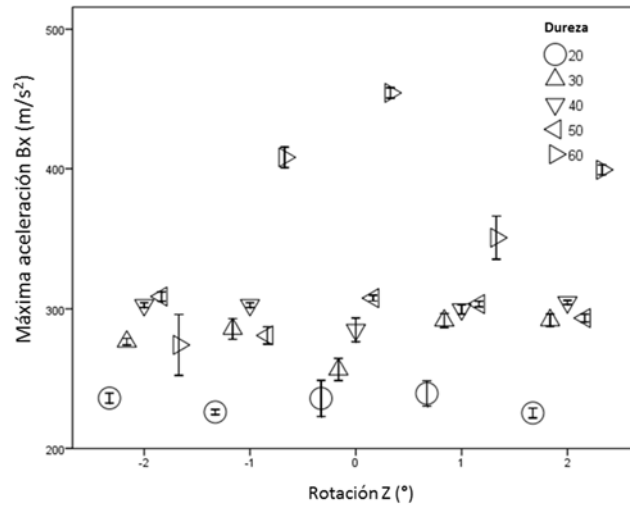


Figura 4.30. Máxima aceleración del canal Bx con cilindros de distinta dureza mientras la muñeca robot gira alrededor del eje Z. La barra de error muestra la desviación estándar sobre las 40 muestras tomadas por cada punto.

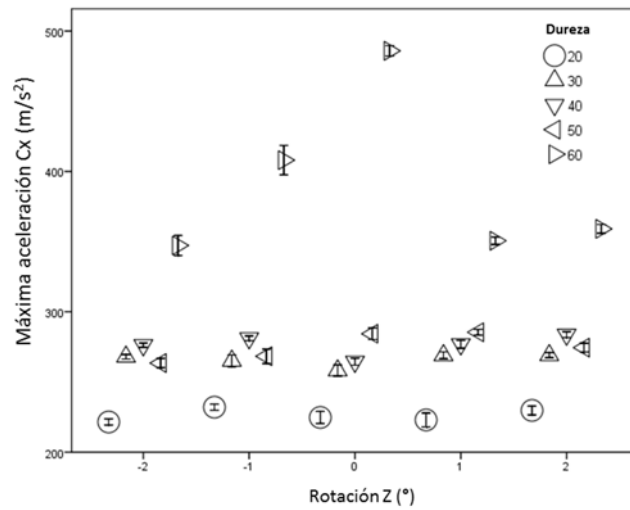


Figura 4.31. Máxima aceleración del canal Cx con cilindros de distinta dureza mientras la muñeca robot gira alrededor del eje Z. La barra de error muestra la desviación estándar sobre las 40 muestras tomadas por cada punto.

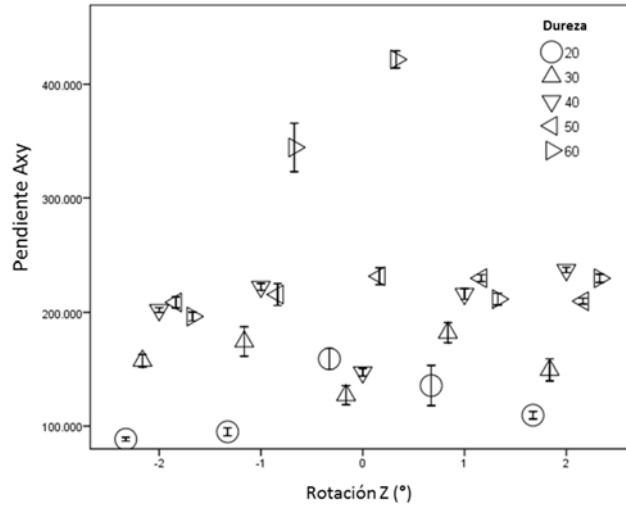


Figura 4.32. Pendiente del canal Axy con cilindros de distinta dureza mientras la muñeca robot gira alrededor del eje Z. La barra de error muestra la desviación estándar sobre las 40 muestras tomadas por cada punto.

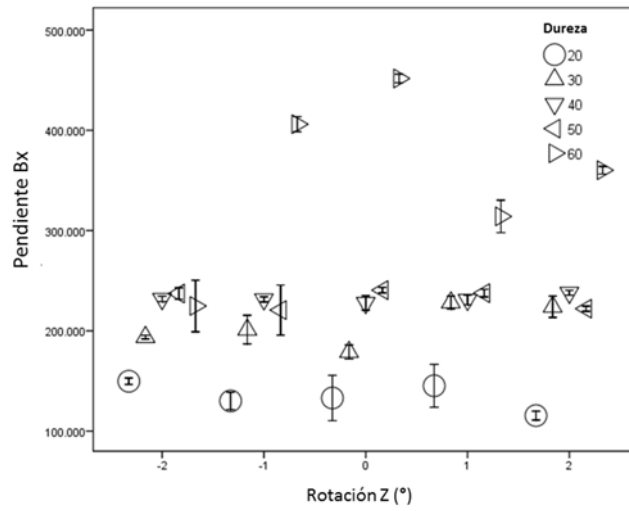


Figura 4.33. Pendiente del canal Bx con cilindros de distinta dureza mientras la muñeca robot gira alrededor del eje Z. La barra de error muestra la desviación estándar sobre las 40 muestras tomadas por cada punto.

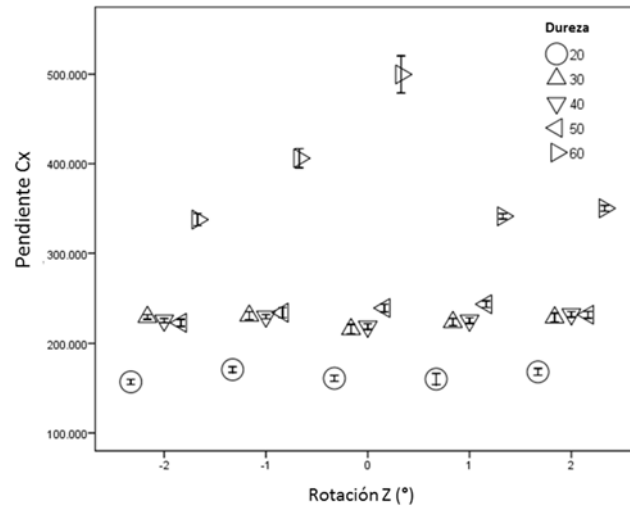


Figura 4.34. Pendiente del canal Cx con cilindros de distinta dureza mientras la muñeca robot gira alrededor del eje Z. La barra de error muestra la desviación estándar sobre las 40 muestras tomadas por cada punto

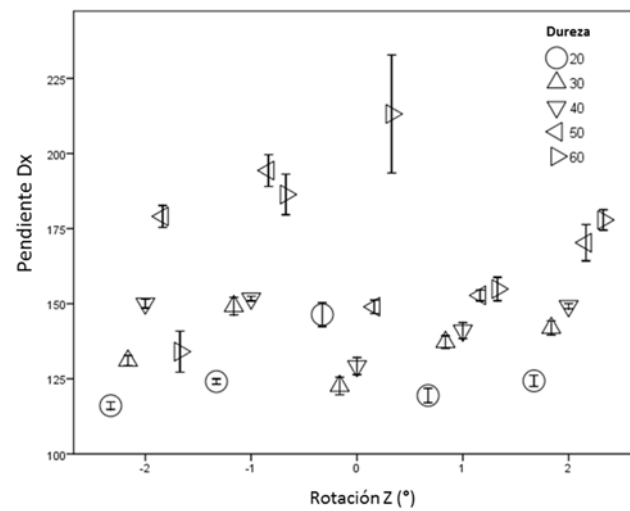


Figura 4.35. Pendiente del canal Dx con cilindros de distinta dureza mientras la muñeca robot gira alrededor del eje Z. La barra de error muestra la desviación estándar sobre las 40 muestras tomadas por cada punto.

4.3. Estudio de la garra con un fruto electrónico

En la industria mientras los productos agroalimentarios son manipulados manualmente se puede realizar una estimación de firmeza del producto. Para la utilización de robots en la manipulación de productos agroalimentarios es deseable que este reemplace las mismas funciones que la manipulación manual. La manipulación de productos agroalimentarios con robots es muy compleja ya que estos no son homogéneos, cambian según diversos parámetros y son susceptibles de ser dañados. La generación de daños en los productos debida a la manipulación provoca una reducción significativa del valor final del producto (Van Zeebroeck 2007). El uso de robots en estas operaciones está limitado por la ausencia de diseños de garras que no generen daños en los productos. Es deseable evaluar la agresividad de la garra.

Los frutos o esferas electrónicas se usan para evaluar los impactos que sufren los productos hortofrutícolas en las operaciones de cosecha y poscosecha (García-Ramos et al. 2004; Desmet 2004; Fischer et al. 2009). Los frutos electrónicos siguen todo el proceso que realiza el fruto a estudiar. Estos disponen de unos acelerómetros internos que procesan la información de las señales obtenidas para dar un valor determinado según su programación interna. En aquellos puntos en los que se obtengan los valores más altos es donde los productos son más susceptibles de sufrir daños. Sin embargo, la evaluación de los impactos depende en cierta medida por la posición relativa entre el fruto y el objeto contra el que impacta. De la misma forma que esta tecnología se emplea en la industria agroalimentaria se puede emplear para evaluar la agresividad de la garra. Debido a las características del fruto electrónico es importante que el estudio evalúe los impactos de la garra del robot sobre el fruto electrónico en función de la orientación relativa de este.

El fruto electrónico PTR 200, que tiene un peso de 143 gramos, es el empleado con la garra. Los ensayos para determinar la posición del fruto se realizaron manteniendo fijos los reguladores de caudal y la presión neumática de alimentación fija a $1,9 \text{ Kg/cm}^2$. El tiempo de ciclo entre agarres fue de 5 segundos y para cada posición de estudio se realizaron 30 repeticiones. Se estudiaron seis posiciones relativas del fruto electrónico respecto de la garra. En la Figura 4.36 se muestran los sistemas de coordenadas del fruto (u,v,w), de la garra (X,Y,Z) y de las distintas posiciones relativas ensayadas. Se repitió el ensayo cambiando los reguladores de caudal que controlan la velocidad de cierre de la garra.

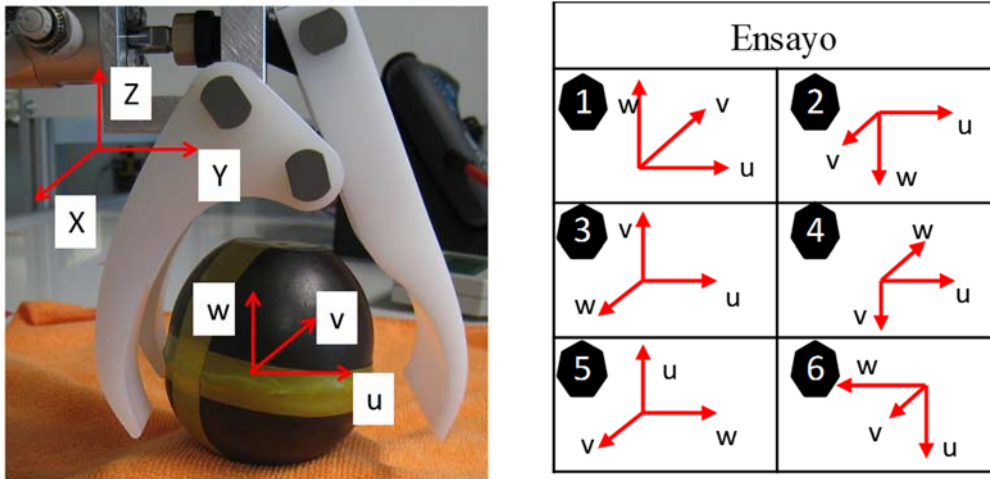


Figura 4.36. Posición relativa del fruto electrónico respecto de la garra y posiciones ensayadas.

En todas las posiciones el impacto medio registrado por el fruto electrónico se mantiene por debajo del 25% del valor máximo que registra. Los valores medios registrados y su variabilidad cambian en función de su posición. La posición con menor variabilidad y con valor medio significativamente inferior es la 1 de la Tabla 4.1. Las posiciones 1 y 2 muestran valores significativamente más bajos que el resto, que corresponden a la posición vertical positiva y negativa.

Tabla 4.1. Valor medio del impacto en % respecto al máximo que registra el fruto electrónico y desviación típica según la orientación del fruto electrónico respecto a la garra robot.

Ensayo	Valor medio del ensayo (%)	Desviación típica
1	7,7	2,1
2	10,7	3,7
3	20,2	6,4
4	24,1	7,0
5	16,3	5,5
6	14,4	4,4
Media		15,6
Desviación media		4,6

En la Figura 4.37 muestra la evolución del valor registrado por el fruto electrónico al incrementar la velocidad de los dedos de la garra ajustando los reguladores de caudal y la presión de alimentación. En neumática el caudal es proporcional a la velocidad

mientras que la presión determina la fuerza. Los valores son significativamente mayores al incrementar tanto el caudal como la presión de alimentación.

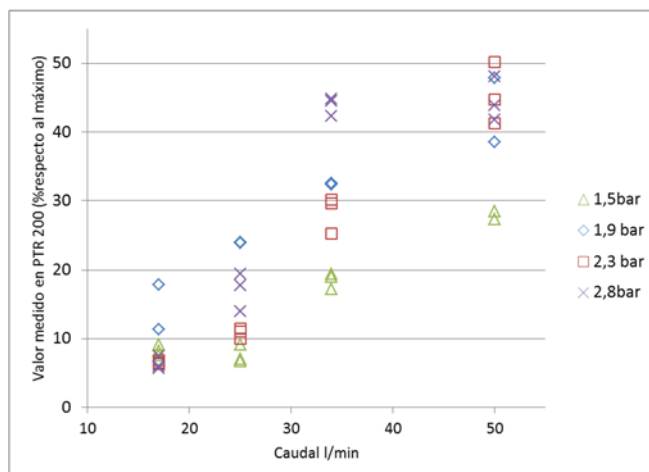


Figura 4.37. Evolución de los resultados medios del fruto electrónico según la presión y el caudal suministrados al cilindro neumático.

Durante el ensayo llevado a cabo con el fruto electrónico, en todas las posiciones el impacto medio registrado se mantuvo por debajo del 25%. Es destacable la influencia de la posición del fruto electrónico respecto a la garra robot, tanto en el valor medio como en la variabilidad de los impactos registrados.

Los resultados determinan la posición vertical positiva correspondiente al ensayo 1 como la más adecuada para estimar el impacto en el agarre de productos hortofrutícolas utilizando un fruto electrónico PTR200.

El fruto electrónico demuestra que a igualdad de fuerza de cierre de los dedos un incremento en la velocidad de los dedos de la garra implica valores mayores registrados en el fruto electrónico. Es posible afirmar que la agresividad de la garra aumenta cuando la velocidad de los dedos aumenta.

4.4. Discusión

Los acelerómetros en los dedos de una garra neumática sirven para estudiar las distintas fases de agarre, identificar la presión neumática de alimentación y reconocer la dureza del producto a manipular.

El reconocimiento de las fases de agarre de un producto permite conocer el proceso de agarre en detalle. En un proceso de coger y colocar con robots, el conocer el tiempo en el cual el producto está firmemente agarrado permite optimizar los movimientos del

robot. Si el producto es agarrado antes de tiempo con el movimiento del robot este puede salir despedido y si se tarda más tiempo se incrementa innecesariamente el tiempo ciclo por producto.

La presión neumática se estima por medio del estudio de los picos de aceleración durante la aproximación de los dedos al producto. Este método no es aplicable a sistemas en los que el movimiento de los dedos sea muy corto o la presión sea muy elevada. Las altas presiones implican un tiempo muy corto de movimiento de los dedos insuficiente como para que se generen los dos picos empleados y cuando los productos son muy grandes el segundo pico puede no alcanzarse.

La dureza de diversos cilindros se estima por medio de acelerómetros que son fijados a los dedos y en el vástago del cilindro neumático. Tres son los métodos empleados para estimar la dureza de los cilindros e individualmente es posible distinguir entre cilindros de durezas de 20, 30, 40, 50 y 60 Shore A. El primer método hace la integral al cuadrado de la aceleración durante todo el periodo de tiempo desde la activación de la señal de la electroválvula que activa el cilindro neumático hasta que el producto se encuentra estable entre los dedos de la garra. Este método puede incluir o no la fase de aproximación de los dedos hasta su contacto con los cilindros. La mayor dificultad de este método es cuando se cambia el punto de ataque entre la garra y el producto, pero si esta es fija es posible clasificar por durezas todos los cilindros mencionados. Las señales de los acelerómetros de los dedos B y C son las que consiguen mejores estimaciones de la dureza. El acelerómetro del dedo A, que es el infra-actuado, al poder rotar libremente, tiene valores menores ya que durante el primer contacto del dedo contra el producto el dedo rotará para adaptarse a la forma del producto y por tanto reduce la severidad del impacto. Los dedos infra-actuados son menos agresivos contra el producto que los que tienen el movimiento completamente definido. Las deceleraciones registradas en la dirección del eje Y son siempre menores, pero alcanzan valores significativos en el dedo A por lo que deben considerarse. La experimentación se realizó con acelerómetros biaxiales que no recogen los efectos de la rotación. Este método brinda la posibilidad de evaluar la agresividad de la garra al agarrar un objeto y ajustar la garra para evitar daños al manipular objetos sensibles.

El segundo método evalúa la severidad de la deceleración que se produce tras el contacto entre los dedos de la garra y el producto. Por medio de este método se pueden clasificar las durezas de los cilindros mencionados siendo la estimación de los dedos B y C mejor que del A. En el caso del acelerómetro D situado en el vástago del cilindro neumático los resultados no fueron lo suficientemente buenos como para predecir pequeñas diferencias de dureza y no es posible distinguir con claridad el instante en el cual comienza el contacto con el producto.

El tercer método estudia los valores de máxima deceleración alcanzada tras el contacto. Los resultados son similares a los del segundo método encontrando mejores estimaciones de la dureza de los acelerómetros de los dedos B y C que del

acelerómetro del dedo A y peores resultados en el acelerómetro D situado en el vástago del cilindro.

Los resultados de los parámetros extraídos de los acelerómetros para estimar la dureza están claramente influenciados por la posición relativa entre la garra y los cilindros manipulados. En este caso los peores resultados y más variables son los de la pendiente de la deceleración tras el contacto. Las señales de los acelerómetros y por lo tanto los parámetros extraídos son sensibles a los cambios que ocurran por lo que un cambio en el rozamiento entre dedo y producto o del producto contra el sitio de agarre inicial afecta claramente a las estimaciones de la dureza.

Un análisis de datos multivariante o una red neuronal que consiga un autoaprendizaje pueden ayudar a mejorar los resultados logrando un mayor coeficiente de correlación. Todos los métodos mostrados pueden ser procesados a alta velocidad para una rápida evaluación. Con los medios empleados la dureza se puede estimar en menos de 0,15 segundos permitiendo así conocer la dureza del producto durante su traslado.

Este sistema de estimación de la dureza podría implementarse en un sistema robótico industrial siempre que las condiciones de manipulación se mantengan idénticas entre distintos productos.

Es deseable que el sistema de estimación de la dureza por medio de acelerómetros localizados en la garra pueda ser independiente de la forma, tamaño del producto y posición relativa garra-producto para que pueda aplicarse en la manipulación de alimentos.

Los frutos electrónicos pueden emplearse para evaluar la agresividad de la garra. Es muy importante tener en cuenta la posición de este respecto de la garra ya que los datos pueden variar significativamente.

4.5. Conclusiones

Los acelerómetros fijados en los dedos de una garra neumática pueden llegar a emplearse como sensores táctiles capaces de distinguir la dureza del producto que manipula. La variabilidad de la respuesta es notable y está muy influida por la posición relativa garra-producto. Para una robusta respuesta de los acelerómetros como sensores táctiles es necesario evitar ruidos que puedan influir en las aceleraciones de los dedos como pueden ser los rozamientos entre el dedo, el producto y la zona de apoyo o los efectos inerciales de la dinámica del mecanismo de la garra. Con un análisis detallado en una garra neumática los acelerómetros pueden llegar a estimar la fuerza de esta y la posición de los dedos.

Capítulo 5

Estimación de propiedades de productos agroalimentarios en garras para robot

5.1. Introducción

Los consumidores buscan productos agroalimentarios frescos y de buena calidad. Para lograr esto es necesario asegurar la calidad de los productos durante los procesos poscosecha (Kader 2001). Cada vez más los consumidores están más sensibilizados con la frescura de los productos y quieren saber los principales parámetros de calidad de los productos que consumen. Esto fomenta actividades de investigación que desarrollen métodos que suministren esa información (Butz et al. 2005). En las líneas de empaquetado de productos agroalimentarios la visión artificial se emplea en la caracterización de la calidad externa para clasificar frutas por tamaño, color, posición, magulladuras y manchas (Blasco et al. 2003). Muchos fabricantes han desarrollado sistemas de clasificación comerciales basados en sensores de color y NIR para clasificar las frutas de acuerdo a su calidad química interna, especialmente el contenido de azúcar (Nicolai et al. 2007). Por el contrario, la medición de parámetros internos de

forma no destructiva como la firmeza o daños en el interior aún requiere de nuevos desarrollos. La textura es uno de los atributos clave que se utiliza para monitorizar y controlar la calidad a lo largo de la cadena de producción de alimentos (Chen & Opara 2013).

Existen diversos métodos instrumentales destructivos y no destructivos para evaluar la textura y los defectos internos en frutas y hortalizas. El penetrómetro (Magness & Taylor 1925) es un método destructivo tradicional empleado por agricultores, cooperativas y centros de control de calidad para medir la firmeza de la fruta durante las operaciones de cosecha y poscosecha. La fuerza máxima de compresión en punción se considera la resistencia de la piel de la fruta y la relación de la deformación con la fuerza a compresión con un disco de diámetro determinado se considera la resistencia del fruto en su conjunto. Los ensayos no destructivos de textura de alimentos frescos y procesados son interesantes para el seguimiento y control de la calidad del producto. La medición no destructiva de la firmeza basada en las propiedades elásticas del tejido ha sido investigada y está ya disponible en varias industrias (Valero et al. 2007). Comercialmente hay varios sistemas no destructivos de medida de firmeza que se pueden implementar en líneas de envasado de productos agroalimentarios o en laboratorios de controles de calidad (*Aweta Acoustical Firmness Sensor*, *Greefa Intelligent Firmness Detector* y *Sinclair Internal Quality-Firmness Tester*). Sin embargo, los resultados de estas mediciones no destructivas en línea están aún muy por debajo de los obtenidos con las mediciones de firmeza destructivos de laboratorio tradicional (Kupferman 2007). La medición de variables extraídas de las curvas de fuerza-deformación, el análisis de las fuerzas de impacto, la técnica del rebote, la medición de las respuestas acústicas a vibraciones e impactos (Diezma-Iglesias et al. 2004), la medición de las propiedades ópticas, y de resonancia magnética nuclear se pueden utilizar para evaluar la firmeza de la fruta (García-Ramos et al. 2004). Otras técnicas no destructivas tales como rayos X, espectroscopia NIR, nariz electrónica, imágenes multiespectrales o dispersión hiperespectral podrían implementarse para caracterizar la calidad interna de los productos (Ruiz-Altisent et al. 2010).

Las técnicas de impacto se basan en las mediciones de fuerza o aceleración versus tiempo. Existe un modelo de impacto estático no destructivo desarrollado en laboratorio para medir la calidad de la fruta en una línea experimental de envasado de frutas (Homer et al. 2010). El valor de firmeza está relacionado con la curva tiempo aceleración suministrada por un acelerómetro que está unido a un brazo que impacta contra el fruto. Este sistema permite clasificar correctamente melocotones en dos categorías según su firmeza (Vursavus et al. 2014). Un sistema parecido con una célula de carga sobre la que caen los productos sirve para clasificar por su firmeza kiwis (Ragni et al. 2010) y tomates (ChengChang et al. 2009).

En este capítulo se muestra el desarrollo y experimentación de varios modelos de garra con acelerómetros como sensores táctiles para la manipulación, sin generación de daños, y clasificación de berenjenas y mangos. Los acelerómetros se han empleado

para la estimación de la firmeza y otras propiedades organolépticas extraídas según ensayos referencia de laboratorio. Para realizar este estudio se han diseñado, fabricado y experimentado con diversos tipos de garras con dedos paralelos y ventosas. La configuración de los movimientos de los dedos de la garra y los ajustes de esta son parámetros que influyen en la forma en que la garra logra manipular sin dañar productos sensibles e irregulares como son las berenjenas y los mangos. Los distintos modelos estudian las posibilidades de dedos infra-actuados con distintos grados de libertad y con almohadillas rellenas de material granular que permiten el control *jamming* de su rigidez. Tanto las garras como el proceso empleado para el tratamiento de las señales de los acelerómetros que estiman la firmeza de los productos están desarrollados en base a experiencias previas. Para conseguir una adecuada manipulación y respuesta de los sensores es imprescindible que el diseño de la garra, el proceso que el robot realiza y el ajuste del procesado de las señales, sean los adecuados. Gran parte de los resultados de estos modelos de garras se pueden consultar en las publicaciones ((Blanes et al. 2016; Blanes, Cortés, et al. 2015; Blanes, Ortiz, et al. 2015;Blanes et al. 2015).

5.2. Descripción general de las garras utilizadas y metodología empleada

Principalmente tres son los problemas que se busca solventar durante el diseño de las distintas garras: la capacidad de la garra para manipular los productos irregulares sin dañarlos, la viabilidad de fabricación de los distintos componentes de la garra diseñada y la respuesta de los acelerómetros para que sean capaces de conseguir señales que clasifiquen los productos por su firmeza.

La adaptación a la forma se consigue por medio de diversos sistemas. Los mecanismos infra-actuados dejan grados de libertad no controlados a los dedos de la garra para que estos se adapten a la forma de los productos mientras se manipulan. Los sistemas de almohadillas en los dedos con control de la rigidez permiten una adaptación suave a los productos durante el agarre y más rígida para su manipulación. La transición *jamming* de un material granular permite controlar la rigidez de este. Pequeños cambios en la densidad de este por medio de vacío incrementan su rigidez. Si el material granular se encuentra encerrado dentro de una membrana flexible se comporta como un fluido con un tacto blando o muy blando si las partículas están muy sueltas y, a medida que se aplica una depresión con respecto al exterior de la membrana las partículas tienden a hacinarse y estar en estrecho contacto unas con otras, esto provoca un cambio en la capacidad para que estas fluyan e incrementa la rigidez del conjunto. En las garras empleadas, el control de la rigidez de esta membrana lo controla el robot por medio de un dispositivo con dos entradas digitales que sirven para realizar la acción de soplado (poca rigidez) y depresión (elevada rigidez). Los actuadores empleados en la garra son neumáticos ya que estos permiten un fácil ajuste de la fuerza de cierre independientemente del tamaño del producto y de su velocidad.

La tecnología de fabricación aditiva de material ha sido empleada para fabricar las piezas más complejas de las garras ya que muchas de estas piezas no pueden ser fabricadas de otro modo. En las garras este proceso de fabricación permite realizar las piezas que disponen de las cavidades necesarias donde alojar el material granular de los dedos. Los diseños de estas piezas, realizadas por fabricación aditiva de material plástico, tienen la geometría optimizada y por ello un peso reducido. Esta técnica de fabricación ha facilitado notablemente el diseño de las garras.

Las señales recogidas de los acelerómetros deben ser lo suficientemente claras y tener poco ruido, esto permite que puedan procesarse para cruzar los datos con la firmeza del producto a manipular. En el capítulo anterior se describen los problemas de los acelerómetros, como sensores táctiles en una garra, para determinar la dureza del producto agarrado. La posición relativa garra-producto y el rozamiento del producto con la base donde este se apoya influyen notablemente en la determinación de la dureza ya que ambos factores provocan ruidos en las señales de los acelerómetros. Para atenuar estos ruidos las garras ensayadas emplean una ventosa que permite mantener el producto en contacto contra los dedos mientras este está en el aire. Este método permite aislar el producto del contacto contra la base donde se apoya y lograr señales con menos ruido. El conjunto de la cinemática del movimiento de los dedos del sistema de manipulación influye claramente en la respuesta en los acelerómetros. Los mecanismos de garras empleados son muy sencillos. Tienen una transmisión directa del actuador al movimiento de los dedos evitando la generación de ruidos procedentes de esfuerzos inerciales variables y difíciles de valorar que normalmente ocurren en mecanismos más complejos.

5.2.1. Operativa robot

En un proceso normal el robot desplaza la garra hasta el producto, activa el cierre de la garra, se retira, se desplaza hasta el sitio de dejada y deja el producto (Figura 2.3). Al agarrar el producto según el sistema de manipulación descrito en el capítulo IV hay dificultades en la respuesta de los acelerómetros cuando existen variaciones en la posición relativa entre el producto y la garra. Dada la importancia de la variabilidad de la respuesta de los acelerómetros cuando la posición del producto respecto de la garra cambia se diseña un nuevo proceso que evita que estos cambios afecten a la respuesta. Gran parte de los cambios en la respuesta de los acelerómetros son debidos al rozamiento que se produce cuando el producto está en contacto con la cinta mientras los dedos de la garra colisionan contra este. Para evitar esto las garras disponen de una ventosa que es capaz de sostener el producto en el aire evitando el contacto de la cinta transportadora. La ventosa se acciona por medio de un venturi accionado por electroválvula. El robot no solo realiza el proceso de coger y colocar si no que realiza golpes intermedios mientras el producto no está en contacto con la cinta para así evitar el ruido que esta genera y lograr que las señales de los acelerómetros funcionen correctamente y sean capaces de clasificar la firmeza de estos. Durante estos golpes el

producto no se cae gracias a la acción de la ventosa. El programa del robot controla la trayectoria de la garra y todos los dispositivos de esta por medio de salidas digitales.

5.2.2. Sincronización entre el robot, la garra y los dispositivos

Para lograr un funcionamiento adecuado de la garra acoplada a un robot y que esta sea capaz de manipular los productos es necesario que el programa robot controle la operativa de los dispositivos de la garra. El controlador del robot, por medio de un programa, activa los dispositivos de control de la garra y sirve como entrada al sistema que adquiere y procesa las señales de los acelerómetros ya que estas han de trabajar de forma sincronizada. La Figura 5.1 es un esquema general del funcionamiento de los sistemas de manipulación empleados, en el no existe ni retroalimentación de las señales ni el cruce de los parámetros extraídos por los acelerómetros con los valores de firmeza de los ensayos destructivos de los laboratorios.

En las garras ensayadas cada dedo dispone de un acelerómetro biaxial ADXL278 con un rango de +/-50g. Una tarjeta de adquisición USB NI6210 es la encargada de recoger y enviar al ordenador las deceleraciones (Ax, Ay, Bx, By, Cx, Cy). Se recogen 8KS a una velocidad de 30KHz por cada canal.

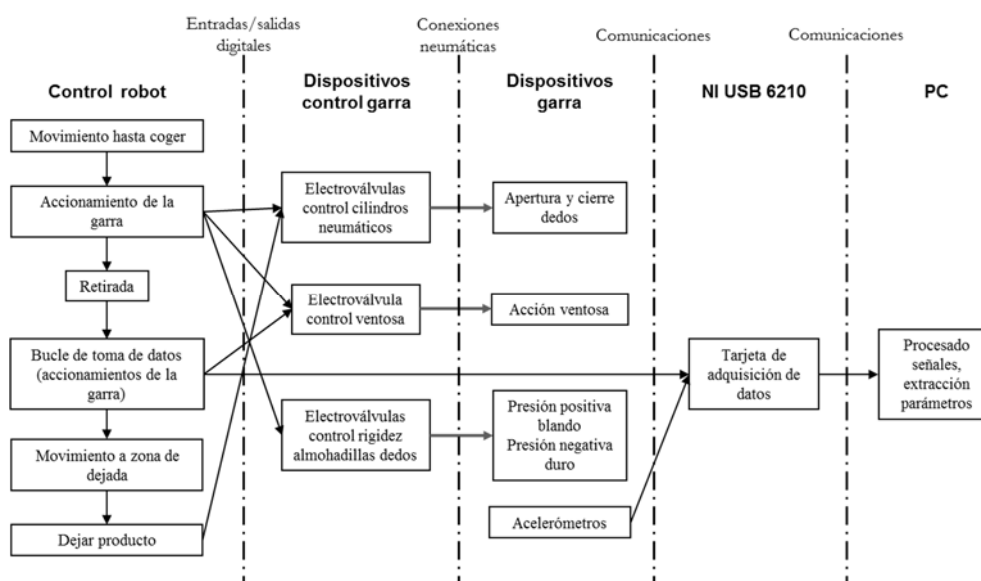


Figura 5.1. Esquema de funcionamiento y conexiones entre el sistema de control del robot, los dispositivos de control de la garra, dispositivos de la garra, tarjeta de comunicaciones y sistema de procesado de señales en PC.

El esquema se completa con una retroalimentación del ordenador que interprete los datos de los sensores, extraiga la información de la calidad del producto manipulado y mande la señal al control del robot para que decida la posterior operación con el producto.

5.2.3. *Procesado de señales*

Las señales de deceleración de los dedos se procesan para extraer parámetros que puedan ser correlacionados con la firmeza de los productos a manipular. El reconocimiento de la activación del cierre de la garra se realiza capturando la señal digital de cierre que manda el controlador del robot. Las señales se capturan una vez ajustados los dispositivos de la garra neumática. La fuerza de cierre se controla con la presión neumática empleada en los actuadores y la velocidad de cierre por medio de los reguladores de caudal. Los tiempos de espera entre las diversas acciones de la garra los controla el robot por medio de parámetros existentes en el programa que este ejecuta. Una vez logrado que la garra sea capaz de manipular sin dañar los productos y el sistema de adquisición de datos de capturar las señales, se procede a realizar el agarre de productos que posteriormente se ensayarán en el laboratorio. Para procesar las señales adquiridas hay unos parámetros que precisan ser definidos para conseguir las variables que posteriormente se cruzan con la firmeza del producto. La firmeza de los productos agroalimentarios se determina por medio de ensayos en laboratorio. Las propiedades mecánicas se analizan a través de un ensayo de punción mediante el uso de máquinas de ensayo universal. El procesado de las señales de deceleración se mejora con los nuevos modelos de garra y la observación detallada de las características de las señales. Las mejoras buscan incrementar la robustez del cálculo de los parámetros y generar nuevos que permitan mejorar la capacidad predictiva. El esquema genérico más complejo empleado en el procesado de las señales de los acelerómetros se muestra en la Figura 5.2. En él se puede observar la necesidad de conocimiento de los valores iniciales o entradas que son seleccionados en base a los ajustes previos y la observación de las señales según el tipo de producto a analizar. El procesado se realiza para cada uno de los canales de los acelerómetros y son analizados de manera independiente, pero con los mismos ajustes.



Figura 5.2. Flujoograma del tratamiento de las señales de los acelerómetros.

5.3. Garra experimental para berenjenas

La berenjena tiene un bajo aporte calórico, muy bajo contenido en sodio y alto contenido en potasio y fibra. Se produce y consume a nivel mundial siendo China e India los que encabezan el volumen de producción. En Europa España es uno de los principales productores exportando parte de la producción (“FAO. *Statistical Database.*,” 2015). Las berenjenas son cuidadosamente recolectadas tras la selección manual de los frutos maduros (Hayashi et al. 2002). Los frutos precisan de refrigeración para mantener su estado de madurez. Las berenjenas no permiten un periodo largo en almacén y pueden dañarse, perdiendo firmeza prematuramente, si se

almacenan a temperaturas demasiado bajas. A igualdad de condiciones posrecolección, la evolución de la madurez de los frutos puede variar ya que no se puede asegurar idéntico estado de maduración de todos los productos en la recolección. La manipulación, calibrado, selección y envasado se realizan normalmente a mano pudiéndose automatizar los distintos procesos en función del volumen de producción. La firmeza de las berenjenas es uno de los principales parámetros que sirve para evaluar la calidad final de esta. La evaluación y monitorización de la firmeza en las líneas de procesado es deseable. Actualmente se emplean ensayos destructivos con penetrómetro para evaluar esta firmeza realizando solo un muestreo por lotes. Es deseable encontrar sistemas no destructivos que sean capaces de medir la firmeza y que mejoren los resultados de los ya desarrollados (Kupferman 2007).

Este estudio describe el desarrollo de dos modelos de garra neumática para que, acoplada a un robot, manipule y compruebe la firmeza de las berenjenas manipuladas. El modelo inicial tiene todos los dedos realizados en plástico y con capacidad para adaptarse a la forma de las berenjenas gracias a su infra-actuación. El modelo final tiene en uno de los dedos una almohadilla con fluido granular que permite adaptarse a la forma de las berenjenas y controlar su rigidez en función del vacío realizado en su interior. El resultado final consigue correlacionar la firmeza destructiva medida como resistencia a punción de la piel con los parámetros extraídos de los acelerómetros.

5.3.1. Primer caso: garra sin jamming

La garra diseñada dispone de tres dedos de movimiento paralelo, una ventosa y dos cilindros neumáticos para manipular berenjenas. En la Figura 5.3 se observa la configuración de la garra. Uno de los cilindros mueve el dedo A, el otro mueve el conjunto de los dedos B, C y la ventosa localizada entre esos dedos. Los dedos tienen grados de libertad indefinidos pudiendo rotar entorno a un eje vertical y también respecto al vástago del cilindro. Estas rotaciones permiten que los dedos se puedan adaptar al producto mientras lo agarra. El robot controla la garra con dos electroválvulas una para ambos cilindros y otra para la ventosa. El robot coge la berenjena desde la cinta, eleva el producto y pone en funcionamiento la ventosa. La berenjena queda sujeta bajo la acción de la ventosa y en contacto con los dedos B y C independientemente de que el dedo A este en contacto con ella. Posteriormente se efectúa cinco veces el bucle: abrir, esperar 0,04 segundos, cerrar y esperar 0,3 segundos. Los acelerómetros de la garra recogen las deceleraciones de los dedos al agarrar las berenjenas. En este caso las señales del primer agarre inicial se desprecian ya que están muy influenciadas por el ruido que genera el arrastre del producto con la cinta y el giro de los dedos de la garra para adaptarse a la forma del producto. Solo las señales del bucle de apertura-cierre fueron analizadas. Las señales procesadas según la ecuación (5.1) en los cinco agarres del bucle permiten obtener los parámetros V_{Ax} , V_{Ay} , V_{Bx} , V_{By} , V_{Cx} , V_{Cy} y los correspondientes módulos de la aceleración compuesta por los vectores con ejes X e Y de cada acelerómetro VA, VB, VC. Por medio de la ecuación (5.2) se determina el valor total del conjunto de los acelerómetros

V_{tx} considerando solo el eje X. Los valores de la máxima deceleración por acelerómetro constituyen los parámetros $MaxAx$, $MaxAy$, $MaxBx$, $MaxBy$, $MaxCx$ y $MaxCy$.

$$VAx = \int_{t_0}^{t_1} Ax^2 dt ; VAy = \int_{t_0}^{t_1} Ay^2 dt ; VA = \sqrt{Ax^2 + Ay^2} \quad (5.1)$$

$$V_{tx} = VAx + VBx + VCx \quad (5.2)$$

En un primer experimento preliminar se emplea un lote de 10 berenjenas de la variedad ‘Negra alargada’ seleccionadas de un establecimiento comercial. Las berenjenas fueron manipuladas con la garra de la Figura 5.3 mientras está acoplada al robot de ABB IRB 340. Este ensayo sirvió para ajustar la presión y velocidad de la garra que se emplea en posteriores experimentos. Para verificar la ausencia de daños en las berenjenas estos se evalúan a las 0 horas, 24 horas, 7 días y 14 días. Los ajustes permiten verificar la ausencia de daños al manipular las berenjenas.

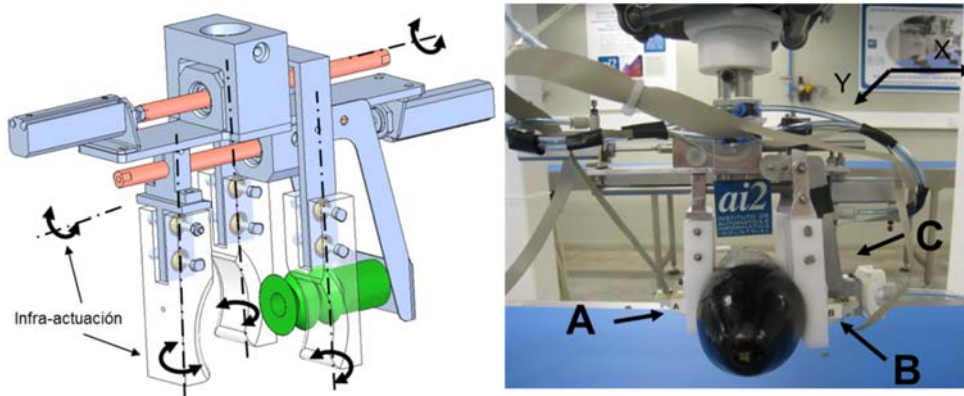


Figura 5.3. A la izquierda descripción de los grados de libertad de la garra, a la derecha localización de los acelerómetros.

El segundo experimento está realizado con 30 berenjenas de la misma variedad. Al tacto se clasifican según firmeza en 3 lotes de 10 unidades. La garra manipula una a una todas las berenjenas y emplea la respuesta de los acelerómetros como ensayo no destructivo para determinar su firmeza.

La firmeza de referencia se mide de forma destructiva como la resistencia a punción de la piel y como resistencia a compresión del fruto entero. Se utiliza una máquina universal de ensayos (Ibertest) a la que se acopla un dinamómetro digital de rango de fuerzas de 0 N a 500 N (Andilog Centor), con precisión del 0,1 %, frecuencia de

muestreo de 1,000 Hz y resolución de 0,025 N. La velocidad de bajada del vástago intercambiable es de 0,001 m/s. La máxima fuerza requerida para realizar el ensayo es tomada desde la curva fuerza-deformación. La resistencia a compresión de todo el fruto es medida como la máxima compresión fuerza/deformación (N/mm) ratio tomado desde la curva fuerza-deformación. A cada berenjena se le realizan dos repeticiones. Los datos de peso, diámetros y longitud fueron medidos previamente. Además, se miden los sólidos solubles de la pulpa en ambos ensayos.

En el ensayo de punción se utiliza un vástago cilíndrico de aguja de 1,5 mm de diámetro. En el ensayo de compresión se utiliza un vástago plano, formado por un disco de 2,0 mm de diámetro y de 3,0 mm de altura.

El ensayo muestra solo un daño ligero en la piel en una de las berenjenas, pero ninguna presenta corte alguno en la piel.

Por medio de un dendograma de clasificación no supervisada según los parámetros destructivos de punción y compresión las tres categorías de firmeza iniciales son corregidas a dos (Figura 5.4) 9 berenjenas poco firmes y 21 firmes. El tacto manual no se correlaciona con la firmeza establecida en los ensayos destructivos.

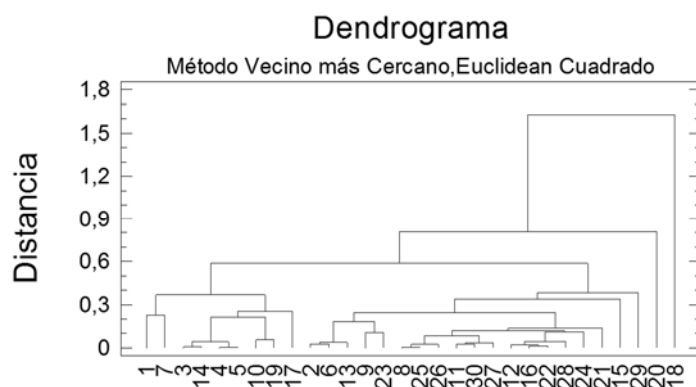


Figura 5.4. . Dendrograma de la clasificación no supervisada, mediante el método del vecino más cercano, (euclídeo cuadrado).

Se emplea un análisis discriminante con los parámetros de la garra para una clasificación supervisada de las berenjenas en las dos categorías. El p-valor es inferior al 0,05 lo cual determina que es estadísticamente significativo. El 90% de los frutos se clasifican correctamente (Tabla 5.1) y todos los frutos poco firmes se clasifican correctamente.

Tabla 5.1. Tabla de clasificación del análisis discriminante de las dos categorías de firmeza en función de las variables de aceleración y energía de los acelerómetros de la garra robot. Grupo 1 berenjenas poco firmes y grupo 2 berenjenas firmes.

Grupo de firmeza	Tamaño	Pronóstico grupo de firmeza	
		1	2
1	9	9 (100,0%)	0 (0,0%)
2	21	3 (14,3%)	18 (85,7%)

Los parámetros V (Tabla 5.2) son los más significativos y solo el parámetro de máxima aceleración en X es también significativo. El parámetro Vtx que recoge un conjunto de información de los tres acelerómetros es el que mejor clasifica las berenjenas. Los parámetros de forma independiente no son capaces de clasificar correctamente las berenjenas. Todos estos resultados han sido publicados en (Blanes et al. 2013).

Tabla 5.2. Coeficientes estandarizados de las variables utilizadas en la función discriminante de la clasificación de las dos categorías de firmeza.

Parámetros utilizados	
Vtx	-129857,0
VC	75255,9
VB	61841,8
VA	19355,6
VBy	56,7
VCy	-4,0
VAx	3,2
MaxAx	-2,8
VBx	2,6

La Figura 5.5 analiza con detalle las señales de deceleración del acelerómetro A en dirección X. En esta figura se pueden distinguir las distintas fases de agarre mencionadas en el capítulo IV. Con la Figura 5.5 (a) se pueden extraer todos los parámetros empleados para la clasificación realizada por categorías.

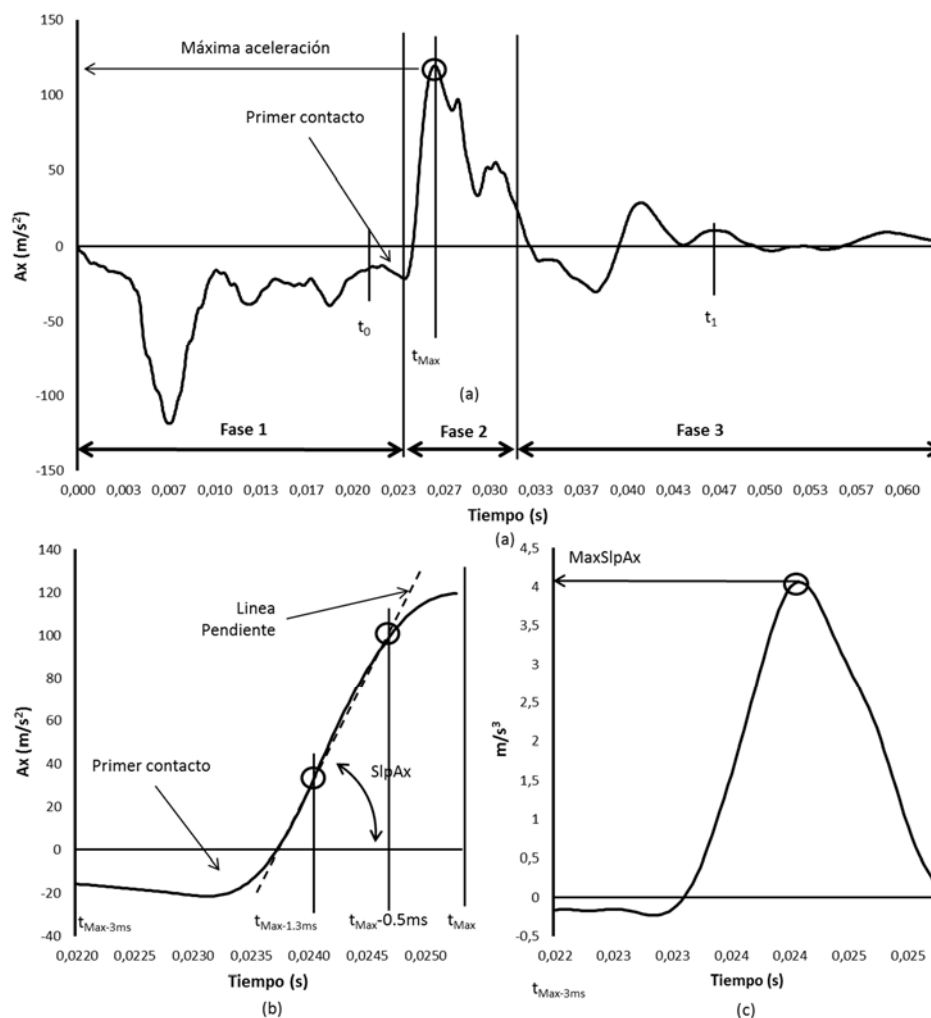


Figura 5.5. (a) Señal acelerómetro A dirección X, (b) zona de primer contacto contra la berenjena, y (c) derivada de la función A_x en torno al primer contacto y la máxima pendiente alcanzada.

La pendiente de la recta de la deceleración tras el contacto se puede valorar como la severidad de la deceleración de los dedos contra las berenjenas. Si la berenjena es más firme el dedo sufrirá una deceleración más violenta que con productos más blandos. Durante el agarre ocurren múltiples impactos y rebotes lo cual dificulta determinar exactamente donde se encuentra el punto del primer contacto.

La Figura 5.5 (b) muestra con detalle la zona de las deceleraciones tras el primer contacto entre el dedo A y la berenjena. Para calcular la pendiente y que esta tenga valores coherentes es necesario identificar el primer contacto contra el producto. No es posible definir un valor claro como punto de partida a partir del cual empieza el contacto. Además, es difícil encontrar un algoritmo que sea capaz de identificar cuando se produce este contacto ya que en muchos casos se producen continuos pasos por aceleraciones con valor nulo. Para facilitar un punto de referencia que sirva para el cálculo de la pendiente se emplea como punto de partida la aceleración máxima registrada y se calcula dicha pendiente para la recta que está comprendida entre la aceleración de los valores del tiempo máximo menos 0,5 milisegundos y tiempo máximo menos 1,3 milisegundos. La Figura 5.5 (c) es la derivada de la función (b), esta función muestra la variación de los valores de la pendiente a lo largo del primer contacto, de ella se puede extraer el valor de la máxima pendiente encontrada y su área sirve para estimar el valor medio de la deceleración encontrada. Estas mejoras son incorporadas en el programa de procesado y extracción de las señales de los acelerómetros para posteriores experimentos con nuevas garras.

Una de las berenjenas se dañó durante los ensayos. El daño en la piel provenía del dedo A. Este dedo dispone de una superficie rígida no deformable y la fuerza que ejerce sobre las berenjenas es la misma que la del conjunto de los dedos B y C y la ventosa. Este dedo puede rotar respecto de un eje vertical, pero con formas muy dispares el dedo puede no acoplarse bien incrementando la presión en zonas concretas que pueden ser el origen de daños. Los parámetros correspondientes a las señales de los acelerómetros del eje Y no aportan mejora significativa a la estimación de la dureza del producto.

5.3.2. Segundo caso: garra con jamming

Dos son las principales mejoras incorporadas en este nuevo prototipo de garra. La garra empleada en el caso anterior llega a dañar una de las berenjenas. Para evitar ese daño se emplea un nuevo dedo A con una almohadilla con control de dureza (Figura 5.6). En esta nueva versión de la garra se incorporan mejoras en el procesado de las señales incrementando con ello el número de parámetros que se pueden usar para determinar la firmeza de las berenjenas.

El dedo A es capaz de adaptarse a las formas irregulares de las berenjenas durante el primer contacto contra esta y copiar su forma rigidizándose tras entrar en funcionamiento la ventosa para posteriormente determinar la dureza de las berenjenas durante el bucle de toma de datos. Como en el caso anterior el dedo A y el conjunto de los dedos B y C junto con la ventosa pueden rotar alrededor del vástago del cilindro neumático que los impulsa. Los dedos B y C siguen pudiendo rotar respecto de un eje vertical. La almohadilla de la zona de contacto del dedo A está recubierta de una membrana de látex en cuyo interior se encuentran hacinadas semillas de cilantro (valores de diámetro medio 3mm, densidad 783 Kg/m³, coeficiente de rozamientos sobre una chapa galvanizada de hierro 0,44). En este caso se incorporó un generador de

vacío con control de impulsión (Festo Ref.: VN-07-H-T3-PQ2-VQ2-RO1-B). El vacío se ajustó para controlar la dureza deseada de la almohadilla del dedo A. El esquema de los dispositivos neumáticos para el control de esta garra y sus acciones sobre esta se muestran en la Figura 5.7.

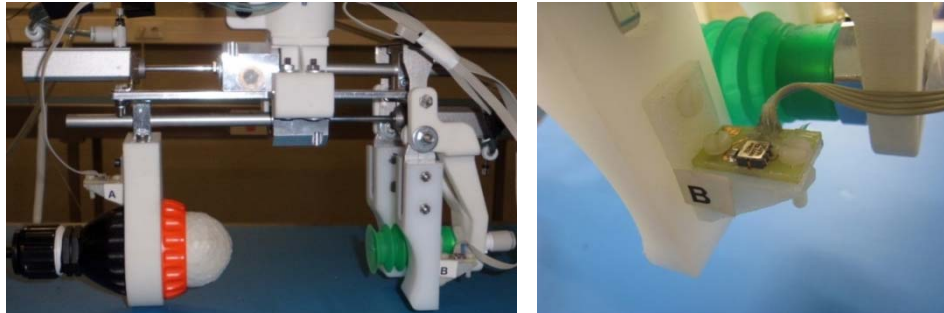


Figura 5.6. (Izquierda) Modelo de garra empleado para clasificar por firmeza berenjenas. El dedo A que puede controlar su dureza durante el proceso. (Derecha) Detalle del acelerómetro empleado en el dedo B.

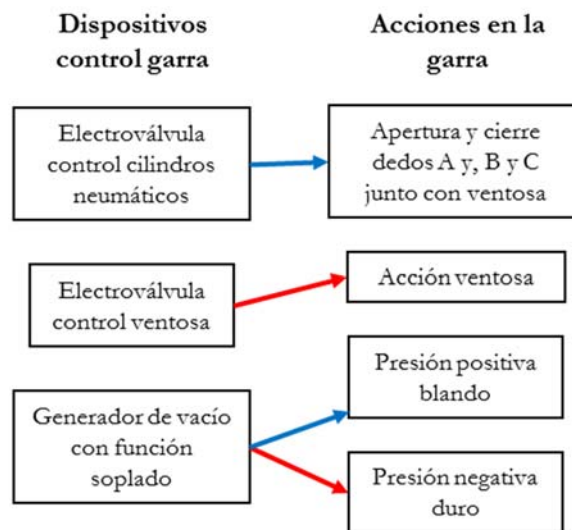


Figura 5.7. Esquema de dispositivos de control de la garra con las conexiones neumáticas empleadas. Presión positiva en azul y negativa en rojo.

En este caso el robot debe controlar la dureza del dedo A por medio de dos salidas digitales que controlan el generador de vacío. El proceso seguido con las berenjenas es muy parecido al del caso anterior. El robot controla paso a paso todos los movimientos y dispositivos de la garra. Antes de agarrar la berenjena desde la cinta transportadora

durante 0,03 segundos se abre la electroválvula para soplar dentro de la almohadilla del dedo A. La membrana de látex se infla levemente, las semillas del interior de la membrana se encuentran sueltas con un comportamiento cuasi de un fluido o sólido con escasa rigidez. Tras ese impulso se libera la señal y el aire sale lentamente. Durante ese periodo de tiempo se envía la señal de cerrar la garra y al cerrarse el dedo A sobre las berenjenas su membrana se deforma durante el contacto adaptándose a su forma. Los dedos B y C pueden rotar libremente respecto a su eje vertical adaptándose también a la forma de las berenjenas. Los acelerómetros se encuentran entonces en posición perpendicular a la berenjena. Tras 0,17 segundos se envía la señal de vacío o presión negativa y la superficie de látex del dedo A se rigidiza. El robot mueve el conjunto garra y berenjena activando la ventosa. La garra abre y cierra cinco veces seguidas produciendo pequeños impactos sobre la berenjena mientras esta no está en contacto con la cinta transportadora. Como en el caso anterior, durante este periodo la berenjena no se cae debido a la acción de la ventosa y permanece en contacto contra los dedos B y C. En este bucle se envía la señal de apertura durante 0,06 segundos para volver a cerrar y esperar 0,96 segundos. El ciclo completo del proceso se muestra en la Tabla 5.3 necesitando 9,5 segundos para cada berenjena.

Tabla 5.3. Conjunto de operaciones que realiza el robot en cada berenjena y el tiempo empleado.

Operativa Robot	Tiempo (s)
Bajar garra a ataque	0.93
Soplado	0.03
Cerrar garra	0.17
Estabilización	0.13
Espera	1
Vuelta a posición	0.7
Estabilización	
Espera (comienzo bucle)	0.4
Abrir garra	0.06
Cerrar garra	0.06
Estabilización	0.133
Espera	0.767
(Fin de bucle)	(5 veces)
Ir a dejada	
Bajar a punto dejada	0.7
Espera	0.2
Abrir garra	0.13
Tiempo total	9.53

La Figura 5.8 muestra un ejemplo de la evolución de la señal en el acelerómetro A en dirección X. Para este caso la garra, con los ajustes empleados para una correcta

manipulación, es más lenta necesitando más tiempo para el cierre del dedo A. Esto es debido en gran medida a su mayor peso. Es necesario ajustar los valores t_0 y t_1 para recoger la fase 2 del periodo de agarre. Empleando el mismo procesamiento de la línea de la pendiente tras el primer contacto en la Figura 5.8 (b) el ajuste a la pendiente real discrepa debido a una mayor lentitud del proceso de la garra. En este caso para calcular la pendiente de la recta tras el contacto una solución de compromiso encontrada tras diversos ensayos es emplear los puntos de aceleración que están entre el tiempo máximo menos 1,8 ms y tiempo máximo menos 1ms. Este ajuste no es necesario para poder calcular la pendiente máxima representada en la Figura 5.8 (c). Para calcularla se usa el valor máximo de deceleración alcanzado como referencia con un margen por encima y por debajo de tal forma que se recoja correctamente el periodo entre la máxima deceleración y el inicio del contacto. El cálculo de la pendiente media tampoco está afectado por este ajuste ya que es estimado según el área absoluta de la función de la Figura 5.8 (c).

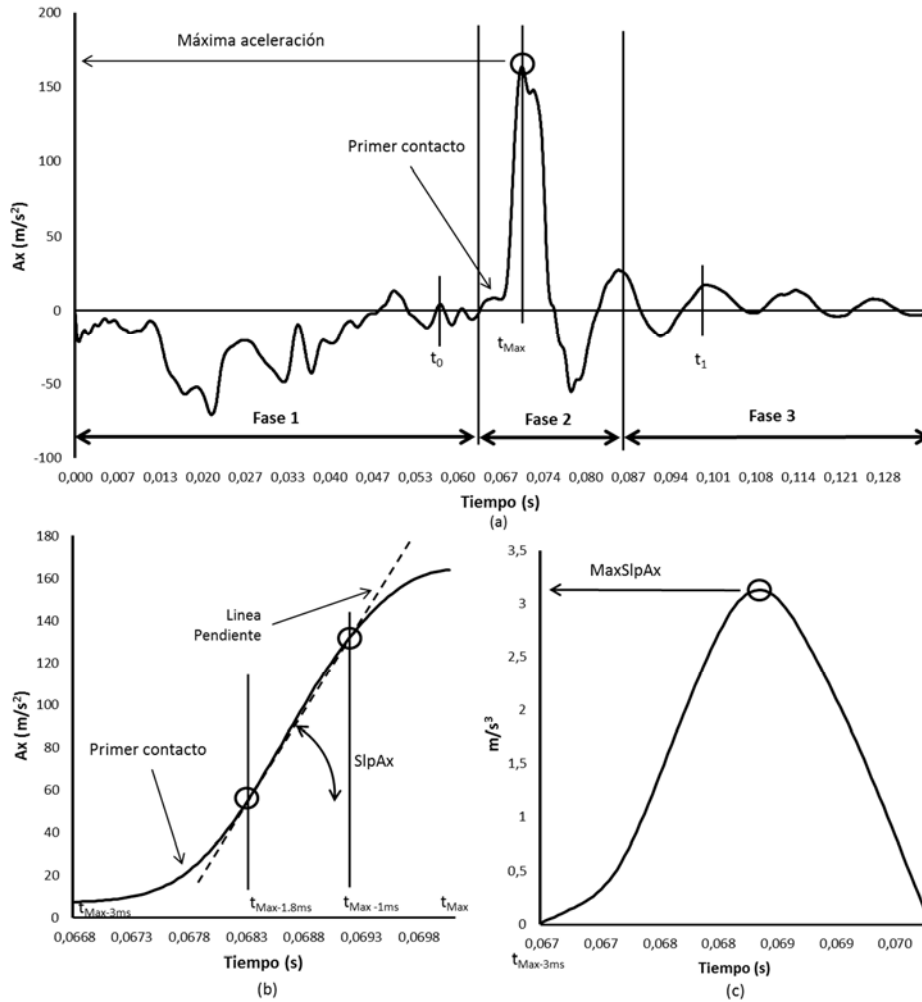


Figura 5.8. (a) Señal acelerómetro A dirección X para la garra con dispositivo de control de dureza de la almohadilla del dedo A, (b) zona de primer contacto contra la berenjena, y (c) derivada de la función (b) y la máxima pendiente alcanzada.

En la Figura 5.9 se observa la diferencia que hay en las señales de deceleración del acelerómetro C en dirección X entre dos berenjenas que muestran valores muy blandos y muy duros según el ensayo destructivo de fuerza deformación. Lo más destacable es la diferencia entre los valores de los picos máximos y la disparidad entre las pendientes de las rectas tras el primer contacto (Figura 5.9 (b)). Ante ambos extremos para emplear como referencia el valor máximo para calcular los dos puntos de la pendiente

tras el contacto es mejor usar los tiempos de referencia de los valores de los productos duros ya que si se emplean los tiempos óptimos de la referencia de los productos blandos la pendiente de los productos más duros será notablemente menor. En la Figura 5.9 (c) se observa que los valores máximos de pendiente no están influenciados por este efecto y el área que abarca es notablemente distinta.

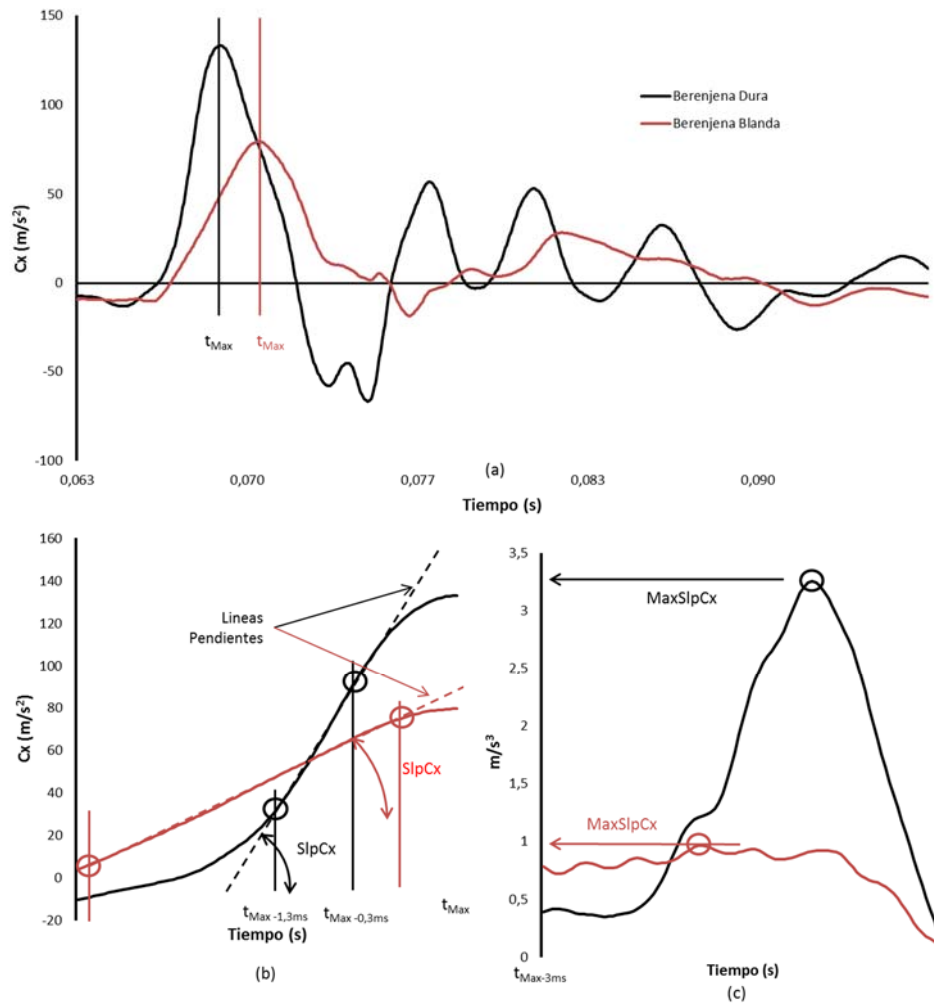


Figura 5.9. Comparativa de la respuesta entre una berenjena blanda y otra dura para el acelerómetro C en la dirección X.

Tanto en la Figura 5.5 (a) como en la Figura 5.8 (a) existen dos picos de aceleración que están contiguos. Empleando este método si el segundo pico es mayor que el primero la referencia del pico máximo que se usa para calcular los distintos parámetros procedentes de la pendiente tras el contacto genera valores incorrectos no representativos de la mayor o menor firmeza de los productos. Un método para evitar esto es suavizar la señal hasta encontrar un único pico que evite esta situación. El proceso de suavizado se realiza con la función de LabVIEW *Filtering type\Smoothing\Moving average\Triangular Half-width 40*.

Para estimar la severidad de la deceleración tras el agarre de las berenjenas tres son los parámetros que se emplean:

- El primer método calcula los valores de la pendiente como la pendiente de la línea que pasa desde el valor del tiempo máximo menos 1,3 milisegundos y tiempo máximo menos 0,3 milisegundos. Estos tiempos se ajustan con los modelos de berenjenas más duras. Los parámetros obtenidos son SlpAx, SlpBx y SlpCx.
- El segundo método calcula la máxima pendiente encontrada. Para ello deriva la función comprendida entre los valores que están en torno al valor de la máxima deceleración y el valor de la máxima deceleración menos 3 milisegundos. En esa función busca el valor máximo encontrado en cada uno de los acelerómetros. Con este método se consiguen MaxSlpAx, MaxSlpBx y MaxSlpCx.
- El tercer método calcula el área en términos absolutos de la función empleada en el segundo método. Esto proporciona los valores medios de deceleración logrando AvgSlpAx, AvgSlpBx, y AvgSlpCx.

Para estimar la firmeza usada como referencia de las berenjenas se emplea el mismo método que en el caso anterior con ensayo de punción en el laboratorio.

5.3.3. Resultados y discusión

Los datos analizados del conjunto de las berenjenas muestran una amplia variación de parámetros físicos Tabla 5.4. En este caso la garra no genera daño en ninguna de las berenjenas. La mejora con el sistema de control de rigidez del dedo A ayuda a evitar daños en los productos.

Tabla 5.4. Parámetros físico-mecánicos extraídos de las 234 berenjenas ensayadas.

	Peso (g)	Longitud (mm)	Diámetro ecuatorial (mm)	Máxima fuerza en punción (N)	Compresión F/d (N/mm)
Media	280,3	185,27	71,2	11,7	2,45
Mínimo	160,7	132,0	59,8	8,49	0,87
Máximo	393,4	244,0	84,6	18,25	4,93
Desviación estándar	37,7	21,95	4,7	1,83	0,82

Como en casos anteriores los datos, procedentes de la respuesta de los acelerómetros, cuando la berenjena se mantiene en contacto con la cinta transportadora no son capaces de estimar la firmeza y además las señales presentan una amplia variabilidad. En este caso el ruido en las señales proviene de las fuerzas de rozamiento entre la berenjena, cinta y dedos de la garra; de la posición y orientación relativa entre la garra y la berenjena; de las dimensiones de la berenjena y de la necesidad de acomodación de los dedos a la forma de la berenjena que manipula. Estos efectos no se manifiestan en el bucle de impactos empleado para medir la firmeza. En el bucle los dedos de la garra se abren durante 0,06 segundos no llegando al tope de apertura. La distancia de la apertura de los dedos es la misma independientemente de la dimensión de la berenjena. Durante la fase de cierre los dedos cierran desde la misma distancia relativa de la berenjena que se manipula. La energía que adquieren los dedos en los golpes que realiza en el bucle es la misma e independiente del tamaño de la berenjena.

No se encuentra relación entre los parámetros físicos de peso, dimensión y diámetro con las medidas conseguidas por los acelerómetros. Tampoco se encuentra relación entre la máxima fuerza en punción y los parámetros conseguidos de los acelerómetros.

Los parámetros del acelerómetro A son los que logran mayor repetitividad en comparación con los datos de B y C. También los parámetros extraídos de A son los que mejores resultados consiguen. Esto hace indicar que al aumentar la capacidad de adaptación de los dedos mejora la capacidad de los acelerómetros para predecir la firmeza de las berenjenas. El parámetro que mejor se adecua a la medida de la firmeza del test de compresión fuerza deformación es V_{Ax} ($r=0.79$, $p<0,001$, 99%).

Para correlacionar los parámetros extraídos de los acelerómetros con la compresión fuerza deformación se emplea una regresión lineal múltiple. El coeficiente de determinación conseguido con el estudio del primer impacto del bucle explica peor la

variabilidad del test destructivo que los otros impactos. Los valores de R^2 ajustados fueron de 69,7 en el primer impacto frente a 76,5 75,3 76,8 y 76,2 en los segundo, tercero, cuarto y quinto impacto respectivamente. El valor medio de los cinco impactos es de 74,1. Empleando solo dos impactos y procesando la información del segundo impacto se puede conseguir la mejor estimación de la firmeza sin mejorar los resultados con más impactos. La causa de esto se debe a que durante el primer impacto la membrana de látex se adapta a la forma de la berenjena y se crean tensiones residuales cortantes superficiales entre el producto y la membrana. La garra necesita una fuerza extra para liberar estas tensiones en la primera apertura de los dedos afectando a las deceleraciones alcanzadas en el primer cierre del bucle.

Para construir y validar la predicción de la firmeza procedente de los acelerómetros se realiza un modelo de regresión de mínimos cuadrados parciales (PLS) de las 234 berenjenas empleadas con una muestra aleatoria del 78%. En este caso el modelo se realiza con la información del segundo impacto del bucle. La calibración del modelo se valida empleando el método de validación cruzada dejando uno fuera (LOOCV). Se logra un coeficiente de regresión $r=0,87$ con un error estándar de calibración (SEC) de 0,351 N/mm. Todos los parámetros usados en el modelo PLS muestran una distribución normal según los valores estandarizados de la Kurtosis. Empleando el modelo creado para estimar la firmeza del 22% de berenjenas restantes la predicción muestra un coeficiente de determinación $r=0,90$ con un error estándar de predicción (SEP) de 0,3153 N/mm.

Las deceleraciones en dirección Y no mejoran la estimación de la firmeza ya que la superficie de los dedos permanece paralela al producto. Los parámetros que están más correlacionados con la medida destructiva de la firmeza son: V_{Ax} $r=0,79$, Max_{Ax} $r=0,78$, $AvgSlp_{Ax}$ $r=0,7091$ y $MaxSlp_{Ax}$ $r=0,6156$. Con estos cuatro parámetros que proceden del acelerómetro A se realiza un modelo PLS consiguiendo en la calibración un coeficiente de correlación de 0,78 y en la predicción de 0,89. La complejidad de la garra puede verse reducida empleando solo un acelerómetro uniaxial que esté localizado en el dedo A.

Los sensores táctiles son capaces de estimar la firmeza del conjunto de la berenjena, medida como compresión fuerza deformación, mientras agarran la berenjena. El resultado es parecido al de otros estudios de impactadores no destructivos para estimación de la firmeza que emplean la fuerza del impacto y su duración (García-Ramos et al. 2005).

Dado que a partir del segundo impacto los posteriores no consiguen mejorar la estimación de la firmeza el proceso robot se puede optimizar empleando solo dos impactos en el bucle de estimación de la firmeza (Tabla 5.3). Los ensayos se realizaron con movimientos verticales del robot y sin traslaciones que son necesarias en los procesos de coger y colocar. En la Tabla 5.5 se muestran estimaciones de tiempos de un ciclo que recoja, estime la firmeza y deje el producto en otro lugar logrando con ello el tiempo ciclo por berenjena de 1,96 segundos.

Tabla 5.5. Operaciones que realiza el robot en cada berenjena con estimaciones del tiempo para un proceso optimizado.

Operativa Robot	Tiempo (s)
Bajar garra a ataque	0.2
Soplado	0.03
Cerrar garra	0.1
Estabilización	0.133
Espera	
Vuelta a posición	0.2
Estabilización	0.133
Espera (comienzo bucle)	
Abrir garra	0.05
Cerrar garra	0.05
Estabilización	0.133
Espera	
(Fin de bucle)	(2 veces)
Ir a dejada	0.3
Bajar a punto dejada	0.2
Espera	0.1
Abrir garra	0.1
Tiempo total	1.96

Si la garra se emplea sin el bucle de estimación de la firmeza el tiempo ciclo sería de 1,49 segundos. Si el bucle de estimación de la firmeza se realiza durante el movimiento de traslación la estimación de un tiempo optimizado es de 1,66 segundos por berenjena.

5.4. Garra experimental para mango

La fruta del mango es muy apreciada por los consumidores y de gran valor añadido. Es la quinta fruta en consumo global y la tercera de las frutas tropicales tras el plátano y la piña. El cultivo del mango en España está creciendo de modo significativo debido a su buena adaptación climática, la ausencia de plagas y el crecimiento del mercado interno. Por lo tanto, todas las predicciones futuras apuntan a un aumento en la expansión del mercado de mango, para así ampliar sus áreas de cultivo, producciones y mercados.

Los mangos son climatéricos y su estado de madurez evoluciona rápidamente después de cosecharlo. La firmeza de los mangos está considerada como un indicador fiable de su madurez tanto en las etapas de cosecha como durante la manipulación comercial. Los datos de firmeza son una herramienta importante para los productores, importadores, minoristas y consumidores (Padda et al. 2011)). La firmeza se puede medir manualmente por una persona entrenada con penetrómetros manuales, pero esta

técnica muestra desventajas en términos de baja repetibilidad, subjetividad, y está limitada a ciertas etapas de la madurez (Padda et al. 2011). El uso de penetrómetros automatizados es otra alternativa para medir la firmeza de la fruta del mango, pero muestra el inconveniente de que es un método destructivo que puede ser aplicado sólo a una muestra de un lote de fruta. Los sistemas no destructivos comerciales para medir la firmeza no proporcionan buenos resultados (Kupferman 2007). El desarrollo de un método no destructivo fiable para evaluar la madurez de mango en las líneas de empaquetado es un importante avance para el éxito de esta industria.

Este estudio describe el desarrollo una pinza neumática, que acoplada a un robot, sea capaz de manipular y comprobar la firmeza de los mangos que manipula. Como en el caso de la berenjena se parte del conocimiento adquirido en anteriores modelos. El modelo inicial busca adaptar la garra de la berenjena a la forma de los mangos evaluando las mejoras necesarias. Posteriores modelos parten de una garra con una base nueva con mayor capacidad de carga. El resultado de la garra finalmente empleada busca no solo la correlación con la firmeza si no con otros parámetros como el contenido en sólidos solubles, pH, acidez, color e índice de madurez.

5.4.1. Adaptación de la garra a los mangos

La garra anteriormente usada con la berenjena se testeó para manipular mangos. A pesar del amplio rango de movimiento paralelo de esta, las mayores variaciones en las dimensiones del mango hacen que sea necesario analizar mangos dentro de un determinado rango de dimensiones.

Los mangos son clasificados según la capacidad de ser agarrados en dos categorías (agarrada y no agarrada). Con una regresión logística se determinan las variables físicas que clasifican los mangos en las dos categorías. Los diámetros ecuatoriales y la longitud, relacionados con el volumen, en lugar de peso, son los parámetros que limitan la capacidad de agarrar. La garra no consigue manipular mangos con diámetros mayores de 86 mm.

Para comprobar el funcionamiento y capacidad de la garra para manipular y clasificar por categorías los mangos se realizó un test con 72 mangos que se clasificaron como duros, blandos y muy blandos. Estos mangos tienen las dimensiones necesarias para ser manipulados por la garra. El primer conjunto de frutos de mango estaba recién cosechado mientras que el segundo y tercer grupo fueron almacenados a 22 ° C y 48% de humedad. Los lotes fueron analizados al cabo de 0, 6 y 12 días. La firmeza se evaluó de forma no-destructiva con la garra y destructivamente con ensayos fuerza deformación en laboratorio.

En la evaluación no destructiva, cada mango se agarra con la garra neumática que tienen los acelerómetros unidos a sus tres dedos (A, B y C). La Figura 5.10 muestra tanto la garra empleada como los dispositivos usados en los ensayos. Los ajustes de la garra respecto al análisis con la berenjena fueron retocados para conseguir manipular correctamente los mangos.

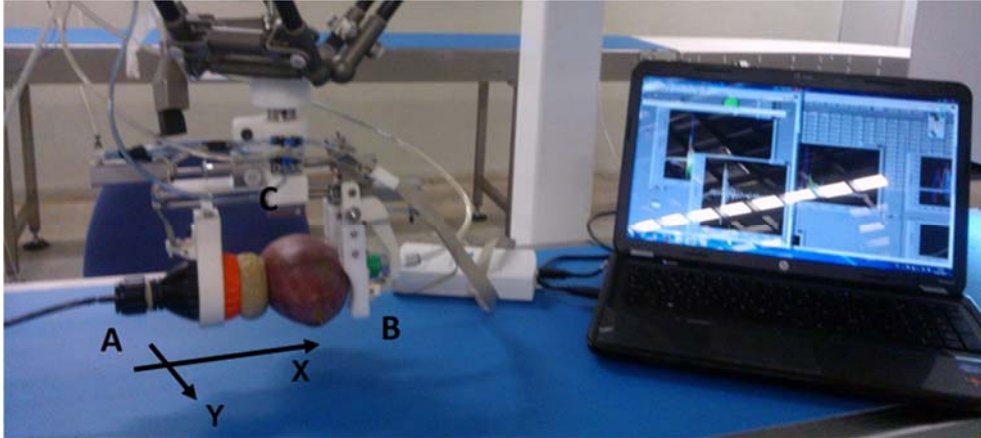


Figura 5.10. Garra neumática con acelerómetros durante la pruebas para la manipulación de mangos.

En la evaluación destructiva de firmeza se utiliza una máquina universal de ensayos (Ibertest) con un dinamómetro digital (Andilog Centor). El rango de dinamómetro de 0 a 500 N con precisión de 0,1%, frecuencia de muestreo 1.000 Hz y resolución 0,025 N. El equipo se utiliza para comprimir la pulpa ecuatorial mango sin piel con una varilla de Magness-Taylor 8 mm de diámetro. Tres son las repeticiones realizadas por fruto. La fuerza máxima promedio se considera como la firmeza destructiva.

Con los frutos de mango que la garra es capaz de agarrar se realiza un análisis discriminante por pasos hacia adelante para determinar qué variables de los acelerómetros proporcionan la mejor discriminación entre las tres categorías de firmeza destructivas. Las variables obtenidas de los acelerómetros son capaces de clasificar los frutos de mango en tres categorías de firmeza destructivas, con un 93,6% de las frutas bien clasificadas, Tabla 5.6 y Figura 5.11. El análisis discriminante por pasos selecciona tres variables que se relacionan significativamente con las tres categorías de firmeza. Los parámetros extraídos de la aceleración en el eje X son los más relacionados con la firmeza.

Tabla 5.6. Análisis discriminante de clasificación de los tres niveles de firmeza según los parámetros no destructivos obtenidos de los acelerómetros de la garra.

Categoría inicial	Categoría Predicha (%)		
	Duro	Blando	Muy blando
Duro	90	10	0
Blando	0	90	1
Muy blando	0	0	11

Porcentaje de mangos bien clasificados 93.6%

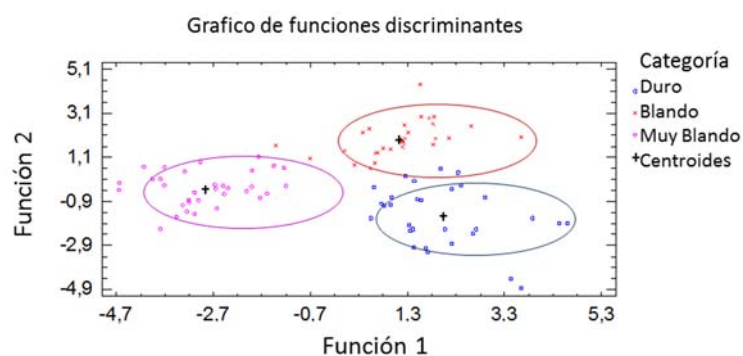


Figura 5.11. Gráfico de la clasificación de los mangos con funciones discriminantes en las tres categorías de firmeza según las variables de la garra.

Los parámetros físicos relacionados con el volumen de los mangos limitan la capacidad de agarre. La garra presenta una falta de adaptación y precisa de una mayor fuerza para conseguir manipular mangos que tengan un diámetro ecuatorial mayor que 0,086 m. La forma de los dedos B y C impide que estos se adapten bien a los mangos. El dedo A es capaz de copiar la forma de los frutos. Las señales de aceleración del eje Y, perpendicular al movimiento de los dedos, no son relevantes. En esta prueba preliminar, con un análisis discriminante por pasos hacia adelante, la garra es capaz de clasificar los mangos en las 3 categorías de firmeza destructivas, con un 93,6% de clasificación correcta.

Con un cambio en el diseño de la forma de los dedos B y C se logra facilitar la adaptación de estos a la forma oval de los mangos. Con estos mejora la capacidad para agarrar los mangos pero la fuerza de cierre y la robustez mecánica de la garra no son adecuadas para productos tan pesados.

5.4.2. Garra diseñada para manipular mangos

Basándose en la necesidad de una nueva garra con mayor capacidad de carga se realiza un nuevo modelo. El objetivo de este nuevo diseño de garra es evaluar la capacidad de estimación de la firmeza de mangos de la variedad "Osteen" y establecer relaciones entre los parámetros no destructivos obtenidos con los acelerómetros incorporados en los dedos de la garra y las propiedades mecánicas, la calidad interna (sólidos solubles, pH y acidez), color de la pulpa y el índice de maduración de la fruta del mango.

Para este diseño de la garra se emplea el mismo concepto que en la anterior, una garra con tres dedos (A, B y C) de movimientos paralelos y ventosas colocadas entre los dedos B y C. En el anterior diseño debido a la rotación de los dedos alrededor del eje del vástago durante los movimientos de traslación del robot el producto puede oscilar dentro de la garra. El nuevo diseño dispone de dos guías lineales que impiden la rotación y solo permiten la traslación lineal de los dedos. Debido al mayor tamaño de los productos se opta por utilizar un cilindro neumático de mayor recorrido (Festo Ref.: DSN-10-80-P). Para absorber las desalineaciones entre el vástago del cilindro y el mecanismo emplea un acople elástico (Festo Ref.: FK-M4). En la anterior garra el punto de agarre del producto no está completamente definido ya que el movimiento de los dedos no está interconectado. Esto genera una indefinición a la hora de conocer la posición exacta de los productos a manipular. En la nueva garra los dedos están unidos mecánicamente para lograr un movimiento de auto-centrado. El producto siempre tiene la misma posición relativa respecto a la garra. El dedo A dispone del mismo sistema *jamming* de adaptación a la forma de los productos.

En los ensayos preliminares de la garra con la configuración original (Figura 5.12) el único cilindro mueve todos los dedos. Los dedos están unidos mecánicamente por medio de barras articuladas. Dada la buena capacidad de adaptación al producto del dedo A con su sistema *jamming* de control de rigidez se realizan dos diseños distintos para los dedos B y C. Ambos se muestran en la Figura 5.12. En el diseño con dedos rígidos (dedo B Figura 5.12) estos disponen de una forma esférica cóncava y para lograr una mayor adaptación a la forma de los mangos durante el agarre. Estos dedos se unen a la garra por medio de rótulas semiesféricas. Este diseño permite que los dedos B y C puedan girar libremente según los tres posibles giros disponibles. En el diseño con dedos con control de rigidez (dedo C Figura 5.12) se emplea el mismo sistema que el usado con el dedo A con el cambio de que estos dedos también pueden girar libremente respecto a su eje vertical.

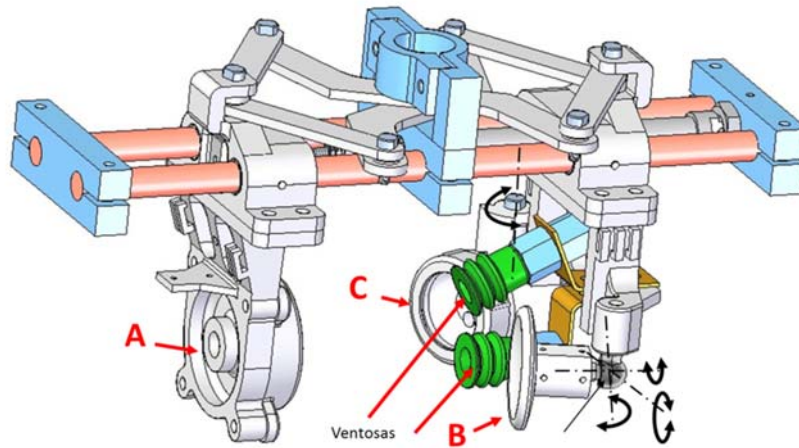


Figura 5.12. Fichero inicial del modelo CAD de la garra para la manipulación de mangos con las distintas variantes de dedos B y C empleadas. En negro se muestra los grados libertad no definidos de los dedos.

En la garra con la configuración de los tres dedos con sistema de control de rigidez (Figura 5.13) se emplea un único dispositivo que controla la rigidez de estos. En ensayos preliminares esta configuración de la garra presenta dificultades a la hora de lograr una correcta manipulación de los productos. La mayor limitación es conseguir un adecuado funcionamiento de todos los sistemas de control de rigidez. Al cambiar ligeramente la posición de los dedos B y C el funcionamiento de estos con las ventosas no es el deseado. Además, la rigidez añadida del sistema de alimentación neumático a estos dedos limita el giro de estos no logrando la mejora buscada en la adaptación al producto.



Figura 5.13. Garra para mango con tres dedos con sistema de control de rigidez. A la izquierda abierta a la derecha cerrada.

La capacidad de adaptación de los dedos B y C cuando están unidos por rotulas semiesféricas es más satisfactoria no encontrándose problemas para el trabajo conjunto de los dedos y ventosas. En el diseño original se emplean dos ventosas (Figura 5.12) ya que en el diseño anterior la ventosa no tenía la suficiente fuerza como para retener el producto. Una de las ventosas esta horizontal y la otra ligeramente inclinada. En los ensayos preliminares se encuentran dificultades para que las dos ventosas siempre se adapten a los mangos y trabajen de forma correcta. Con el trabajo en conjunto de las dos en muchos casos se producen fugas en el cierre de alguna de ellas. El mejor resultado se consigue con una sola ventosa ligeramente inclinada que ayuda a sostener verticalmente los mangos mientras se mantienen en contacto con los dedos B y C.

El mecanismo de movimiento conjunto de los dedos de la garra para que cierren de forma concéntrica genera ruido en las señales de los acelerómetros. La señal se ve claramente influenciada por la dinámica del mecanismo. El cilindro neumático empuja directamente el dedo A y las barras articuladas transmiten el movimiento a los dedos B y C. Cuando el dedo A comienza a moverse las barras van transmitiendo el movimiento hasta los dedos B y C creando ruido en los acelerómetros en forma de rebotes. La dinámica de este mecanismo afecta a las señales de desaceleración debido a la influencia de los esfuerzos inerciales de las barras articuladas y la flexión de estas durante el proceso. Este ruido al añadirse a la señal dificulta notablemente la obtención de los parámetros empleados para estimar la firmeza. La señal se hace tan difusa que no se puede determinar con precisión cuando se produce el contacto de los dedos con el mango cuando se está realizando el bucle de apertura-cierre. Además, las deceleraciones máximas tras el contacto están atenuadas por tener la garra una mayor inercia y holguras en el mecanismo. Los acelerómetros recogen tanto la información del impacto de los dedos sobre el producto como ruido procedente de la dinámica de los mecanismos de transmisión de la garra. Con esta configuración es difícil distinguir cuando los mangos son más o menos firmes. En el anterior diseño uno de los

actuadores mueve los dedos B y C junto con la ventosa y el producto. Si el producto incrementa significativamente su peso el movimiento del conjunto durante el bucle de control será menor y esto puede afectar al resultado final de los acelerómetros. Un menor movimiento puede influir en la respuesta de los impactos ya que si los dedos no llegan a la misma velocidad, la energía disponible en estos durante los impactos será menor afectando a la capacidad de estimación de los acelerómetros. Para evitar ambos problemas, la contaminación de las señales por la dinámica del mecanismo y asegurar la misma energía disponible durante los impactos, se independizan los movimientos de los dedos. Los dedos B y C junto con la ventosa se fijan al chasis de la garra y el cilindro solo mueve el dedo A. Esta configuración (Figura 5.14) mejora notablemente la calidad de las señales permitiendo con mayor facilidad identificar las distintas fases del agarre. También se bajan los dedos B y C para aproximarlos a la cinta transportadora y mejorar el funcionamiento conjunto con la ventosa. Se emplea un tubo más flexible para el control del sistema de rigidez del dedo A que permite una mayor libertad de movimientos al dedo.

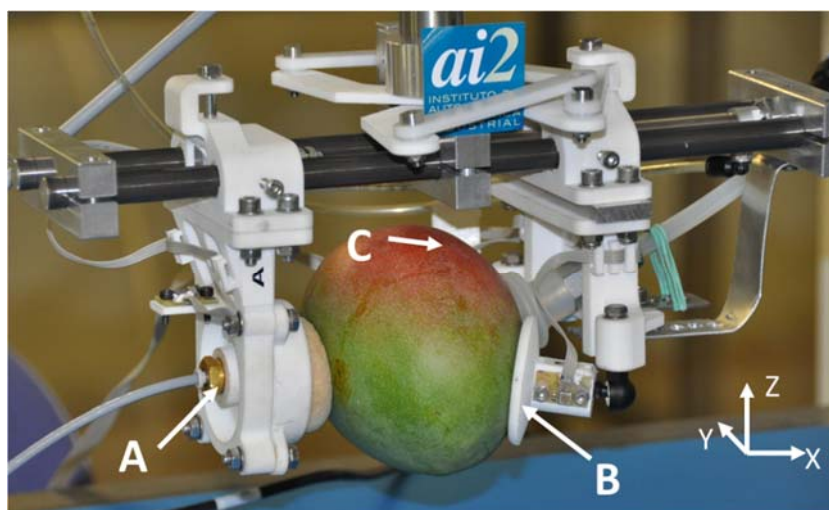


Figura 5.14. Modelo de garra empleado para determinar de forma no destructiva las características fisicoquímicas de los mangos.

5.4.2.1 Procedimiento experimental

Un lote de 350 mangos (variedad 'Osteen') cosechados manualmente en Málaga se seleccionan en base a un tamaño y color uniforme y libre de manchas o infecciones externas.

Todos los mangos se lavan con una solución de jabón y secan con papel desechable para eliminar completamente el agua de la superficie. Los mangos son numerados

individualmente y se dividen aleatoriamente en 7 grupos de cincuenta mangos (A, B, C, D, E, F y G). Todos los grupos se almacenan durante un día en una cámara fría ($11,9 \pm 0,4$ °C y $84,3 \pm 1,7\%$ de humedad relativa) hasta que las pruebas de agarre comienzan. Los frutos del grupo A se analizan un día después de la recepción y los restantes se almacenan en una cámara a $18,0 \pm 2,1$ °C y $67,6 \pm 3,3\%$ de HR. Cada 2 días, el siguiente grupo se saca de la cámara y se analiza. Todos los mangos son manipulados por la garra robótica. Veinte se utilizan para evaluar las propiedades mecánicas, la composición interna (°brix, pH y acidez) y el color de la pulpa. Los otros treinta se utilizan para evaluar el daño causado por la garra. Estos se mantienen en la cámara de almacenamiento durante dos semanas después de la manipulación con el fin de detectar posibles contusiones.

5.4.2.2 Análisis de propiedades fisicoquímicas

Para evaluar la firmeza y madurez de los mangos, las propiedades mecánicas, la composición interna, y el color de la pulpa se analiza. Todos estos análisis se llevan a cabo inmediatamente después de las mediciones con la garra. Se evalúan un total de 140 muestras (20 mangos por grupo).

Las propiedades mecánicas se analizan con un ensayo de perforación con una máquina de ensayo universal (TextureAnalyser-XT2, Stable MicroSystems). La prueba se realiza tres veces en cada mango con un punzón de 6 mm de diámetro a una deformación relativa de 30% a una velocidad de 1 mm/s. Se analizan diferentes parámetros en todas las muestras. La fuerza de fractura (FF) expresada por la fuerza máxima aplicada para romper la muestra (N), la deformación del fruto (DF) expresado por la deformación hasta el punto de fractura (mm) y la firmeza mecánica (FS) expresada por la pendiente de la curva fuerza deformación real hasta el punto de fractura (N/mm).

La composición interna se analiza a través de los sólidos solubles totales (SST), el pH y la acidez (TA). Contenido de SST es determinado por refractometría (°Brix) con un refractómetro digital (RFM330 +) a 20 ° C y con sensibilidad de $\pm 0,1$ °Brix. El dato de TA se realiza con un análisis volumétrico en un valorador automático (CRISON, pH-bureta 24) con NaOH 0,5 N hasta un pH de 8,1 (UNE34211: 1981) usando 15 g de mango triturado y diluyéndolo en 60 ml de agua destilada. El color de la pulpa se mide usando un espectrocolorímetro MINOLTACM-700d y se calcula un índice de maduración (RPI) (Velez-Rivera et al. 2014).

5.4.2.3 Operativa del robot

La operativa que sigue el robot, los dispositivos de control de la garra, los dispositivos de la garra, los sistemas de captura y el procesado están representados en la Figura 5.15. Esta operativa es muy parecida a la empleada en anteriores ocasiones. Previamente al análisis físico-químico, los mangos son colocados manualmente sobre una cuna donde la garra los recoge. El robot baja hasta el punto de agarre. Por 0,03

segundos la almohadilla del dedo A se infla asegurando un comportamiento blando antes del agarre. La garra cierra el dedo A. La almohadilla del dedo A esta blanda y se adapta a la forma de mango durante su contacto contra el mango. En el primer contacto los dedos B y C giran hasta orientarse paralelamente al mango que manipula y los acelerómetros permanecen así orientados perpendicularmente a los mangos. Tras un período de estabilización, la presión negativa cambia el estado de la almohadilla a dura y el vacío activa la ventosa.

Como en la garra de la berenjena se utiliza el estado duro durante los desplazamientos y los impactos para estimar las características de los mangos. El robot mueve la garra con el mango hacia arriba y comienza un bucle de ciclo de cinco rápidos impactos de apertura y cierre, mientras el mango está unido a B y C por la acción de la ventosa. Durante el primer impacto la almohadilla del dedo A vuelve a cambiar de blanda a dura, blanda cuando está abierto y dura tras el cierre cuando está en contacto con el mango.

Los mangos se recogen desde una cuna situada sobre la cinta transportadora así que los dedos se adaptan al mango mientras este está en contacto con la cuna. Cuando la garra está en la posición superior y el mango no está en contacto con la garra se pueden producir pequeños movimientos entre el mango y los dedos B y C. Este proceso asegura que las superficies de los dedos están duras y paralelas a la superficie del mango durante el bucle de caracterización de los mangos. Durante este bucle las señales de desaceleración se recogen y registran en un ordenador.

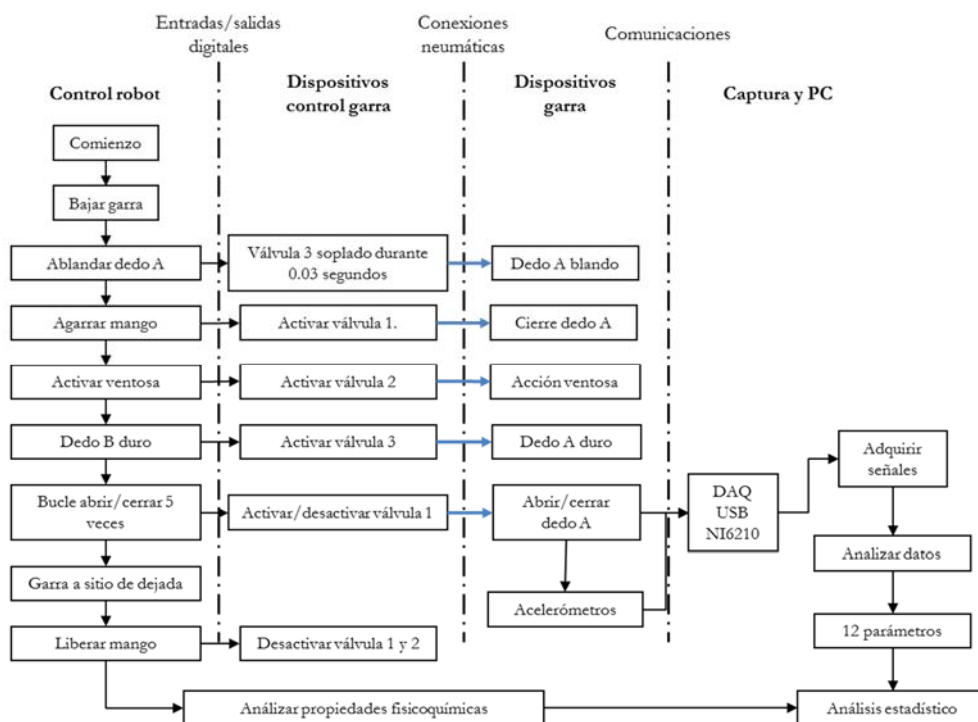


Figura 5.15. Esquema de la operativa de funcionamiento de la garra para mangos y sus sistemas periféricos.

Para verificar que la garra no daña los mangos se analizan un total de 210 muestras (7 grupos, de la A a la G, de 30 mangos) con el fin de evaluar los posibles daños en el mango causados por la garra durante la manipulación. Las muestras son evaluadas visualmente todos los días durante el período de dos semanas de almacenamiento usando una lupa. Después de un periodo de dos semanas de almacenamiento, se evalúa también la parte interna de cada fruta.

5.4.1. Procesado de las señales de los acelerómetros

Se emplea el mismo módulo de adquisición de datos USB NI-6210 y de acelerómetros ADXL278 que en el caso anterior. Las señales se muestrean igualmente 8KS a 30 KHz, con filtro de paso bajo de 1500 Hz. El programa de LabVIEW que procesa las señales está modificado para conseguir los 24 parámetros que se detallan a continuación. Las señales son cortadas para analizar sólo el período de tiempo en que los dedos están impactando contra el mango (Figura 5.16). Con esta función se calculan los parámetros V_{Ax} , V_{Bx} y V_{Cx} provenientes de la ecuación (5.3) y los valores máximos tras el contacto $Max A$, $Max B$ y $Max C$.

$$VAx = \int_{t_0}^{t_1} Ax^2 dt ; VBx = \int_{t_0}^{t_1} Bx^2 dt ; VC = \int_{t_0}^{t_1} Cx^2 dt \quad (5.3).$$

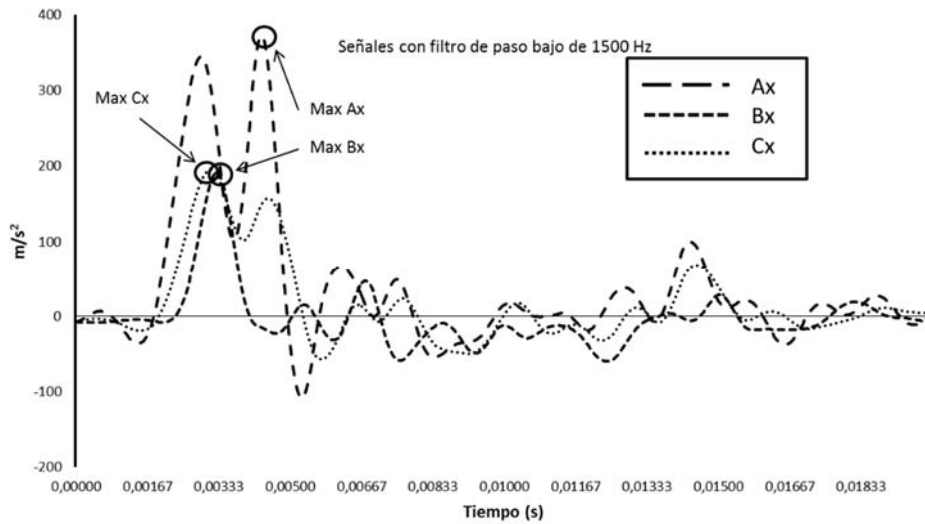


Figura 5.16. Señales de deceleración tras agarrar un mango con la garra.

En este ejemplo, la desaceleración de todos los dedos Ax, Bx y Cx tienen dos picos debido a los rebotes durante el impacto. El segundo pico de deceleración del dedo A es mayor que el primero. Si se usa esta señal para calcular la pendiente de la desaceleración tras el contacto los resultados no son significativos y alteran la realidad del resultado final al tratar de calcular la severidad de la deceleración. A fin de mejorar esta situación, las señales se suavizan (Figura 5.17) para conseguir un único pico siguiendo el mismo filtro que en casos anteriores (LabVIEW *Filtering type\Smoothing\Moving average\Triangular Half-width 40*). Con esta función se calculan los parámetros VAx2, VBx2 y VCx2 provenientes de la ecuación (5.3) y los valores máximos tras el contacto Max Ax2, Max Bx2 y Max Cx2 (Figura 5.17).

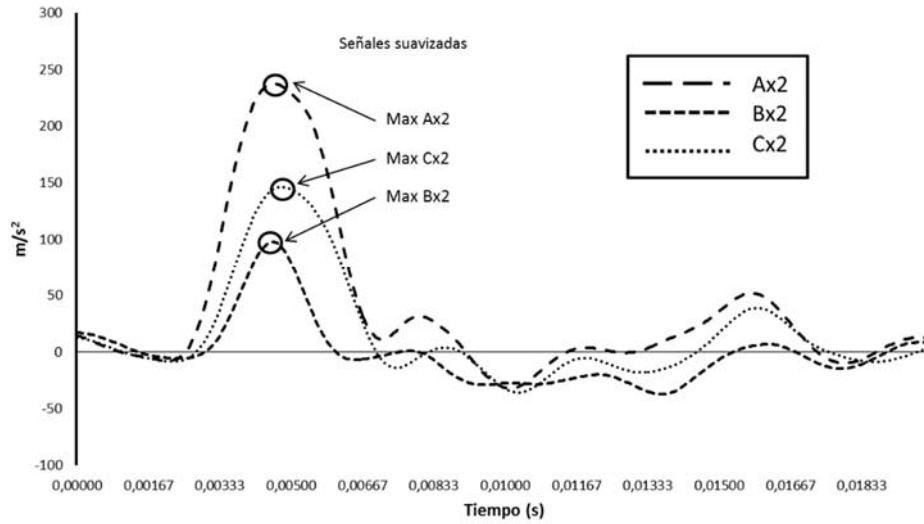


Figura 5.17. Señales suavizadas de deceleración con un único pico en torno a los valores máximos.

Estas señales suavizadas logran un único pico y se emplean para calcular la pendiente de la desaceleración desde el máximo valor hasta 80 muestras anteriores (Figura 5.18). Con esta función se calculan los parámetros correspondientes a las pendientes Slp Ax, Slp Bx, Slp Cx y aplicando la ecuación (5.3) se consiguen los parámetros VAx3, VBx3 y VCx3.

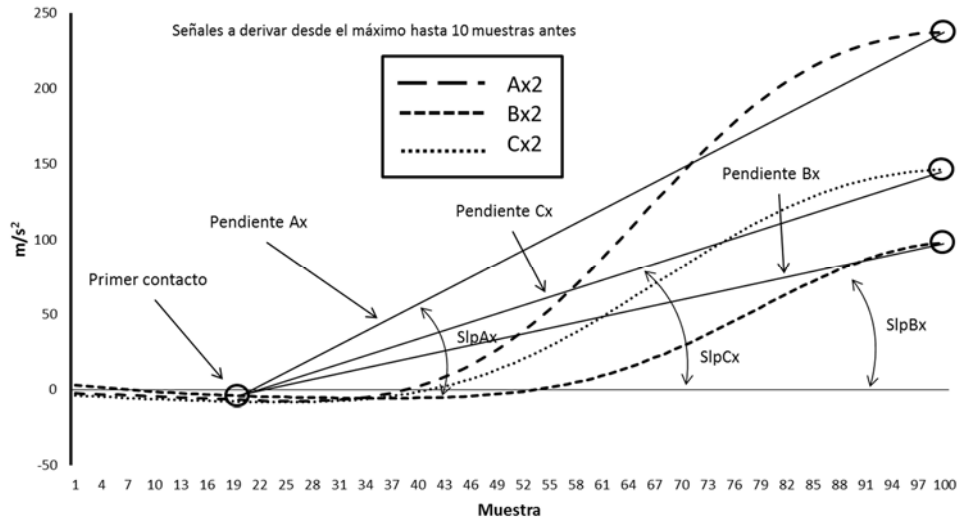


Figura 5.18. Pendientes de la recta desde la máxima desaceleración hasta 80 muestras antes del valor máximo alcanzado.

Como en los casos anteriores con el uso de estas señales de deceleración es difícil definir, con un algoritmo robusto, el punto exacto del primer contacto entre el mango y el dedo. Esto puede introducir errores en el cálculo de la pendiente. Una solución es emplear la función derivada de las desaceleraciones (Figura 5.19) que representa la variación en el tiempo de la pendiente o del cambio de la deceleración durante el contacto. En estas señales es fácil calcular los valores máximos de las pendientes y estimar el valor medio con la integración del área de dichas señales. Estas señales permiten extraer los parámetros de máximas pendientes alcanzadas $MaxSlpAx$, $MaxSlpBx$ y $MaxSlpCx$ así como aplicando la ecuación (5.3) se consigue calcular un valor medio de pendientes $AvgSlpAx$, $AvgSlpBx$ y $AvgSlpCx$.

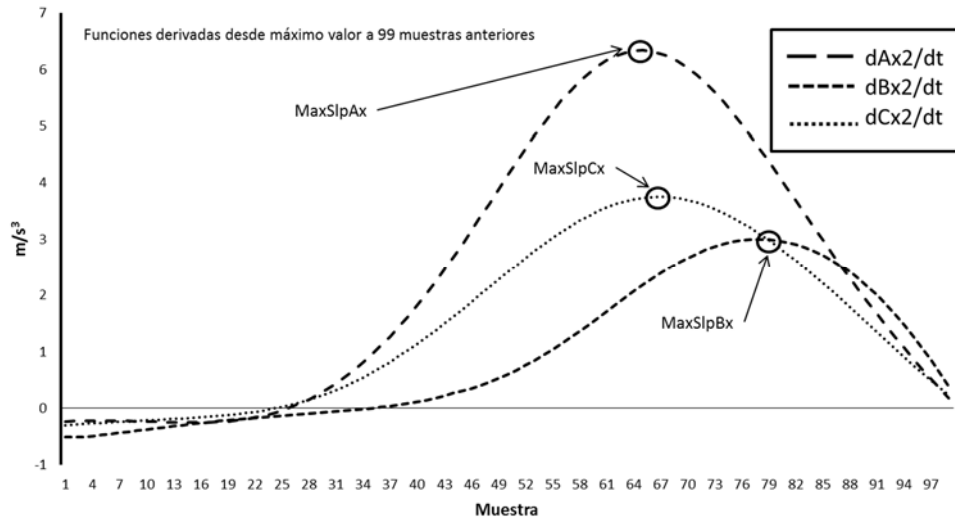


Figura 5.19. Derivadas de las desaceleraciones durante el primer contacto del mango con los dedos.

La Figura 5.20 (a) es un ejemplo de las señales de deceleración del acelerómetro Ax centradas respecto al máximo valor encontrado y con mangos en distintos estados de maduración. Observando las señales se aprecian varios picos de deceleración, así como valores máximos menores al incrementarse el estado de maduración. Con estas señales no se puede distinguir por medio de la pendiente tras el contacto cuál es el estado de maduración. Al suavizar las señales (Figura 5.20 (b)) se aprecia claramente cómo evolucionan las señales con la madurez. A pesar de que en este ejemplo con las señales suavizadas no siempre hay diferencias en la madurez, al emplear los valores máximos en las señales originales es posible distinguir entre los distintos estados de madurez.

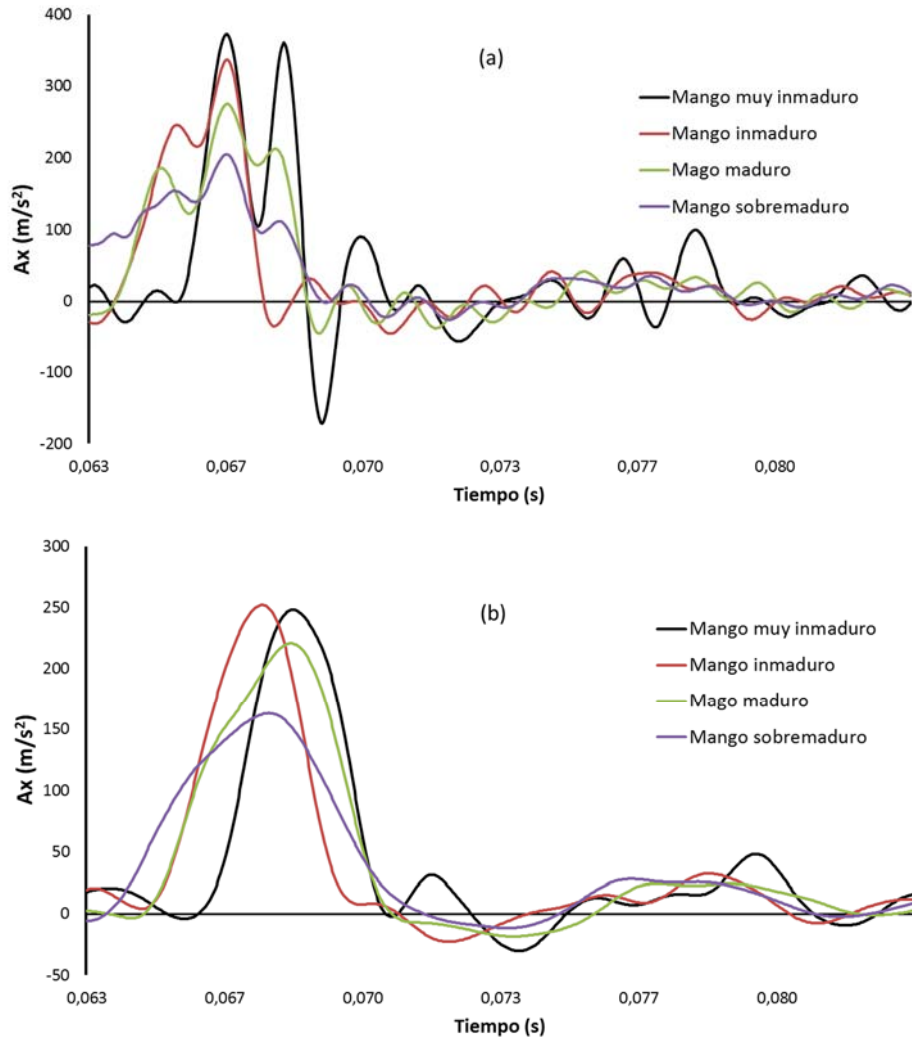


Figura 5.20. Señales del acelerómetro Ax con mangos en distintos estados de madurez. (a) Señales originales extraídas, (b) señales tras un suavizado.

En la Figura 5.21 se muestra el detalle de la deceleración del dedo Ax tras el contacto con las señales tras el suavizado y la derivada de esta. Estas señales están centradas respecto a los valores máximos encontrados. En estas señales se observa el cambio de la pendiente con el estado de madurez si bien la pendiente varía de forma considerable en función de los puntos que se elijan para calcularla. Con la derivada de estas funciones se logra conocer como varía la pendiente a lo largo de las señales. En este

caso se aprecia claramente como varían los valores máximos de pendiente con los distintos niveles de madurez. También es posible anotar una variación en el área de las funciones derivadas que evalúa los valores medios de pendiente encontrados.

De todos los 24 parámetros que se extraen de las señales se seleccionan 12 (V_{Ax} , V_{Bx} , V_{Cx} , $MaxAx$, $MaxBx$, $MaxCx$, $MaxSlpAx$, $MaxSlpBx$, $MaxSlpCx$, $AvgSlpAx$, $AvgSlpBx$ y $AvgSlpCx$) por su mayor repetitividad.

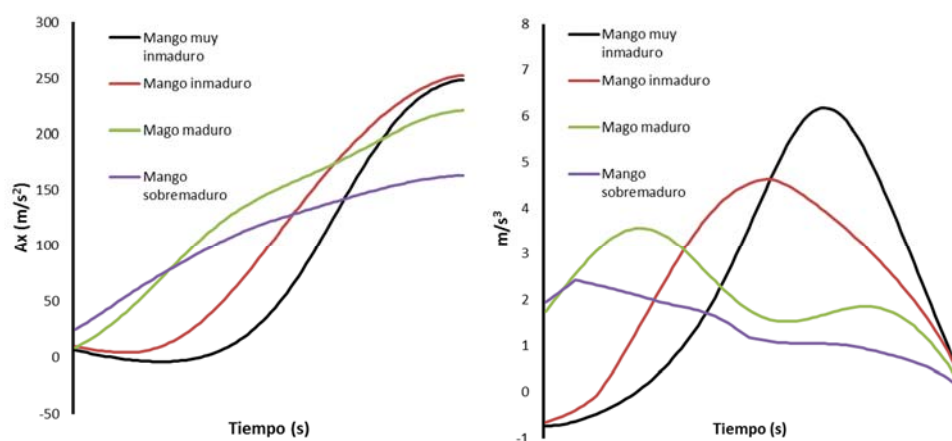


Figura 5.21. A la izquierda las señales suavizadas en la zona del contacto inicial y a la derecha la derivada de estas señales.

5.4.1.1 Análisis de las propiedades fisicoquímicas

Se analizan diez parámetros fisicoquímicos; fuerza de fractura (FF), deformación de la fruta (DF), firmeza mecánica (DF), sólidos solubles totales (SST), pH, acidez (TA), luminosidad de la pulpa (L^*), tonalidad de la pulpa (C^*), croma de la pulpa (H^*) y el índice de maduración (RPI).

Se realiza un análisis de la varianza (ANOVA) para determinar diferencias significativas en los parámetros fisicoquímicos y los de la garra utilizando el software Statgraphics Plus.

5.4.1.2 Análisis de datos multivariante

Los parámetros extraídos proporcionadas por la pinza del robot (V_{Ax} , V_{Bx} , V_{Cx} , $MaxAx$, $MaxBx$, $MaxCx$, $MaxSlpAx$, $MaxSlpBx$, $MaxSlpCx$, $AvgSlpAx$, $AvgSlpBx$ y $AvgSlpCx$) y los datos obtenidos del análisis fisicoquímico (FF, DF, FS, SST, pH, TA, L^* , C^* , H^* y RPI) se disponen en una matriz donde las filas representan el número de muestras ($\#N = 140$ muestras) y las columnas representan el número de variables ($\#V = 22$ variables). Las x-variables o predictores son las 12 variables proporcionadas

por la pinza del robot y las y-variables o respuestas son las 10 variables proporcionadas por el análisis fisicoquímico. El conjunto de datos se separa al azar en dos grupos, un grupo de 105 muestras se utiliza como grupo de calibración y el otro grupo compuesto por las muestras restantes (35 mangos) se utiliza para establecer la predicción.

Los datos son procesados por regresión de mínimos cuadrados parciales (PLS) para la construcción de modelos de calibración independientes para cada propiedad fisicoquímica. La técnica del PLS es particularmente útil cuando es necesario prever un conjunto de variables de respuesta de un conjunto de variables predictoras (Abdi 2010). En PLS, la predicción se consigue mediante la transferencia de las variables intercorrelacionadas a un conjunto de factores independientes llamado variables latentes (LVs) que describen la covarianza máxima entre la información de la garra y la variable de respuesta (es decir, firmeza mecánica, sólidos solubles totales, luminosidad de la pulpa o el índice de maduración en nuestro caso). Las LVs de cada modelo PLS no están correlacionadas y llevan toda la información relevante para realizar predicciones más estables. El número de LVs utilizadas en cada modelo se determina con el valor mínimo de la suma de los cuadrados del error residual predicho (PRESS) (Esquerre et al. 2009; Talens et al. 2013). Cuando aumenta el número de factores latentes en el modelo, el valor de PRESS disminuye hasta su valor más bajo correspondiente al número ideal de factores latentes. Los modelos de calibración se construyen estrictamente con el conjunto de datos de calibración y optimizados por validación cruzada interna (*leave-one-out*). El comportamiento de los modelos de calibración desarrollados es validado para predecir los parámetros fisicoquímicos en un conjunto de pruebas independientes.

Antes del análisis PLS, los predictores fueron transformados para realizar sus distribuciones aproximadamente simétricas con el fin de dar a cada variable la misma importancia en el análisis previo. Cada variable se centra restando sus promedios y escala a la unidad de varianza dividiéndolos por su desviación estándar. El centrado se asegura de que todos los resultados sean interpretables en términos de variación alrededor de la media y la escala da todas las x-variables la misma oportunidad de influir en la estimación de la propiedad fisicoquímica.

El rendimiento de los modelos se evalúa utilizando el error estándar de calibración (SEC), el error estándar de la validación cruzada (SECV), el error de raíz cuadrada media de calibración (RMSEC), el error de la raíz cuadrada media de la validación cruzada (RMSECV) y el coeficiente de correlación (r).

El software utilizado para el análisis multivariado es Unscrambler v9.7.

5.4.1.3 Resultados y discusión

En general, el análisis fisicoquímico muestra que los mejores parámetros para evaluar la madurez de mangos "Osteen" son la firmeza, el contenido de sólidos solubles y el color de la pulpa. Estos resultados concuerdan con los otros estudios (Padda et al. 2011), donde describen que los mejores instrumentos para evaluar los cambios en los

mangos durante el proceso de maduración son el penetrómetro, seguido por el color de la pulpa y el contenido total de sólidos solubles. De hecho, estos parámetros se utilizan en los mangos de embalaje líneas para evaluar estado de madurez (Brecht 2010).

La garra es capaz de agarrar el 100% de los mangos de los grupos A al F sin dañar mecánicamente ninguno. En el caso de los mangos muy sobre-maduros del grupo G, la garra dañó el 10% de los frutos. La ventosa de la garra rompe la piel de estos mangos.

La Tabla 5.7 muestra el rango de valores mínimo y máximo, los valores medios y la desviación estándar de los parámetros extraídos por el procesamiento de las señales de los acelerómetros de la garra. Todos los parámetros se miden a lo largo del eje X debido a que no se encuentra una correlación clara entre la dureza de la muestra y la aceleración medida a lo largo del eje Y. El mismo efecto se observa en la anterior garra al manipular berenjenas.

Tabla 5.7. Valores máximos y mínimos, medios y desviación estándar de los 12 parámetros de la garra para estudiar los mangos.

Parámetros	Mínimo valor	Máximo valor	Media	Sdev
VAx (m ² /s ²)	95.76	260.27	173.09	30.52
VBx (m ² /s ²)	14.45	45.49	27.69	6.79
VCx (m ² /s ²)	10.97	87.61	45.10	11.55
Max Ax (m/s ²)	205.36	441.58	330.73	41.34
Max Bx (m/s ²)	74.19	198.41	132.37	26.82
Max Cx (m/s ²)	64.76	236.35	154.72	29.18
MaxSlp Ax	2.12	6.98	4.71	1.03
MaxSlp Bx	1.00	3.38	2.22	0.45
MaxSlp Cx	-0.24	3.86	2.50	0.76
AvgSlop Ax	1.15	2.98	2.34	0.31
AvgSlop Bx	0.30	1.14	0.79	0.17
AvgSlop Cx	0.42	2.27	1.16	0.28

Durante el análisis de las señales de la garra, como era de esperar, se observa que los dedos sufren la desaceleración más violenta cuando los mangos están más inmaduros, mientras que la desaceleración es menor cuando la maduración de mango es mayor. Por medio del análisis estadístico los mejores parámetros que muestran este comportamiento son MaxAx, MaxBx, MaxCx y MaxSlpAx, MaxSlpBx, MaxSlpCx. La Figura 5.22 muestra los valores medios con un 95% de intervalos de confianza sobre los valores medios de los parámetros de deceleración máxima durante el contacto entre los dedos y los mangos (Figura 5.22. a), y el promedio de los parámetros de

pendiente máxima de deceleración tras el contacto (Figura 5.22. b) durante el período de almacenamiento de muestras en las que claramente se observa este comportamiento.

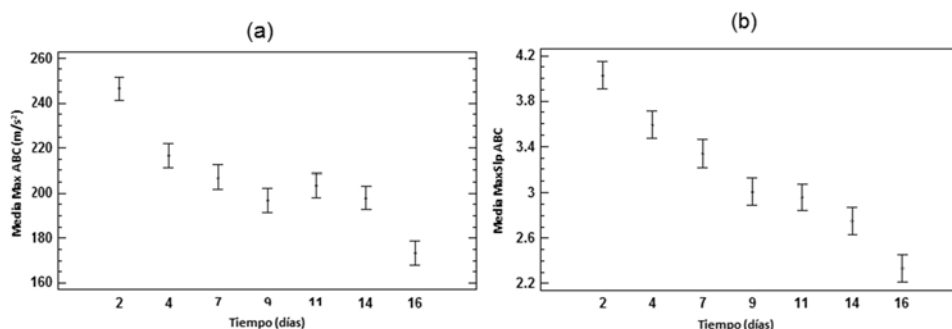


Figura 5.22. Valores medios con un 95% de intervalo de confianza sobre los valores medios de los parámetros de deceleración máxima (a) y el promedio de los parámetros de pendiente máxima de deceleración tras el contacto (b) durante el período de almacenamiento de las muestras.

5.4.1.4 Correlación entre los parámetros de la garra y las mediciones fisicoquímicas

Con el fin de ver si la pinza del robot puede evaluar la firmeza de los mangos y su madurez, se desarrollan modelos de regresión parcial de mínimos cuadrados (PLS) para explicar las características fisicoquímicas de acuerdo a las variables extraídas de las señales de los acelerómetros. Las muestras de los mangos (# N=140) fueron separadas al azar en un conjunto para calibración (105 muestras) y en un conjunto para validación (35 mangos). El paso crítico para un modelo de calibración PLS es seleccionar el número correcto de variables latentes para obtener la mejor predicción. Si se seleccionan menos variables latentes, el modelo fácilmente da lugar a un bajo ajuste, mientras que si se seleccionan muchas variables latentes causa un sobre ajuste. El número ideal de factores latentes para predecir la firmeza mecánica, contenido de sólidos solubles y luminosidad de la pulpa son identificados a partir de la Figura 5.23 (a) y es de 4, 3 y 3, respectivamente. Con estos factores latentes, el valor de PRESS tiene valores más bajos y los modelos tienen una buena capacidad de predicción. El rendimiento de los modelos de calibración para cada componente se optimiza mediante validación cruzada interna y luego se valida con una validación externa con un grupo de validación independiente.

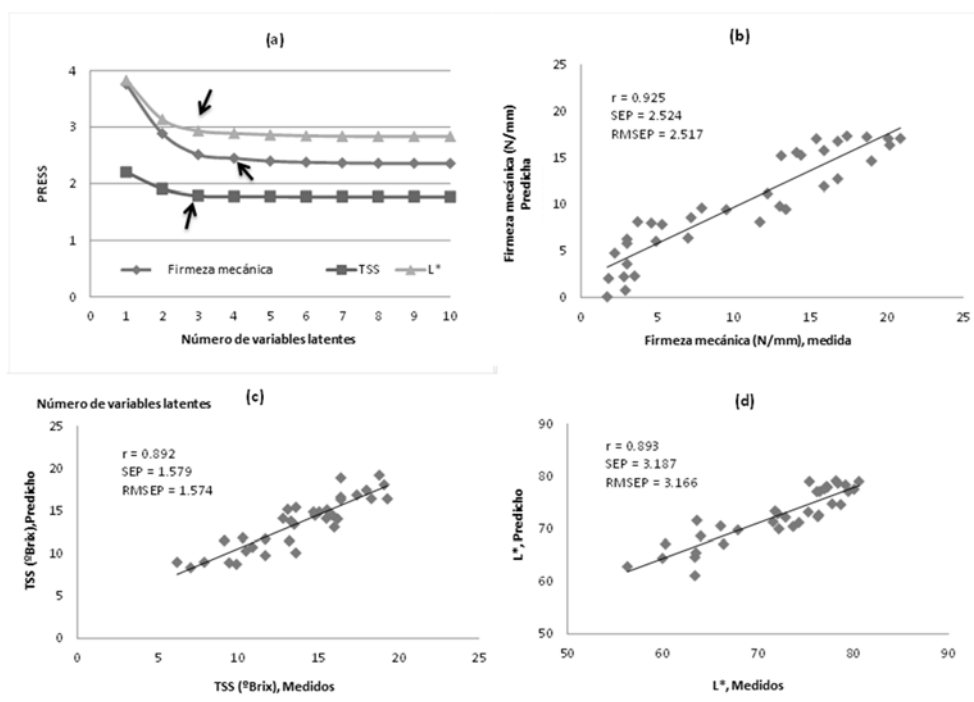


Figura 5.23. Predicción de la firmeza mecánica, sólidos solubles y luminosidad de la pulpa utilizando los modelos PLS. (a) Gráfico PRESS para identificar el número óptimo de variables latentes. Predicción versus valores medidos de (a) firmeza mecánica, (b) sólidos solubles, y (c) la luminosidad de la pulpa.

La Tabla 5.8 muestra el error estándar de calibración (SEC), el error estándar de la validación cruzada (SECV), el error estándar de predicción (SEP), el error de la raíz cuadrada media de calibración (RMSEC), el error de la raíz cuadrada media de la validación cruzada (RMSECV), el error de raíz cuadrada media de la predicción (RMSEP), el coeficiente de correlación (r), y los números de variables latentes requeridos (#LVs) de firmeza mecánica (pendiente de la línea hasta el punto de fractura), contenido de sólidos solubles, y la luminosidad de la pulpa para los grupos de calibración y predicción. Los resultados indicaron que los modelos de calibración PLS para estos parámetros muestran valores bajos de SEC, SECV, RMSEC y RMSECV, y altos valores de r , lo que indica un buen rendimiento de los modelos.

Tabla 5.8. Resultados de los modelos PLS para la predicción de la firmeza mecánica, contenido en sólidos solubles y luminosidad de la pulpa en los mangos muestreados.

Parámetro	#N	#LV	Calibración			Validación cruzada			Predicción		
			r	SEC	RMSEC	r	SECV	RMSECV	r	SEP	RMSEP
Firmeza mecánica	12	4	0,918	2.46	2.45	0.904	2.656	2.644	0.925	2.524	2.517
Contenido sólidos solubles	12	3	0.859	1.79	1.79	0.834	1.936	1.927	0.892	1.579	1.574
Luminosidad de la pulpa	12	3	0.874	2.94	2.93	0.853	3.170	3.156	0.893	3.187	3.166

#N número total de variables de la garra, #LV número de variables latentes, SEC error estándar de calibración, SECV el error estándar de la validación cruzada, SEP el error estándar de predicción, RMSEC el error de la raíz cuadrada media de calibración, RMSECV el error de la raíz cuadrada media de la validación cruzada, RMSEP el error de raíz cuadrada media de la predicción, r el coeficiente de correlación.

Cuando se utilizan los modelos con 35 nuevas muestras de mangos, las predicciones también son altas. Se obtienen los mejores resultados para la firmeza mecánica. El coeficiente de correlación entre los valores de la garra y la pendiente de la gama lineal hasta el punto de fractura es 0,925, con un error estándar de predicción de 2,524 N/mm, raíz cuadrada media del error de la predicción de 2,517 y un sesgo de -0,380 N/mm. Este resultado indica que hay buenas relaciones entre las mediciones de agarre del robot y la firmeza de mango.

En el caso de los sólidos solubles totales, el coeficiente de correlación entre los valores de la garra y TSS es 0,892, con un error estándar de predicción de 1,579 °Brix, el error de la raíz cuadrada media de predicción de 1,574 °Brix y la diferencia sistemática entre predicho y valores medidos de -0,228 °Brix. Para luminosidad de la pulpa, el coeficiente de correlación entre los valores de agarre del robot y luminosidad de la pulpa era 0,893, con un error estándar de predicción de 3,187, el error de raíz cuadrada media de la predicción de 3,166 y un sesgo de 0,396.

Los gráficos de dispersión de la Figura 5.23 muestra la eficiencia de los modelos de PLS para predecir la firmeza mecánica (Figura 5.23 b), contenido de sólidos solubles (Figura 5.23c) y la luminosidad de la pulpa (Figura 5.23d). En todas las figuras, los ejes de ordenadas y abscisas representan los valores ajustados predichos y medidos de los parámetros. La correlación entre los valores medidos y predichos para cada parámetro muestra un buen rendimiento predictivo.

Las propiedades físicas y químicas más esenciales de los mangos al vincularlos con la percepción sensorial de la madurez pueden ser descritas por el índice de maduración (RPI). El RPI combina los valores de resistencia a la fractura, la acidez y sólidos solubles totales. Tabla 5.9 muestra los resultados de los modelos de PLS para la predicción de la resistencia a fractura, la acidez, sólidos solubles totales y RPI. El modelo RPI muestra el mejor coeficiente de predicción y el mejor rendimiento de los modelos. Este resultado indica que la información no destructiva obtenida de la garra podría ser usada para predecir la combinación de parámetros relacionados con el estado de madurez y el índice de RPI con más precisión que cualquiera de los parámetros individualmente.

Tabla 5.9. Resultados de los modelos PLS para la predicción de la fuerza de fractura, contenido en sólidos solubles, acidez y RPI en los mangos muestreados.

Parámetro	#N	#LV	Calibración			Validación cruzada			Predicción		
			r	SEC	RMSEC	r	SECV	RMSECV	r	SEP	RMSEP
Fuerza de Fractura	12	3	0,856	18,41	18,402	0,831	19,948	19,853	0,872	18,21	17,989
Contenido sólidos solubles	12	3	0,859	1,79	1,786	0,834	1,936	1,927	0,892	1,579	1,574
Acidez	12	3	0,798	0,12	2,930	0,753	0,135	0,135	0,820	0,124	0,127
RPI	12	4	0,887	0,62	0,614	0,862	0,679	0,675	0,937	0,517	0,518

#N número total de variables de la garra, #LV número de variables latentes, SEC error estándar de calibración, SECV el error estándar de la validación cruzada, SEP el error estándar de predicción, RMSEC el error de la raíz cuadrada media de calibración, RMSECV el error de la raíz cuadrada media de la validación cruzada, RMSEP el error de raíz cuadrada media de la predicción, r el coeficiente de correlación.

La Figura 5.24 (a) muestra la media con un 95% de intervalo de confianza del RPI durante el almacenamiento de las muestras. Un efecto similar ocurrió al trabajar con mangos de la variedad "Manila" (Velez-Rivera et al. 2014), los valores de RPI disminuyeron durante el almacenamiento. Se identifican tres fases de madurez según en el parámetro RPI: mangos verdes (grupo A), mangos con maduración intermedia (grupos B, C, D, E y F) y mangos sobre maduros (grupo G). Un modelo de calibración PLS se desarrolla para explicar el índice RPI de acuerdo con las variables extraídas de la garra. La correlación de la calibración entre las variables extraídas de las señales del acelerómetro y el RPI es 0,887, con la SEC y RMSEC de 0,617 y 0,614 respectivamente. Cuando se utiliza el modelo para predecir las nuevas muestras de mango se logra un mejor coeficiente de correlación ($r = 0,937$), con un error estándar de predicción de 0,517, error de raíz cuadrada media de la predicción de 0,518 y un sesgo de -0,089. La Figura 5.24 (b) muestra la buena capacidad de predicción del modelo PLS para el índice RPI.

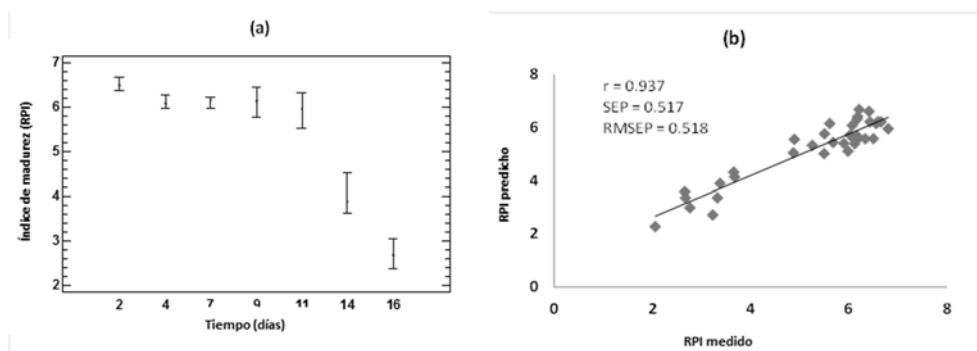


Figura 5.24. (a) Evolución del índice de madurez durante el periodo de almacenamiento de las muestras (b) valores de RPI predichos frente a medidos.

5.4.1.5 Conclusión

El análisis fisicoquímico muestra que los mejores parámetros para evaluar la madurez de los mangos variedad "Osteen" son la firmeza mecánica, el contenido de sólidos solubles, y la luminosidad de la pulpa. Estas variables son los parámetros utilizados en las líneas de empaquetado para evaluar la madurez de la fruta y tomar decisiones de acuerdo a sus valores. Los modelos de predicción, desarrollados por regresión de mínimos cuadrados parciales, son capaces de estimar los parámetros descritos y también el índice de madurez en base a la información obtenida de los acelerómetros de la garra. Este estudio demuestra que es posible evaluar la firmeza y la maduración de los mangos utilizando una técnica no destructiva durante un proceso de manipulación robotizado.

5.5. Comparativa entre los distintos modelos de garra

Con el desarrollo de los distintos modelos de garra presentados se estudia la capacidad que tienen los acelerómetros como sensores táctiles en garras para robots cuando estos están colocados en los dedos de las garras. Los acelerómetros se colocan en diversos tipos de dedos; con diferentes tipos de grados de libertad, infra-actuados, no infra-actuados y con control de la dureza. En los distintos modelos de garra se emplean diversos métodos para extraer de los acelerómetros parámetros que luego se cruzan con los ensayos estándar de laboratorio. El principal parámetro estudiado en todos los modelos es la firmeza mecánica. Según se emplean distintos tipos de garra se desarrollan también distintos métodos estadísticos para encontrar mejores ajustes entre los parámetros de la garra y los de los ensayos de laboratorio. La experiencia adquirida en cada garra sirve para mejorar la siguiente y mejorar los modelos estadísticos, aun

cuando cada producto presenta sus peculiaridades y necesidades específicas. Para poder contrastar la capacidad de predicción de cada una de las garras y sus configuraciones es necesario estudiarlas según un único criterio que permita cuantificar la mejora de los diversos modelos.

5.5.1. Procedimiento empleado y resultados

Para poder comparar los datos se procesan las señales de los acelerómetros de acuerdo con el programa desarrollado en el último modelo de garra (Figura 5.14) para extraer los 24 parámetros que se contrastan con los datos de firmeza mecánica medida en el laboratorio como la pendiente de la línea tensión deformación hasta ruptura en el test de compresión. El método estadístico empleado es el modelo de regresión lineal múltiple por pasos hacia delante para estimar la pendiente de la línea de la fuerza de deformación en la prueba de compresión y todos los parámetros extraídos de los tres acelerómetros de la garra.

La garra de la Figura 5.25 (a) logra un coeficiente de determinación de $r=0,851$ en la capacidad predictiva de la firmeza de las berenjenas que manipula. Con la garra de la Figura 5.1 (b) el control de rigidez del dedo A mejora la capacidad de adaptación al producto asegurando una mayor área de contacto e incrementando la regularidad del área que contacta independientemente de la forma de las berenjenas. Esta garra logra una mejor estimación de predicción de la firmeza con un coeficiente de determinación de $r=0,872$. Cabe destacar la mejor capacidad predictiva del dedo A ya que empleando solo los parámetros que provienen del dedo A se logra un coeficiente de determinación $r=0,803$ frente al dedo B con $r=0,50$ y el dedo C con $r=0,58$. Para el caso de la garra que manipula los mangos con el dedo A con control de la rigidez (Figura 5.25 c) se logra el mayor coeficiente de determinación para la estimación de la firmeza alcanzando un valor de $r=0,934$ encontrándose valores muy parecidos en los coeficientes de determinación alcanzados empleando solo el dedo A ($r=0,887$) frente al dedo B ($r=0,894$). Los resultados de la estimación firmeza son bastante buenos para los dedos A y B. La forma semiesférica cóncava del dedo B y la posibilidad de que este pueda rotar libremente alrededor de los tres grados de libertad en giro mejora la adaptación al agarrar los productos. En este caso el dedo B no se mueve, pero los resultados siguen siendo buenos.

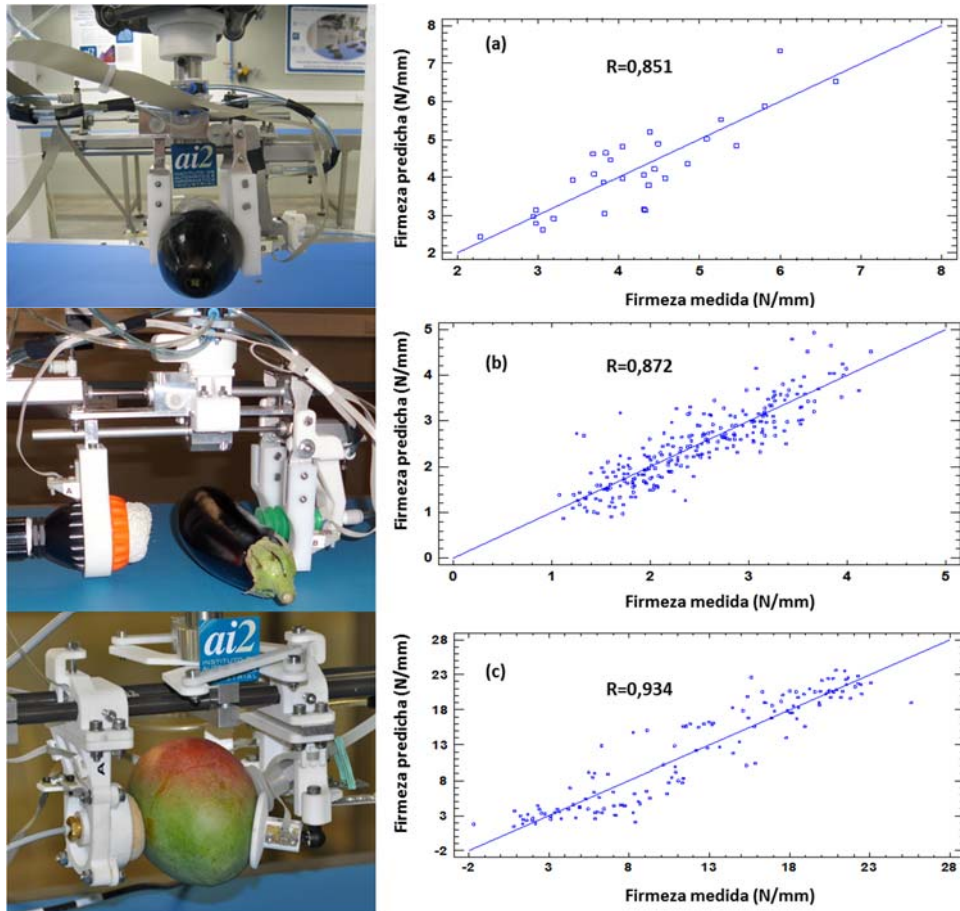


Figura 5.25. Firmeza predicha con un modelo de regresión múltiple de los parámetros obtenidos de los acelerómetros de las garras (a) para berenjena con dedo A sin control de rigidez, (b) para berenjena con dedo A con control de rigidez y (c) para mango con dedo A con control de rigidez.

5.5.2. Discusión

La garra para manipulación de berenjenas Figura 5.25 (a) presenta una buena capacidad de adaptación a la forma de las berenjenas. Logra una estimación de la firmeza con un coeficiente de determinación de 0,851. Con esta garra la posición relativa entre berenjenas y el punto central de la garra podría verse desplazada durante los movimientos del robot. Esto es debido a que el producto puede girar alrededor de

los vástagos de los cilindros neumáticos y a que el movimiento de cierre de los dedos no está unido mecánicamente.

La garra de la Figura 5.25 (b) es una mejora de la anterior. Esta garra logra una mejor adaptación a la forma de las berenjenas gracias al control de rigidez de la almohadilla del dedo A. Esto mejora la capacidad predictiva de la firmeza hasta lograr un coeficiente de determinación de 0,871. El dedo A necesita tiempo para garantizar una adaptación adecuada a las berenjenas y para cambiar su rigidez. La estimación de la firmeza de este dedo se ve afectada por las fuerzas de cortadura residuales entre la membrana de dedo A y berenjenas. Como se ha mencionado anteriormente durante el tiempo que el dedo A se adapta a las formas de las berenjenas, la membrana se desinfla mientras está en contacto con la berenjena esto hace que algunas fuerzas de cortadura residuales se mantengan entre la membrana y las berenjenas. Esto afecta a la estimación de la firmeza durante el primer proceso de ciclo de apertura y cierre.

En el caso de la garra de la Figura 5.25 (c) el movimiento de los dedos se mantiene paralelo. Esta garra es la que mejor estima la firmeza con un coeficiente de determinación de 0,934. Las diferencias más significativas con las anteriores son:

- Sólo se utiliza un actuador que mueve uno de los dedos. El producto se mantiene fijo durante la captura de las señales que evalúan la firmeza.
- Los dedos B y C se adaptan mejor a los productos al tener un mayor número de grados de libertad infra-actuados. Presentan tres grados de libertad en lugar de uno.

En esta pinza la estimación de la firmeza de los dedos A o B es similar, lo que significa que el dedo A podría simplificarse utilizando el mismo conjunto mecánico como dedo B sin afectar los resultados. Sin embargo, esto limita la capacidad de la garra. Al mover la garra con el producto verticalmente los dedos pueden rotar y el producto puede desprenderse. El uso del sistema con control de firmeza del dedo A permite que, al adaptarse a la forma del producto, se puedan generar los suficientes esfuerzos verticales como para desplazar con cierta aceleración la garra en movimientos verticales ascendentes.

El dedo B está fijo al chasis y logra resultados similares al dedo A, que está unido al movimiento del vástago del cilindro neumático. La estimación de la firmeza alcanzada es muy similar tanto si el acelerómetro se mueve con los dedos como si no.

5.6. Conclusiones

La configuración de los grados de libertad de los dedos de la garra y sus formas son parámetros fundamentales para asegurar la manipulación adecuada de productos irregulares como las berenjenas o los mangos. Los resultados mejoran cuando los dedos aumentan sus grados de libertad.

La capacidad de detección de los acelerómetros como sensor táctil está influenciada por las interferencias y los ruidos producidos durante el proceso de agarre. Estas perturbaciones afectan las respuestas de los sensores táctiles del acelerómetro. Tanto el proceso que controla el robot con la garra como la configuración de la garra deben estar diseñados para reducir las perturbaciones que afectan a las deceleraciones de los dedos. Para mejorar la adaptación de los dedos de la garra a las superficies de mangos y berenjenas se han probado diferentes configuraciones. El sistema de control de firmeza (*jamming*) de la almohadilla de los dedos y la unión con rótulas esféricas de los dedos que permiten tres rotaciones libres es el sistema que logra la mejor capacidad de adaptación de los dedos a las distintas formas irregulares. Se consigue una mejor capacidad de los acelerómetros cuando los dedos tienen una mejor capacidad de adaptación a la diversidad de formas de los productos que agarra. Los resultados de la estimación de la firmeza de los productos mejoran cuando la configuración mecánica de la garra es más simple.

El software para procesar las señales necesita de ajustes para cada garra y configuración cinemática y dinámica. Los resultados están influenciados si se producen cambios que puedan afectar a las deceleraciones durante el proceso de agarre.

Los acelerómetros como sensores táctiles para garras acopladas en un robot tienen un tiempo de respuesta rápido, de bajo costo, y son fáciles de integrar en garras de robots industriales mediante la incorporación de los acelerómetros dentro de los dedos de la garra. Los acelerómetros se pueden utilizar con diferentes fuerzas de agarre, velocidades, y propiedades del producto, ya que no están en contacto directo con el producto y por lo tanto están libres del riesgo de sufrir desgaste.

Con un diseño adecuado de una garra neumática al producto que manipula y acelerómetros unidos a sus dedos es posible evaluar la firmeza de berenjenas y mangos. Esta técnica se puede emplear con otros productos agroalimentarios.

Capítulo 6

Conclusiones

A pesar de los avances del uso de los robots en el sector alimentario, la manipulación primaria con robots en el sector agroalimentario todavía sigue siendo un reto. Para lograr superarlo es necesario no solo el desarrollo planteado en esta tesis, centrada en el sistema de manipulación con sensores, sino también un desarrollo multidisciplinar de áreas no contempladas en la presente tesis. La visión artificial es un elemento imprescindible para lograr la correcta manipulación de productos irregulares. Es la encargada de proporcionar la posición y forma de los productos y mandar las coordenadas al robot para el punto de ataque y orientación del sistema de agarre. Los nuevos sistemas de visión para la identificación 3D de los productos y los avances en sistemas de visión fuera del espectro visible forman parte necesaria para la identificación tanto del producto como de parámetros de su calidad. Actualmente ya existen equipos para identificar propiedades de los productos agroalimentarios de manera no destructiva empleando estas técnicas de visión artificial. En el plano de la investigación se trabaja con la visión para la identificación de la manera más adecuada de manipular los productos con la garra de un robot. Estos sistemas analizan las distintas posibilidades de agarre del producto generando una estrategia que busca la consecución exitosa de la manipulación de los productos. La optimización del proceso de agarre y de las entradas necesarias a mandar a el sistema de agarre precisa del desarrollo de algoritmos eficientes que sean capaces de evaluar parámetros medibles que definan la calidad del agarre (Roa & Suárez 2015). Otro aspecto muy importante es el abaratamiento de los robots y sus controles junto con la simplificación de su uso. Los nuevos sistemas de programación de robots son más sencillos de realizar y tienen mayores posibilidades de integrarse y comunicarse con otros sistemas periféricos. Estos factores son muy necesarios para facilitar la implementación de la robótica en las empresas del sector agroalimentario que no disponen de un avanzado dominio de la tecnología robótica. Los elevados costes de equipos y software suponen una clara limitación a la robotización del sector. Este efecto se ve aumentado al considerar la estacionalidad de los productos agroalimentarios.

6.1. Principales contribuciones

Esta tesis desarrolla estrategias y modelos de agarre con sensores analizando los problemas y requisitos del sistema de agarre para manipular sin dañar los productos agroalimentarios. Estudia la incorporación de acelerómetros como sensor táctil añadido a la parte posterior de los dedos y fuera del contacto directo con el producto. Como resultado del trabajo de investigación realizado en diversos proyectos I+D se han obtenido las siguientes contribuciones:

- ***Propuestas y métodos para la correcta selección del sistema de manipulación robotizada de productos agroalimentarios***

El presente trabajo de tesis revisa diversas tecnologías que pueden emplearse en garras para la manipulación directa de productos agroalimentarios. Ante la variedad de formas y texturas de estos productos es necesario que las garras se adapten a los productos evitando, en la medida de lo posible, un incremento significativo de la complejidad de esta. Se apuesta por sistemas autoadaptables entre los cuales se destacan los mecanismos infra-actuados y el uso de materiales flexibles. Se han desarrollado diversos modelos de garras con mecanismos infra-actuados y con materiales flexibles logrando la exitosa manipulación de productos como berenjenas y mangos sin dañar los productos. Es destacable el potencial de la tecnología *jammig*. En las pruebas realizadas con esta tecnología se demuestra la capacidad para copiar la forma de diversidad de productos y la facilidad de controlar el cambio de la rigidez. Se ha contrastado que las limitaciones de fabricación son un importante hándicap que limitan los potenciales diseños de garras y sus componentes.

En ámbitos científicos paralelos existe una clara pujanza por el desarrollo de nuevos sistemas de robótica blanda (*soft robotics*). Estos se caracterizan por su alta capacidad de adaptación a diversidad de formas, en algunos casos su buena velocidad de ejecución, y la simplicidad de su mecanismo. Para aplicar estas tecnologías en la manipulación agroalimentaria aún existen limitaciones y retos a superar como son mejorar la fuerza de estos dispositivos, reducir la incertidumbre de posición, mejorar los procesos de fabricación o desarrollar sensores táctiles flexibles para estos mecanismos.

- ***Innovación en el diseño de garras para alimentos mediante fabricación aditiva***

Tras la realización de distintos modelos de garras fabricados en plástico por sinterizado láser de polvo, se ha demostrado el enorme potencial de esta tecnología en la fabricación de garras flexibles para productos irregulares. Esta tecnología permite simplificar la fabricación y abrir la mente a nuevos diseños imposibles de realizar con las tecnologías clásicas de fabricación por mecanizado. Para potenciar este desarrollo se proponen diversas posibilidades para diseñar articulaciones flexibles y actuadores neumáticos. Se han encontrado limitaciones en la longevidad de los actuadores neumáticos en el estado actual de la tecnología pero hay grandes expectativas para las

articulaciones flexibles llegándose a soportar millones de ciclos sin aparente desgaste. El uso de la fabricación aditiva, para la fabricación de sistemas de agarre flexibles, irá creciendo según la tecnología avance, reduzca sus costes, amplíe el abanico de materiales y mejore la calidad de sus acabados.

- ***Pruebas y validación de garras manipulando productos agroalimentarios con inspección mediante acelerómetros como sensores táctiles***

Se han estudiado los acelerómetros como sistema táctil al ser colocados en dedos de distintas garras neumáticas. Estos funcionan como sensores táctiles intrínsecos fuera del desgaste por contacto y presentan la posibilidad de poder ser encapsulados dentro de los dedos incrementando su robustez. La respuesta de estos sensores está muy influenciada por los ruidos y características mecánicas de la garra. Los rozamientos entre el producto, la garra y la superficie de apoyo, así como las características inerciales del mecanismo de la garra pueden llegar a desvirtuar las señales. Para lograr un funcionamiento adecuado es necesario realizar todo el proceso en conjunto en el cual se deben de considerar el diseño mecánico de la garra, el proceso robot y un adecuado sistema de procesado de señales.

Diversos métodos del proceso del robot y del procesado de las señales de los acelerómetros han sido investigados con distintos conjuntos mecánicos de garras para la manipulación de berenjenas y mangos. Los datos no destructivos de los acelerómetros han sido contrastados con los ensayos destructivos de laboratorio empleados como referencia. Los prototipos de garra y procesamiento se han ido mejorando hasta llegar a conseguir coeficientes de correlación $r=0,937$ para predecir valores de índices de madurez en mangos.

6.2. Publicaciones resultado de la tesis

Como resumen, se han publicado un total de 5 artículos revistas siendo 3 del primer cuartil y 1 del segundo y otro en revista de acceso abierto. También hay 5 publicaciones en congresos internacionales con aceptación por revisión.

Revistas

- C. Blanes, M. Mellado, P. Beltrán. Tactile sensing with accelerometers in prehensile grippers for robots. *Mechatronics*. 33 (2016), 1–12.
 - *Automation & Control Systems* Q2 (22/58)
 - *Computer Science, Artificial Intelligence* Q2 (49/123)
 - *Engineering, Electrical & Electronic* Q2 (86/249)
 - *Engineering, Mechanical* Q1 (29/130).

- C. Blanes, V. Cortés, C. Ortiz, M. Mellado, P. Talens. Non-destructive assessment of mango firmness and ripeness using a robotic gripper. *Food and Bioprocess Technology*. 8 (2015) 1914-1924.
 - *Food Science & Technology* Q1 (20/123)
- C. Blanes, C. Ortiz, M. Mellado, P. Beltrán. Assessment of eggplant firmness with accelerometers on a pneumatic robot gripper. *Computers and Electronics Agriculture*. 113 (2015) 44-50.
 - *Agriculture, Multidisciplinary* Q1 (6/56)
 - *Computer Science, Interdisciplinary Applications* Q2 (32/102).
- C. Blanes, M. Mellado, P. Beltran. Novel additive manufacturing pneumatic actuators and mechanisms for food handling grippers, *Actuators*. 3 (2014) 205-225.
 - *MDPI Open Access Journals*.
- C. Blanes, M. Mellado, C. Ortiz, A. Valera. Technologies for robot grippers in pick and place operations for fresh fruits and vegetables, *Spanish Journal of Agricultural Research*. 9 (2011) 1130-1141.
 - *Agriculture, Multidisciplinary* Q2 (26/56).

Congresos

- V. Cortes, C. Blanes, M. Navarro, M. Mellado, et al. Non-destructive firmness assessment of mango “Osteen” with a robot gripper. (2015) *VIII Congreso Ibérico de Agroingeniería* 1-3 Junio.
- C. Blanes, C. Ortiz, V. Cortes, P. Talens, M. Mellado. Robot gripper sensor operation in fresh mango postharvest handling for non-destructive firmness assessment. (2015) *Avecta, 1st International Student Congress of Food Science and Technology*, Universidad de Valencia 5-6 Marzo.
- C. Blanes, M.C. Ortiz, P. Talens, M. Mellado. Mango postharvest handling and firmness assessment with a robotic gripper. (2014) *International Conference of Agricultural Engineer*, Zurich.
- C. Blanes, M.C. Ortiz Sánchez, M. Mellado Arteché. Aubergine (*Solanum melogena*) firmness detection using a robot gripper during handling. (2013) *VII Congreso Ibérico de Agroingeniería*, Madrid.
- C. Blanes, C. Ortiz, M. Mellado, P. Beltrán. Determinación de la posición adecuada del fruto electrónico respecto a la garra robot para la estimación del impacto en el agarre pick and place de productos hortofrutícolas (2011) *VI Congreso Ibérico de Agroingeniería* 5-7 Septiembre.

Patentes

- Solicitud de patente en Estados Unidos. *Active deformable finger for robot gripper*. Número de serie 62/190,134. ID 027318.00113

6.3. Nuevas acciones y propuestas futuras

El uso de ventosas en productos agroalimentarios supone una limitación en el empleo de la técnica propuesta para diseñar garras capaces de extraer información del producto mediante acelerómetros. Muchos productos disponen de una superficie sobre la cual no trabaja adecuadamente la ventosa, otros disponen de una piel que no soporta los esfuerzos que genera la ventosa.

Actualmente se está experimentando con un nuevo modelo de garra que no emplea ventosas. La ventosa es necesaria para retener el producto y evaluar impactos mientras este está solo en contacto directo con los dedos de la garra. Para sustituir la función de la ventosa la garra dispone de cuatro dedos dispuestos perpendicularmente. Dos de los dedos permiten sujetar el producto para que este no caiga y no esté en contacto con la cinta de transporte, mientras los otros realizan el bucle de apertura-cierre para analizar la respuesta de los acelerómetros al golpear los dedos el producto. La nueva garra se ha experimentado para manipular nectarinas (Figura 6.1). Los datos extraídos se están procesando para ser cruzados con los datos destructivos de laboratorio.

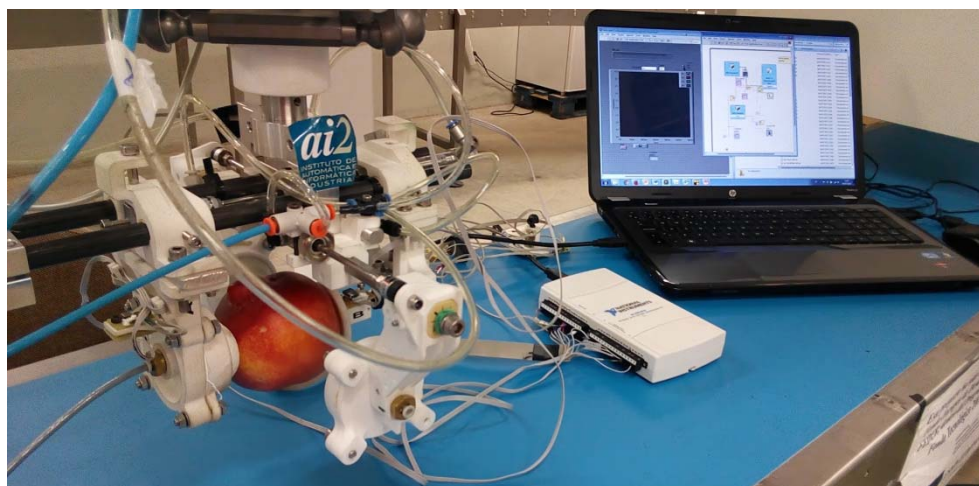


Figura 6.1. Garra de cuatro dedos empleada con la nectarina

A esta garra se le han incorporado dos sondas de espectrofotómetro (Figura 6.2). Uno de los espectrofotómetros está colocado en el interior del dedo B y el otro sobre un dispositivo que se acerca al producto durante el proceso. La garra tiene cinco puntos de contacto. Sobre el dedo B también hay colocado un acelerómetro. La idea es realizar la

fusión de sensores de acelerómetros (dedos A y B) y espectrofotómetros en la misma garra. La experiencia adquirida en el grupo de trabajo del proyecto DACSA con los experimentos realizados en mangos con espectrofotómetros facilita la incorporación de estos. Un software desarrollado específicamente y conectado a uno de los dispositivos del robot es el encargado de recibir las señales del espectrofotómetro. Los experimentos se están realizando con mangos. Aún hay que contrastar la viabilidad y calidad de las señales no destructivas conseguidas con la garra.

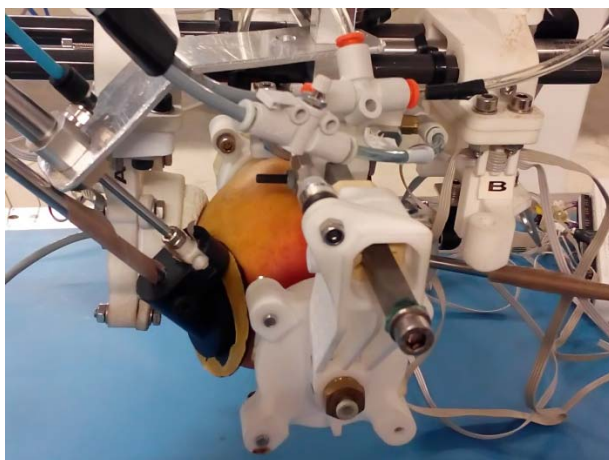


Figura 6.2. Modificación de la garra de cuatro dedos para la incorporación de dos sondas de espectrofotómetro empleada con el mango.

Otra línea de investigación es el empleo de dedos flexibles realizados en silicona como sistema de agarre. Actualmente hemos fabricado varios modelos y estamos investigando su comportamiento. La intención es la incorporación de sensores táctiles tipo resistencias variables con la flexibilidad y acelerómetros en la punta de estos dedos. La ventaja más significativa de estos sistemas es su gran tolerancia a impactos y la flexibilidad para adaptarse a todo tipo de formas. En paralelo se pretende conocer cómo pueden emplearse estos dedos para la manipulación agroalimentaria con robots.

Bibliografía

- Abdi, H., 2010. Partial least squares regression and projection on latent structure regression (PLS Regression). *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 2(1), pp.97–106.
- Ali, B. et al., 2010. A New Approach in Design and Operating Principle of Silicone Tactile Sensor. *Journal of Computer Science*, 6(8), pp.940–945.
- Amagai, A. & Takase, K., 2002. Implementation of dynamic manipulation with visual feedback and its application to pick and place task. In *Assembly and Task Planning, 2001, Proceedings of the IEEE International Symposium on*. Fukuoka, Japan: Proceedings of the 4th IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning Soft Research Park, pp. 344–350.
- Bac, C.W., Hemming, J. & van Henten, E.J., 2014. Stem localization of sweet-pepper plants using the support wire as a visual cue. *Computers and Electronics in Agriculture*, 105, pp.111–120.
- Bandyopadhyaya, I., Babu, D., Kumar, A., et al., 2014. Tactile sensing based softness classification using machine learning. In *Advance Computing Conference (IACC), 2014 IEEE International*. IEEE, pp. 1231–1236.
- Bandyopadhyaya, I., Babu, D., Bhattacharjee, S., et al., 2014. Vegetable Grading Using Tactile Sensing and Machine Learning. In *Advanced Computing, Networking and Informatics-Volume 1*. Springer, pp. 77–85.
- Bar-Cohen, Y., 2000. Electroactive polymers as artificial muscles-capabilities, potentials and challenges. *Handbook on biomimetics*, 8.
- Becker, A., Sandheinrich, R. & Bretl, T., 2009. Automated manipulation of spherical objects in three dimensions using a gimbaled air jet. In *Intelligent Robots and Systems, 2009. IROS 2009. IEEE/RSJ International Conference on*. pp. 781–786.
- Bégoc, V. et al., 2007. Mechanical design of a new pneumatically driven underactuated hand. In *Robotics and Automation, 2007 IEEE International Conference on*. IEEE, pp. 927–933.
- Bekku, A. & Nakajima, Y., 2015. Fixing Device for a Planar Object by Incorporating Jamming Transition Phenomenon and a Suction Unit. *Journal of Robotics*, 2015.
- Bicchi, A., 2002. Hands for dexterous manipulation and robust grasping: A difficult road toward simplicity. *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, 16(6), pp.652–662.
- Blanes, C., Ortiz, C., et al., 2015. Assessment of eggplant firmness with accelerometers on a pneumatic robot gripper. *Computers and Electronics in Agriculture*, 113, pp.44–50. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169915000289>.
- Blanes, C., Cortés, V., et al., 2015. Non-Destructive Assessment of Mango Firmness and Ripeness Using a Robotic Gripper. *Food and Bioprocess Technology*, 8(9), pp.1914–

1924. Available at: http://link.springer.com/article/10.1007/s11947-015-1548-2?wt_mc=email.event.1.SEM.ArticleAuthorOnlineFirst#.
- Blanes, C. et al., 2015. Robot Gripper Sensor Operation in Fresh Mango Postharvest Handling for Non-Destructive Firmness Assessment. In Avecta, ed. Universidad Politécnica de Valencia: 1st International Student Congress of Food Science and Technology.
- Blanes, C. et al., 2011. Technologies for robot grippers in pick and place operations for fresh fruits and vegetables. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 9(4), pp.1130–1141.
- Blanes, C., Mellado, M. & Beltran, P., 2014. Novel Additive Manufacturing Pneumatic Actuators and Mechanisms for Food Handling Grippers. *Actuators*, 3(3), pp.205–225. Available at: <http://www.mdpi.com/2076-0825/3/3/205/>.
- Blanes, C., Mellado, M. & Beltrán, P., 2016. Tactile sensing with accelerometers in prehensile grippers for robots. *Mechatronics*, 33, pp.1–12. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957415815002007> [Accessed December 21, 2015].
- Blanes, C., Ortiz, C. & Mellado, M., 2013. Aubergine (*Solanum melogena*) firmness detection using a robot gripper during handling. In Madrid: VII Iberian AgroEngineering Conference (SEAgIng SECH 2013).
- Blasco, J., Aleixos, N. & Molto, E., 2003. Machine vision system for automatic quality grading of fruit. *Biosystems Engineering*, 85(4), pp.415–423.
- Blind, S.J. et al., 2001. Manipulating parts with an array of pins: A method and a machine. *The International Journal of Robotics Research*, 20(10), pp.808–818.
- Bloss, R., 2006. How do you quickly load cases and trays with tough to handle product? *Industrial Robot: An International Journal*, 33(5), pp.339–341.
- Bogue, R., 2009. The role of robots in the food industry: a review. *Industrial Robot*, 36(6), pp.531–536.
- Brantmark, H. & Hemmingson, E., 2001. FlexPicker with PickMaster revolutionizes picking operations. *Industrial Robot: An International Journal*, 28(5), pp.414–420.
- Brecht, J., 2010. Mango Postharvest Best Management Practices Manual. *Gainesville: Univ. of Fla. Horticultural Sciences Department*, pp.1–74. Available at: <http://edis.ifas.ufl.edu/pdffiles/HS/HS118500.pdf>.
- Brown, E. et al., 2010. From the Cover: Universal robotic gripper based on the jamming of granular material. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107(44), pp.18809–18814.
- Brun, X. & Melkote, S., 2006. Evaluation of handling stresses applied to EFG silicon wafer using a Bernoulli gripper. , pp.1346–1349.
- Buckingham, R.O. et al., 1996. Robofish - A new robot system for handling fresh cod. In 156

- BEIJING: Systems, Man, and Cybernetics, 1996., IEEE International Conference on, pp. 1606–1610.
- Butz, P., Hofmann, C. & Tauscher, B., 2005. Recent developments in noninvasive techniques for fresh fruit and vegetable internal quality analysis. *Journal of Food Science*, 70(9), pp.131–141.
- Catalano, M.G. et al., 2014. Adaptive synergies for the design and control of the Pisa/IIT SoftHand. *The international journal of robotics research*, 33(5), pp.768–782.
- Causey, G.C. & Quinn, R.D., 1998. Gripper design guidelines for modular manufacturing. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Institute of Electrical Engineers INC (IEEE), pp. 1453–1458.
- Ceccarelli, M. & Nieto, J.N., 1993. El agarre con pinzas de dos dedos. In *I Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica*. pp. 170–171.
- Chen, L. & Opara, U., 2013. Texture measurement approaches in fresh and processed foods — A review. *Food Research International*, 51(2), pp.823–835.
- ChengChang, L., Chyung, A. & ChingHua, T., 2009. Non-destructive impact test for assessment of tomato maturity. *Journal of Food Engineering*, 91(3), pp.402–407.
- Choi, H. & Koë, M., 2006. Design and feasibility tests of a flexible gripper based on inflatable rubber pockets. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46(12-13), pp.1350–1361.
- Chua, P.Y., Ilschner, T. & Caldwell, D.G., 2003. Robotic manipulation of food products—a review. *Industrial Robot: An International Journal*, 30(4), pp.345–354.
- Ciocarlie, M. & Allen, P., 2010. Data-driven Optimization for Underactuated Robotic Hands. *2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp.1292–1299.
- Connolly, C., 2003. Gripping developments at silsoe. *Industrial Robot*, 30(4), pp.322–325.
- Dahiya, R. et al., 2013. Directions Toward Effective Utilization of Tactile Skin: A Review. *IEEE Sensors Journal*, 13(11), pp.4121–4138.
- Dahiya, R. et al., 2010. Tactile Sensing-From Humans to Humanoids. *IEEE transactions on robotics*, 26(1), pp.1–20.
- Dargahi, A. & Najarian, S., 2005. Advances in tactile sensors design/manufacturing and its impact on robotics applications - a review. *Industrial Robot*, 32(3), pp.268–281.
- Darvish, B. et al., 2009. A Novel Tactile Force Probe for Tissue Stiffness Classification. *American Journal of Applied Sciences*, 6(3), pp.512–517.
- Davey, P.G., 1999. Custom solutions for food-robotics clients. *Industrial Robot*, 26(4), pp.271–273.
- Davis, S. et al., 2007. Robot prototyping in the design of food processing machinery. *Industrial Robot: An International Journal*, 34(2), pp.135–141.

- Davis, S., Gray, J.O. & Caldwell, D.G., 2008. An end effector based on the Bernoulli principle for handling sliced fruit and vegetables. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 24(2), pp.249–257.
- Deimel, R. & Brock, O., 2013. A Compliant Hand Based on a Novel Pneumatic Actuator. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. Karlsruhe, Germany, pp. 2039–2045.
- Desmet, M., 2004. Instrumented sphere prediction of tomato stem-puncture injury. *Postharvest Biology and Technology*, 34(1), pp.81–92.
- Diago, M.P. et al., 2015. Assessment of cluster yield components by image analysis. *Journal of the science of food and agriculture*, 95(6), pp.1274–82. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/25041796> [Accessed February 24, 2016].
- Diezma-Iglesias, B., Ruiz-Altisent, M. & Barreiro, P., 2004. Detection of internal quality in seedless watermelon by acoustic impulse response. *Biosystems Engineering*, 88(2), pp.221–230.
- Dini, G., Fantoni, G. & Failli, F., 2009. Grasping leather plies by Bernoulli grippers. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 58(1), pp.21–24.
- Dollar, A.M., 2010. The highly adaptive sdm hand: Design and performance evaluation. *The international journal of robotics research*, 29(5), pp.585–597.
- Drimus, A. et al., 2014. Design of a flexible tactile sensor for classification of rigid and deformable objects. *New Boundaries of Robotics*, 62(1), pp.3–15. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092188901200125X>.
- Edward, C., 2004. Light activated adhesive gripper (LAAG) workholding technology and process. *Journal of manufacturing processes*, 6(2), pp.201–214.
- Erzincanli, F. & Sharp, J.M., 1997. Meeting the need for robotic handling of food products. *Food Control*, 8(4), pp.185–190.
- Esquerre, C. et al., 2009. Initial Studies on the Quantitation of Bruise Damage and Freshness in Mushrooms Using Visible-Near-infrared Spectroscopy. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57(5), pp.1903–1907.
- EU-FP7-ICT-Ref.215821, 2008. Emergence of Cognitive Grasping through Emulation, Introspection, and Surprise. (GRASP). *GRASP*. Available at: http://cordis.europa.eu/project/rcn/85543_en.html [Accessed January 13, 2016].
- EU-FP7-ICT-Ref.216239, 2008. DEXterous and autonomous dual-arm/hand robotic manipulation\nwith sMART sensory-motor skills: A bridge from natural to artificial cognition (DEXMART). *DEXMART*. Available at: http://cordis.europa.eu/project/rcn/85328_en.html [Accessed January 13, 2016].
- EU-FP7-ICT-Ref.231500, 2009. Skin-Based Technologies and Capabilities for \nSafe, Autonomous and Interactive Robots. (ROBOSKIN). Available at: http://cordis.europa.eu/project/rcn/89511_en.html [Accessed January 13, 2015].

- EU-FP7-ICT-Ref.231608, 2009. Novel Design Principles and Technologies for a New Generation of High Dexterity Soft-bodied Robots Inspired by the Morphology and Behaviour of the Octopus. (Octopus). Available at: http://cordis.europa.eu/project/rcn/89036_en.html [Accessed January 13, 2016].
- EU-FP7-ICT-Ref.231640, 2009. Developmental pathway towards autonomy and dexterity in robot in-hand manipulation. (HANDLE). *HANDLE*. Available at: http://cordis.europa.eu/project/rcn/89250_en.html [Accessed January 13, 2016].
- EU-FP7-ICT-Ref.287728, 2012. STIFFness controllable Flexible and Learn-able manipulator for surgical OPERations.
- EU-FP7-ICT-Ref.619319, 2013. A Coordination Action for Soft Robotics. (Robosoft). Available at: http://cordis.europa.eu/project/rcn/110380_en.html [Accessed January 13, 2016].
- EU-FP7-IDEA-IRC-Ref.291166, 2012. A Theory of Soft Synergies for a New Generation of Artificial Hands. (Soft Hands). Available at: http://cordis.europa.eu/project/rcn/102189_en.html [Accessed January 13, 2016].
- EU-FP7-IDEAS-IRC-Ref.320992, 2013. Robotic Dynamic Manipulation. (RODYMAN). *RODYMAN*. Available at: http://cordis.europa.eu/project/rcn/107007_en.html [Accessed January 13, 2016].
- EU-FP7-KBBE.Ref.311987, 2012. Flexible robotic systems for automated adaptive packaging of fresh and processed food products. (PICKNPACK). Available at: http://cordis.europa.eu/project/rcn/105072_en.html [Accessed January 13, 2016].
- EU-FP7-NMP-Ref.246252, 2010. Intelligent sensing and manipulation for sustainable production and harvesting of high value crops. (CROPS). Available at: http://cordis.europa.eu/project/rcn/96216_en.html [Accessed January 13, 2016].
- EU-H2020-EU.1.1.Ref.637935, 2015. Control of contact interactions for robots acting in the world. (Cont-Act). Available at: http://cordis.europa.eu/project/rcn/193543_en.html [Accessed January 13, 2016].
- EU-H2020-EU.1.3.2.Ref.659265, 2014. LEARning-CONtrol tight interaction: a novel approach to robust execution of mobile manipulation tasks. (LEACON). Available at: http://cordis.europa.eu/project/rcn/195745_en.html [Accessed January 13, 2013].
- EU-H2020-EU.2.1.1.1.Ref.645145, 2015. Haptic Printed and Patterned Interfaces for Sensitive Surface. (HAPPINESS). Available at: http://cordis.europa.eu/project/rcn/194288_en.html [Accessed January 13, 2015].
- EU-H2020-EU.2.1.1.5.Ref.644313, 2015. Sweet Pepper Harvesting Robot. (SWEEPER). Available at: http://cordis.europa.eu/project/rcn/194187_en.html [Accessed January 13, 2016].
- EU-H2020-EU.2.1.1.5.Ref.645599, 2015. Soft-bodied intelligence for Manipulation. (SoMa). *SoMa*. Available at: http://cordis.europa.eu/project/rcn/194335_en.html [Accessed January 13, 2016].

- Fischer, I.H. et al., 2009. Citrus postharvest diseases and injuries related to impact on packing lines. *Scientia Agricola*, 66(2), pp.210–217.
- Flood, S. et al., 2005. Engineering and horticultural aspects of robotic fruit harvesting: Opportunities and constraints. *HortTechnology*, 15(1), p.79.
- Foglia, M.M. & Reina, G., 2006. Agricultural robot for radicchio harvesting. *Journal of Field Robotics*, 23(6-7), pp.363–377.
- FoodDrinkEurope, 2014. Data & Trends of the European Food and Drink Industry 2013-2014. , 2015(9/21). Available at: http://www.fooddrinkeurope.eu/uploads/publications_documents/Data_Trends_of_the_European_Food_and_Drink_Industry_2013-2014.pdf [Accessed January 13, 2016].
- García-Ramos, F.J. et al., 2005. Non-destructive fruit firmness sensors: a review. *Spanish journal of agricultural research*, 3(1), pp.61–73.
- García-Ramos, F.J., Ortiz-Cañavate, J. & Ruiz-Altisent, M., 2004. Evaluation and correction of the mechanical aggressiveness of commercial sizers used in stone fruit packing lines. *Journal of Food Engineering*, 63(2), pp.171–176.
- Genecov, A.M., Stanley, A.A. & Okamura, A.M., 2014. Perception of a Haptic Jamming display: Just noticeable differences in stiffness and geometry. In *Haptics Symposium (HAPTICS), 2014 IEEE*. IEEE, pp. 333–338.
- Giannaccini, M.E. et al., 2014. A variable compliance, soft gripper. *Autonomous robots*, 36(1-2), pp.93–107.
- Girao, P. et al., 2013a. Tactile sensors for robotic applications. *Measurement*, 46(3), pp.1257–1271.
- Girao, P. et al., 2013b. Tactile sensors for robotic applications. *Measurement*, 46(3), pp.1257–1271.
- Gosselin, C., Pelletier, F. & Laliberte, T., 2008. An anthropomorphic underactuated robotic hand with 15 Dofs and a single actuator. In *IEEE . IEEE International Conference on Robotics and Automation. ICRA 2008*, pp. 749–754.
- Grunert, K.G., 2005. Food quality and safety: consumer perception and demand. *European Review of Agricultural Economics*, 32(3), pp.369–391.
- Grzesiak, A., Becker, R. & Verl, A., 2011. The Bionic Handling Assistant: a success story of additive manufacturing. *Assembly Automation*, 31(4), pp.329–333.
- Van Ham, R. et al., 2009. Compliant Actuator Designs Review of Actuators with Passive Adjustable Compliance/Controllable Stiffness for Robotic Applications. *Ieee Robotics & Automation Magazine*, 16(3), pp.81–94.
- Hasegawa, Y. et al., 2006. An active tactile sensor for detecting mechanical characteristics of contacted objects. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 16(8), pp.1625–1632.

- Hayashi, S. et al., 2010. Evaluation of a strawberry-harvesting robot in a field test. *Biosystems Engineering*, 105(2), pp.160–171.
- Hayashi, S. et al., 2002. Robotic harvesting system for eggplants. *Japan Agricultural Research Quarterly*, 36(3), pp.163–168.
- Van Henten, E.J. et al., 2003. Field test of an autonomous cucumber picking robot. *Biosystems Engineering*, 86(3), pp.305–313.
- Hirose, S. & Umetani, Y., 1978. The development of soft gripper for the versatile robot hand. *Mechanism and machine theory*, 13(3), pp.351–359.
- Holmes, J.F., 2010. Guidelines for designing washdown robots for meat packaging applications. *Trends in food science technology*, 21(3), p.158.
- Homer, I., Ortiz Canavate, J. & Ruiz Altisent, M., 2010. Evaluation of a Non-Destructive Impact Sensor to Determine on-Line Fruit Firmness. *Chilean journal of agricultural research*, 70(1), pp.67–74.
- Hoshi, T. & Shinoda, H., 2007. Free-form tactile sensor using 3-dimensional shape capture sheet. In *EuroHaptics Conference, 2007 and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems. World Haptics 2007. Second Joint. IEEE*, pp. 403–408.
- Howe, R., Dollae, A. & Claffee, M., 2014. Robots Get a Grip. *IEEE Spectrum*, 51(12), pp.42–47.
- Howell, L.L., Magleby, S.P. & Olsen, B.M., 2013. *Handbook of compliant mechanisms*, John Wiley & Sons.
- Ilievski, F. et al., 2011. Soft robotics for chemists. *Angewandte Chemie*, 123(8), pp.1930–1935.
- Jaeger, H., 2014. Celebrating Soft Matter’s 10th Anniversary: Toward jamming by design. *Soft matter*, 11(1), pp.12–27.
- Jentoft, L.P. et al., 2014. Intrinsic Embedded Sensors for Polymeric Mechatronics: Flexure and Force Sensing. *Sensors*, 14(3), pp.3861–3870.
- Jiang, A. et al., 2012. Design of a variable stiffness flexible manipulator with composite granular jamming and membrane coupling. In *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2012 IEEE/RSJ International Conference on. IEEE*, pp. 2922–2927.
- Jiang, A. et al., 2013. Granular jamming transitions for a robotic mechanism. In *Powders and Grains 2013: Proceedings of the 7th International Conference on Micromechanics of Granular Media*. AIP Publishing, pp. 385–388.
- Jiang, A. et al., 2014. Robotic Granular Jamming: Does the Membrane Matter? *Soft Robotics*, 1(3), pp.192–201.
- Jiang, Y. et al., 2012. Learning hardware agnostic grasps for a universal jamming gripper. In *Robotics and Automation (ICRA), 2012 IEEE International Conference on. IEEE*,

- pp. 2385–2391.
- Jimenez, A.R., 1997. Featureless classification of tactile contacts in a gripper using neural networks. *Sensors and actuators.A, Physical*, 62(1-3), pp.488–491.
- Kader, A.A., 2001. Quality assurance of harvested horticultural perishables R. P. BenArie S., ed. *ACTA HORTICULTURAE*, (553), pp.51–55.
- Kader, A.A. & Rolle, R.S., 2004. *The role of post-harvest management in assuring the quality and safety of horticultural produce*, FAO.
- Kaneko, M. et al., 2003. The 100 G capturing robot - too fast to see. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 8(1), pp.37–44.
- Kaneko, M. & Higashimori, M., 2013. Where Future Robots Should Go and Should Not Go. In *2013 IEEE International Conference on Mechatronics (ICM)*. Mechatronics (ICM), 2013 IEEE International Conference on.
- Kim, Y.-J. et al., 2013. A novel layer jamming mechanism with tunable stiffness capability for minimally invasive surgery. *Robotics, IEEE Transactions on*, 29(4), pp.1031–1042.
- Kimoto, A. & Matsue, Y., 2011. A New Multifunctional Tactile Sensor for Detection of Material Hardness. *IEEE transactions on instrumentation and measurement*, 60(4), pp.1334–1339.
- Kondo, N., 2010. Automation on fruit and vegetable grading system and food traceability. *Trends in Food Science & Technology*, 21(3), pp.145–152.
- Kordi, M.T., Husing, M. & Corves, B., 2007. Development of a multifunctional robot end-effector system for automated manufacture of textile preforms. In *Advanced intelligent mechatronics, IEEE/ASME international conference on*. New York: IEEE/ASME International Conference On Advanced Intelligent Mechatronics, pp. 725–730.
- Kragten, G. & Herder, J., 2010. The ability of underactuated hands to grasp and hold objects. *Mechanism and machine theory*, 45(3), pp.408–425.
- Kupferman, E., 2007. Non-destructive firmness instrument testing: Apples and pears. *Postharvest Information Network. Washington State University-Tree Fruit Research and Extension Center*, pp.1–19. Available at: <http://postharvest.tfrec.wsu.edu/EMK2007B.pdf>.
- Kusuda, Y., 2011. Robots at FOOMA Japan: a food machinery and technology exhibition. *Industrial Robot: An International Journal*, 38(6), pp.572–576.
- Kusuda, Y., 2010. The use of robots in the Japanese food industry. *Industrial Robot*, 37(6), pp.503–508.
- Laliberte, T. & Gosselin, C.M., 1998. Simulation and design of underactuated mechanical hands. *Mechanism and Machine Theory*, 33(1-2), pp.39–57.

- Lanni, C. et al., 2009. An optimum design algorithm for mechanisms in two-finger grippers. In *WSEAS International Conference. Proceedings. Mathematics and Computers in Science and Engineering*. WSEAS, pp. 63–70.
- Larouche, L.-A. & Birglen, L., 2013. Assisted design of linkage-driven adaptive soft fingers. *Industrial Robot*, 40(4), pp.337–346.
- Laurent, G.J., Delettre, A. & Fort-Piat, L., 2011. A New Aerodynamic-Traction Principle for Handling Products on an Air Cushion. *Robotics, IEEE Transactions on*, 27(2), pp.379–384.
- Lee, M., 2000. Tactile sensing: New directions, new challenges. *The international journal of robotics research*, 19(7), pp.636–643.
- Lee, M.H., 1999. Review Tactile sensing for mechatronics - a state of the art survGuardarey. *Mechatronics*, 9(1), pp.1–31.
- Li, M. et al., 2014. Multi-fingered haptic palpation utilizing granular jamming stiffness feedback actuators. *Smart Materials and Structures*, 23(9), pp.1–11.
- Li, X. & Kagawa, T., 2013. Development of a new noncontact gripper using swirl vanes. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 29(1), pp.63–70. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0736584512000865>.
- Lien, C.C., Ay, C. & Ting, C.H., 2009. Non-destructive impact test for assessment of tomato maturity. *Journal of Food Engineering*, 91(3), pp.402–407.
- Lien, T.K., 2008. A novel gripper for limp materials based on lateral Coanda ejectors. *CIRP annals*, 57(1), p.33.
- Lipson, H., 2013. Challenges and Opportunities for Design, Simulation, and Fabrication of Soft Robots. *Soft Robotics*, 1(1), pp.21–27.
- Lotti, F. & Vassura, G., 2002. A novel approach to mechanical design of articulated fingers for robotic hands. In *Intelligent Robots and Systems, 2002. IEEE/RSJ International Conference on*. IEEE, pp. 1687–1692.
- Lowe, R.J., Chappell, P.H. & Ahmad, S.A., 2010. Using accelerometers to analyse slip for prosthetic application. *Measurement science technology*, 21(3), p.35203.
- Lynch, K.M. & Mason, M.T., 1999. Dynamic nonprehensile manipulation: Controllability, planning, and experiments. *The International Journal of Robotics Research*, 18(1), pp.64–92.
- Ma, W., Xu, L. & Yu, H., 2010. Structural Optimization of Non-contact Vortex Negative Pressure Carrier. *Advanced materials research*, 97-101, pp.3219–3224.
- Magness, J.R. & Taylor, G.F., 1925. Improved type of pressure tester for the determination of fruit maturity. *U.S. Dep. Agric. Circ. No. 350*.
- Mantriota, G., 2007a. Optimal grasp of vacuum grippers with multiple suction cups. *Mechanism and machine theory*, 42(1), pp.18–33.

- Mantriota, G., 2007b. Theoretical model of the grasp with vacuum gripper. *Mechanism and machine theory*, 42(1), pp.2–17.
- Maruyama, R., Watanabe, T. & Uchida, M., 2013. Delicate grasping by robotic gripper with incompressible fluid-based deformable fingertips. In *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2013 IEEE/RSJ International Conference on*. IEEE, pp. 5469–5474.
- Masey, R.J.M., 2010. Guidelines for the design of low-cost robots for the food industry. *Industrial Robot*, 37(6), pp.509–517.
- Masey, R.J.M. & Caldwell, D.G., 2007. Design of an Automated Handling System for Limp, Flexible Sheet Lasagna Pasta. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. pp. 1226–1231.
- Mason, M.T., 1999. Progress in nonprehensile manipulation. *The International Journal of Robotics Research*, 18(11), pp.1129–1141.
- Matsuno, T. et al., 2006. Strategy of Picking Up Thin Plate by Robot Hand Using Deformation of Soft Fingertip. In *Robotics and Automation, 2005. ICRA 2005. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on*. IEEE, pp. 2326–2331.
- Mazzolai, B. et al., 2012. Soft-robotic arm inspired by the octopus: II. From artificial requirements to innovative technological solutions. *Bioinspiration biomimetics*, 7(2), p.25005.
- Meijneke, C., Kragten, G.A. & Wisse, M., 2011. Design and performance assessment of an underactuated hand for industrial applications. *Mechanical Science*, 2, pp.9–15.
- Monkman, G., 2003. Electroadhesive microgrippers. *Industrial Robot*, 30(4), pp.326–330.
- Monkman, G.J. et al., 2007. *Robot grippers*, Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co.
- Monta, M., Kondo, N., Ting, K.C., et al., 1998. Harvesting end-effector for inverted single truss tomato production systems. *Journal Japanese Society of Agricultural Machinery*, 60, pp.97–104.
- Monta, M., Kondo, N. & Ting, K.C., 1998. End-effectors for tomato harvesting robot. *Artificial Intelligence Review*, 12(1), pp.11–25.
- Morales, R. et al., 2014. Soft Robotic Manipulation of Onions and Artichokes in the Food Industry. *Advances in Mechanical Engineering*, pp.345291–345291.
- Morin, S.A. et al., 2014. Using “Click-e-Bricks” to Make 3D Elastomeric Structures. *Advanced Materials*, 26(34), pp.5991–5999.
- Mosadegh, B. et al., 2014. Pneumatic Networks for Soft Robotics that Actuate Rapidly. *Advanced Functional Materials*, 24(15), pp.2163–2170.
- Murayama, Y. et al., 2008. Development of a new instrument for examination of stiffness in the breast using haptic sensor technology. *Sensors and actuators.A, Physical*, 143(2), pp.430–438.
- Naghdy, F. & Esmaili, M., 1996. Soft Fruit Grading using a Robotics Gripper. 164

International Journal of Robotics and Automation, 11, pp.93–101.

- Nicolai, B.M. et al., 2007. Nondestructive measurement of fruit and vegetable quality by means of NIR spectroscopy: A review. *Postharvest Biology and Technology*, 46(2), pp.99–118.
- Nielsen, S.A. & Dancu, A., 2014. Embodied computation in soft gripper. In *Proceedings of the 2014 ACM/IEEE international conference on Human-robot interaction*. ACM, pp. 256–257.
- Nishida, T. et al., 2014. Development of universal jamming gripper with a force feedback mechanism. In *Soft Computing and Intelligent Systems (SCIS), 2014 Joint 7th International Conference on and Advanced Intelligent Systems (ISIS), 15th International Symposium on*. IEEE, pp. 242–246.
- NSF-1226883, 2012. NRI-Large: Collaborative Research: Soft Compliant Robotic Augmentation for Human-Robot Teams. Available at: http://www.nsf.gov/awardsearch/showAward?AWD_ID=1226883&HistoricalAwards=false [Accessed January 13, 2016].
- Odhner, L. et al., 2014. A compliant, underactuated hand for robust manipulation. *The international journal of robotics research*, 33(5), pp.736–752.
- Okatani, Y., Nishida, T. & Tadakuma, K., 2014. Development of universal robot gripper using MR α fluid. In *Soft Computing and Intelligent Systems (SCIS), 2014 Joint 7th International Conference on and Advanced Intelligent Systems (ISIS), 15th International Symposium on*. IEEE, pp. 231–235.
- Omata, S., Murayama, Y. & Constantinou, C.E., 2004. Real time robotic tactile sensor system for the determination of the physical properties of biomaterials. *Sensors and actuators.A, Physical*, 112(2-3), pp.278–285.
- Padda, M. et al., 2011. Methods to analyze physico-chemical changes during mango ripening: A multivariate approach. *Postharvest Biology and Technology*, 62(3), pp.267–274.
- Peng, P., Rajamani, R. & Erdman, A., 2009. Flexible Tactile Sensor for Tissue Elasticity Measurements. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 18(6), pp.1226–1233.
- Penisi, O.H., Ceccarelli, M. & Carbone, G., 2003. Clasificación de mecanismos en pinzas industriales de dos dedos. *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica*, 7(1), pp.59–75.
- Petchartee, S. & Monkman, G., 2008. Optimisation of prehension force through tactile sensing. *Industrial Robot: An International Journal*, 35(4), pp.361–368.
- Petkovic, D. et al., 2012. Passively Adaptive Compliant Gripper. *Mechanisms, Mechanical Transmissions and Robotics*, 162, pp.316–325.
- Petkovic, D. et al., 2013. Sensor elements made of conductive silicone rubber for passively compliant gripper. *The international journal of advanced manufacturing technology*,

- 69(5-8), pp.1527–1536.
- Petterson, A. et al., 2010. A Bernoulli principle gripper for handling of planar and 3D (food) products. *Industrial Robot*, 37(6), pp.518–526.
- Pham, D.T. & Yeo, S.H., 1991. Strategies for gripper design and selection in robotic assembly. *International Journal of Production Research*, 29(2), pp.303–316.
- Polygerinos, P. et al., 2015. Soft robotic glove for combined assistance and at-home rehabilitation. *Robotics and Autonomous Systems*, 73, pp.135–143. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921889014001729>.
- Prahlad, H. et al., 2008. Electroadhesive robots-wall climbing robots enabled by a novel, robust, and electrically controllable adhesion technology. *2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vols 1-9*, pp.3028–3033.
- Prahlad, H.E. et al., 2012. Electroadhesive gripping. *Patent US8325458 B2*.
- Ragni, L., Berardinelli, A. & Guarnieri, A., 2010. Impact device for measuring the flesh firmness of kiwifruits. *Journal of Food Engineering*, 96(4), pp.591–597.
- Rawal, B.R., Pare, V. & Tripathi, K., 2008. Development of noncontact end effector for handling of bakery products. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 38(5), pp.524–528.
- Reitelshöfer, S. et al., 2014. Combining a collaborative robot and a lightweight Jamming-Gripper to realize an intuitively to use and flexible co-worker. In *System Integration (SII), 2014 IEEE/SICE International Symposium on*. IEEE, pp. 1–5.
- Roa, M.A. & Suárez, R., 2015. Grasp quality measures: review and performance. *Autonomous robots*, 38(1), pp.65–88.
- Rossi, C. & Savino, S., 2014. An Underactuated Multi-finger Grasping Device. *International journal of advanced robotic systems*, 11, pp.1–12.
- Rovira-Más, F., Zhang, Q. & Reid, J.F., 2008. Stereo vision three-dimensional terrain maps for precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 60(2), pp.133–143. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016816990700172X> [Accessed February 25, 2016].
- Ruiz-Altisent, M. et al., 2010. Sensors for product characterization and quality of specialty crops--A review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 74(2), pp.176–194.
- Rus, D. & Tolley, M.T., 2015. Design, fabrication and control of soft robots. *Nature*, 521(7553), pp.467–475.
- Saadat, M. & Nan, P., 2002. Industrial applications of automatic manipulation of flexible materials. *Industrial Robot: An International Journal*, 29(5), pp.434–442.
- Sam, R. & Nefti, S., 2010. Design and feasibility tests of flexible gripper for handling variable shape of food products. In *Proceedings of the 9th WSEAS international*

- conference on Signal processing, robotics and automation*. World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS), pp. 329–335.
- Sangbae, K., Laschi, C. & Barry, T., 2013. Soft robotics: a bioinspired evolution in robotics. *Trends in biotechnology*, 31(5), pp.287–294.
- Sarig, Y., 2005. Mechanized Fruit Harvesting - Site Specific Solutions. In I. and T. for S. F. and V. P. F. 05, ed. Montperllier (France), pp. 237–246. Available at: <http://www.symposcience.net/exl-doc/colloque/ART-00001645.pdf>.
- Schmidt, P., Mael, E. & Wuertz, R., 2006. A sensor for dynamic tactile information with applications in human-robot interaction and object exploration. *Robotics and autonomous systems*, 54(12), pp.1005–1014.
- Sdahl, M. & Kuhlenkoetter, B., 2005. CAGD-computer aided gripper design for a flexible gripping system. *International journal of advanced robotic systems*, 2(2), pp.135–138.
- Seliger, G. & Stephan, J., 1998. Flexible garment handling with adaptive control strategies. In *International symposium on robotics*. pp. 483–487.
- Seliger, G., Stephan, J. & Lange, S., 2000. Non-rigid part handling by new gripping device. In *Proceedings of ICME*. Institute for Machine Tools and Factory Management, Technical University Berlin, Germany: Proceedings of ICME, pp. 1–8.
- Setiawan, A.I., Furukawa, T. & Preston, A., 2004. A low-cost gripper for an apple picking robot. In *Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA'04. 2004 IEEE International Conference on*. IEEE, pp. 4448–4453.
- Shikida, M. et al., 2003. Active tactile sensor for detecting contact force and hardness of an object. *Sensors and actuators.A, Physical*, 103(1-2), pp.213–218.
- Shimoga, K.B. & Goldenberg, A.A., 1992. Soft materials for robotic fingers. In *Robotics and Automation, 1992. Proceedings., 1992 IEEE International Conference on*. IEEE, pp. 1300–1305 vol. 2.
- Sinapov, J. et al., 2011. Vibrotactile Recognition and Categorization of Surfaces by a Humanoid Robot. *IEEE transactions on robotics*, 27(3), pp.488–497.
- Spencer, B.F. et al., 1997. Phenomenological model for magnetorheological dampers. *Journal of Engineering Mechanics*, 123(3), pp.230–238.
- Stephan, J. & Seliger, G., 1999. Handling with ice—the cryo-gripper, a new approach. *Assembly Automation*, 19(4), pp.332–337.
- Stokes, A.A. et al., 2013. A Hybrid Combining Hard and Soft Robots. *Soft Robotics*, 1(1), pp.70–74.
- Stone, R.S.W. & Brett, P.N., 1995. A flexible pneumatic actuator for gripping soft irregular shaped objects. In *Innovative Actuators for Mechatronic Systems, IEE Colloquium on*. IET, p. 13.

- Tagliamonte, N.L. et al., 2012. Double actuation architectures for rendering variable impedance in compliant robots: A review. *Mechatronics*, 22(8), pp.1187–1203. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957415812001493>.
- Talens, P. et al., 2013. Prediction of water and protein contents and quality classification of Spanish cooked ham using NIR hyperspectral imaging. *Journal of Food Engineering*, 117(3), pp.272–280.
- Tallian, R. & Weinstein, M., 1998. Flexible automation solutions for today's bakeries. *Industrial Robot*, 25(1), p.20.
- Tegin, J., 2005. Tactile sensing in intelligent robotic manipulation—a review. *Industrial Robot*, 32(1), pp.64–70.
- Tillet, N., 1995. Robots and food - Low margins need different solutions. *Industrial Robot*, 22(5), pp.15–17.
- Todd, E.C.D. et al., 2010. Outbreaks where food workers have been implicated in the spread of foodborne disease. Part 9. Washing and drying of hands to reduce microbial contamination. *Journal of Food Protection*®, 73(10), pp.1937–1955.
- Trivedi, D. et al., 2008. Soft robotics: Biological inspiration, state of the art, and future research. *Applied Bionics and Biomechanics*, 5(3), pp.99–117.
- Valero, C., Crisosto, C.H. & Slaughter, D., 2007. Relationship between nondestructive firmness measurements and commercially important ripening fruit stages for peaches, nectarines and plums. *Postharvest Biology and Technology*, 44(3), pp.248–253.
- Vandaele, V., 2005. Non-contact handling in microassembly: Acoustical levitation. *Precision Engineering*, 29(4), pp.491–505.
- Vanderborght, B. et al., 2013. Variable impedance actuators: A review. *Robotics and Autonomous Systems*, 61(12), pp.1601–1614.
- Velez-Rivera, N. et al., 2014. Computer Vision System Applied to Classification of “Manila” Mangoes During Ripening Process. *Food and Bioprocess Technology*, 7(4), pp.1183–1194.
- Vermeulen, M.M.A. & Wisse, M., 2008. Maximum allowable manipulator mass based on cycle time, impact safety and pinching safety. *Industrial Robot: An International Journal*, 35(5), pp.410–420.
- Vose, T.H., Umbanhowar, P. & Lynch, K.M., 2009. Friction-induced velocity fields for point parts sliding on a rigid oscillated plate. *The International Journal of Robotics Research*, 28(8), pp.1020–1039.
- Vursavus, K.K. et al., 2014. Non-Destructive Impact Device for Measuring the Flesh Firmness of Peaches. *Philippine Agricultural Scientist*, 97(4), pp.391–398.
- Wagner, M. et al., 2008. A Novel Wall Climbing Robot Based on Bernoulli Effect. *IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications*, pp.210–215.

- Walker, D.S., Thoma, D.J. & Niemeyer, G., 2009. Variable impedance magnetorheological clutch actuator and telerobotic implementation. In *Intelligent Robots and Systems, 2009. IROS 2009. IEEE/RSJ International Conference on*. IEEE, pp. 2885–2891.
- Wall, V., Deimel, R. & Brock, O., 2015. Selective Stiffening of Soft Actuators Based on Jamming. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. Seattle, pp. 252–257. Available at: http://www.robotics.tu-berlin.de/fileadmin/fg170/Publikationen_pdf/ICRA15_0055_FI.pdf.
- Wallin, P.J., 1997. Robotics in the food industry: An update. *Trends in Food Science & Technology*, 8(6), pp.193–198.
- Wierzbicki, R. et al., 2007. Electrostatic Silicon Microgripper with Low Voltage of Actuation. *2007 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science*, pp.344–349.
- Wilson, M., 2010. Developments in robot applications for food manufacturing. *Industrial Robot*, 37(6), pp.498–502.
- Wu, L.C., Carbone, G. & Ceccarelli, M., 2009. Designing an underactuated mechanism for a 1 active DOF finger operation. *Mechanism and Machine Theory*, 44(2), pp.336–348.
- Wurdemann, H. et al., 2011. Category-based food ordering processes. *Trends in food science technology*, 22(1), pp.14–20.
- Wurdemann, H. et al., 2009. Intrinsic relation between categorisation of food products and processes. In *Reconfigurable Mechanisms and Robots, 2009. ReMAR 2009. ASME/IFTOMM International Conference on*. IEEE, pp. 725–729.
- Xu, K. & Simaan, N., 2008. An investigation of the intrinsic force sensing capabilities of continuum robots. *IEEE transactions on robotics*, 24(3), pp.576–587.
- Yang, D. et al., 2009. An Anthropomorphic Robot Hand Developed Based on Underactuated Mechanism and Controlled by EMG Signals. *Journal of Bionic Engineering*, 6(3), pp.255–263.
- Yao, L. et al., 2013. PneuUI: Pneumatically actuated soft composite materials for shape changing interfaces. In *Proceedings of the 26th annual ACM symposium on User interface software and technology*. ACM, pp. 13–22.
- Yin, L. & Ananthasuresh, G.K., 2003. Design of distributed compliant mechanisms. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 31(2), pp.151–179.
- Yoshioka, T. et al., 2007. Texture perception through direct and indirect touch: an analysis of perceptual space for tactile textures in two modes of exploration. *Somatosensory motor research*, 24(1-2), pp.53–70.
- Yousef, H., Boukallel, M. & Althoefer, K., 2011. Tactile sensing for dexterous in-hand manipulation in robotics-A review. *Sensors and actuators.A, Physical*, 167(2), pp.171–187.

- Zaki, A.M. et al., 2010. Design and implementation of efficient intelligent robotic gripper. In *Modelling, Identification and Control (ICMIC), The 2010 International Conference on*. IEEE, pp. 710–716.
- Van Zeebroeck, M., 2007. The effect of fruit factors on the bruise susceptibility of apples. *Postharvest Biology and Technology*, 46(1), pp.10–19.
- Zhang, W. et al., 2009. Super under-actuated multi-fingered mechanical hand with modular self-adaptive gear-rack mechanism. *Industrial Robot: An International Journal*, 36(3), pp.255–262.
- Zheng, H. & Shen, X., 2013. Double-Acting Sleeve Muscle Actuator for Bio-Robotic Systems. *Actuators*, 2(4), pp.129–144.
- Zhi Guo, L. et al., 2009. Study on the collision-mechanical properties of tomatoes gripped by harvesting robot fingers. *African journal of biotechnology*, 8(24), pp.7000–7007.
- Zhong, Z.W. & Yeong, C.K., 2006. Development of a gripper using SMA wire. *Sensors and Actuators A: Physical*, 126(2), pp.375–381.
- Zhou, D. et al., 2007. Design of a fresh meat packing robot for working in washdown environment. , pp.452–457.
- Zhu, T. et al., 2007. Principle and application of vibrating suction method. In *Robotics and Biomimetics, 2006. ROBIO'06. IEEE International Conference on*. IEEE, pp. 491–495.