

Universidad de Costa Rica
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería de Biosistemas

“Diseño de un dispositivo electrónico para medir el daño mecánico en melón (*Cucumis melo* v.b reticulatos) haciendo uso de tecnologías de código abierto”

Trabajo Final de Graduación presentado ante la Escuela de Ingeniería de Biosistemas como requisito para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Agrícola.

Hugo Mora Fallas

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

San José, Costa Rica

Diciembre, 2017

Agradecimientos

Quiero brindar un profundo agradecimiento a mi familia que a lo largo de mi época universitaria me ha apoyado incondicionalmente y siempre alentándome a superarme como estudiante.

Al cuerpo director de mi tesis por el apoyo, la paciencia y el tiempo dedicado para que este proyecto llegara a suceder.

Al señor Andrés Rodríguez por su amable recepción, atención y disponibilidad a colaborar con el desarrollo de esta idea.

Resumen

La demanda de productos agrícolas frescos, en específico frutas, incrementan continuamente para suplir las necesidades por parte del consumidor. Es imperativo maximizar la producción e innovar en un mercado cada vez más competitivo; sin embargo, el acceso a la tecnología que permite disminuir los índices de pérdidas es costoso y de difícil acceso económico para el agricultor. Parte de las pérdidas en el producto ocurren por daños mecánicos en los procesos de trasiego, líneas de empaque y exportación. Los daños en los productos frescos se hacen evidentes conforme el producto avanza en su estado de madurez, en algunos casos dependiendo del proceso, hasta 30 días pueden pasar para que sean perceptibles.

Las tecnologías de código abierto facilitan el acceso al desarrollo de herramientas ya que son de bajo costo y permiten la colaboración en la innovación de mejores tecnologías. Estas tecnologías incluyen impresoras en 3D, programas y controladores electrónicos de libre uso.

En el presente estudio se desarrolla un dispositivo electrónico programable basado en un modelo de melón Cantaloupe, impreso con tecnología 3D y con la capacidad de registrar impactos en fruta. Se utilizan elementos electrónicos para procesar los datos captados por un acelerómetro y registrarlos en una memoria SD. Se utiliza la prueba estándar del sistema de péndulo para corroborar el registro constante y generar la secuencia de parámetros de datos de impacto.

Los daños en los melones responden a alturas equivalentes de impacto con valores de aceleración, los cuales la herramienta utiliza para correlacionar las lecturas e indicar la equivalencia del daño. Las mismas pruebas a las cuales se somete la herramienta se utilizaron para someter melones reales y generar la correlación física de los daños. En la sección experimental, el producto con daño es evaluado durante 30 días, simulando un proceso de exportación.

El diseño, dada su naturaleza de enfoque en el uso de tecnologías libres, es un prototipo que reduce el costo capital de las herramientas disponibles en el mercado, y como prototipo muestra una serie de mejoras para su posterior uso en una planta de proceso y en procesos de transporte, así como un núcleo base para futuros proyectos. Los resultados muestran que la herramienta permite registrar impactos que generan riesgos en el producto durante el proceso de exportación. La correlación de aceleraciones entre la herramienta y los melones permitió determinar que a partir de los 36,04 G registrados con la herramienta, los melones se exponen a riesgo de daños como fracturas y gelatinización de pulpa. Si en una línea de proceso, acondicionamiento de la fruta o proceso de transporte, se registra este valor con la herramienta, se genera un daño que impide la comercialización a los 30 días de ocurrido el impacto.

Índice General

Agradecimientos	ii
Resumen.....	iii
Índice de Figuras.....	vii
Índice de Cuadros	viii
Introducción	10
I. Objetivo general.....	14
II. Objetivos específicos.....	14
Capítulo 1: Marco Teórico.....	15
1.1 Calidad de los Productos Agrícolas	15
1.1.1 Propiedades físicas de los productos agrícolas.....	15
1.1.2 Daño mecánico.....	16
1.1.3 Reología.....	20
1.2 Metodologías de medición de impactos.....	24
1.2.1 Pruebas de impacto en materiales.....	24
1.2.2 Métodos de medición de daño	31
1.2.3 Métodos Destructivos	32
1.2.4 Pruebas no destructivas.....	32
1.3 Generalidades del <i>Cucumis melo</i>	34
Capítulo 2: Metodología.....	38
2.1 Desarrollo de modelo representativo del melón.....	38
2.2 Selección de los elementos electrónicos del dispositivo electrónico.....	39
2.3 Programación y registro de datos en la herramienta	40
2.4 Pruebas de medición de la aceleración de la herramienta durante un impacto.....	42
2.5 Diseño experimental de las pruebas con melones reales.....	42
2.6 Procedimiento para evaluar daños físicos y firmeza en las pruebas con melón	46
2.7 Cálculo de la aceleración de los melones durante el impacto.....	48
Capítulo 3: Resultados	51
3.1 Diseño de la herramienta.....	51

3.1.1	Desarrollo del modelo representativo del melón	51
3.1.2	Programación y registro de la herramienta	55
3.1.3	Registro de la aceleración de objetos	57
3.2	Resultados experimentales de las pruebas con melones	58
3.2.1	Determinación de la aceleración final del golpe del melón.....	58
3.2.2	Resultados en la evolución de daños físicos y firmeza en los melones.....	60
3.2.3	Registro de temperatura y humedad relativa durante el almacenamiento del producto.....	64
3.3	Resultados de la herramienta para registrar impactos.....	64
3.3.1	Adquisición de datos de la herramienta.....	65
3.3.2	Establecimiento de bandas de aceleración equivalentes para la calibración de la herramienta.....	66
	Conclusiones.....	71
	Recomendaciones	73
	Bibliografía	75
	Anexo I.....	79
	Anexo II	81
	Anexo III.....	82
	Anexo IV.....	83

Índice de Figuras

Figura 1.1. Curva esfuerzo-deformación para materiales (Beer et al., 2010).....	23
Figura 1.2. Curvas de deformación a través del tiempo para el mismo impacto con 3 respuestas según el material(Mohsenin, 1986).....	26
Figura 1.3. Descripción visual de un impacto de un producto agrícola (Mohsenin, 1986)..	26
Figura 1.4. Diagrama de pruebas que se realizan para evaluar el efecto de los impactos (Mohsenin, 1986).....	27
Figura 1.5. Respiración celular y producción de etileno del melón (Suslow & Cantwell, 2016).	35
Figura 2. 1 Copia de salida del software Cube 3D y visualización de una de las piezas de la esfera diseñada.	39
Figura 2.2 Esquema de lógica de programación.....	41
Figura 2. 3 Pila de recibo de melón en la planta de empaque.....	43
Figura 2. 4 Sistema de amortiguamiento para el traslado.	43
Figura 2. 5. Cobertura de sarán.....	43
Figura 2. 6 Sistema de péndulo.....	44
Figura 2. 7 Ángulos del sistema de péndulo.....	45
Figura 2. 8 Corte de la fruta.....	47
Figura 2. 9. Lugares de medición firmeza (en un círculo se muestra la zona en dónde se golpeó la fruta).....	47
Figura 3. 1. Diseño virtual de los componentes electrónicos (vista 1).....	51
Figura 3. 2 Diseño virtual de los componentes electrónicos (vista 2).....	51
Figura 3. 3 Hemisferio 1, con base para ajuste de los elementos electrónicos.....	52
Figura 3. 4 Ajuste de placa de controlador dentro del Hemisferio 1.....	52

Figura 3. 5 Hemisferio 2.....	53
Figura 3. 6 Hemisferio con la placa del controlador.....	53
Figura 3. 7 Unión de ambos hemisferios.....	53
Figura 3. 8 Corte interno en dónde se muestra el encaje de los componentes electrónicos .53	
Figura 3. 9 Diseño impreso de la carcasa de uno de los hemisferios.....	54
Figura 3. 10. Diagrama eléctrico de los componentes eléctricos de la herramienta.....	54
Figura 3. 11. Segmento de código de lectura de sensor de aceleración.....	55
Figura 3. 12. Fragmento de código de registro de información.....	56
Figura 3. 13 Fragmento de código bucle principal.....	56
Figura 3. 14 Registro de aceleración, 350Hz vs 80Hz.....	58
Figura 3. 15 Aceleración del impacto de los melones en el sistema de péndulo.....	59
Figura 3. 16 Firmeza zona sin golpe vs firmeza zona con golpe.....	61
Figura 3. 17 Pérdida de masa de los melones durante el experimento.....	62
Figura 3. 18 Apariencia de los melones sometidos a golpes durante el almacenamiento ...	63
Figura 3. 19 Registro de temperatura y humedad relativa (%).....	64
Figura 3. 20 Aceleración registrada por la herramienta según alturas de impacto.....	65
Figura 3. 21 Correlación de valores de aceleración de la herramienta y los melones reales	68
Figura 3. 22 Sensibilidad de la herramienta.....	69

Índice de Cuadros

Cuadro 1.1. Masa de cada uno de los calibres comerciales de melón (Picón, 1997)	36
Cuadro 2.1 Constantes para la variedad de melón Cantaloupe y el bloque de concreto	49

Cuadro 3.1 Promedio y desviación estándar de aceleraciones de los melones según las alturas de impacto	59
Cuadro 3.2 Promedio de valores de aceleración registrados con la herramienta.....	66
Cuadro 3.3 Rangos de bandas aceleración equivalente de la herramienta, valores máximos y mínimos	67
Cuadro 3.4 Valores de correlación entre aceleraciones de la herramienta y los melones reales	67
Cuadro I. Cálculo de aceleración de los melones	79
Cuadro II. Aceleración de la herramienta en las pruebas de impacto registrados en la herramienta desarrollada.....	81
Cuadro III. Resultados del análisis de varianza de la firmeza y pérdida de masa en los melones reales.....	82
Cuadro IV. Resumen económico de la herramienta	83

Introducción

En Costa Rica hay más de 21 productores medianos y pequeños que producen melón y que buscan innovar en su producción para mantenerse en un mercado competitivo. En el 2012, mercado del melón en Costa Rica representó un 2% del total de las exportaciones anuales, donde un 85% del melón es exportado y el 15% restante es para consumo interno. En el 2012, la Promotora de Comercio Exterior de Costa Rica (Procomer) menciona que el melón fue el quinto producto agrícola en exportaciones y generó divisas mayores a US\$65 millones (Alpizar et al., 2014). A pesar de la rentabilidad del cultivo, el área de siembra sufrió reducciones, presentando una disminución del 56% comparando las temporadas 2006-2007 y 2011-2012 (Alpizar et al., 2014). La caída del área de cultivo del melón en el año 2011 se debió principalmente a la crisis económica mundial, así como la revaluación negativa el colón costarricense frente al dólar estadounidense. Actualmente, el cultivo de melón cuenta con una extensión de siembra de 4590 hectáreas, distribuidas entre las zonas aledañas a la cuenca del Río Tempisque, la Península de Nicoya y la zona del Pacífico Central de Costa Rica.

La conservación de la calidad del melón y reducción de las pérdidas poscosecha es imperativa, con el fin de lograr un buen nivel de competitividad que permita a los productores participar viablemente en el mercado. La disponibilidad de tecnologías para disminuir las pérdidas poscosecha existe, tales como esferas de impacto y sensores infrarrojos; sin embargo, son recursos con alta inversión económica.

Según el Ministerio de Agricultura y Ganadería de Costa Rica (MAG), el mayor porcentaje de pérdida poscosecha se da durante el trasiego de fruta debido al daño mecánico. La principal razón de este problema se origina por golpes durante el transporte por carreteras, caminos en malas condiciones y en los procesos limpieza, preparación y empaque para el mercado de producto fresco, el cual no es fácilmente detectable en sitio debido a que los síntomas del daño se hacen visibles durante el almacenamiento y transporte.

La industria del cultivo del melón requiere métodos de monitoreo constante de parámetros físicos que detecten el sitio y la magnitud de la ocurrencia del daño, que sean replicables y de costo accesible para pequeños y medianos productores de fácil mantenimiento y sustitución, con el fin de disminuir las pérdidas poscosecha debidas al trasiego de la fruta. La resolución del problema se puede lograr por medio de la aplicación de tecnologías accesibles, como código libre disponible para programas de cómputo y sistemas electrónicos de desarrollador.

En la búsqueda de alternativas a los métodos tradicionales y los métodos de alta tecnología, convergen opciones tecnológicas de bajo costo para el diseño de herramientas para el estudio y minimización de daño mecánico. El concepto de Código Abierto, como lo explica “The Open Source Initiative” (Füller, Schroll, & von Hippel, 2013), ofrece un sistema de libre distribución donde el software puede ser adquirido sin costo ni discriminación de áreas de iniciativa y ofrece neutralidad tecnológica, lo cual significa que las empresas tienen libertad de escoger la tecnología que mejor se ajusta a sus necesidades y requerimientos de adquisición y desarrollo (Harhoff & Mayrhofer, 2010). El movimiento de Código Abierto inicia en 1984 cuando Richard Stallman inicia el desarrollo de un

sistema operativo gratuito, el cual desencadena una comunidad de desarrolladores dispuestos a encontrar soluciones y mejores opciones sin afán de enriquecerse (Wolfram & Torstein, 2015). La comunidad de desarrolladores de código abierto genera una revelación completa del conocimiento y colaboración que impulsa la innovación para el diseño de herramientas. (Balka, 2011) (West, 2003).

El desarrollo de software libre condujo a cuatro principios básicos sobre el uso de programas los cuales están enfocados a poder ejecutar, copiar, distribuir y mejorar el uso de los mismos; estos principios propician el desarrollo de diseños abiertos en los cuales no solo el sistema para programar es libre sino también el hardware obedece a los mismos 4 principios del software libre en la materialización de ideas, donde los usuarios digitalizan el contenido y por medio de impresoras 3D, replican los modelos.

El progreso del código abierto se vincula con el concepto de Tecnología Apropiada, el cual se enfoca en el desarrollo de tecnologías adecuadas para su uso en países en vías de desarrollo. Actualmente se han desarrollado herramientas tecnológicas como The OpenAgTM Food Server el cual genera un sistema de producción dentro de un espacio confinado, facilita el manejo poscosecha de alimentos por medio del reconocimiento infrarrojo de plantas. FREEWAT es otro ejemplo de tecnología apropiada, el cual se enfoca en el manejo en código abierto de sistemas de riego (Schelly, Anzalone, Wijnen, & Pearce, 2015). El MIT Media Lab, trabaja en ampliar el concepto de Agricultura de Código Abierto, el cual se enfoca en crear sistema de producción agrícola de alimentos con un alto compromiso innovador.

Se han desarrollado alternativas para simular las condiciones reales de una fruta, como sus características térmicas por medio de distintos tipos de contexturas de gel

(Defraeye et al., 2017) para analizar el historial de temperaturas en la cadena de frío. Existen distintos tipos de esferas o semiesferas con materiales similares a látex para estimar aceleraciones en productos como papa y cerezas (Opara & Pathare, 2014) en los cuales se entrega una herramienta que únicamente se adapta a una condición física de producto.

En este proyecto, se utilizó la tecnología de código abierto y de impresión en 3D para desarrollar un dispositivo programable como herramienta para medir el riesgo de daño mecánico en melón (cultivar Cantaloupe) a lo largo del transporte y manipulación en planta. La utilización de esta tecnología enfatiza la opción de reducir costos en los sistemas productivos y la reducción de pérdidas, mientras que la documentación de eventos, permite evaluar potenciales cambios en el proceso para disminuir el riesgo ante un posible daño mecánico.

I. Objetivo general

Desarrollar un dispositivo electrónico programable con tecnologías de código abierto para registrar el riesgo al daño mecánico durante el traslado de la fruta, basado en el cultivar de melón Cantaloupe.

II. Objetivos específicos

Para cumplir con el objetivo general de este documento, se llevarán a cabo correspondientemente 4 objetivos específicos:

- i. Desarrollar un modelo físico en 3D representativo para un melón basado en las características de la fruta del cultivar Cantaloupe para utilizarlo como un dispositivo electrónico medidor de impacto.
- ii. Seleccionar y programar un dispositivo electrónico de código abierto para la medición de la aceleración de objetos.
- iii. Calcular las aceleraciones de melones reales durante un golpe a cuatro diferentes alturas para la evaluación del riesgo al daño.
- iv. Comparar la aceleración en los melones reales con la aceleración registrada con la herramienta para su correlación con síntomas físicos y cambios en las propiedades de los melones.

Capítulo 1: Marco Teórico

1.1 Calidad de los Productos Agrícolas

1.1.1 Propiedades físicas de los productos agrícolas.

El aspecto más importante en los productos agrícolas es la calidad, en especial si se trata de producto fresco (Lucena, Ferreira, & de Sousa, 2012), las frutas que no reciben ninguna clase de impacto o enfermedad garantizan un adecuado proceso de madurez. Las características internas y externas son factores decisivos para mercados exigentes, por ello es necesario mantener el máximo control sobre lo que le ocurre al producto y asegurar procesos que no comprometan la calidad.

La forma y las dimensiones físicas de los productos agrícolas son importantes para separar el material extraño en las operaciones de clasificación y selección según las características deseadas (Stroshine, 1998). La forma y el tamaño de los productos agrícolas se determina midiendo características como la redondez y la esfericidad, esto involucra el área mayor proyectada del producto en reposo, el área del círculo circunscrito menor y los diámetros mayor y menor. En las frutas irregulares, se incorpora la medida de diámetro medio. En el caso del melón, se toma en cuenta el diámetro mayor y menor, llamados diámetro polar y diámetro ecuatorial (Picón, 1997), estudio que desarrolló un análisis sobre la resistencia del melón al daño mecánico en el proceso de empaque para exportación.

Las comparaciones visuales de cada una de las frutas se tiende a aproximar y modelar bajo objetos geométricos, por ejemplo: redondeado (aproximado a una esfera),

ovalado (forma de huevo a los extremos), elipse (diámetro vertical mayor al diámetro horizontal) (Mohsenin, 1986). La densidad y la gravedad específica de los productos agrícolas tienen aplicaciones industriales como el secado, almacenamiento, separación de materiales, manejos poscosecha, evaluación de madurez, textura (Mohsenin, 1986), además de que los productos agrícolas se comercializan por medio de la masa. El volumen se determina utilizando el desplazamiento del agua, y la densidad utilizando la masa entre el volumen. La densidad puede cambiar sustancialmente dependiendo los contenidos de agua, aceites y fibras en los materiales agrícolas (Stroshine, 1998).

El área superficial es el área total de la cáscara extendida en un plano horizontal (Stroshine, 1998), este valor se utiliza para determinar el porcentaje de área externa dañada por mal manejo poscosecha. Las técnicas bibliográficas para el análisis de daños son laboriosas, ya que involucran análisis matemáticos complejo y cuando se manejan volúmenes grandes de producto se opta por la determinación visual subjetiva del porcentaje de área dañada, esto dependiendo del criterio de un evaluador (Picón, 1997)

1.1.2 Daño mecánico

Todos los productos agrícolas frescos (frutas, hortalizas y raíces) que provienen de partes vivas de plantas contienen alrededor de 65%-95% de agua y los procesos vitales no se detienen después de su cosecha. El producto agrícola fresco luego de ser cosechado continúa en transpiración y respiración, procesos en los cuales la actividad celular es fundamental (Bovi, Caleb, Linke, Rauh, & Mahajan, 2016), y es por esto que el tiempo de vida de un producto se convierte en una carrera contra el tiempo para los productores, distribuidores y vendedores para poder mantener la calidad y reducir las pérdidas del

producto. Los factores que intervienen en la duración de un producto y a su vez en el deterioro fisiológico acelerado son: las altas temperaturas (mayor actividad de agua), las bajas humedades relativas y el daño físico (llamado daño mecánico).

El daño mecánico o las lesiones físicas son ocasionadas por un manejo inadecuado del producto agrícola fresco, en el cual produce una serie de magulladuras internas que dan espacio a un deterioro fisiológico anormal, hendiduras y grietas de la piel. Estas hendiduras o grietas aumentan rápidamente la pérdida de agua y aceleran el proceso normal de modificaciones fisiológicas, por ejemplo una única hendidura en una manzana puede generar más de 400% de incremento en su tasa de pérdida de humedad (Wilson, Boyette, & Estes, 1995) y propicia la entrada de enfermedades y fácilmente generar procesos de fermentación y propagar infecciones a productos sanos (Opara & Pathare, 2014). Estudios en frutas y vegetales estiman que alrededor de 30%-40% del producto se ve afectado por daños físicos desde que se cosechan hasta que llegan al punto de venta (Peleg & Hinga, 1986).

El daño mecánico genera también magulladuras en sitios donde la fuerza aplicada no llega a generar hendidura o grieta, una magulladura es un tipo de falla del tejido subcutáneo sin generación de ruptura en la piel del producto fresco (Mohsenin, 1986) el cual se ve manifestado en un oscurecimiento que aparece un tiempo después del evento (el tiempo depende de la magnitud y de las características propias del producto). Existen factores precosecha y poscosecha que influyen en la susceptibilidad y severidad del daño mecánico originado. Los factores precosecha son:

- a) Características estacionales: son todas aquellas que se relacionan directamente con el clima, como lo son la temperatura a la hora del crecimiento, la cantidad de horas sol y las intensidades de lluvia.
- b) Características del cultivo: tipo de suelo, cantidad de agroquímicos y cantidad de riego.
- c) Característica de crecimiento: posición del fruto durante el cultivo.

Los factores poscosecha que influyen la aparición de daños son:

- a) Fecha de cosecha: la turgencia y las características de maduración hacen que el producto sea más susceptible ya que entre mayor índice de madurez, mayor tasa de respiración. La curva climatérica genera una alza en la tasa de respiración y un abrupto incremento en la producción de etileno que acelera el proceso de maduración (Franck et al., 2007; Sousa-Gallagher, Tank, & Sousa, 2016).
- b) La duración del enfriamiento acelerado, tiempo en el cual se reduce la temperatura del producto a 4°C para el melón (Saltveit, 2011), para posteriormente ingresar a un régimen de temperatura de almacenaje.
- c) Temperatura de almacenaje: bajas temperaturas de almacenaje bajan las tasas metabólicas y los índices de deterioración de productos perecederos. Las temperaturas deben de estar por encima de las temperaturas críticas en donde aparecen los efectos del daño por frío para el melón el daño por frío aparece a partir de los 2 °C hacia menores temperaturas (Saltveit, 2011). Las temperaturas ideales de almacenamiento permiten retrasar la aparición de enfermedades y síntomas debidos a daños por golpes y magulladuras (Sousa-Gallagher et al., 2016). Se recomienda una temperatura de almacenaje para el melón de entre 2 °C y 7 °C (Saltveit, 2011).

- d) Duración del tiempo de almacenaje: el tiempo que permanezca almacenado será el reflejo del manejo poscosecha que se le haya dado al producto agrícola, es por ello que en este tiempo aparecen los daños ocasionados, entre otros factores que provocan madures y senescencia. El melón tiene un tiempo recomendado de almacenaje de entre 12-15 días entre 2,2 °C y 5 °C y a una humedad relativa de entre 85%-90% (Saltveit, 2011).

El daño mecánico que se origina en productos como tomate, manzana y duraznos según Li & Thomas (2014), se puede caracterizar en tres etapas: la etapa de daño celular, la etapa de oxidación enzimática y la etapa de oscurecimiento.

- a) Daño celular: Las fuerzas que se aplican sobre la superficie de las frutas causa daño a nivel interno, dicho daño consiste en la ruptura de la pared celular y el daño en las membranas (Mesquita & Queiroz, 2013); dado que todas las frutas tienen características diferentes en su composición química y en las estructuras internas de su pared celular, se verá alterada la manera en cómo responde cada una a las diferentes intensidades de fuerza aplicada, generando diferentes proporciones de daño (28).
- b) Oxidación enzimática: en cada una de las células dañadas se liberan sustancias fenólicas contenidas en la vacuola, encimas contenidas en las paredes celulares, membranas y citoplasma, principalmente Polifenol Oxidasa (PPO) y Peroxidasa (POD) entran en contacto directo generando daño por oxidación al entrar en contacto con el oxígeno (Billaud, Brun-Mérimée, Louarme, & Nicolas, 2004). Las sustancias fenólicas que se originan por el daño celular generarán que se propague la oxidación ya que el oxígeno desencadena la reacción enzimática y por ende la

oxidación (Franck et al., 2007). El PPO se transforma en quinonas que son polímeros de altamente reactivos de color café.

- c) Etapa de oscurecimiento: una vez que se origina la oxidación enzimática, las sustancias fenólicas se transforman en quinina; la quinina al acumularse genera una pigmentación café que usualmente se visualiza durante la etapa de almacenamiento del producto (Franck et al., 2007).

1.1.3 Reología

La reología de los alimentos estudia la relación entre el esfuerzo, la deformación y la escala de tiempo para poder entender los procesos de los productos, su estructura, puntos críticos para su deformación, su textura y la relación con las características de calidad (Agulheiro & Roseiro, 2012). Hay tres grandes regímenes que deben ser considerados para el entendimiento de la reología de los alimentos; la primera región, obedece a la ley de Hooke, en donde hay una relación lineal entre el esfuerzo y la deformación; la segunda región, se caracteriza por tener una relación no lineal entre esfuerzo y deformación; y la última región es donde ocurre la falla.

Los productos agrícolas son productos vivos que se encuentran en constantes cambios en forma, tamaño, respiración y otros aspectos que caracterizan a los seres vivos (Picón, 1997). Durante el desarrollo y el almacenamiento, las células son sensibles a influencias externas como humedad, temperatura, oxígeno, etc. En los productos biológicos la elasticidad varía con la edad y las condiciones fisiológicas. Los fluidos biológicos son generalmente líquidos no-newtonianos, por ello la reología se aplica para el comportamiento mecánico de sistemas biológicos (Mohsenin, 1986).

La comprensión de los estudios de la reología involucran definiciones como la deformación unitaria, la cual es el cambio unitario ocasionado por una fuerza, en el tamaño o forma de un cuerpo con respecto a su tamaño o forma original (Steffe, 1996), la cantidad es adimensional y se expresa en in/in, cm/cm o en una relación directa de unidades. Los tipos de deformaciones unitarias incluyen la deformación lineal (tensión o compresión) la cual se define como el cambio por unidad de longitud producido por una fuerza en una dimensión lineal. La deformación axial (torsión) que se define como la deformación lineal en un plano paralelo al eje longitudinal del espécimen y la deformación transversal se define como la deformación lineal en un plano perpendicular al eje longitudinal del espécimen.

Las deformaciones suceden al aplicarse un esfuerzo, el cual se define como la intensidad de fuerza ejercida por unidad de área. Los tipos de esfuerzos incluyen el esfuerzo normal por tensión, el cual es el esfuerzo normal producido por fuerzas que actúan sobre el plano dirigidas hacia fuera del objeto y el esfuerzo normal por compresión el cual es el esfuerzo producido por fuerzas que actúan sobre el plano en dirección hacia adentro del objeto. La resistencia a la compresión se define como el máximo esfuerzo por compresión que un material es capaz de soportar, se calcula por medio de la carga máxima durante una medición de compresión.

Los esfuerzos se representan de diferente manera según los materiales, el límite elástico (Ecuación 1.1) se define como el máximo esfuerzo que un material es capaz de soportar sin tener ningún daño permanente una vez que haya cesado el esfuerzo. El módulo de Young es la resultante de un esfuerzo y una deformación de una carga puntual, la fuerza normal a la superficie causa una deformación en un eje, haciendo posible calcular esta

deformación por medio del módulo de elasticidad del material. La ecuación (1.1) es válida para cualquier material que se encuentre sometido a un esfuerzo y que sufra una deformación, la cáscara o piel de los productos agrícolas cumple estas condiciones.

$$E = \frac{\rho}{\varepsilon} \quad (1.1)$$

Dónde:

E = Módulo de Young (Pa)

ρ = Esfuerzo (Pa)

ε = Deformación (m/m)

El esfuerzo y la deformación mantienen una relación que permite determinar zonas en las cuales los materiales se comportan de acuerdo a sus características internas. La curva se grafica describiendo el comportamiento de la curva esfuerzo-deformación, la cual se muestra en la Figura 1.1. Se identifican 4 zonas, los cuales varían entre los distintos materiales; i) región lineal de esfuerzo-deformación, ii) región plástica o de fluencia, iii) región de endurecimiento por deformación y iv) región de estricción (Beer, Johnston, Dewolf, & Mazurek, 2010).

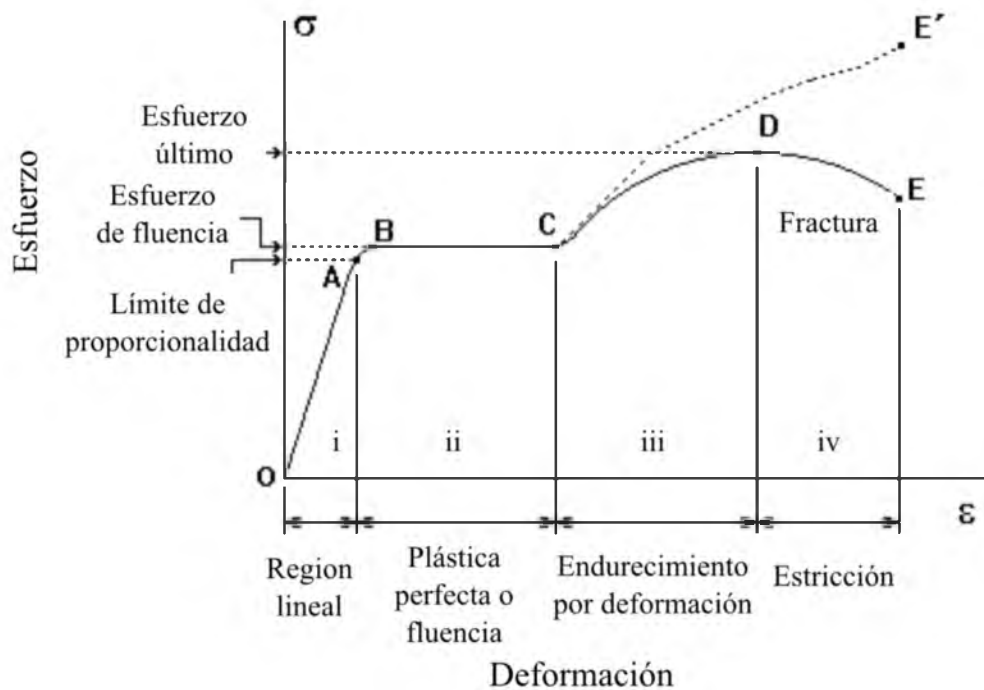


Figura 1.1. Curva esfuerzo-deformación para materiales (Beer et al., 2010)

Los puntos descritos anteriormente (O-A-B-C-D-E-E') se explican como parte de una secuencia de regiones a las cuales se ven expuestos los materiales:

- a) Región Lineal: el esfuerzo y la deformación son directamente proporcionales y el comportamiento del material es lineal, zona de comportamiento elástico. (Beer et al., 2010). (puntos O - A en Figura 1.1)
- b) Límite de proporcionalidad: no hay una relación lineal entre el esfuerzo y la deformación, por lo que el esfuerzo se llama Límite de Proporcionalidad. La constante de proporcionalidad se conoce como el Módulo de Young, este mismo es la pendiente del Diagrama Esfuerzo-Deformación en la región elástica, (puntos A-B, Figura 1.1) (Beer et al., 2010).

- c) Esfuerzo de Fluencia: esfuerzo al cual el material entra en zona plástica (punto B, Figura 1.1), los biomateriales presentan una región de fluencia leve con la tendencia a ingresar a la región plástica con un aumento en el esfuerzo.
- d) Región Plástica: segmento en el cual el material se deforma sin necesidad de ningún incremento en el esfuerzo aplicado (puntos B-C, Figura 1.1).
- e) Región Endurecimiento: al material le ocurren cristalizaciones y se incrementa la resistencia del material, por lo que para alargar más el material se necesita de mayor esfuerzo tensor o esfuerzo de compresión (puntos B-C, Figura 1.1). (Beer et al., 2010).
- f) Esfuerzo último: la carga alcanza su máximo valor y da espacio al punto de fractura (punto D).
- g) Estricción: se da la inestabilidad del material y sucede el punto de fractura (puntos D-E, Figura 1.1).

La Figura 1.1 muestra el comportamiento del producto a medida que la fuerza aplicada por compresión incrementa por unidad de área, lo cual provoca una deformación que incrementa según la curva hasta que ocurre una fractura.

1.2 Metodologías de medición de impactos

1.2.1 Pruebas de impacto en materiales

Las causas más comunes de daño mecánico en productos agrícolas se deben a los choques e impactos contra superficies duras o contra los mismos productos durante el

manejo (Picón, 1997). El concepto de daño por impacto o impacto mecánico lo definió Goldsmith (1960) como una carga instantánea, no continua y no periódica sobre un producto. Algunos factores como la altura de la caída, la velocidad antes de la colisión, la masa de cada producto, el radio de curvatura, área de contacto y las deformaciones se deben considerar para estimar el daño al producto. Mohsenin (1986), señala que existen cuatro fases en una colisión:

- i. Deformación elástica inicial, en la cual la región de contacto se deforma elásticamente y se recuperará completamente sin deformaciones residuales.
- ii. Deformación plástica durante la cual la presión media excede la presión dinámica de campo del material y las deformaciones resultantes podrían no ser recuperadas totalmente.
- iii. Deformación totalmente plástica durante la cual la deformación continúa de elastoplástico a totalmente plástico.
- iv. Rebote plástico durante el cual se recobra parte de la deformación y se da una liberación de esfuerzo.

Las primeras tres fases de los impactos se presentan en la Figura 1.2. Los impactos que no se comportan de manera elástica, su energía cinética se convierte en deformación permanente del material y una disipación posterior de su energía en forma de calor es por esta conversión de energía que relación esfuerzo-deformación no mantiene relación lineal y se recurre a métodos teóricos para describir estos impactos (Mohsenin, 1986).

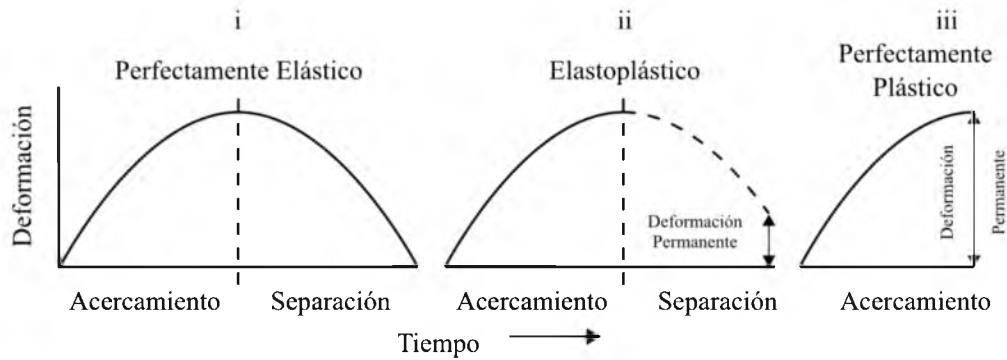


Figura 1.2. Curvas de deformación a través del tiempo para el mismo impacto con 3 respuestas según el material(Mohsenin, 1986)

- i) deformación elástica
- ii) deformación plástica sin recuperaciones totales
- iii) deformación totalmente plástica.

En la Figura 1.3, se muestra el contacto de una fruta con una superficie a la hora de un impacto, en el cual se genera una deformación sobre un área afectada. Según la magnitud de la fuerza con la que se genera el impacto, así es la respuesta del producto agrícola y la región de impacto (D) presentaría alguna de las 3 respuestas de la Figura 1.2.

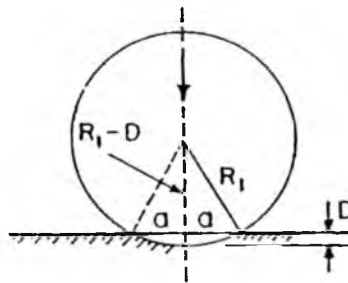


Figura 1.3. Descripción visual de un impacto de un producto agrícola (Mohsenin, 1986)

Dónde:

R_1 = radio de promedio del producto agrícola (cm)

D = deformación generada por el impacto (cm)

α = extensión angular de zona afectada ($^{\circ}$).

En la Figura 1.3 se muestra la posible zona en la cual se manifestaría el daño ocasionado por la fuerza del impacto. Las demás dimensiones R_1 y α son las dimensiones del radio del producto agrícola (modelada esféricamente) y de la extensión angular de la posible zona afectada. Hay distintas pruebas para provocar los impactos en fruta. Las pruebas incluyen sistemas de péndulo, caída libre, péndulo compuesto, entre otros; en dónde se varía la energía cinética al inicio del movimiento, la velocidad inicial del objeto y los sitios de contacto de las fuerzas al impacto (Figura 1.4).

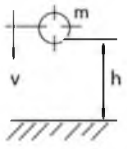
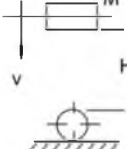
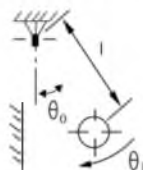
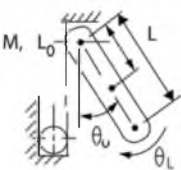








	Prueba de Caída	Caída de una masa	Péndulo Simple	Prueba de Fuerza Compuesta
1. Descripción Cinemática				
2. Energía cinética del objeto al inicio del impacto	mgh	"Cero"	$mgl(1-\text{Cos}\theta_0)$	"Cero"
3. Posición Inicial Equivalente de: a) Energía Inicial b) Velocidad inicial	$h; E=mgh$ $h; v=(2gh)^{1/2}$	$H=m/Mh$ $H=h$	$\theta_0 = \text{Cos}^{-1} (1-h/l)$ $\theta_0 = \text{Sin}^{-1} (K\sqrt{2h/l})$	$\theta_0 = \text{Cos}^{-1} (1-mh/Mr)$ $\theta_0 = \text{Sin}^{-1} (K/L\sqrt{2hR})$
4. Fuerzas de contacto durante el impacto	 Una Fuerza	 Dos Fuerzas	 Una Fuerza Mayor	 Dos Fuerzas Mayores
5. Fuerza inercial equivalente	 $-dmy$	 $-dmy$	 $dml\theta$	 $-dmL\theta$

Figura 1.4. Diagrama de pruebas que se realizan para evaluar el efecto de los impactos (Mohsenin, 1986)

Dónde:

m = masa de la fruta (kg).	θ_0 = ángulo inicial (°).
v = velocidad de la fruta (m/s).	θ_1 = ángulo de desplazamiento de la cuerda (°).
h = altura de caída (m).	$dm\gamma, dml\theta, -dml\theta$ = deformación de la fruta.
g = fuerza de gravedad (9,81m/s ²).	C.G. = centro de gravedad.
E_1 = Energía inicial (N).	R = radio de la fruta (m.)
M = masa del bloque de impacto (kg).	r = radio del centro de gravedad (m.)
H = altura entre la fruta y el bloque (m).	L = distancia entre el impacto y el eje del brazo de impacto (m)
l = longitud de la cuerda (m).	

Cuando dos cuerpos colisionan, su energía cinética se convierte en fuerza causante de deformación, a la vez que cuando un sólido elástico es comprimido, éste tiende a expandirse y posteriormente recuperar su forma original. Así la energía usada para poder comprimir el objeto es recuperada como la energía cinética del producto al rebotar de la colisión (Picón, 1997). Un sólido de masa m moviéndose a una velocidad v , tiene un momento de $m \cdot v$; durante el impacto el cambio en el momento es igual al área bajo la curva fuerza-tiempo (aceleración-tiempo) para el impacto. Si un sólido de masa m se está moviendo a una velocidad en forma de vector v_1 previa al impacto, a una velocidad en forma de vector v_2 después del impacto y si hay una estricta dependencia del tiempo, la función de la fuerza $F(t)$ se ubica entre los tiempos de impacto t_1 y t_2 , se resumen el cambio de momento en:

$$mv_1 + mv_2 = \int_{t_1}^{t_2} F(t)dt \quad (1.2)$$

A partir de la ecuación (1.2), se puede obtener la fuerza máxima del impacto desarrollada durante la colisión para un tiempo dado. Para condiciones de impacto de una esfera (R_1) con condiciones plásticas y una placa plana ($R_2 \gg R_1; m_2 \gg m_1$) (R_2 = radio de la placa plana (m); m_2 = masa de la placa plana (kg)) de material, con una velocidad relativa de impacto de v , se obtiene la fuerza máxima de impacto (F_{max}) y el tiempo de contacto (T_{con}) con las siguientes fórmulas (Stroshine, 1998):

$$k_1 = \frac{1 - u_1^2}{E_1} \quad (1.3)$$

Dónde:

k_1 = Constante elástica del producto.

u_1 = Módulo de Poisson para el producto.

E_1 = Módulo de elasticidad del producto (Pa).

$$k_2 = \frac{1 - u_2^2}{E_2} \quad (1.4)$$

Dónde:

k_2 = Constante elástica de la placa de impacto.

u_2 = Módulo de Poisson de la placa de impacto.

E_2 = Módulo de elasticidad de la placa de impacto (Pa).

$$F_{max} = \left(\frac{4 \cdot \sqrt{R_1}}{3 \cdot (k_1 + k_2)} \right)^{\frac{2}{5}} \cdot \left(\frac{5}{4} \cdot m_1 \cdot v_{final}^2 \right)^{\frac{3}{5}} \quad (1.5)$$

Dónde:

F_{max} = Fuerza máxima de impacto (N).

R_1 = Radio medio del producto (m).

v_{final} = velocidad final de impacto (m/s).

m_1 = masa del producto (kg).

$$T_{con} = \frac{2.9432}{v_{final}} \cdot \left(\frac{15 \cdot (k_1 + k_2) \cdot m_1 \cdot v_{final}^2}{16 \cdot \sqrt{R_1}} \right)^{\frac{2}{5}} \quad (1.6)$$

Dónde:

T_{con} = *Tiempo de contacto de la colisión (s)*.

Para el cálculo de la velocidad final de un objeto en un sistema pendular (Figura 1.4), se utiliza la ecuación (1.7.d), en la cual se realiza la conservación de la energía mecánica entre el punto inicial y el punto final del impacto. En el primer punto, la energía está concentrada en energía potencial, al momento del impacto la energía se ve trasladada a energía cinética.

$$E_{mecánica1} = E_{mecánica2} \quad (1.7.a)$$

$$E_{potencial} = E_{cinética} \quad (1.7.b)$$

$$M \cdot g \cdot l(1 - \cos\theta) = M \cdot \frac{v_{final}^2}{2} \quad (1.7.c)$$

$$v_{final} = \sqrt{2 \cdot g \cdot l(1 - \cos\theta)} \quad (1.7.d)$$

Dónde:

v_{final} = *Velocidad final antes de la colisión (m/s)*

g = *Aceleración gravitacional (9,81m/s²)*

l = *longitud de la cuerda del péndulo (m)*

θ = *ángulo del péndulo expresado en radianes.*

La ecuación (1.7.d) indica la velocidad final del impacto, y la ecuación (1.6) indica el tiempo de contacto del impacto, en el cual se toma en cuenta las características físicas de los objetos involucrados durante la colisión. La ecuación (1.8.a) utiliza los resultados de la ecuación (1.6) y (1.7.d) y se obtiene el cambio de aceleración del objeto durante el impacto:

$$v_{final} = a_{impacto} \cdot T_{con} \quad (1.8.a)$$

$$a_{\text{impacto}} = \frac{v_{\text{final}}}{T_{\text{con}}} \quad (1.8.b)$$

Dónde:

v_{final} = *Velocidad final antes de la colisión (m/s)*

a_{impacto} = *cambio de aceleración durante el impacto (m/s²)*

T_{con} = *tiempo de contacto del impacto (s)*

1.2.2 Métodos de medición de daño

El daño en frutas se origina principalmente en eventos durante las operaciones de cosecha, pero ocurre también en las operaciones de clasificación y en las líneas de empaque, durante el transporte y hasta el final de la cadena de suministros (Li & Thomas, 2014). La calidad de los productos agrícolas se ve significativamente reducida si hay malos manejos y más aún si los productos no son consumidos de manera inmediata, causando pérdidas económicas y problemas con la seguridad alimentaria. Se tratan dos grandes temas al hablar de la medición de daño mecánico, ya que la seguridad alimentaria y la eficiencia agrícola requieren acciones concisas para disminuir sus impactos, es por ello que las metodologías o formas de medir estos daños deben evolucionar conforme evolucionan los requerimientos. Las metodologías actuales para medir daño se pueden catalogar en métodos destructivos y no destructivos. Los métodos destructivos utilizan producto para realizar las pruebas, mientras que los no destructivos utilizan parámetros previamente dados y calibrados por medio de las pruebas destructivas.

1.2.3 Métodos Destructivos

Los métodos destructivos se tratan de pruebas que se realizan sobre el producto de manera que deforman sus características físicas, estos métodos incluyen un refractómetro que mide la cantidad de sólidos solubles y se la medida se expresa en cantidad de grados Brix, las muestras se deben de cortar y aplastar para extraer el jugo y realizar la medición (Schmilovitch & Mizrach, 2013). La forma en la que se mide la acidez, se realiza con una prueba de pH por medio de sustancias como fenolftaleína, azul de bromotimol y anaranjado metilo para determinar su nivel básico o ácido (Schmilovitch & Mizrach, 2013). La firmeza de las frutas se mide utilizando un penetrómetro dónde se grafica la porción elástica, el punto de ruptura celular y el segmento de fallo celular ante la deformación.

1.2.4 Pruebas no destructivas

1.2.4.1 Visión computacional para calidad interna

Las técnicas de visión computacional para medir la calidad interna de frutas utilizan métodos que no involucran contacto directo con el producto. El uso de imágenes hiperespectrales (HSI) en la cual se identifican los componentes químicos y su distribución espacial (Ruiz-Altisent et al., 2010). Estas aplicaciones se utilizan para la detección de moretones o hematomas ocasionados por los daños mecánicos y sus dimensiones (Opara & Pathare, 2014a). Además de las aplicaciones HSI, hay trabajos sobre los rangos visibles en los cuales se trabaja la absorción de energía en la zona del infra-rojo (NIR), en la cual se detectan cambios en las concentraciones de agua, carbohidratos, grasas y proteínas para detectar hematomas. Las diferentes absorciones de las longitudes de onda se relacionan fundamentalmente con las uniones O-H, C-H y N-H, las cuales son los vínculos de las

estructuras primarias de las moléculas orgánicas (Schmilovitch & Mizrach, 2013).

El color de la piel de las frutas es considerado como indicador de la madurez de las frutas, pero el color para la percepción visual humana es únicamente indicador del estado de madurez en relación a pigmentos o deterioro (Ruiz-Altisent et al., 2010); esto quiere decir que se basa en una figura de banda ancha del espectro visible (como escala de grises o escala de colores) la cual es inapropiada para indicadores como azúcar, agua, almidón, proteínas, entre otros. Las imágenes visibles anteriormente mencionadas, son útiles para cuantificar estados de madurez de las frutas.

La resonancia magnética nuclear (NMR) es la técnica no invasiva más importante para la inspección interna de objetos biológicos (Ruiz-Altisent et al., 2010), esto debido a que la resonancia magnética codifica la cantidad de núcleos químicos equivalentes a diferentes ambientes electrónicos y químicos, en donde el espectro resultante es una gráfica de intensidad vs frecuencia. La sensibilidad a la concentración de químicos, movilidad y difusión, influenciada por la distribución de las células y microtextura del tejido, hace que la NMR actúe como sensor de la integridad misma de los tejidos. Dentro de los productos comúnmente inspeccionado con NMR están las frutas, vegetales, pescado y producto cárnico (Opara & Pathare, 2014a).

1.2.4.1 Métodos mecánicos.

Las frutas y vegetales presentan comportamientos viscoelásticos bajo sistema de cargas mecánicas, los cuales dependen de la carga aplicada y la fuerza de los impactos (Schmilovitch & Mizrach, 2013), es por ello que las mediciones viscoelásticas dependen de la fuerza, la deformación y del tiempo. Los métodos mecánicos se han desarrollado para la medición no destructiva de daños de parámetros agrícolas de firmeza, entre ellos están la

medición de curvas esfuerzo-deformación. Se utilizan sensores piezoeléctricos o resortes para medir la curva de esfuerzo-deformación de manera no destructiva en frutas, esta curva es producida al aplicar una carga fija durante un periodo de tiempo o por medio del cálculo de la fuerza necesaria para exceder la deformación (Ruiz-Altisent et al., 2010).

Los sensores medidores de impacto, identifican los impactos de varias maneras i) ejerciendo un golpe sobre la fruta con un elemento que incluye el sensor, ii) colocando una fruta sobre un sensor de carga y dejando caer una masa encima y iii) colocando el sensor entre una placa y una fruta y ejerciendo un golpe puntual (Ruiz-Altisent et al., 2010).

Las esferas para medir daño mecánico entran en esta clasificación, las cuales contienen sensores de aceleración que proveen de información acerca de cambios vectoriales de aceleración y variaciones en velocidad.

1.3 Generalidades del *Cucumis melo*

El melón (*Cucumis melo*) es una planta herbácea cuya estructura consiste de tallos lisos o en forma de estrías que se ramifican y su especie es anual (de Luca, 1998). Los frutos se presentan de forma esférica u ovoide, la textura de su cáscara presentar surcos con un estilo de red (Núñez, 2006). El melón se cosecha por madurez y no por tamaño, el cual corresponde al porcentaje de desprendimiento del pedúnculo, el ideal es $\frac{3}{4}$ ya que es el momento en el cual su estado de madurez permite contemplar los tiempos de transporte en la exportación (Suslow & Cantwell, 2016).

Los melones son productos climatéricos y presentan grandes tasas de respiración y producción de etileno que coinciden con la maduración natural. El melón produce suficiente etileno para estimular la posterior maduración, y si no se cuenta con un buen manejo post-cosecha, los índices de maduración se elevan y el producto presentaría menor tiempo de vida útil.

El contenido de azúcares en el melón no incrementa después de la etapa de cosecha ya que no posee reservas extensivas de almidón para hidrolizar el azúcar, un incorrecto manejo (elevadas temperaturas o daños mecánicos-físicos) estimulan la respiración celular y la posterior pérdida de azúcares y pérdida en la calidad del producto en cuanto a sabor. En la Figura 1.5 se muestra el comportamiento de la respiración celular y de la producción de etileno del melón.

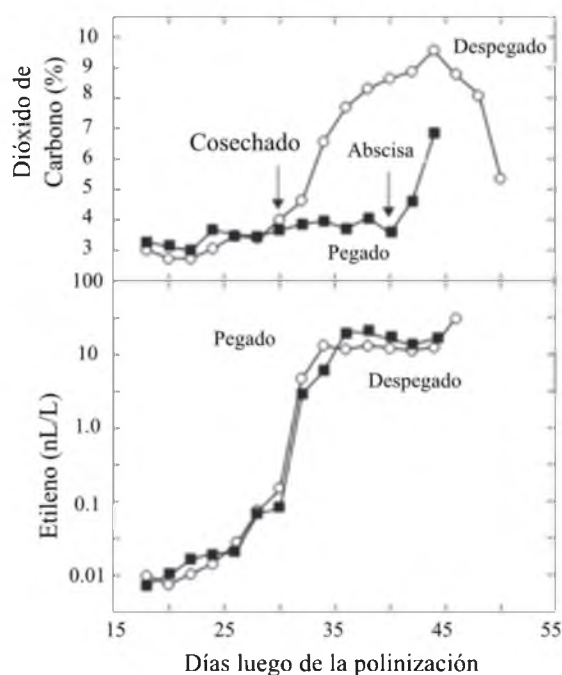


Figura 1.5. Respiración celular y producción de etileno del melón (Suslow & Cantwell, 2016).

Se muestran los dos ejes verticales (porcentaje de dióxido de carbono y concentración de etileno) contra el eje horizontal en días después de la polinización. Se observa el punto de cosecha para dos comparaciones en las cuales el melón ya ha sido desprendido de la planta y para el caso en el que sigue pegado a la planta. Se observa cómo la respiración celular (CO₂) incrementa dramáticamente una vez se realiza la cosecha y cómo se manifiesta la tasa de producción de etileno.

Los melones se cosechan debido a un factor crítico de madurez y no por tamaño, los melones se clasifican por calibres (Cuadro 1.1). La madurez ideal para comercio en mercados nacionales es de un completo desprendimiento del pedúnculo, ya que al melón no incrementar en azúcares una vez cosechados se puede aprovechar de mejor manera las características de sabor; pero al momento de acercarse a un mercado de exportación se recomienda un desprendimiento de $\frac{3}{4}$.

Cuadro 1.1. Masa de cada uno de los calibres comerciales de melón (Picón, 1997)

Calibre	Masa Aproximada (kg)
9	2.0
12	1.5
15	1.2
18	1.0
23	0.8

El calibre indica la cantidad de melones que entran por cada uno de los corrugados internacionales de exportación.

Se utilizan tres datos esenciales de características del melón Cantaloupe, según indica Picón (1997):

$k_1 = 1,69 \times 10^6$, constante elástica del melón (N/m).

$u_1 = 0.49$ m/m, radio de Poisson del melón.

$E_1 = 4.50 \times 10^5$, módulo de elasticidad del melón.

Capítulo 2: Metodología

Se diseñó una herramienta para la evaluación del daño mecánico, con la cual se miden las aceleraciones ocasionadas en los melones cuando se generan impactos, asociados a daños físicos en las frutas y disminuciones en su firmeza. El diseño de la herramienta consistió en el diseño de una carcasa plástica con la forma de un melón y su posterior impresión en 3D. En el interior de la carcasa, se incorporó un dispositivo electrónico programable, con sensores capaces de medir las aceleraciones de golpes y registrar los datos.

Además, se realizó un experimento para correlacionar los posibles síntomas de daños mecánicos de frutas durante un periodo de almacenamiento 30 días, con los valores de aceleraciones registrados al golpear la fruta. Los valores de aceleración de la fruta posteriormente se correlacionan con los valores registrados por la herramienta en cuatro diferentes alturas controladas.

2.1 Desarrollo de modelo representativo del melón

El desarrollo del modelo representativo de melón inició con las características físicas que debía cumplir, ya que se trataba de una fruta con características con tendencia esférica. Se elaboró un diseño que debía cumplir la característica promedio de la fruta calibre 15 con un diámetro de 13,5 cm y con una cavidad para contener los componentes electrónicos para registrar aceleraciones. En el desarrollo de la herramienta, se debía

considerar dos hemisferios idénticos con la capacidad de contener los componentes electrónicos y de poder tener soportes para sujetarse el uno con el otro.

Se utilizó el programa Autodesk Inventor 2014 para realizar el diseño en tres dimensiones de la herramienta para posteriormente imprimirla. Se utilizó la impresora Cube 3D (3D Systems) con un programa de diseño e interfaz de impresión (Figura 2.1). Los imprimieron utilizando material PLA (Ácido poliláctico) el cual es un plástico de fácil acceso y de uso común en los prototipos de impresión 3D.



Figura 2. 1 Copia de salida del software Cube 3D y visualización de una de las piezas de la esfera diseñada.

2.2 Selección de los elementos electrónicos del dispositivo electrónico

Para la elaboración de la herramienta, se utilizó un microcontrolador Arduino (modelo Atmega 2560) con dimensiones de 10 cm x 5 cm, cuyas características permitieron tener la mayor capacidad de procesamiento de datos según el tamaño físico del microcontrolador.

Por sus dimensiones, el microcontrolador entra en el interior de la esfera diseñada y permite continuar con la incorporación de los demás componente electrónicos. Se utilizó un acelerómetro de tres ejes Adafruit (modelo ADXL 377), un módulo de registro SD iTeed Studio (modelo IM120525008), un elevador de voltaje PowerBoost de la marca Adafruit (modelo 1000C) y una batería de 350mAh (modelo LIPO 552035). Los elementos electrónicos se unifican de manera que se optimizó el espacio físico requerido.

2.3 Programación y registro de datos en la herramienta

La herramienta se utilizó para registrar valores de desaceleración en la zona ecuatorial del modelo impreso de melón; sin embargo, la herramienta cuenta con la capacidad de registrar las aceleraciones en cualquier dirección en la que ocurra la incidencia. Se determinó de manera experimental que la frecuencia de lectura óptima es de 350Hz y un umbral mínimo de lectura de 3G. Los valores que exceden el umbral son valores que se consideran parte de un golpe, se registró una cantidad de 25 valores continuos a la frecuencia seleccionada para captar la mayor cantidad de información de las aceleraciones.

Se utilizó el programa de licencia libre Arduino IDE versión 1.8.3 enfocado a la plataforma MAC OS X, el programa es escrito en el lenguaje de programación JAVA. Se programó el dispositivo de manera que se comenzaran las lecturas por medio de un botón, en el cual se accede por medio de la apertura de los hemisferios de la herramienta y su posterior cierre por medio de tornillos que unen ambas piezas.

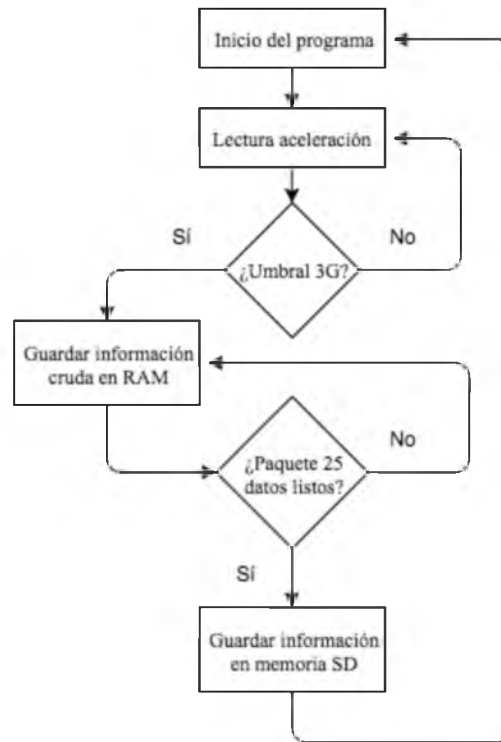


Figura 2.2 Esquema de lógica de programación

En la Figura 2.2, se muestra el bloque de inicio del programa, el cual pasa a leer la señal que el acelerómetro emite, y continuamente revisa una condición de umbral determinada en un valor de aceleración de 3G. Al superar el umbral, se procede a registrar de manera temporal los datos de aceleración en la Memoria de Acceso Aleatorio (RAM) del microprocesador, en esta memoria se registran de manera consecutiva 25 valores representativos a los valores de desaceleración de la herramienta durante el impacto. Al momento de tener el paquete de 25 valores, se procede a registrar el valor de los mismos en la Memoria SD de la herramienta, una vez sucede esto, se regresa al momento de lectura del sensor de aceleración y a esperar el momento en que se exceda el umbral mínimo de registro. Los datos se registraron con su respectivo valor de aceleración expresado en G ($1\text{ G} = 9,81\text{m/s}^2$).

2.4 Pruebas de medición de la aceleración de la herramienta durante un impacto.

Se utilizó el sistema de péndulo con 4 diferentes alturas para registrar los valores de las aceleraciones de cada uno de los impactos. Se utilizaron las alturas de 6 cm, 22 cm, 48 cm y 78 cm, y una cantidad de 50 repeticiones de impactos únicos para cada una. Debido a la resolución del equipo, se utilizaron rangos operativos para obtener los valores equivalentes de cada una de las alturas.

Las pruebas con la herramienta se realizaron de la misma manera que las pruebas con los melones, se utilizó el sistema de péndulo simple para realizar los golpes y se efectuaron 50 repeticiones de golpes para cada una de las alturas. El dispositivo electrónico registra la información en una memoria extraíble, posteriormente la información se interpreta por medio de un programa de análisis de hojas de cálculo.

2.5 Diseño experimental de las pruebas con melones reales

Las pruebas experimentales se realizaron en el Laboratorio de Tecnología Poscosecha (LTP), del Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA), ubicado en la Ciudad de La Investigación de la Universidad de Costa Rica.

Se utilizaron 90 melones de diámetro 13,5 cm, suministrados por la melonera La Ceiba, ubicada en San Joaquín de Nicoya, Costa Rica (coordenadas: 10.11105,-85.31407). Los melones se tomaron directamente de la pila de recibo de la fruta que viene desde los campos de cosecha, donde se seleccionó de manera manual (Figura 2.3).



Figura 2. 3 Pila de recibo de melón en la planta de empaque

Cada melón se empacó en cajas plásticas colocando papel periódico para inmovilizar la fruta y evitar los daños mecánicos durante el traslado hacia el LTP. Además, se cubrió con sarán verde para evitar la incidencia de sol sobre la fruta y evitar la aceleración de los procesos de maduración. (Figura 2.4 y Figura 2.5).



Figura 2. 4 Sistema de amortiguamiento para el traslado.



Figura 2. 5. Cobertura de sarán

A su llegada al LTP se realizó un prelavado de la fruta con agua sin cloro para remover cualquier suciedad que acarreará el producto del campo; no se suministró

tratamiento contra patógenos o enfermedades. Se pesaron todos los melones para posteriormente utilizar el dato como parte de la ecuación (1.7).

Para el estudio del daño mecánico, se utilizó el sistema de péndulo disponible en el LTP (Figura 2.6). El sistema presenta una longitud de cuerda de 95 cm y un medidor de ángulo (resolución de 10°), para así realizar un único impacto por melón sobre un bloque de concreto. Con este método se realizaron tres repeticiones por cada uno de los ángulos seleccionados con una fruta diferente para cada repetición. La cuerda tiene dos puntos de apoyo en el sistema de péndulo para evitar que la fruta tienda a girar previo al impacto.

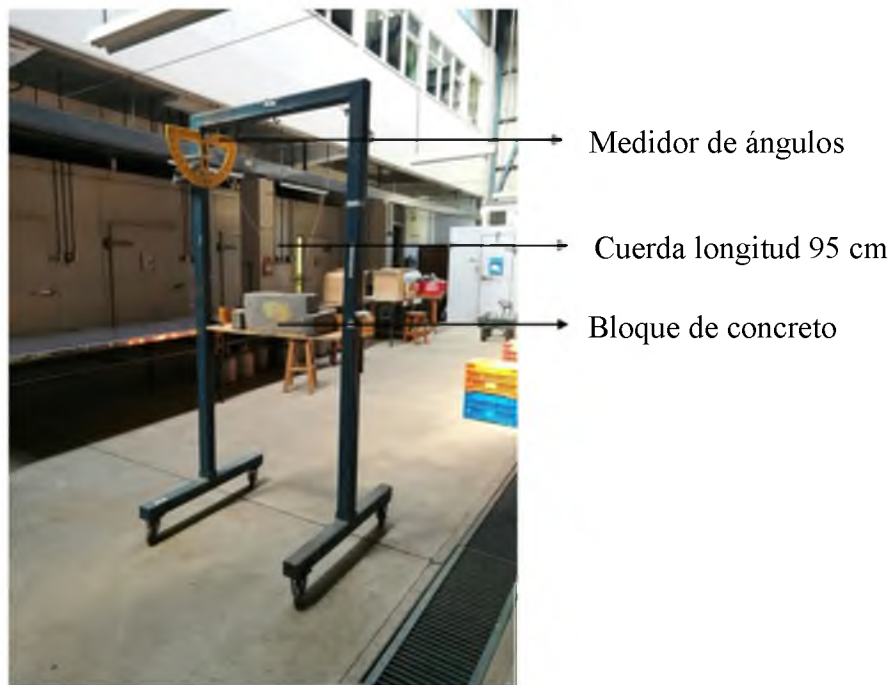


Figura 2. 6 Sistema de péndulo

Se utilizaron 5 ángulos para impactos (20°, 40°, 60° y 80°) (Figura 2.7); los cuales corresponden respectivamente a las alturas de caída de 6, 22, 48 y 78 cm, 15 unidades no

recibieron ningún tipo de impacto. Se sujetó la fruta con un velcro alrededor de su circunferencia, dejando libre el espacio ecuatorial del impacto. Después de golpear la fruta una única vez, se marcó la zona impactada para posteriormente realizar la separación de hemisferios. Las mediciones de daño se realizaron cada 5 o 10 días durante el almacenamiento (día 0, 10, 20, 25 y 30 después del impacto). La fruta se mantuvo en refrigeración durante 20 días y a condición ambiente promedio del día 20 al día 30 de evaluación.

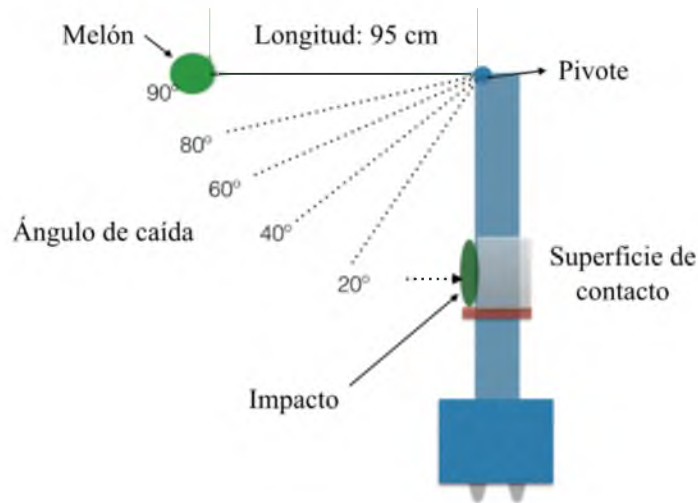


Figura 2. 7 Ángulos del sistema de péndulo.

Luego de realizar las pruebas con el sistema de péndulo, la totalidad de los melones ingresaron a las condiciones de almacenamiento mencionadas, para simular el periodo de transporte para la exportación del producto; 20 días naturales a 4°C y 90% humedad relativa; y posteriormente 10 días más bajo condiciones de temperatura y humedad relativa ambiente (22°C y 80% humedad relativa como valores promedio). Las condiciones de

almacenamiento se registran por medio de dos dispositivos de adquisición de datos marca HOBO modelo UX100-003.

2.6 Procedimiento para evaluar daños físicos y firmeza en las pruebas con melón

Los síntomas de daño mecánico y firmeza se evaluaron con el siguiente procedimiento:

- i. Se cortó la fruta en el diámetro ecuatorial, justo en el centro del sitio impactado, esto produce dos hemisferios.
- ii. Uno de los hemisferios se utilizó para medir la firmeza de cada melón. Para ello, en la zona afectada se hicieron 3 mediciones y otras 3 en la zona no afectada por cada uno de los golpes (Figura 2.8 y Figura 2.9), se utiliza el penetrómetro Chatillon DPP-100N.
- iii. El otro hemisferio se utilizó el área de la pulpa con síntomas de daño mecánico, para identificar oscurecimiento de pulpa o cambios visuales en la consistencia de la firmeza.



Figura 2. 8 Corte de la fruta

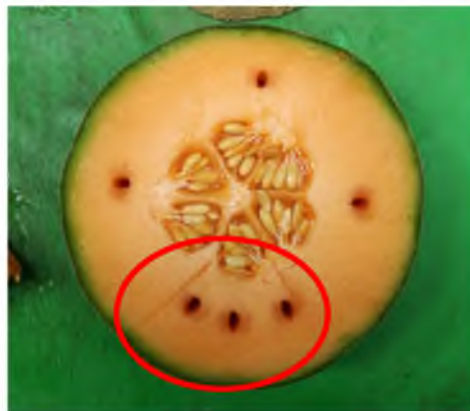


Figura 2. 9. Lugares de medición firmeza
(en un círculo se muestra la zona en
dónde se golpeó la fruta)

El análisis estadístico de los datos se realizó por medio del software estadístico InfoStat y se realizó la prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) con los análisis de varianza (ANOVA) para comparar los resultados de firmeza y pérdida de masa con respecto a los días de almacenamiento de los melones.

La nomenclatura utilizada es:

- i. FB: Firmeza en zona sin golpe
- ii. FG: Firmeza zona golpeada
- iii. PP%: Pérdida de masa porcentual

Las escalas de daño físicos en la pulpa se catalogaron de la siguiente manera:

- i. Daño leve: hay un efecto elástico, ya que no se observaron daños aparentes en la fruta en el proceso de evaluación. Hay una debilitación de firmeza debido a rompimiento de células y tejidos, pero no hay daño evidentes.

- ii. Daño moderado: hay algunos daños que se observan visualmente, hay pérdida de fluidos y eventual oscurecimiento de zonas de la pulpa. Hay una pérdida de turgencia en zonas afectadas.
- iii. Daño severo: los daños son mayores, hay tejidos aplastados y gran cantidad de zonas con oscurecimientos debido a la liberación de fluidos y hay un deterioro acelerado comparado al proceso de maduración regular.

2.7 Cálculo de la aceleración de los melones durante el impacto.

La aceleración de los melones, se calculó siguiendo la siguiente prioridad:

- a) Velocidad final a la hora del impacto contra el bloque de concreto, utilizando la ecuación (1.8.d) seguidamente se presenta una muestra de cálculo para la primera altura de:

$$v_{final} = \sqrt{2 \cdot g \cdot l(1 - \cos\alpha)} \quad (2.1.a)$$

$$v_{final} = \sqrt{2 \cdot \frac{9,81m}{s^2} \cdot 0,06m} \quad (2.1.b)$$

$$v_{final} = \mathbf{1,06 m/s} \quad (2.1.c)$$

- b) Constante elástica del melón, con la ecuación (1.4) usando los datos del Cuadro 2.1, utilizando el módulo de elasticidad E_1 y su módulo de Poisson u_1 ; posteriormente la constante elástica del bloque de impacto con la ecuación (1.5). Las ecuaciones utilizadas son únicamente válidas para su uso con la ecuación (1.7)

Cuadro 2.1 Constantes para la variedad de melón Cantaloupe y el bloque de concreto

Material	Valor	Fuente
Melón Cantaloupe	$u_1 = 0.49 \text{ m/m}$	(Picón, 1997)
	$E_1 = 450000 \text{ Pa}$	(Picón, 1997)
Bloque de concreto	$u_2 = 0.2 \text{ m/m}$	(ASTM C469)
	$E_2 = 2,15 \times 10 \text{ Pa}$	(ASTM C469)

$$k_1 = \frac{1 - u_1^2}{E_1} \quad (2.2.a)$$

$k_1 = 1,69 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{N}$ Constante elástica del melón

$$k_2 = \frac{1 - u_2^2}{E_2} \quad (2.2.b)$$

$k_2 = 4,46 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{N}$ Constante elástica del bloque de concreto

Los valores de k_1 y k_2 se mantienen constantes para todos los resultados de este estudio.

c) Tiempo de contacto de la colisión. La aceleración de cada melón en un golpe cambia rápidamente, ya que el cambio en su velocidad se da en un espacio de tiempo, este espacio de tiempo es la duración del contacto entre melón y la superficie de impacto, se calcula con la ecuación (1.7):

$$T_{con} = \frac{2.9432}{v_{final}} \cdot \left(\frac{15 \cdot (k_1 + k_2) \cdot m_1 \cdot v_{final}^2}{16 \cdot \sqrt{R_1}} \right)^{\frac{2}{5}} \quad (2.3.a)$$

Sustituyendo los siguientes valores para el melón 1, altura 1, en el modelo se obtiene:

$$v_{final} = 1,06 \frac{m}{s}$$

$$m_1 = 0,903 \text{ kg}$$

$$R_1 = 0,0675 \text{ m}$$

$$k_1 = 1,69 \times 10^{-6} \text{ m}^2/N$$

$$k_2 = 4,46 \times 10^{-11} \text{ m}^2/N$$

$$T_{con} = 0,0207 \text{ s}$$

d) La aceleración de un impacto es el cambio de la velocidad respecto al tiempo, y se calcula con la ecuación (1.9):

$$a_{golpe} = \frac{v_{final}}{T_{con}} \quad (2.4.a)$$

$$a_{golpe} = 51,25 \frac{m}{s^2} \cdot \frac{1 G}{9,81 \frac{m}{s^2}} \quad (2.4.c)$$

$$a_{golpe} = 5,22 G$$

Capítulo 3: Resultados

3.1 Diseño de la herramienta

3.1.1 Desarrollo del modelo representativo del melón

La primera etapa de diseño de la herramienta consistió en realizar de manera virtual el diseño de los componentes electrónicos, con el fin de seleccionar el arreglo más compacto antes de proceder a unirlos físicamente (Figura 3.1 y Figura 3.2). El diseño de los componentes electrónicos permitió visualizar la configuración antes de proceder a soldar y a unificar cada uno de los componentes. El diseño virtual, se utilizó también para comprobar si las partes entraban en la cavidad con las medidas del melón de 13,5 cm de diámetro.

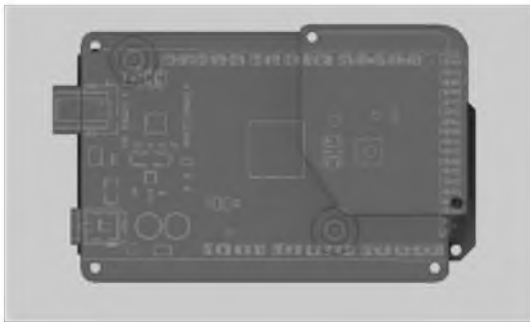


Figura 3. 1. Diseño virtual de los componentes electrónicos (vista 1)

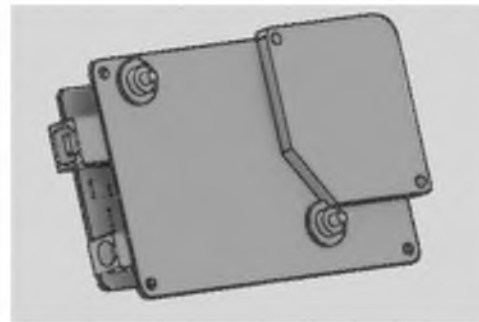


Figura 3. 2 Diseño virtual de los componentes electrónicos (vista 2)

Los componentes electrónicos fueron fijados en los puntos de apoyo del controlador. El diseño de la carcasa incluye pilares en conjunto con venas de soporte para aumentar la

resistencia al esfuerzo ejercido por los impactos a los cuales se va a ver expuesta la herramienta. En la Figura 3.3 se muestra el hemisferio 1 que lleva la placa y la implementación de cortes para añadir tuercas y así sujetar las piezas. El controlador es atornillado al hemisferio 1 de la herramienta (Figura 3.4). Las venas de soporte que se diseñaron sirven como soporte estructural interno, ya que la impresión es hueca, la misma puede incidir de manera negativa sobre las columnas en las que va atornillada la placa. Las venas de soporte de los pilares surgen luego de realizar un primer modelo impreso y que en este ocurriera una fractura debido a la magnitud del impacto.

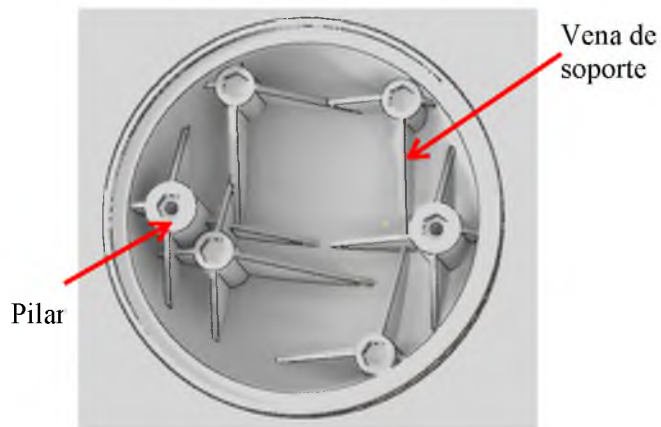


Figura 3. 3 Hemisferio 1, con base para ajuste de los elementos electrónicos

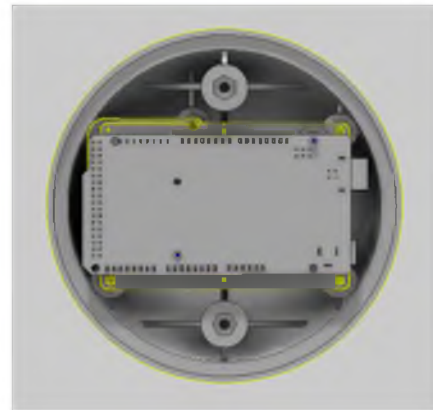


Figura 3. 4 Ajuste de placa de controlador dentro del Hemisferio 1

El hemisferio 2 no lleva pilares destinados a sujetar la placa, únicamente presenta dos soportes para unir ambos hemisferios. Las columnas A y B (Figura 3.5 y Figura 3.6) permiten atornillar ambos hemisferios del diseño impreso

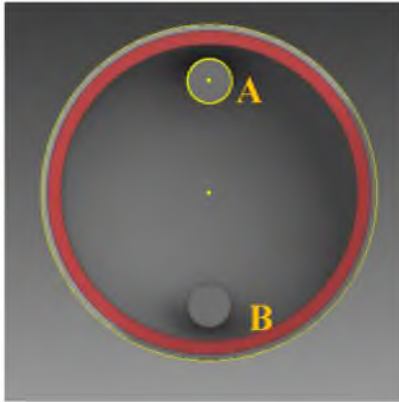


Figura 3. 5 Hemisferio 2

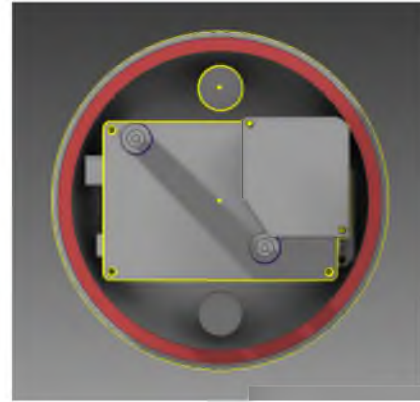


Figura 3. 6 Hemisferio con la placa del controlador

Al completar el diseño de ambas partes del modelo (hemisferio 1 y hemisferio 2) y el montaje digital en el programa Autodesk Inventor 2014, se realiza la unión de todas las piezas (Figura 3.7). Los cortes transversales permiten visualizar el interior de la herramienta con los componentes electrónicos para verificar su correcto encaje (Figura 3.8). Las uniones de la herramienta no le dan la capacidad de ser hermética ya que no hay empaque que detengan el ingreso de agua.

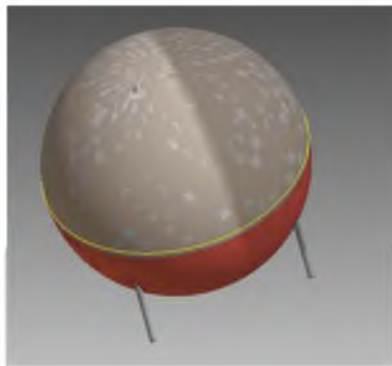


Figura 3. 7 Unión de ambos hemisferios

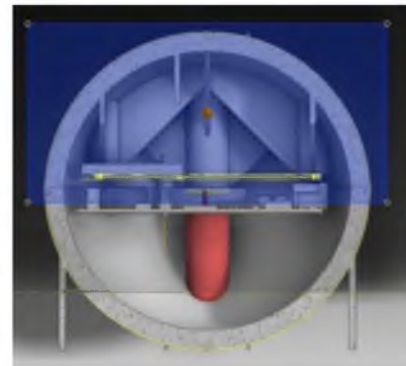


Figura 3. 8 Corte interno en dónde se muestra el encaje de los componentes electrónicos

La Figura 3.9 muestra el proceso de impresión de la herramienta. El diagrama de las conexiones de los sensores y el microcontrolador (Figura 3.10) muestra los puertos para la

instalación de los componentes electrónicos. Este diagrama se utiliza como referencia para replicar, escalar y realizar mejoras al dispositivo.

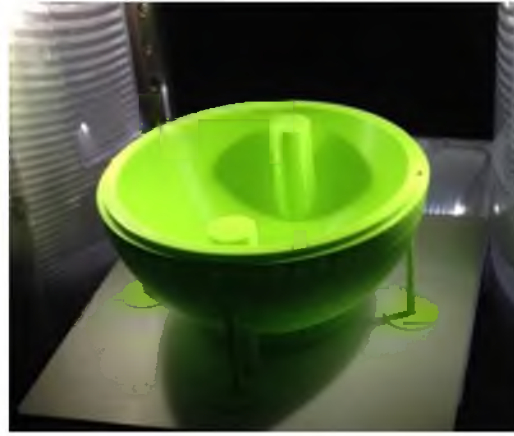


Figura 3. 9 Diseño impreso de la carcasa de uno de los hemisferios.

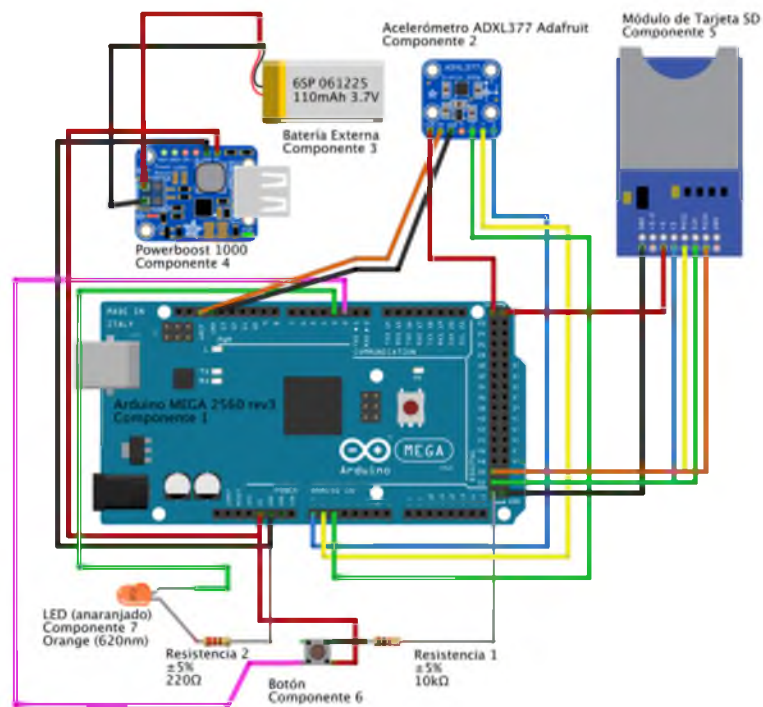


Figura 3. 10. Diagrama eléctrico de los componentes eléctricos de la herramienta

El diseño de los componentes (Figura 3.10) se derivó de múltiples arreglos hasta llegar a la mejor combinación y selección de los componentes. La batería externa (Componente 3), se seleccionó por su diseño ligero y compacto, con un voltaje de 3,7 V. Los sensores trabajan con 5 V, debido a la diferencia de voltaje se instaló un convertidor de voltaje a la batería para poder obtener 5,2 V y dotar de energía al sistema (Componente 4). La batería permite obtener una autonomía de uso de más de 12 horas con una única carga de los 110 mAh de capacidad.

3.1.2 Programación y registro de la herramienta

La programación es la base del funcionamiento de la herramienta, el manejo de las lecturas de los sensores permite el registro de los datos. La información que brinda el sensor de aceleración (Componente 2, Figura 3.10) se lee por medio de ingresos de información en los tres ejes X, Y y Z, los cuales se transforman a valores enteros y ajustados para generar un vector resultante. El vector resultante es la raíz de la sumatoria de los vectores a la segunda potencia. Este valor es el que está ajustado, transformado y expresado en G de aceleración. La manera gráfica de ver este segmento en la programación permite esquematizar el funcionamiento del sensor (Figura 3.11).

```
float prueba() {  
  int xRaw = ReadAxis(xInput);  
  int yRaw = ReadAxis(yInput);  
  int zRaw = ReadAxis(zInput);  
  float xAccel = xRaw / 1000.0;  
  float yAccel = yRaw / 1000.0;  
  float zAccel = zRaw / 1000.0;  
  vectorResultante = sqrt((xAccel * xAccel) + (yAccel * yAccel) + (zAccel * zAccel));  
  return vectorResultante;  
}
```

Figura 3. 11. Segmento de código de lectura de sensor de aceleración.

Para evitar que el registro de información en la memoria SD (Componente 5, Figura 3.10) se sature, se colocaron líneas de código para filtrar cualquier señal menor a aceleraciones

de 3G antes de registrarla, si este filtro no existiera se produce una sobresaturación de la memoria del dispositivo. Los impactos responden a un aumento en la aceleración (negativa) o desaceleración del objeto según un lapso de tiempo. La herramienta permite que se registren 25 valores de desaceleración antes de pasar a registrarlos (Figura 3.12).

```
void logData() {
  if (vectorResultante > 3) {
    boolean findGMax = true;
    while (findGMax) {
      Datos();
      if (contador2 == 25) {
        findGMax = false;
        contador2 = 0;
      }
    }
    Calcular();
  }
}
```

Figura 3. 12. Fragmento de código de registro de información

La Figura 3.12 hace referencia al filtro (`vectorResultante > 3`) que permite el ingreso al registro de información. Se genera un arreglo de 25 datos (`contador2 == 25`) que posteriormente se calculan y registran en el módulo de tarjeta SD. La frase del código “void LogData()” (Figura 3.12) y la frase “float prueba” (Figura 3.11) son dos funciones que se utilizan en el bucle principal de la programación (Figura 3.13).

```
void loop()
{
  logData();
  prueba();
}
```

Figura 3. 13 Fragmento de código bucle principal

3.1.3 Registro de la aceleración de objetos

El bucle principal ejecuta la función “logData ();” y “prueba ();”, la cual permite el registro de datos de aceleración. El registro inicia cuando se supera el umbral de 3 G, en ese momento se registran 25 lecturas del acelerómetro. La frecuencia actual de operación es de 350 Hz la cual se alcanzó optimizando el manejo de datos como paquetes de 25 elementos, ya que una vez se completan los registros sin procesar, se transforman los datos a valores de G y se registran. Si el caso fuese el contrario, en el que cada valor del sensor entra, se transforma y se registra, la frecuencia de operación sería de 80 Hz y limita la cantidad de lectura que se pueden registrar de un impacto. Se realizó una comparación entre las dos velocidades, 350 Hz es la máxima frecuencia que se puede obtener bajo las capacidades de procesamiento actuales y se obtiene mayor cantidad de datos del impacto.

Se muestra una gráfica (Figura 3.14) con un punto máximo para cada frecuencia de un impacto de caída libre de 20 cm de altura, la frecuencia de máxima alcanzable de 350 Hz permite obtener mayor cantidad de información de cada impacto, en comparación con la frecuencia de 80 Hz. Se utilizó la frecuencia de 350 Hz para registrar todos los valores de aceleración de las pruebas de impacto. Los valores menores a 3 G se consideran valores ruido, ya que debido a la resolución del sensor no es posible obtener un valor de 1 G exacto de aceleración constante de la gravedad.

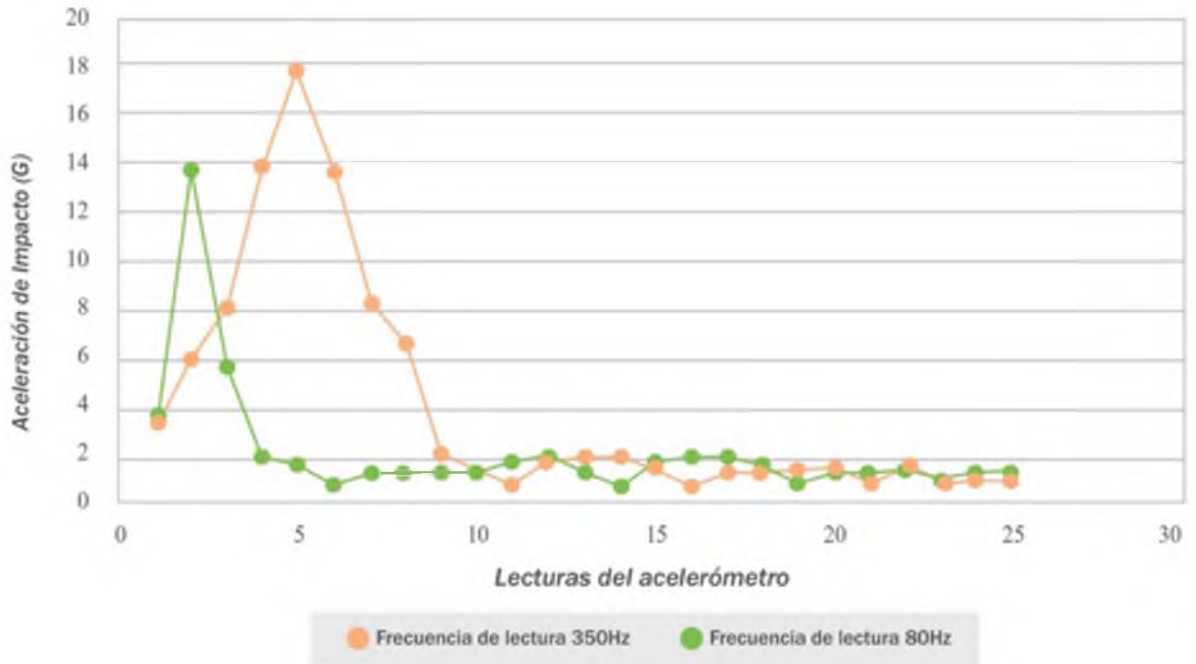


Figura 3. 14 Registro de aceleración, 350Hz vs 80Hz.

3.2 Resultados experimentales de las pruebas con melones

3.2.1 Determinación de la aceleración final del golpe del melón

El sistema de péndulo se utilizó para provocar un golpe al melón. Este sistema ofrece distintas alturas que según el ángulo seleccionado, replican distintos niveles de impactos; y según la masa de cada uno de los melones, se obtienen distintos valores aceleración de los impactos (Figura 3.15 y Cuadro 3.1). En el Anexo 1 presenta una muestra de cálculo.

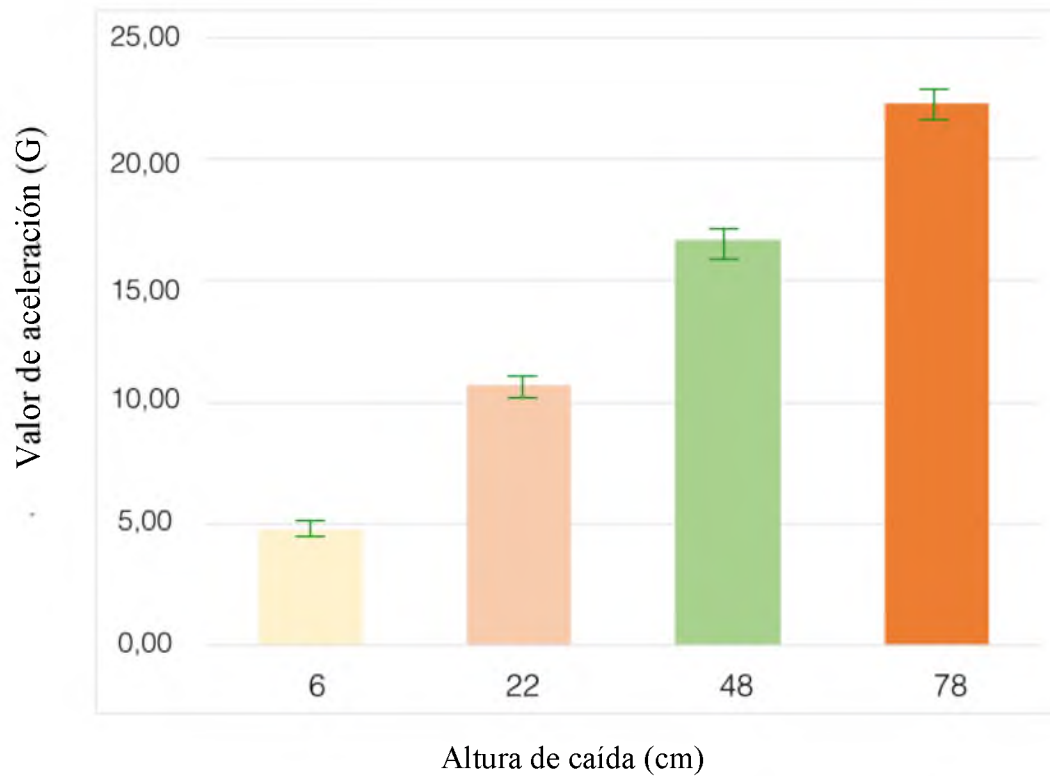


Figura 3. 15 Aceleración del impacto de los melones en el sistema de péndulo

Cuadro 3.1 Promedio y desviación estándar de aceleraciones de los melones según las alturas de impacto

Altura equivalente (cm)	Valor mínimo de aceleración (G)	Valor máximo de aceleración (G)	Promedio (G)	Desviación Estándar
0	0,00	0,00	0,00	0,00
6	4,25	5,22	4,75	0,25
22	9,82	11,74	10,71	0,55
48	15,55	18,05	16,68	0,81
78	20,61	24,18	22,28	0,99

Los valores de aceleración para la primera altura (0 cm) son cero, ya que es una altura control bajo la cual no se realizó ningún golpe. Los valores de aceleración de estos impactos mantienen una variación muy baja (desviación estándar menor a 1) ya que la velocidad final para cada altura no presenta variaciones. Conforme la altura incrementa, así incrementa la velocidad final del impacto y así su valor de aceleración (G). La altura de 78 cm presenta el mayor valor de aceleración (22,28 G) y una desviación estándar de 0,99 (Figura 3.15). Los valores mínimos y máximos se utilizaron posteriormente, al momento de correlacionar los valores de los melones reales con los de valores de aceleración registrados con la herramienta.

3.2.2 Resultados en la evolución de daños físicos y firmeza en los melones

Los valores de las aceleraciones durante los impactos se relacionan con la reducción en la firmeza del melón, en ambas condiciones de almacenamiento (refrigeración y temperatura ambiente) tanto en la zona sin golpe y con golpe. En la Figura 3.16 se muestra que la firmeza disminuyó en el tiempo, independientemente de altura a la cual se generó el impacto.

Además, se observó que desde el primer día, la firmeza en el área golpeada fue entre 5 N y 10 N menor que en el área no golpeada, y esta diferencia se mantuvo a lo largo del periodo 0 a 20 días.

A los 20 días de almacenamiento a 4 °C, se extrajo el producto del cuarto refrigerado a condiciones ambiente, lo cual provoca un rápido descenso de la firmeza atribuido a un aumento en la actividad metabólica de la fruta, que aceleró los procesos de ablandamiento asociados a la maduración y senescencia de la fruta. En el día 30 de almacenamiento, se

observó que la firmeza se redujo a valores entre 9,9 N y 14,1 N en la zona sin impacto y entre 0,9 N y 11,0 N en la zona del impacto.

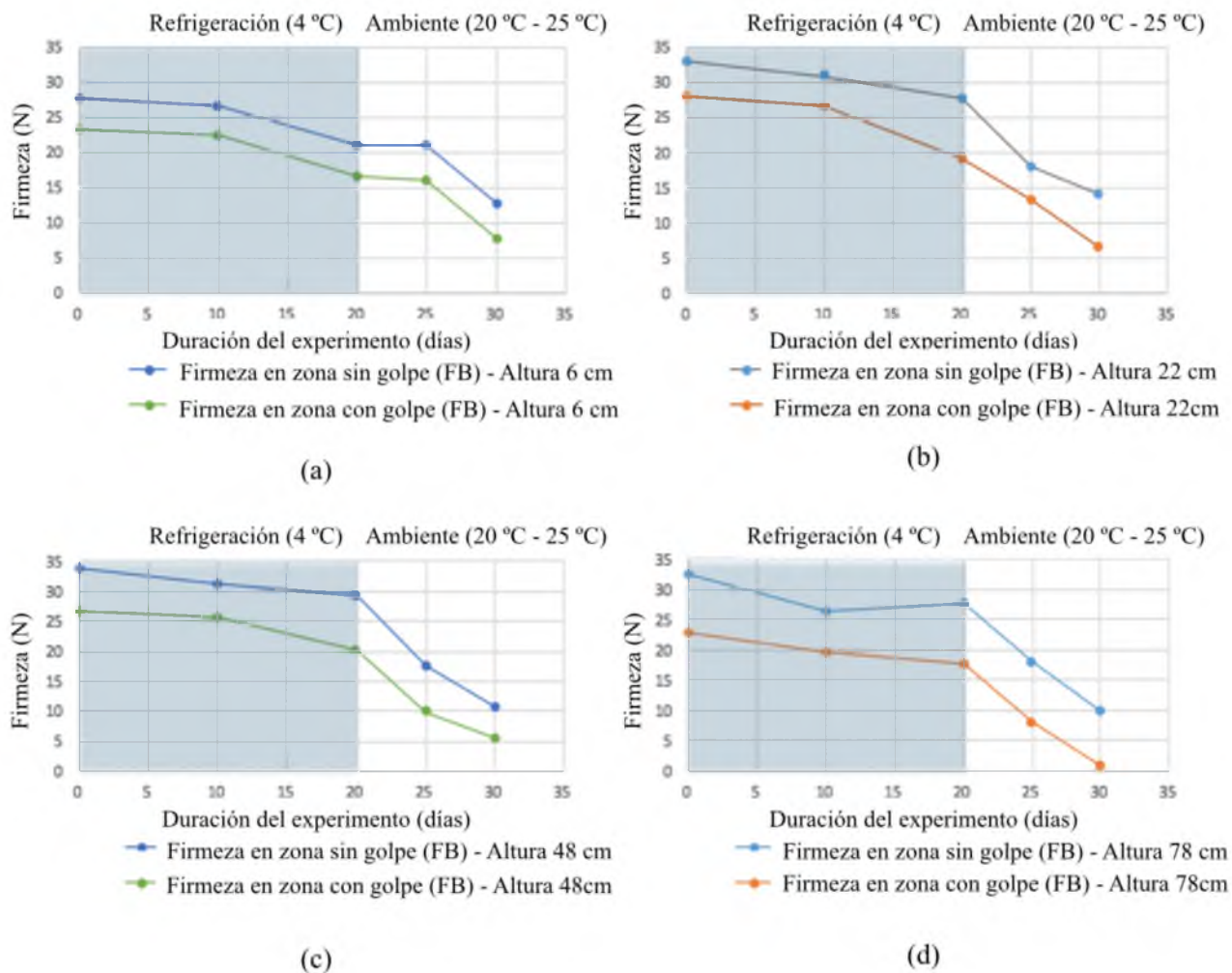


Figura 3. 16 Firmeza zona sin golpe vs firmeza zona con golpe

(a) Firmeza zona sin golpe vs firmeza zona con golpe – Altura 6 cm. (b) Firmeza zona sin golpe vs firmeza zona con golpe – Altura 22 cm. (c) Firmeza zona sin golpe vs firmeza zona con golpe – Altura 48 cm. (d) Firmeza zona sin golpe vs firmeza zona con golpe – Altura 78 cm

Se encontró en el día 30 que para la fruta golpeada desde la altura de 78 cm, la firmeza de la zona golpeada fue de 0,9 N y se caracterizó por una apariencia acuosa y sin capacidad de mantener su estructura, los golpes iguales o superiores son los de mayor riesgo para los melones de esta variedad, el deterioro que presentó la fruta era evidente y había perdido su capacidad de comercialización. Los resultados presentados en la Figura 3.16 fueron analizados estadísticamente, y no se encontraron diferencias significativas en la firmeza de la fruta en la zona golpeada (Anexo III).

La pérdida de masa decreció linealmente durante los primeros 20 días de almacenamiento (Figura 3.17); sin embargo, no se encontraron diferencias significativas entre las altura de caída. Se presentó una tendencia de las mayores alturas a presentar mayores pérdidas de masa, esto debido a la ruptura de tejidos, un incremento en su respiración celular y a un acelerado proceso de maduración.

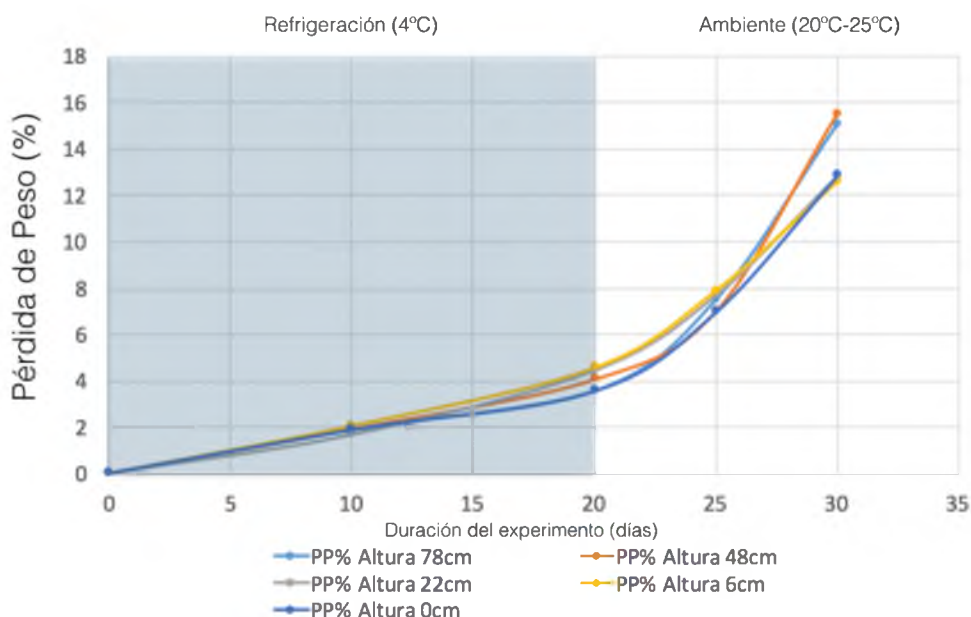


Figura 3. 17 Pérdida de masa de los melones durante el experimento

En cuanto a la apariencia física de la fruta, no presentó cambio significativo durante los primeros 20 días de almacenamiento. A los 30 días, los melones de las alturas de 48 cm y 78 cm presentaron síntomas de deterioro propios de la sobremaduración y senescencia del melón. Este comportamiento indica que el daño mecánico está presente, pero por la magnitud del impacto se mantiene latente, a medida que el producto se sobre madura y va perdiendo consistencia, se debilitan los tejidos y aparecen los síntomas visuales de daño, los cuales fueron únicamente visibles a la hora de ver el interior de la fruta. Estas alturas presentaron daños mecánicos en forma de magulladura, tejidos acuosos y cambio de color en la pulpa. En las pruebas no se observó fractura de la cobertura externa de los melones, no se alcanza el esfuerzo último del material.

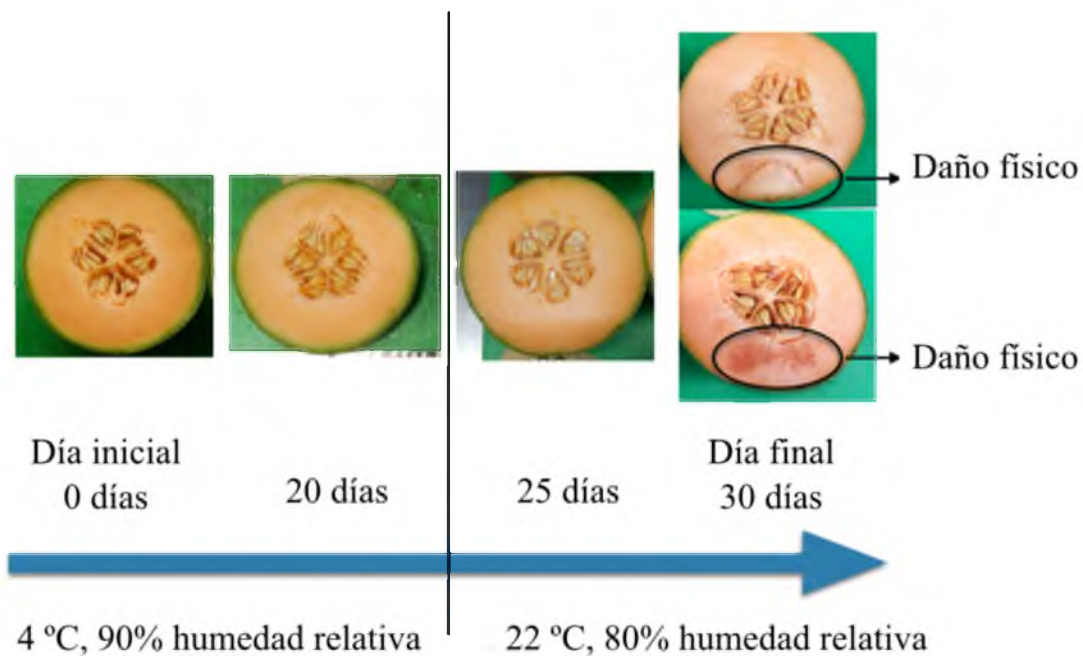


Figura 3. 18 Apariencia de los melones sometidos a golpes durante el almacenamiento

3.2.3 Registro de temperatura y humedad relativa durante el almacenamiento del producto.

Durante el almacenamiento, la temperatura del cuarto de refrigeración se mantuvo a $4 \pm 1^\circ\text{C}$, mientras que la humedad relativa varió entre 80% y 92%. Estos resultados indican condiciones muy estables durante las evaluaciones. Posterior a los 20 días de almacenamiento, se trasladó la fruta a condiciones de temperatura y humedad relativa ambiental (Figura 3.19) con una temperatura que varió entre 20°C y 25°C debido a los tiempos de día/noche y la humedad relativa entre 70% y 94%.

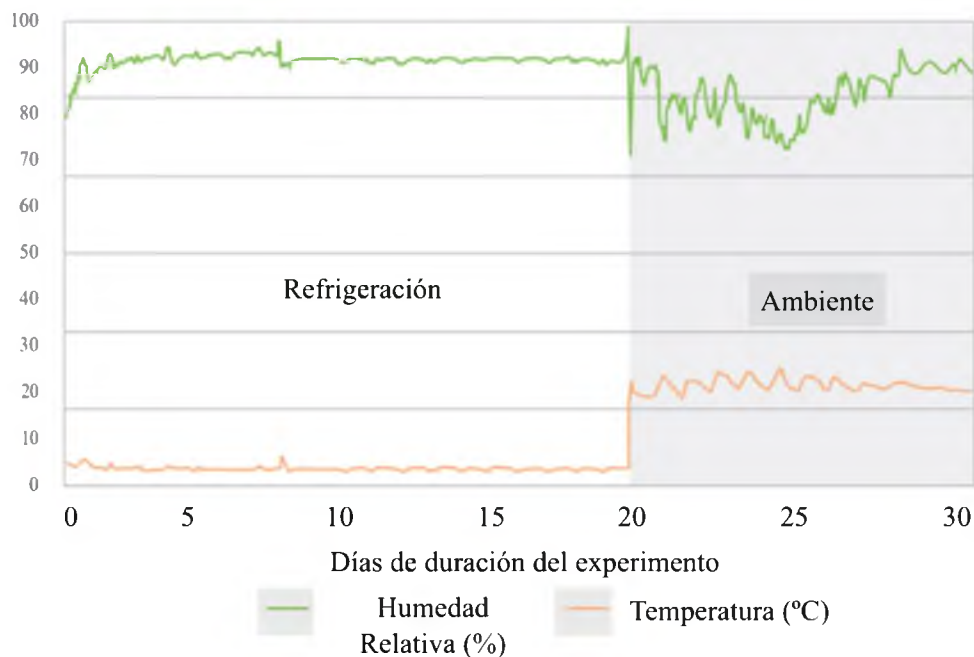


Figura 3. 19 Registro de temperatura y humedad relativa (%)

3.3 Resultados de la herramienta para registrar impactos.

3.3.1 Adquisición de datos de la herramienta

Se registraron los valores de aceleración usando el péndulo descrito para cada una de las alturas de caída utilizadas para el melón (6, 22, 48 y 78 cm); para 50 repeticiones (Cuadro II, Anexo II).

La herramienta puede registrar un valor máximo de 200 G de aceleración, cabe resaltar que la sensibilidad se ve afectada por la magnitud de la aceleración registrada, por lo que para valores más altos, se pierde precisión, así la resolución que el acelerómetro aporta es proporcional a la medida de la aceleración a la cual se ve expuesto, incrementando su desviación estándar conforme incrementa la altura de caída. . En la Figura 3.20, se muestra el resumen de los resultados obtenidos con la utilización de la herramienta.

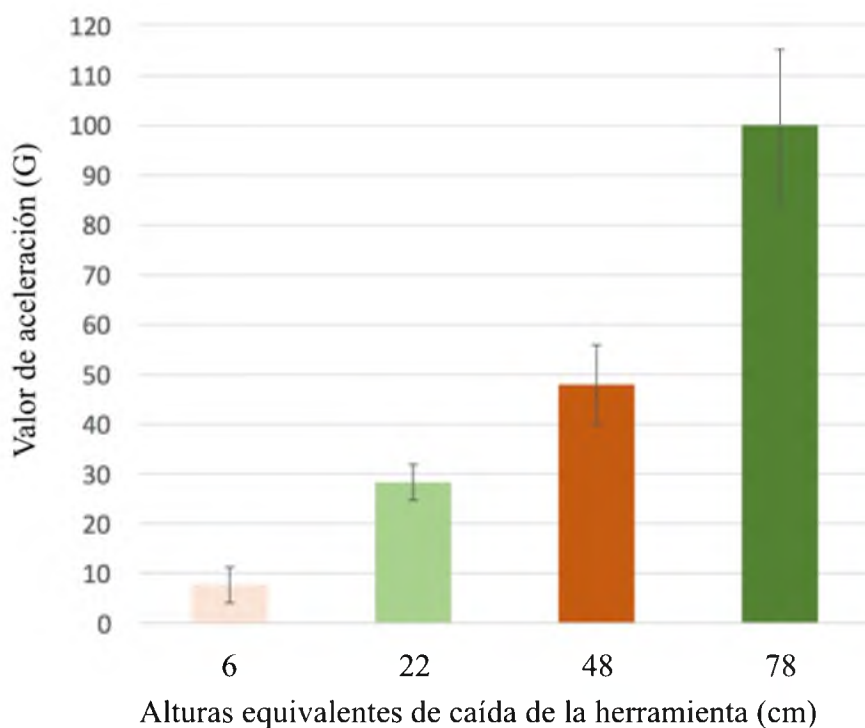


Figura 3. 20 Aceleración registrada por la herramienta según alturas de impacto

Los valores para cada una de las alturas se comportan como bandas de registros, bajo las cuales se pueden ubicar las aceleraciones para cada una de las correspondientes alturas del estudio. Los valores de aceleración para la altura de 78 cm son los que presentan la mayor desviación estándar con 15,31 G y un promedio de 99,97 G de aceleración (Cuadro 3,2). La altura de 6 cm presenta un valor de aceleración promedio de 7,75 G con una desviación estándar de 3,56. El aumento se debe a la variabilidad porcentual de la lectura del sensor de aceleración.

Cuadro 3.2. Promedio de valores de aceleración registrados con la herramienta.

Altura equivalente (cm)	Promedio (G)	Desviación estándar
6	7,75	3,56
22	28,39	3,56
48	47,96	7,87
78	99,97	15,31

3.3.2 Establecimiento de bandas de aceleración equivalentes para la calibración de la herramienta.

Se definieron cuatro bandas de trabajo para tomar los valores y agruparlos según las alturas de la sección experimental (6, 22, 48 y 78 cm). Para ello se tomaron los valores máximos y mínimos de aceleración registrados en la herramienta para cada altura (Cuadro 3.3) y se definieron las aceleraciones equivalentes (Cuadro 3.3).

Cuadro 3.3. Rangos de bandas aceleración equivalente de la herramienta, valores máximos y mínimos

Banda de Trabajo	Altura equivalente (cm)	Valor Mínimo (G)	Valor Máximo (G)
1	6	4,98	16,55
2	22	22,73	35,66
3	48	36,04	65,76
4	78	75,32	132,56

Adicionalmente, se utilizaron los resultados de la aceleración de los melones dados en el Cuadro 3.1, también divididos en bandas con el fin de correlacionar las aceleraciones medidas por la herramienta, con las del melón (Cuadro 3.4).

Cuadro 3.4. Valores de correlación entre aceleraciones de la herramienta y los melones reales

Aceleración	Altura equivalente 6cm		Altura equivalente 22cm		Altura equivalente 48cm		Altura equivalente 78cm	
	Melón	Herramienta	Melón	Herramienta	Melón	Herramienta	Melón	Herramienta
Mínimo (G)	4,25	4,98	9,82	22,73	15,55	36,04	20,61	75,32
Máximo (G)	5,22	16,55	11,74	35,66	18,05	65,76	24,18	132,56
Promedio (G)	4,75	7,63	10,71	28,39	16,68	47,96	22,28	99,97

Del Cuadro 3.4 se unen los valores mínimos y máximos de cada altura para crear las bandas de calibración de la herramienta, según se muestra en la Figura 3.21.

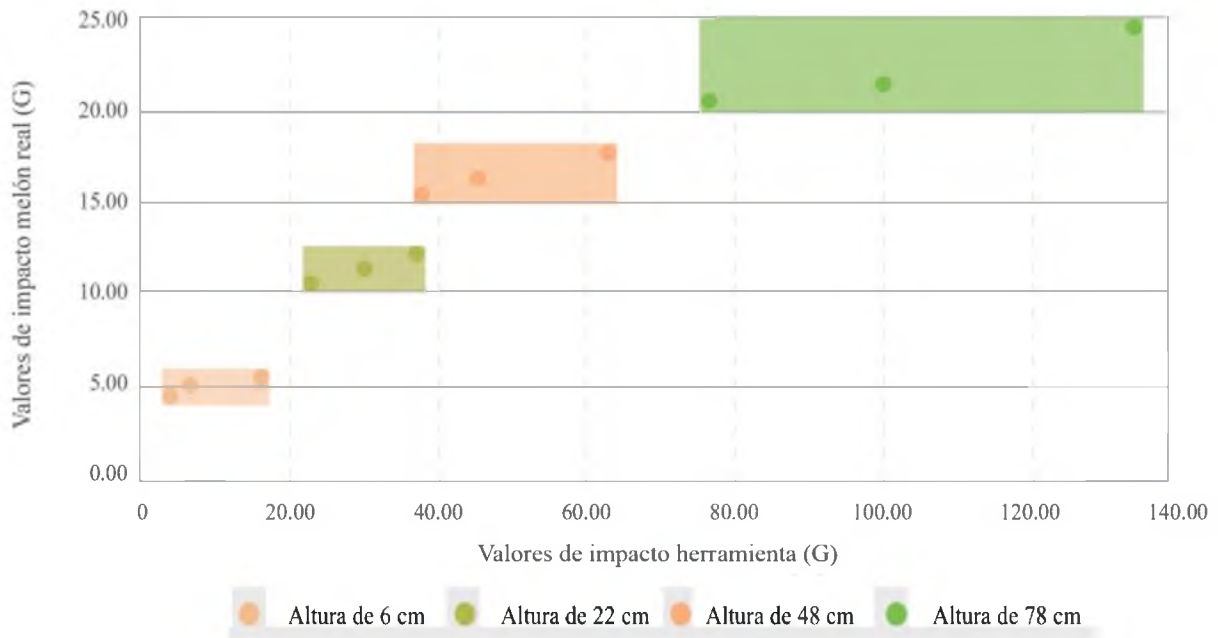


Figura 3. 21 Correlación de valores de aceleración de la herramienta y los melones reales

En el caso de la altura de 6cm, los valores de aceleración para los melones reales se encontraron en el rango de los 4,25 G a 5,22 G; mientras que los valores de aceleración que registró la herramienta son de entre los 4,98 G y los 16,55 G, los cuales se catalogaron como el equivalentes al rango previamente mencionado; así sucesivamente para las demás alturas. Los umbrales de cada rango van adoptando valores mayores conforme se incrementa la altura del impacto, tal es el caso de la altura equivalente a 78cm, la cual presentó un rango entre los 75,32 G y 132,56 G de aceleración con la herramienta y un rango entre 20,61 G y 24,18 G.

Los valores de las aceleraciones para los melones son de menor magnitud que las aceleraciones registradas por la herramienta, debido a esto se observó que las dimensiones de las bandas de la Figura 3.21 difieren y no mantienen una correlación uniforme. La diferencia en esta correlación se debe a que el sensor de aceleración utilizado genera una desviación

estándar proporcional a la medida de la magnitud de la aceleración registrada y por eso se manejó el resultado en bandas. Estas diferencias permitieron comparar la respuesta de la herramienta con los datos de aceleración de los melones, pero dadas las condiciones de la herramienta en estado de prototipo es un factor que se debe corregir para poder tener bandas más estrechas y cercanas entre sí que permitan mediciones más confiables.

Los valores promedio para cada altura mantienen un ajuste lineal que tiene a 1 ($R^2 \approx 1$), para cada diferencia entre alturas se presenta un mayor diferencial para las aceleraciones de la herramienta que para las aceleraciones de los melones. La sensibilidad del sensor permitió registrar un rango amplio de valores para cada altura (Figura 3.22) y así mantener separados los datos.

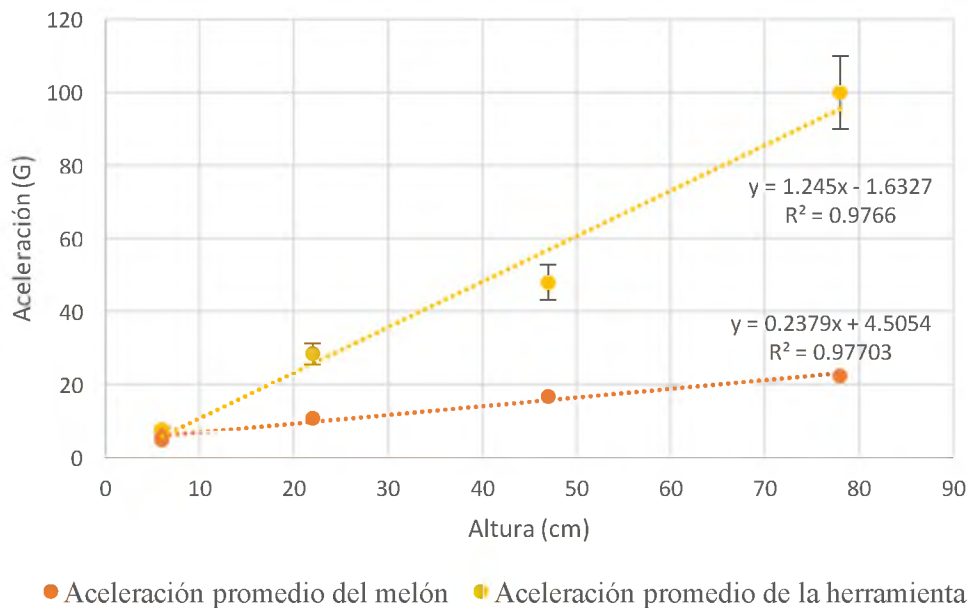


Figura 3. 22 Sensibilidad de la herramienta

Los datos de firmeza se correlacionaron con los valores de aceleración de la herramienta, con los cuales se obtuvo una medida del riesgo de la aparición de daño mecánico debido a impactos. En las pruebas para los melones se obtuvo un efecto leve de daño ya que se provocó únicamente un impacto a cada melón, lo cual se cataloga como una condición controlada de laboratorio, ya que en la práctica el melón puede ser impactado en múltiples zonas. Esta condición permitió tener certeza sobre lo que sucedió con cada melón, lo cual permitió identificar un umbral tolerable (7,63G-36,04G) de aceleraciones para la variedad de melón Cantaloupe Florentina.

Los valores de aceleración de la herramienta de la banda equivalente de 78cm presentan mayor vulnerabilidad a la aparición de daños latentes en el melón real, ya que al cabo de los 30 días de almacenamiento se aprecia un efecto moderado sobre la pulpa.

Conclusiones

El uso de una impresora en 3D permitió diseñar una herramienta para medir impactos para el estudio de daño mecánico en melón, creando un dispositivo para instalar los componentes electrónicos para la medición de la aceleración.

Se completó con éxito el registro de impactos por medio de la programación de código abierto y se presentó un diseño que permite ser replicado para incluir mejoras y ser utilizado en otros productos agrícolas. El diseño se obtuvo por medio de la utilización de tecnología 3D de bajo costo y sistemas accesibles de código libre, bajo la premisa de utilizar componentes electrónicos disponibles en el mercado de Costa Rica. El equipo utilizado para el desarrollo de la herramienta presentó una inversión aproximada de USD \$170 (Anexo IV) y se utilizaron componentes para cumplir con un producto mínimo viable sujeto a mejoras.

Se seleccionaron los componentes del dispositivo electrónico que permiten obtener una medición máxima de aceleración 200 G, el cual permite registrar los valores que generan riesgos de daños moderados a severos en el melón. El diseño de la herramienta permite trabajar con 4 bandas independientes (#1: 4,98G a 16,55G, #2: de 22,73 G a 35,66 G, #3: 36,04 G a 65,76 G y #4: 75,32 G a 132,56 G), los cuales corresponden a aceleraciones equivalentes según las alturas de golpe de 6 cm, 22 cm, 48 cm y 78 cm.

Las aceleraciones obtenidas para los melones bajo el sistema de péndulo presentaron un incremento en su magnitud respecto al incremento de altura. Los valores de las aceleraciones de los golpes en el melón inician con un valor de 4,25 G para una altura de 6cm; hasta un valor de 24,18 G para la altura mayor equivalente a 78 cm. Además, los resultados

del método del péndulo utilizando melones, permitieron obtener una correlación de aceleración de la fruta con lecturas digitales de aceleración de la herramienta.

La firmeza presentó una disminución generalizada en la zona golpeada comparada con la que no tuvo golpes, manifestándose desde el primer día de medición. Los daños obtenidos se manifestaron únicamente transcurrido el tiempo total del experimento, haciendo evidente visualmente el golpe hasta finalizar el periodo de almacenamiento. Los melones se vuelven más vulnerables a cambios en sus propiedades conforme aumenta la altura del golpe.

El desarrollo del prototipo limita las capacidades de la herramienta y por su naturaleza de bajo costo sacrifica su resolución con una desviación estándar que incrementa según la magnitud de la aceleración registrada, con valores de hasta 15,31 G de desviación para medidas de 100 G debido a las condiciones de los equipos con lo que se elaboró la herramienta.

Se concluye también que si la herramienta registra valores mayores a 75,32 G, el producto presentaría un daño moderado a partir de día 30, provocando que la fruta no pueda ser comercializada. Se presenta un valor umbral de 36,04 G, sobre el cual se aceleró la pérdida de consistencia interna y se incrementó la vulnerabilidad de los melones a sufrir efectos moderados, mayores disminuciones de firmeza y riesgos a la aparición de zonas de oscurecimiento.

Recomendaciones

El diseño de la herramienta permite registrar y correlacionar de manera exitosa los impactos en el melón, pero su desarrollo está aún en una etapa temprana ya que conforme se avanzó en su composición, se manifestaron necesidades no resueltas para la herramienta.

El dispositivo se validó en condiciones controladas de laboratorio, con el fin de comprobar el funcionamiento del dispositivo y registro de datos. Se recomienda implementarlo en los procesos de transporte, empaque y distribución, con miras a corregir y mejorar la adquisición y correlación de datos.

Además, es necesario vincular localización geográfica con incidencia de golpes y cambios de condiciones de almacenamiento, convierte esto en oportunidad de mejorar el dispositivo, para así mantener una correlación adicional con el sitio de la incidencia.

La mejora del diseño impreso de la herramienta debe ser de los principales pasos a seguir, se recomienda la utilización del material “Ninja Flex Plastic”, en su presentación para impresoras 3D de extrusión. Adicionalmente se puede utilizar un recubrimiento de látex para disminuir el diferencial de aceleración de los impactos.

La mayoría de productos agrícolas presentan proceso de lavado, actualmente la herramienta no presenta la hermeticidad suficiente para enfrentarse a medios en dónde se sumerja parcialmente, por lo cual se recomienda el diseño de biseles para sellar el dispositivo contra el ingreso de agua.

La recolección de datos en los procesos agrícolas es una de las principales limitaciones, ya que es necesario detener el registro de datos para acceder a la información, para facilitar el

acceso se recomienda la incorporación de un módulo de intercomunicación con tecnología Wi-Fi.

Bibliografía

- Agulheiro, A. C., & Roseiro, C. (2012). 2 Rheological Properties of Food. In *Physical Properties of Food* (pp. 23–52).
- Alpizar, M., Chacón, M., López, K., Megaglia, C., Mora, E., Moreira, L., & Segura, S. (2014). Estadísticas de Comercio Exterior Costa Rica 2014. *Promotora Del Comercio Exterior de Costa Rica*, 2215–2342. <http://doi.org/2215-2342>
- Balka, K. (2011). *Open Source Product Development* (Vol. 1). Hamburgo.
- Beer, F., Johnston, R., Dewolf, J., & Mazurek, D. (2010). *Mecánica de Materiales* (Quinta Edi). México, DF: McGraw-Hill.
- Billaud, C., Brun-Mérimée, S., Louarme, L., & Nicolas, J. (2004). Effect of glutathione and Maillard reaction products prepared from glucose or fructose with glutathione on polyphenoloxidase from apple—I: Enzymatic browning and enzyme activity inhibition. *Food Chemistry*, 84(2), 223–233. [http://doi.org/10.1016/S0308-8146\(03\)00206-1](http://doi.org/10.1016/S0308-8146(03)00206-1)
- Bovi, G. G., Caleb, O. J., Linke, M., Rauh, C., & Mahajan, P. V. (2016). Transpiration and moisture evolution in packaged fresh horticultural produce and the role of integrated mathematical models: A review. *Biosystems Engineering*, 150, 24–39. <http://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.07.013>
- Defraeye, T., Wu, W., Prawiranto, K., Fortunato, G., Kemp, S., Hartmann, S., ... Nicolai, B. (2017). Artificial fruit for monitoring the thermal history of horticultural produce in the cold chain. *Journal of Food Engineering*, 215, 51–60. <http://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.07.012>
- Franck, C., Lammertyn, J., Ho, Q. T., Verboven, P., Verlinden, B., & Nicolai, B. M. (2007). Browning disorders in pear fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 43(1), 1–13. <http://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2006.08.008>
- Füller, J., Schroll, R., & von Hippel, E. (2013). User generated brands and their contribution to the diffusion of user innovations. *Research Policy*, 42(6), 1197–1209. <http://doi.org/10.1016/j.respol.2013.03.006>

- Harhoff, D., & Mayrhofer, P. (2010). Managing user communities and hybrid innovation processes: Concepts and design implications. *Organizational Dynamics*, 39(2), 137–144. <http://doi.org/10.1016/j.orgdyn.2010.01.005>
- Li, Z., & Thomas, C. (2014). Quantitative evaluation of mechanical damage to fresh fruits. *Trends in Food Science & Technology*, 35(2), 138–150. <http://doi.org/10.1016/j.tifs.2013.12.001>
- Lucena, Í., Ferreira, L., & de Sousa, J. (2012). *Food Industrial Processes - Methods and Equipment*. (D. B. Valdez, Ed.) *InTech*. Brazil.
- Mesquita, V. L. V., & Queiroz, C. (2013). Chapter 10 – Enzymatic Browning. In *Biochemistry of Foods* (pp. 387–418). <http://doi.org/10.1016/B978-0-08-091809-9.00010-8>
- Mohsenin, N. (1986). *Physical Properties of Plant and Animal Materials. Structure, Physical Characteristics and Mechanical Properties*. (G. and Breach, Ed.) (2nd ed.). New York. <http://doi.org/10.1002/food.19870310724>
- Monge, J. E. (2013). Producción y exportación de melón (*Cucumis melo*) en Costa Rica. *Tecnología En Marcha*, 27(1), 93–103.
- Opara, U. L., & Pathare, P. B. (2014). Bruise damage measurement and analysis of fresh horticultural produce—A review. *Postharvest Biology and Technology*, 91, 9–24. <http://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2013.12.009>
- Peleg, K., & Hinga, S. (1986). Simulation of vibration damage in produce [fruit and vegetables] transportation. *ASAE*, 29, 633–641.
- Picón, D. (1997). *Resistencia del melón (*Cucumis melo*, v.b. *reticulatus*) al daño mecánico en el proceso de empaque para exportación*. Universidad de Costa Rica.
- Ruiz-Altisent, M., Ruiz-García, L., Moreda, G. P., Lu, R., Hernández-Sánchez, N., Correa, E. C., ... García-Ramos, J. (2010). Sensors for product characterization and quality of specialty crops—A review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 74(2), 176–194. <http://doi.org/10.1016/j.compag.2010.07.002>
- Saltveit, M. E. (2011). 2 – Melon (*Cucumis melo* L.). In *Postharvest Biology and Technology*

- of Tropical and Subtropical Fruits* (p. 31–45e). <http://doi.org/10.1533/9780857092618.31>
- Schelly, C., Anzalone, G., Wijnen, B., & Pearce, J. M. (2015). Open-source 3-D printing technologies for education: Bringing additive manufacturing to the classroom. *Journal of Visual Languages & Computing*, 28, 226–237. <http://doi.org/10.1016/j.jvlc.2015.01.004>
- Schmilovitch, Z., & Mizrach, A. (2013). 16 – Instrumental assessment of the sensory quality of fruits and vegetables. In *Instrumental Assessment of Food Sensory Quality* (p. 446–466e). <http://doi.org/10.1533/9780857098856.3.446>
- Sousa-Gallagher, M. J., Tank, A., & Sousa, R. (2016). 14 – Emerging Technologies to Extend the Shelf Life and Stability of Fruits and Vegetables. In *The Stability and Shelf Life of Food* (pp. 399–430). <http://doi.org/10.1016/B978-0-08-100435-7.00014-9>
- Steffe, J. F. (1996). *Rheological Methods in Food Process Engineering*. East Lansing: Freeman Press.
- Stroshine, R. (1998). *Physical Properties of Agricultural Materials and Food Products*. Stillwater, Oklahoma: Purdue University.
- West, J. (2003). How open is open enough?: Melding proprietary and open source platform strategies. *Research Polic*, 32(7), 1259–1285.
- Wilson, L., Boyette, M., & Estes, E. (1995). *Postharvest Handling and Cooling of Fresh Fruits, Vegetables, and Flowers for Small Farms*. (No. Leaflets 800–804).
- Wolfram, E., & Torstein, H. (2015). Chapter 15 – The Information Economy and the Open-Source Principle. *The Microeconomics of Complex Economie*, 451–471.

ANEXOS

Anexo I

Cuadro I. Cálculo de aceleración de los melones

Número	Identificador	REP	Ángulo (°)	Tiempo (días)	Masa Inicial (g) 30-3-17	Radianes	Altura h (m)	Velocidad Final (m/s)	Fmax (N)	Tiempo de Contacto (s)	Aceleración (m/s ²)	Aceleración (G)
1	1	01	0	00	1074,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00000	0,00	0,00
2	2	02	0	00	805,1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00000	0,00	0,00
3	3	03	0	00	965,79	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00000	0,00	0,00
16	4	01	0	10	949,1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00000	0,00	0,00
17	5	02	0	10	969,94	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00000	0,00	0,00
18	6	03	0	10	957,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00000	0,00	0,00
31	7	01	0	20	1051,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00000	0,00	0,00
32	8	02	0	20	1019,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00000	0,00	0,00
33	9	03	0	20	795,55	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00000	0,00	0,00
46	10	01	0	25	1014,61	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00000	0,00	0,00
47	11	02	0	25	824,58	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00000	0,00	0,00
48	12	03	0	25	926,36	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00000	0,00	0,00
61	13	01	0	30	1024,81	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00000	0,00	0,00
62	14	02	0	30	1193,68	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00000	0,00	0,00
63	15	03	0	30	967,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00000	0,00	0,00
4	1	01	20	00	699,75	0,35	0,06	1,06	144,27	0,02069	51,25	5,22
5	2	02	20	00	902,64	0,35	0,06	1,06	168,08	0,02290	46,29	4,72
6	3	03	20	00	798,81	0,35	0,06	1,06	156,19	0,02181	48,61	4,96
19	4	01	20	10	1174,1	0,35	0,06	1,06	196,80	0,02544	41,67	4,25
20	5	02	20	10	920,88	0,35	0,06	1,06	170,11	0,02309	45,92	4,68
21	6	03	20	10	1026,16	0,35	0,06	1,06	181,52	0,02411	43,98	4,48
34	7	01	20	20	883,78	0,35	0,06	1,06	165,96	0,02271	46,68	4,76
35	8	02	20	20	996,09	0,35	0,06	1,06	178,31	0,02382	44,50	4,54
36	9	03	20	20	797,24	0,35	0,06	1,06	156,01	0,02179	48,65	4,96
49	10	01	20	25	834,16	0,35	0,06	1,06	160,31	0,02219	47,78	4,87
50	11	02	20	25	818,14	0,35	0,06	1,06	158,45	0,02202	48,15	4,91
51	12	03	20	25	1077,29	0,35	0,06	1,06	186,90	0,02458	43,13	4,40
64	13	01	20	30	806,91	0,35	0,06	1,06	157,14	0,02190	48,41	4,94
65	14	02	20	30	812,72	0,35	0,06	1,06	157,82	0,02196	48,28	4,92
66	15	03	20	30	902,26	0,35	0,06	1,06	168,03	0,02290	46,30	4,72
7	1	01	40	00	796,17	0,70	0,22	2,09	351,61	0,01902	109,79	11,19
8	2	02	40	00	786,42	0,70	0,22	2,09	349,02	0,01893	110,33	11,25
9	3	03	40	00	893,43	0,70	0,22	2,09	376,79	0,01992	104,84	10,69
22	4	01	40	10	1018,75	0,70	0,22	2,09	407,66	0,02099	99,48	10,14
23	5	02	40	10	900,22	0,70	0,22	2,09	378,50	0,01998	104,53	10,66
24	6	03	40	10	955,32	0,70	0,22	2,09	392,24	0,02046	102,07	10,40
37	7	01	40	20	1026,94	0,70	0,22	2,09	409,62	0,02106	99,16	10,11
38	8	02	40	20	827,63	0,70	0,22	2,09	359,88	0,01932	108,10	11,02 11,74
39	9	03	40	20	706,79	0,70	0,22	2,09	327,36	0,01814	115,15	

Número	Identificador	REP	Ángulo (°)	Tiempo (días)	Masa Inicial (g) 30-3-17	Radianes	Altura h (m)	Velocidad Final (m/s)	Fmax (N)	Tiempo de Contacto (s)	Aceleración (m/s ²)	Aceleración (G)
53	11	02	40	25	914,93	0,70	0,22	2,09	382,20	0,02011	103,85	10,59
54	12	03	40	25	739,87	0,70	0,22	2,09	336,47	0,01847	113,06	11,52
67	13	01	40	30	1000,54	0,70	0,22	2,09	403,27	0,02084	100,20	10,21
68	14	02	40	30	821,16	0,70	0,22	2,09	358,19	0,01926	108,44	11,05
69	15	03	40	30	998,51	0,70	0,22	2,09	402,78	0,02082	100,28	10,22
10	1	01	60	00	909,53	1,05	0,48	3,05	600,69	0,01859	164,19	16,74
11	2	02	60	00	922,29	1,05	0,48	3,05	605,73	0,01870	163,27	16,64
12	3	03	60	00	967,19	1,05	0,48	3,05	623,26	0,01906	160,20	16,33
25	4	01	60	10	1009,5	1,05	0,48	3,05	639,47	0,01939	157,48	16,05
26	5	02	60	10	752,88	1,05	0,48	3,05	536,28	0,01724	177,08	18,05
27	6	03	60	10	1077,87	1,05	0,48	3,05	665,12	0,01990	153,40	15,64
40	7	01	60	20	1032,28	1,05	0,48	3,05	648,09	0,01956	156,08	15,91
41	8	02	60	20	829,54	1,05	0,48	3,05	568,41	0,01792	170,35	17,36
42	9	03	60	20	835,77	1,05	0,48	3,05	570,97	0,01797	169,84	17,31
55	10	01	60	25	816,35	1,05	0,48	3,05	562,97	0,01781	171,44	17,48
56	11	02	60	25	1081,58	1,05	0,48	3,05	666,49	0,01993	153,19	15,62
57	12	03	60	25	929,25	1,05	0,48	3,05	608,47	0,01875	162,78	16,59
70	13	01	60	30	755,25	1,05	0,48	3,05	537,30	0,01726	176,86	18,03
71	14	02	60	30	1093,39	1,05	0,48	3,05	670,85	0,02001	152,53	15,55
72	15	03	60	30	896,1	1,05	0,48	3,05	595,35	0,01848	165,17	16,84
13	1	01	80	00	924,33	1,40	0,78	3,92	819,92	0,01780	220,52	22,48
14	2	02	80	00	1147,75	1,40	0,78	3,92	933,65	0,01941	202,23	20,61
15	3	03	80	00	871,43	1,40	0,78	3,92	791,44	0,01738	225,78	23,02
28	4	01	80	10	986,16	1,40	0,78	3,92	852,40	0,01826	214,88	21,90
29	5	02	80	10	770,28	1,40	0,78	3,92	734,96	0,01655	237,20	24,18
30	6	03	80	10	1051,86	1,40	0,78	3,92	886,04	0,01874	209,41	21,35
43	7	01	80	20	960,58	1,40	0,78	3,92	839,07	0,01807	217,15	22,14
44	8	02	80	20	1080,66	1,40	0,78	3,92	900,51	0,01894	207,16	21,12
45	9	03	80	20	821,87	1,40	0,78	3,92	764,11	0,01698	231,13	23,56
58	10	01	80	25	930,16	1,40	0,78	3,92	823,02	0,01784	219,97	22,42
59	11	02	80	25	846,16	1,40	0,78	3,92	777,59	0,01718	228,46	23,29
60	12	03	80	25	1131,56	1,40	0,78	3,92	925,73	0,01930	203,38	20,73
73	13	01	80	30	961,55	1,40	0,78	3,92	839,58	0,01808	217,07	22,13
74	14	02	80	30	883,93	1,40	0,78	3,92	798,23	0,01748	224,50	22,88
75	15	03	80	30	927,73	1,40	0,78	3,92	821,73	0,01782	220,20	22,45

Anexo II

Cuadro II. Aceleración de la herramienta en las pruebas de impacto registrados en la herramienta desarrollada

Lectura	Altura 6cm (G)	Altura 22cm (G)	Altura 48cm (G)	Altura 78cm (G)
1	12,54	25,89	50,66	103,48
2	8,33	25,9	43,64	89,55
3	14,64	22,84	38,93	125,65
4	5,27	25	38,56	131,77
5	5,76	23,67	37,47	107,07
6	8,25	26,96	41,56	89,45
7	5,23	26,68	50,15	75,32
8	11,67	28,73	60,21	96,45
9	5,13	31,23	36,96	79,89
10	6,43	34,41	48,54	77,89
11	7,67	27,78	39,65	106,99
12	5,81	24,15	56,04	85,56
13	8,45	34,38	36,4	99,55
14	6,33	30,5	37,76	105,23
15	15,92	27,94	65,76	104,55
16	5,47	22,73	41,63	113,45
17	15,55	35,6	57,43	132,56
18	5,21	28,43	44,33	87,07
19	5,99	26,75	45,78	117,78
20	5,24	25,89	46,55	87,56
21	6,21	28,42	40,17	114,32
22	7,18	30,25	47,76	93,45
23	5,98	30,21	38,45	95,39
24	6,54	28,91	51,98	111,32
25	6,95	33,21	50,3	104,77
26	5,02	35,66	43,32	88,11
27	6,27	25,43	44,78	128,43
28	6,09	31,2	45,32	84,43
29	5,59	23,75	55,65	101,32
30	6,15	30,3	55,32	104,23
31	7,96	33,78	58,43	94,34
32	5,03	26,7	43,34	90,5
33	7,1	34,67	47,87	75,43
34	7,91	26,74	60,54	83,98
35	5,06	23,27	50,21	102,76
36	11,71	27,5	47,21	115,54
37	7,08	27,31	57,32	126,54
38	8,77	31,54	36,04	105,32
39	5,84	30,74	40,17	108,45
40	15,6	25,47	61,23	81,39
41	5,32	30,7	51,33	95,44
42	14,09	27,52	45,66	94,44
43	4,99	31,64	56,76	126,74
44	5,09	24,08	39,43	102,76
45	16,55	24,57	51,32	81,99
46	4,98	25,8	49,32	87,55
47	5,25	25,07	47,55	114,91
48	5,29	26,87	63,34	90,43
49	5	32,71	55,43	88,43
50	5,98	30,17	44,32	88,99
MAX	16,55	35,66	65,76	132,56
MIN	4,98	22,73	36,04	75,32
PROM	7,62	28,39	47,95	99,97
DV	3,35	3,52	7,79	15,16

Anexo III

Cuadro III Resultados del análisis de varianza de la firmeza y pérdida de masa en los melones reales

Día 0			
Altura (cm)	FSD (N)	FCD (N)	PP (%)
78	32.5 A	22.9 A	0.0
48	34.0 A	26.7 A	0.0
22	33.0 A	27.9 A	0.0
6	27.5 A	23.2 A	0.0
0	34.1 A	34.1 A	0.0
Día 10			
Altura (cm)	FSD (N)	FCD (N)	PP (%)
78	26.3 A	19.5 A	1.9 A
48	31.3 A	25.5 A	1.8 A
22	30.8 A	26.6 A	1.6 A
6	26.6 A	22.4 A	2.0 A
0	24.5 A	24.5 A	1.8 A
Día 20			
Altura (cm)	FSD (N)	FCD (N)	PP (%)
78	27.5 ABC	17.8 AB	3.5 A
48	29.2 C	20.2 AB	4.0 A
22	27.7 BC	19.1 AB	4.4 A
6	21.0 A	16.4 AB	4.5 A
0	22.0 ABC	22.0 B	3.5 A
Día 25			
Altura (cm)	FSD (N)	FCD (N)	PP (%)
78	18.1 A	8.1 A	7.47 A
48	17.67 A	9.9 A	6.95 A
22	18 A	13.33 A	7.66 A
6	22.9 A	15.97 A	7.85 A
0	19.67 A	19.67 A	6.93 A
Día 30			
Altura (cm)	FSD (N)	FCD (N)	PP (%)
78	9.9 A	0.9 A	15.0 A
48	10.6 A	5.4 B	15.4 A
22	14.1 A	6.7 B	12.7 A
6	12.8 A	7.6 B	12.5 A
0	11.0 A	11 C	12.7 A

En dónde:

FSD: Firmeza sin daño.

FCD: Firmeza con daño.

PP(%): pérdida de masa porcentual.

Anexo IV

Cuadro IV Resumen económico de la herramienta

Componente	Costo (USD)
Módulo de tarjeta SD	5
Acelerómetro ADXL377	25
Batería externa	6
PowerBoost 1000	22
Arduino Mega 2560	40
Botón	1
Cables varios	4
Luz	1
Resistencias varias	2
Cautín y soldadura	6
Filamento 3D (320g)	8
Alquiler de impresora	50
TOTAL	170

*Precios aproximados diciembre 2017.