

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

POSGRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA

Y USO INTEGRAL DEL AGUA

**“ROBOT TREPADOR DE PALMERAS PARA LA
DETECCIÓN DE COCOS”**

*Que como requisito parcial
para obtener el grado de*

**MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO
INTEGRAL DEL AGUA, ORIENTACIÓN BIODIVERSIDAD**



DIRECCIÓN GENERAL ACADEMICA
DIRECCIÓN GENERAL DE ASUNTOS ESCOLARES
DIRECCIÓN GENERAL DE EXAMENES PROFESIONALES

Presenta:

RENÉ RAMÍREZ RAMÍREZ



Chapingo, Estado de México, Diciembre de 2012

ROBOT TREPADOR DE PALMERAS PARA LA DETECCIÓN DE COCOS

Tesis realizada por **René Ramírez Ramírez** bajo la dirección del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL
AGUA, ORIENTACIÓN BIOSISTEMAS**

Director: _____

Dr. Federico Félix Hahn Schlam

Asesor: _____

Dr. Irineo L. López Cruz

Asesor: _____

M.C. Omar Reséndiz Cantera

“Clara manhã, obrigado. O essencial é viver...”

Carlos Drummond de Andrade

AGRADECIMIENTOS

A LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO POR HABER ABRIGADO UNA VEZ MÁS MIS SUEÑOS Y POR HABERME PERMITIDO CONSEGUIR UN LOGRO MÁS EN MI VIDA.

AL CONSEJO NACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA (CONACyT) POR LA BECA BRINDADA PARA LA REALIZACIÓN DE ESTA MAESTRÍA.

A MI AMIGO Y ASESOR, EL DR. FEDERICO FÉLIX HAHN SCHLAM POR TODA LA CONFIANZA DEPOSITADA EN MI Y POR COMPARTIR MUCHAS DE SUS EXPERIENCIAS, MUCHAS GRACIAS.

AL DR. IRINEO LÓPEZ CRUZ POR POR SUS CONSEJOS DURANTE LA ELABORACIÓN DE ESTE TRABAJO.

AL M. C OMAR RESÉNDIZ CANTERA POR SU APOYO AL FINAL DE ESTE TRABAJO Y POR ACEPTAR FORMAR PARTE DE EL.

AL DR. EUGENIO ROMANCHIK KRIUCHKOVA POR SU APOYO DURANTE ESTOS DOS AÑOS DE TRABAJO.

UN ESPECIAL AGRADECIMIENTO AL DR. JOSÉ ARMANDO RAMÍREZ ARIAS POR SUS CONFIANZA, CONSEJOS Y APOYO DURANTE MI ESTANCIA EN LA UNIVERSIDAD.

OBRIGADO A TODAS AS PESSOAS QUE CONTRIBUÍRAM PARA MEU SUCESSO E PARA MEU CRESCIMENTO COMO PESSOA.

“SOU O RESULTADO DA CONFIANÇA E DA FORÇA DE CADA UM DE VOCÊS.”.

Tanize Nascimento

DEDICATORIA

A toda mi familia, por el amor y cariño que me han brindado en toda mi vida

*A la raza chapinguera por enseñarme el verdadero valor de la amistad y por todas las maravillosas
experiencias que me permitieron vivir a su lado.*

*A minha esposa Tanize Ferreira do Nascimento. Por su amor y motivación a ser una persona
diferente.*

*Especialmente a mis amigos Toñito, Arce, Luis Mauricio y Leonel por las experiencias que vivimos y
por los sueños que compartimos.*

A mis amigos Ricardo, Baldomero, Alvaro y Rodi.

A mis amigos Marlio, Nadia y Efraín por mostrarme que la amistad no tiene fronteras.

Y a todas las personas que me acompañaron y apoyaron durante esta aventura, muchas gracias.

RENÉ RAMÍREZ RAMÍREZ

DATOS BIOGRÁFICOS DEL AUTOR

René Ramírez Ramírez es originario de la localidad del Ejido de Tlalchichilpa, municipio de San Felipe del Progreso Estado de México, nació el 28 de Marzo de 1986, a los 6 años entro a la escuela primaria “Vicente Guerrero” ubicada en la misma localidad, los estudion de la educación secundaria los realizó en le escuela Telesecundaria “Justo Sierra” a la edad de 15 años. Posteriormente se traslado a la Preparatoria Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo en donde realizó los estudios de nivel medio superior. En el 2004 decide ingresar al Instituto Politécnico Nacional, en donde realizó los estudios de Ingeniería Mecatrónica, la cual terminó en diciembre de 2009. En Agosto de 2010 regresa a la Universidad Autónoma Chapingo para realizar los estudios de Maestría en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, concluyendola en diciembre de 2012. Actualmente trabaja como programador .NET en la empresa PRAXIS ubicada en la Ciudad de México.

ROBOT TREPADOR DE PALMERAS PARA LA DETECCIÓN DE COCOS

Autor: René Ramírez Ramírez

Director: Dr. Federico Félix Hahn Schlam

El propósito de este trabajo fue diseñar, construir y probar un sistema robótico capaz de trepar palmeras para detectar cocos mediante un sistema de visión artificial. Para la construcción del robot se diseñó una estructura que pudiera adaptarse fácilmente a la forma física del tallo de la palmera (inclinación, altura y grosor). Esta estructura consta de un mecanismo de biela - manivela el cual permite al robot ascender por la palmera soportando su propia masa que es aproximadamente 7 kg incluyendo la estructura, motores, baterías y cámara. El sistema de visión artificial se compone de una cámara IP que se encarga de adquirir las imágenes del punto en que se encuentra el robot. Se utiliza un procesamiento basado en un algoritmo de detección de círculos se identifica la presencia de cocos en la palmera usando C# code la plataforma visual.NET. Los cocos pudieron ser identificados adecuadamente cuando no había interferencia por parte de las palapas. El robot trepaba bien en palmas derechas y en aquellas donde no había grandes malformaciones en el tronco.

Palabras Clave: robot trepador, visión artificial, palma de coco.

COCONUT CLIMBING ROBOT FOR COCONUT DETECTION

Author: René RamírezRamírez

Advisor: Dr. Federico Félix Hahn Schlam

The purpose of this work was to design, build and test a robotic system which is capable of climbing palm trees in order to detect coconuts with the help of artificial vision. The constructed robot presented a structure that could adapt easily to the coconut trunk form (inclination, height and diameter). The structure has a crank-connecting rod system that helps the robot to climb the palm tree carrying a motor, a battery and a camera weighting 7 kilograms. The artificial vision system includes an IP camera to acknowledge the point where the robot stands. In order to know the position of a coconut, an algorithm is used. It detects the circle of the coconut and determines where it is located. This process is done with a C# program in visual.NET platform. Coconut could be identified properly when no leaves interfered. The robot climbed properly when palms were straight and the trunk had null bad formations.

Keywords: climbing robot, artificial vision, coconut palm

Índice

Objetivos	xiii
Introducción	xiv
1. Marco Teórico	1
1.1. Características generales de los cocos	1
1.1.1. Origen y dispersión	2
1.1.2. Ecología	2
1.1.3. Características botánicas	3
1.1.4. Problemática en la producción de cocos en México	3
1.2. Sistemas robóticos y su aplicación en la agricultura	4
1.2.1. Robots cosechadores o recolectores	5
1.3. Sistemas de visión artificial y su aplicación en la agricultura	9
1.3.1. Algunas aplicaciones de la visión artificial en la agricultura	11
1.4. Sistemas electrónicos para la transmisión inalámbrica	13
1.4.1. Comunicación por módulos de Radiofrecuencia	14
1.4.2. Redes Inalámbricas	15
1.4.3. Aplicación de los sistemas de comunicación inalámbrica en agricultura	18

2. Materiales y métodos	20
2.1. Diseño general del sistema	20
2.2. Sistema mecánico	21
2.2.1. Análisis cinemático del sistema de ascenso del robot	24
2.2.2. Análisis cinemático del robot	27
2.3. Sistema de visión artificial	29
2.3.1. Transformación de la imagen a niveles de grises	30
2.3.2. Convolución	31
2.3.3. Mejoramiento de la imagen	31
2.3.4. Detección de bordes	32
2.3.5. Detección de cocos usando el método de detección de elipses	36
2.4. Software de control y diseño electrónico	38
3. Resultados y discusión	40
3.1. Caracterización fisonómica de cocotero (“Coconus Nucifera”)	40
3.2. Diseño mecánico del robot: Prototipo Metálico	42
3.3. Diseño mecánico del robot: Prototipo de PVC	45
3.3.1. Análisis mecánico del robot	49
3.4. Discusión de los resultados obtenidos del sistema mecánico	50
3.5. Sistema de visión artificial	52
3.5.1. Obtención de la imagen	52
3.5.2. Niveles de grises de la imagen	55
3.5.3. Mejoramiento de la imagen y obtención de los bordes	56
3.5.4. Detección final de cocos	59
3.5.5. Discusión de los resultados obtenidos durante el procesamiento de de las imágenes	63
3.5.6. Sistema eléctrico	66
4. Conclusiones	68
A. Diseños desarrollados del sistema mecánico	70

B. Ventanas desarrolladas del software de control	74
C. Características generales de los dispositivos usados	78
C.1. Dispositivos electrónicos	78
C.1.1. PIC18F4550	78
C.1.2. Características generales del ATmega32/32L	79
C.1.3. Transmisor HM-TR915/TTL	81
D. Tablas de diámetros e inclinación de las palmeras analizadas	82
E. Tabla de distancias entre los cocos y la cámara	91
F. Tablas de eficiencia del algoritmo usado para la detección de cocos	94
G. Tabla de distancias entre los cocos y la posición final del robot	99
Bibliografía	102
Bibliografía	102

Índice de figuras

1.1. Robot recolector de naranjas.	6
1.2. Robot recolector de manzanas.	7
1.3. Robot recolector de champiñones.	7
1.4. Robot recolector de tomates y cerezas.	8
1.5. Robot recolector de frutos secos.	9
1.6. Etapas del procesamiento digital de imagenes.	10
1.7. Detección de cocos usando Momentos geométricos invariantes.	12
1.8. Detección de cocos usando TCH e Intersección de cuerdas.	12
1.9. Modulación FSK	14
1.10. Topología de red con Puntos de Acceso (AP)	17
2.1. Diagrama general del sistema robótico.	21
2.2. Variaciones físicas en el tallo de distintas palmeras.	22
2.3. Trazado de triángulo para estimar el ángulo de inclinación en las palmeras.	22
2.4. Principio usado para el diseño del robot.	23
2.5. Estructura del robot.	24
2.6. Mecanismo en funcionamiento.	25
2.7. Mecanismo biela - manivela.	26
2.8. Modelo del mecanismo de ascenso.	27

2.9. Sistema de adquisición de imágenes.	29
2.10. Ejes de movimiento de la cámara.	30
2.11. Proceso para la detección de cocos.	30
2.12. Geometría de la elipse.	37
3.1. Sistema mecánico del robot. (A). Primer diseño, (B).Modificaciones del primer diseño.	43
3.2. Casos de falla de ascenso de prototipo metálico.	43
3.3. Sistema mecánico del robot construido con estructura metálica.	44
3.4. Sistema mecánico del robot construido con PVC.	45
3.5. Sistema mecánico final del robot construido con PVC.	46
3.6. Resultados de ascenso del robot.	47
3.7. Resultados de ascenso del robot en una palmera con superficie irregular.	47
3.8. Superficies que afectan el desplazamiento y velocidad del robot durante el ascenso.	48
3.9. Gráficas de movimiento del robot	50
3.10. Gráficas de fuerza y fricción ejercida por el robot sobre la palmera.	51
3.11. Sistema para la adquisición de las imágenes. (A)Ordenador - Router, (B) Sistema para movimiento de la cámara.	53
3.12. Imagen adquirida por el ordenador.	53
3.13. Mejoramiento de la imagen. (A) Usando un filtro Gaussiano, (B) Ecualización del histograma, (C) Cambio de contraste.	57
3.14. Ecualización del histograma.	57
3.15. Mejoramiento por cambio de contraste.	58
3.16. Detección de bordes usando el filtro de Sobel.	58
3.17. Obtención final de bordes por umbralización.	59
3.18. Cocos detectados en las imágenes de análisis.	60
3.19. Cambios del mapa de bordes respecto al cambio del valor de umbral.	61
3.20. Eficiencia obtenida al variar el valor de umbral de la imagen después de aplicar el filtro de Sobel.	62
3.21. Distancia promedio para la obtención de la imagen con respecto a la cantidad de cocos.	63
A.1. Vista frontal de robot Koala.	71
A.2. Vista lateral de robot Koala.	71

ÍNDICE DE FIGURAS

A.3. Vista en perspectiva de robot Koala.	72
A.4. Diseño de robot podador.	72
A.5. Prototipo de robot podador.	73
B.1. Ventana para adquisición de imágenes y control del robot.	74
B.2. Ventana para el procesamiento de imágenes.	75

Índice de cuadros

2.1. Características de baterías usadas.	38
3.1. Tabla de características físicas de la muestra de palmeras estudiadas.	41
3.2. Estadísticas de la muestra de palmeras estudiadas.	42
3.3. Masa soportada y velocidad de los diseños contruidos.	48
3.4. Obtención de imágenes a distintas distancias (cámara - cocos) (D1): Distancia Cámara - Cocos, (D2): Distancia Coco - Tallo de la palmera	54
3.5. Transformación de las imágenes capturadas de formato de color RGB a niveles de gris con sus respectivos histogramas.	55
3.6. Tabla de eficiencia por valor de umbral aplicado	60
3.7. Tabla de distancias Cámara - Cocos	62
3.8. Consumo eléctrico del robot.	67
D.1. Diámetros	84
D.2. Inclinación	86
D.3. Medidas palmera	90
E.1. Distancia	93
F.1. Eficiencia	96
F.2. Eficiencia 2	98

G.1. Distancia Robot - Coco 101

Objetivo general

Diseñar y construir un robot trepador de palmeras para la detección de cocos basándose en un modelo de visión artificial.

Objetivos Particulares.

1. Diseñar y construir un sistema mecánico para trepar palmeras considerando las variaciones físicas de esta (diámetro y altura).
2. Desarrollar modelo de visión artificial para la detección de cocos.
3. Desarrollar un software para el control remoto del robot desde una PC.
4. Diseñar y construir el sistema electrónico para el control del robot.

Introducción

Durante muchos años los robots habían quedado relegados casi exclusivamente a los entornos industriales pero, en la actualidad la tendencia a salir de estos entornos para extenderse sobre todos los ámbitos de la sociedad. Podemos encontrar que la robótica ha sido introducida en multitud de escenarios y con aplicaciones muy diversas, por ejemplo: en el ensamblado y fabricación, transporte de mercancías pesadas, manipulación de materiales peligrosos, exploración espacial, exploración submarina, misiones de localización y rescate de supervivientes, desactivación de explosivos, ocio y entretenimiento, teleasistencia y cirugía, entre otros muchos.

Además de realizar tareas concretas, un robot debe ser capaz de desenvolverse en un entorno real plagado de interferencias, desordenado, desconocido, cambiante, lleno de tráfico intenso de objetos, vehículos o personas, que a medida de que estos entornos se conozcan puedan modificar la conducta del robot, lo cual aun complica más su desarrollo.

Precisamente la amplia diversidad de estos escenarios y aplicaciones provoca que cada proyecto robótico sea prácticamente exclusivo y particular, según las restricciones y características del problema que trata de resolver y que requiera del esfuerzo de equipos multidisciplinares para su desarrollo.

Cabe mencionar que, dentro de la robótica existen dos áreas importantes de clasificación de los robots, manipulación y locomoción, de las cuales actualmente uno de los grandes retos en el área de la locomoción es el de desarrollar un robot que sea capaz de moverse por cualquier tipo de entorno, por muy escarpado y complicado que sea. Se pueden realizar estudios previos y diseñar un robot específico en un determinado terreno. Pero lo interesante es conseguir un robot versátil que pueda moverse por la mayor cantidad de terrenos posibles.

Este documento presenta una propuesta de desarrollo de un robot de locomoción para trepar

palmeras el cual tiene como objetivo identificar la presencia de cocos, esta tarea se propuso realizarse mediante un modelo de visión artificial a fin de que este proceso se realice en forma automática, para ello se integró una cámara IP inalámbrica en el robot a fin de evitar el uso de cables para su conexión. Además, se pensó que este robot podría servir como base para la realización de un “cosechador de cocos” que se lograría al integrarle un sistema que se encargue del corte y traslado del coco hacia el suelo con lo que se facilitará este tipo de trabajo.

Este sistema se desarrolló de forma que el robot fuera capaz de trepar la mayor cantidad de palmeras independientemente del diámetro y forma del tallo así como su altura.

Además de esto, se desarrolló un software de control del robot con el que en forma remota se realizó la manipulación del robot en cuanto a ascenso y adquisición de las imágenes transmitidas por la cámara.

La descripción del desarrollo de la propuesta, se presenta en este documento a través de cuatro capítulos, de los cuales el primer capítulo describe la información teórica referente a los sistemas implementadas en todo el robot. El segundo capítulo muestra todo el procedimiento usado para el diseño y construcción del robot, así como los materiales usados para su elaboración. El capítulo tres presenta los resultados obtenidos en cuanto al comportamiento del robot durante el ascenso así como los resultados obtenidos en el proceso de detección de cocos. Por último, en el capítulo cuatro se desarrollan las conclusiones del trabajo realizado.

1.1. Características generales de los cocos

El cocotero *cocos nucifera* L, palma de coco, llamada también árbol de la vida ó árbol de los mil usos, es un cultivo representativo de las zonas costeras tropicales, y desde hace miles de años el hombre ha vivido con esta palma, aprovechando la madera para sus casas, como combustible, las palapas para techos de sus viviendas, la pulpa de la nuez de coco como alimento y ha utilizado el agua del fruto como bebida fresca. La palma de coco es una importante fuente de grasa vegetal, del endospermo de la semilla se obtiene el aceite de coco, útil en la fabricación de jabones, detergentes, aceites, grasas comestibles, tortas de copra para la engorda de ganado y otros subproductos industriales. La grasa de coco sobresale por ser un producto insustituible en la industria galletera y en la confitería [1].

Desde el punto de vista agrícola, el cocotero representa una alternativa para las áreas costeras tropicales y por su capacidad de desarrollo en los suelos arenosos pobres en nutrimentos y materia orgánica, donde ningún otro cultivo puede prosperar en forma económicamente redituable. Su presencia en la orilla de los mares es un componente paradisíaco de las zonas costeras tropicales, que ha favorecido la industria turística de México y de muchos países del mundo [1].

1.1.1. Origen y dispersión

La palabra coco proviene del portugués “cocu” con referencia al fruto, que sugiere una cara de mono. *Cocos nucifera* L. se distribuye en regiones tropicales y subtropicales de África, el Caribe y América del Sur. Su mayor variabilidad se presenta en el sureste asiático y en segundo lugar en el Caribe. Debido a su presencia y largo historial en las regiones tropicales y subtropicales de todos los continentes, no hay certeza sobre su centro de origen. Se cree que aunque el ancestro silvestre del coco pudo ser del sureste de Asia o de Sudamérica, el cual fue dispersado antes de su domesticación, hace millones de años. La gran dispersión de esta especie se atribuye a que los cocos flotantes son llevados por corrientes marinas o por acarreo del hombre en barcos como fuente de alimento y bebida, conservando su viabilidad por varias semanas. De esta manera es muy evidente su dispersión en un gran número de costas tropicales del mundo, donde el cocotero ha prosperado a pesar de las plagas, la arena, el viento, el agua salobre, etc., desarrollándose también tierra adentro. En México existen dos tipos contrastantes de cocotero, en cuanto a características genotípicas. Estas corresponden, en términos generales, a las de tipo silvestre “*niu kafa*” y tipo domesticado “*emphniu vai*”, distribuidos en América en las costas del Atlántico y del pacífico respectivamente, los cuales fueron introducidos independientemente por los españoles en el siglo XVI. Cabe hacer notar, las variedades de coco enano malayo, probadas como resistentes en Jamaica, arribaron a México durante la última mitad del siglo XX, observándose en diferentes huertas de las costas del Pacífico (Guerrero y Colima), así como del Golfo y el Caribe (Tabasco, Yucatán y Quintana Roo) [2].

1.1.2. Ecología

Cocos nucifera L. se encuentra ampliamente distribuida en islas y zonas costeras tropicales de todo el mundo, entre los 26 °C de latitud norte y sur; también puede encontrarse a alturas de hasta 1,200 msnm. Es una planta tropical que prospera mejor en climas sin marcadas fluctuaciones estacionales, con una temperatura promedio superior a 20 °C, precipitación media anual de 1,000 a 1,800 mm, pudiendo soportar mayores precipitaciones en suelos con buen drenaje. Tiene un buen desarrollo en suelos de aluvión tipo migajón arenoso, con presencia de materia orgánica, aireación, buen drenaje y con un pH entre 5 y 8. La profundidad mínima del suelo para su óptimo desarrollo radicular debe ser de 80 a 100 cm [3]. Por su capacidad para crecer en suelos arenosos sujetos a inundación ha desarrollado importantes mecanismos de adaptación. Es el caso de su extenso sistema de raíces

que le proporciona un anclaje eficiente para soportar fuertes vientos y su resistencia fisiológica que le permite tolerar la salinidad del suelo, condiciones alcalinas e incluso heladas ocasionales [3].

1.1.3. Características botánicas

Cocos nucifera L. pertenece a la familia Palmae, que comprende un solo género. Su número cromosómico es $2n = 32$. Es una planta monopódica que mide 12 a 25 m de alto. Su tallo esbelto y estipitoso crece más o menos torcido; a menudo es más ancho en la base, donde puede tener alrededor de 80 cm de diámetro; la porción superior del tronco raramente alcanza los 30 cm [3]. Sus hojas se agrupan en el ápice formando un penacho. Los pecíolos de 90 a 150 cm de largo se disponen en forma envolvente dando la estructura fibrosa al tallo. Las frondas de las hojas tienen una longitud de 1.8 a 6 m; son pinnadas con foliolos de 60 a 90 cm de largo. Es una planta monoica que tiene flores masculinas y femeninas reunidas en una inflorescencia que se observa envuelta por una bráctea o espádice [3]. El fruto es una drupa de tres caras, de 20 a 30 cm de diámetro, que pesa alrededor de 1.5 kg, con epicarpio brillante, mesocarpio fibroso de color castaño a rojizo y endocarpio lignificado o "nuez" que encierra una sola semilla. El endospermo o reserva alimenticia de la semilla está formado por una porción carnosa o albuminosa y un jugo lechoso dulce, denominados respectivamente como carne y agua de coco. El endospermo carnoso seco se utiliza para producir la copra, de la cual se extrae el aceite de coco. Los frutos requieren de 9 a 10 meses para madurar [3].

1.1.4. Problemática en la producción de cocos en México

Dentro de la problemática del coco se ubica la poca rentabilidad del cultivo, ya que el precio que se paga por la copra es muy bajo, en comparación con los elevados costos de producción, que incluyen los productos que el coprero debe adquirir para sacar adelante el cultivo. Las ganancias que se obtienen en la producción coprera son mínimas, por lo que para que una familia pueda vivir de esa actividad es necesario que tenga 30 hectáreas por lo menos. Por otra parte, es palpable que la productividad de las plantaciones es muy baja ya que las técnicas de manejo utilizadas son muy rudimentarias, incluyendo instrumentos manuales básicos como el machete y mano de obra barata no especializada; sólo los contados grandes productores ocasionalmente utilizan maquinaria. Las plantaciones parecen abandonadas y sólo reciben un manejo mínimo que no resulta el más adecuado, siendo la cosecha, la mayoría de las veces, la única práctica que se realiza. Por otra parte, las plantaciones de cocotero

tienen fuertes deficiencias nutrimentales, sobre todo, de nitrógeno y no se hace nada por corregirlo, pues aunque la SARH Y FERTIMEX han establecido calendario, dosis y fuentes de aplicación, las plantaciones de cocotero no se fertilizan. Esto se debe a que las recomendaciones no son generadas bajo condiciones locales, además de los altos costos de los agroquímicos y el bajo precio de la copra. Cálculos hechos con el precio del paquete tecnológico recomendado, demuestran que no se compensa la elevación de los gastos que ocasionan la compra de productos y la mano de obra requerida, con la ganancia por el incremento en el rendimiento esperado. Ante la grave amenaza del avance de enfermedades y plagas que afectan al cocotero y lo limitado de los programas oficiales para apoyar el desarrollo de las plantaciones y de la industria, se corre el riesgo de que en poco tiempo las áreas de producción queden desoladas, con la consecuente repercusión negativa en la economía. Inclusive, sería catastrófica la transformación ecológica del medio, ya que actualmente las palmas de coco son un orgullo como símbolo tropical, que dan vida y paisaje a muchos centros de desarrollo turístico [4].

1.2. Sistemas robóticos y su aplicación en la agricultura

La agricultura es el arte de cultivar la tierra y comprende todas las actividades humanas de acondicionamiento del medio ambiente natural y del suelo haciéndolo más apto para el posterior cultivo de cereales, frutas, hortalizas, pasto y forrajes con fines alimenticios o para producir flores, plantas ornamentales, madera, fertilizantes, productos químicos, productos biofarmacéuticos, entre otros. Todas las actividades económicas que abarca el sector agrícola se fundamentan en la explotación del suelo o de los recursos asociados a este en forma natural o por la acción del hombre [5].

Actualmente, el sector agroalimentario es objeto de especial atención en cuanto a la incorporación de tecnologías avanzadas, dadas las exigencias cada vez mayores de producción, diversidad y calidad de los productos, así como de la presentación de los mismos [6]. Todo ello con el problema creciente de la falta de mano de obra. Cabe por ello hacer un análisis del estado actual, ventajas y posibilidades de robotización de las tareas agrícolas. Los objetivos que se plantean son:

1. Permitir la sustitución de operarios en tareas peligrosas para la salud, como la pulverización de productos fitosanitarios.
2. Abordar la realización de tareas repetitivas y tediosas, como la recolección de frutos.
3. Realizar tareas en horas nocturnas, lo cual permite el ahorro de tiempo, por ejemplo, en la

recolección.

4. Mejorar la precisión en algunas de las tareas agrícolas, como las relacionadas con la biotecnología, y en concreto la multiplicación de plantas a partir de tejido vegetal.
5. Optimizar la eficiencia y calidad de algunas de las tareas como la uniformidad en la realización de huecos para el trasplante. Lograr la disminución de riesgos ambientales como la reducción de la cantidad de producto fitosanitario que se emite al aire.

Dado que el trabajo presentado en este documento trata sobre el desarrollo de un prototipo que podría usarse como cosechador de cocos, por tanto en este apartado se hará referencia a robots cosechadores existentes en la actualidad.

1.2.1. Robots cosechadores o recolectores

La recolección puede ser realizada de manera continua, por vibración o por unidades. También se incluyen en esta fase la clasificación de los frutos y el envasado en campo. La recolección continua aparece en los cultivos masivos de cereales, maíz y otros en los que las plantas, secas o verdes, son cortadas en su parte inferior mediante dispositivos tipo cuchilla. Si bien existe maquinaria en parte automatizada para estos procesos, puede ser aumentada su autonomía en base al empleo de sensores (altura del corte, por ejemplo). Asimismo la robotización de esta tarea puede ser aumentada mediante el empleo de la tele operación y la conducción automática de las cosechadoras comerciales. El uso de la vibración está indicado para frutos y semillas duras como almendras y nueces y para otros productos que deben ser procesados posteriormente. Se emplean para ello brazos mecánicos que se engarzan a los troncos y que son accionados desde vehículos tractores. La recolección por piezas en árboles o en plantas es un tema que está siendo tratado con especial interés en muchos centros de investigación y desarrollo en robótica, existiendo prototipos para cítricos (limones, naranjas y mandarinas), manzanas y racimos de uvas, e incluso para plantas al aire libre como sandías, melones o coles. En el caso de cultivos bajo invernadero, también existen algunos desarrollos de prototipos para diferentes variedades de tomates, pepinos, o fresas, así como para la recolección de champiñones. Uno de los principales problemas a resolver en esta tarea es la localización de los frutos, siendo preciso el uso de sistemas sensoriales capaces de detectarlos considerando el efecto de la superposición de los distintos elementos en una planta o árbol [6]. A continuación se muestran algunos de las aplicaciones que se han desarrollado, tanto como proyectos de investigación y productos comercializados:



Figura 1.1: Robot recolector de naranjas.

- Recolector de naranjas y Recolector de manzanas [7]: La empresa Vision Robotics Corporation (VRC), de San diego (USA), el recolector de naranjas está compuesto por un sistema de visión usado para escanear e identificar naranjas por medio un sistema escáner colocado en varios brazos multi-ejes usando varias cámaras estereoscópicas para crear una imagen virtual 3D de todo el árbol de naranjas. La posición y el tamaño de las naranjas son almacenados y suministrados a ocho grandes brazos que recogen cada naranja de una forma fácil, eficaz y económica (figura 1.1).

El recolector de manzanas tiene también un sistema de visión usado para escanear e identificar las manzanas dentro de una huerta. Las cámaras son colocadas al final de los booms de escaneo, usando cadenas de cámaras estereoscópicas para crear una imagen virtual 3D de todo el árbol manzanas. La posición y el tamaño de las manzanas son almacenados y suministrados a los brazos recolectores. Inmediatamente siguiendo el proceso de escaneo, una serie de brazos largos rectangulares cogen cada manzana (figura 1.2).

- Recolector de champiñones [8]: La Universidad de Warwick, UK, desarrolló un brazo robót que permite detectar el tamaño adecuado de los champiñones y además cuales son más saludables, para poder recolectarlos. Su principal desventaja es que es más lento que la recolección con mano de obra (figura 1.3).
- Robot recolector de tomates y cerezas [9]: proyecto desarrollado por la universidad de Okasuma que está formado por 4 componentes: un manipulador, un efector final, un sensor visual, y un

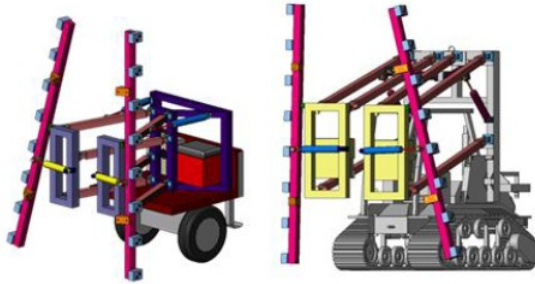


Figura 1.2: Robot recolector de manzanas.



Figura 1.3: Robot recolector de champiñones.

dispositivo de navegación. El manipulador tiene 7 grados de libertad con un alto grado de manipulación. Tiene dos articulaciones prismáticas y 5 rotacionales. Se desarrollaron dos tipos de efectores finales, uno para los tomates y otro para los tomates de cereza. Para cortar las frutas, estas primero son succionadas neumáticamente y luego si están en una posición adecuada se procede a cortar el tallo, y si no, se mueve un poco el efector final para tomar una posición adecuada. La fruta recolectada es transportada por medio de un tubo entre el efector final y un contenedor, ver figura 1.4. Una cámara CCD fue usada para diferenciar las frutas de sus tallos y hojas. La posición de las frutas se detecta por visión estéreo binocular. Se usó además un sistema de navegación para que el robot se pueda mover con cuatro ruedas, el cual fue comercializado como un vehículo para transportarse en invernaderos. Una segunda fase del



Figura 1.4: Robot recolector de tomates y cerezas.

proyecto se va a realizar con una Universidad de USA, una empresa eléctrica y un instituto de maquinaria agrícola para poder ser comercializada.

- Recolector VT-2 [10]: La empresa española AGROMELCA, S.L., es una empresa creada en el año 2003 y que está compuesta por la segunda generación de una empresa familiar ubicada en el Bajo Aragón que desde hace 30 años está ligado a la distribución y fabricación de equipos recolectores para frutos secos y aceitunas, desarrolló un equipo recolector llamado: VT-2, que va montado en la parte trasera de un tractor. Incorpora la pinza de alta potencia con vibración circular continua, con posibilidad de variarla. Este equipo ofrece innumerables ventajas como es su desmontaje, su agilidad de maniobra o su visibilidad a la hora de efectuar enganches al tronco. El sistema VT-2 va equipado con elevación independiente, desplazamiento lateral, telescópico y giro en la pinza. El sistema TRV incorpora los siguientes elementos: Turbo en la vibración, Dos vibraciones en cada sentido, Regulación del frenado de la pinza, Regulación del apriete de los brazos al tronco y Auto apriet (figura 1.5).

Existen además de los prototipos anteriores otra variedad de proyectos en desarrollo, sin embargo, este documento solo presenta algunos ejemplos de robots cosechadores existentes en este momento.

Algo que se puede destacar de esos proyectos es, que la mayoría de los prototipos son de desplazamiento horizontal (sobre el suelo), por lo que este proyecto plantea un prototipo para la aplicación futura en el proceso de la cosecha de coco considerando un desplazamiento vertical.



Figura 1.5: Robot recolector de frutos secos.

1.3. Sistemas de visión artificial y su aplicación en la agricultura

La Visión Artificial o también llamada Visión por Computador, es una rama de la inteligencia artificial que tiene por objeto modelar matemáticamente los procesos de percepción visual en los seres vivos y generar programas que permitan simular estas capacidades visuales por computadora de forma que un ordenador sea capaz de interpretarla y utilizarla como base para la toma de decisiones [11].

La visión artificial tiene múltiples aplicaciones en la industria, sobretodo para la realización de tareas que tengan carácter repetitivo y que se realicen a alta velocidad. Las oportunidades para la introducción de la visión artificial se encuentran principalmente en tareas de inspección, selección de productos, embalaje, monitorización de procesos, o bien para guiar vehículos que se busquen autonomizar de la conducción humana para realizar tareas que sean peligrosas para el hombre. El proceso de visión artificial se desarrolla mediante el procesamiento digital de imágenes el cual es implementado de acuerdo a la secuencia mostrada en el diagrama de la figura 1.6.

Cada uno de estos procesos se pueden describir de la siguiente manera:

- **Adquisición de imágenes:** Puede ser un escáner o una cámara y una tarjeta A/D como interface. Para el ejemplo concreto se utilizaría una cámara de gran resolución.
- **Preprocesamiento:** Mejora la imagen para que los procesos posteriores tengan éxito. Aquí se aplican técnicas para mejorar contraste, eliminar ruido, realzar contornos, etc.
- **Segmentación:** Separa una imagen en sus partes constitutivas u objetos. En el reconocimiento

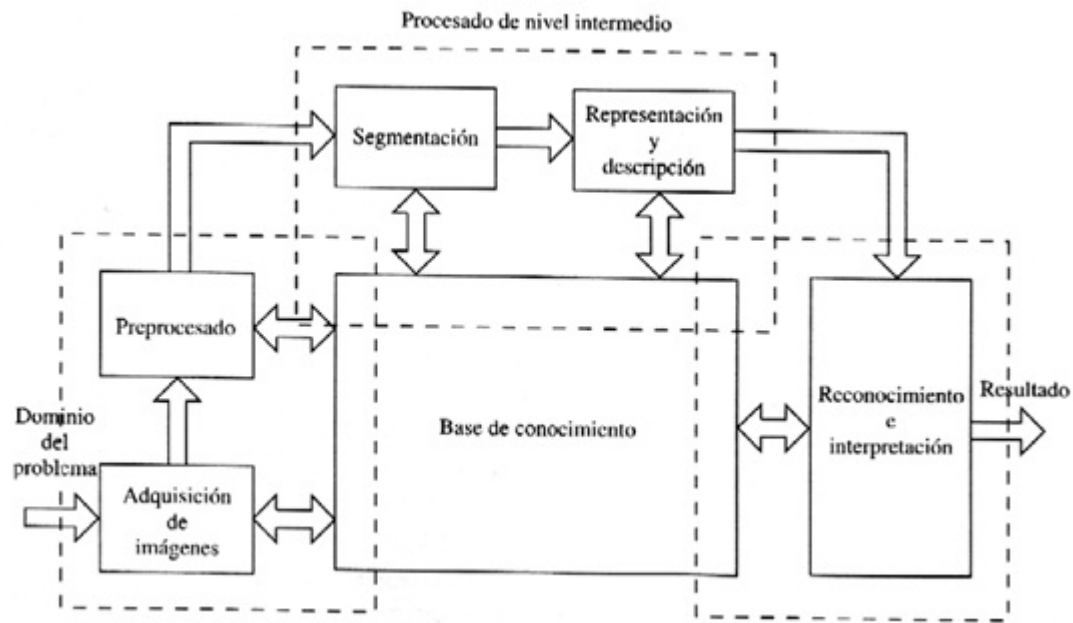


Figura 1.6: Etapas del procesamiento digital de imágenes.

de caracteres, la segmentación se usa para aislar caracteres y palabras del fondo.

- **Representación y Descripción:** Considera cómo representar las partes u objetos segmentados en una imagen; es decir, se pueden representar en función de su contorno o de las características de los pixels que forman la región.

Para representar partes de una imagen es necesario utilizar la descripción, que no es más que usar propiedades y atributos de los objetos para clasificarlos.

- **Reconocimiento:** Proceso que asigna una etiqueta a un objeto basándose en la información proporcionada por sus descriptores.
- **Interpretación:** Implica asignar significado a un conjunto de objetos reconocidos. Por ejemplo, una secuencia de caracteres reconocidos se puede interpretar como un nombre.
- **Base de conocimiento:** Generalmente es una base de datos con información que tiene que ver con el fenómeno que se estudia o el cual se desea analizar mediante PDI. Además de guiar la operación de cada módulo de procesamiento, la base de conocimiento controla también la interacción entre módulos.

El proceso anterior describe la forma general en que se lleva a cabo la identificación de objetos o figuras dadas sus apariencias físicas ó formas que capta el ojo humano, ahora, para llevar a cabo cada uno de los pasos descritos se debe recurrir al uso de herramientas matemáticas y computacionales las cuales se encargarán de describir sus principales características físicas (forma, tamaño, color) mediante ecuaciones y que servirán para la identificación del objeto.

1.3.1. Algunas aplicaciones de la visión artificial en la agricultura

Muchas aplicaciones usando tecnología de visión mediante máquinas han sido desarrolladas en sectores agrícolas tales como agricultura de precisión, seguridad y calidad de productos en postcosecha, evaluación y clasificación de productos, esto debido a que los sistemas de visión no solamente reconocen tamaño, forma, color y textura de objetos sino también proveen numerosos atributos de los objetos observados en la escena de análisis [12]. Esta información resulta útil para determinar el nivel de madurez de la planta para precosecha, enfermedades, nivel de estrés, etc.

La implantación de sistemas visión artificial en la agricultura ha aumentado considerablemente en los últimos años, debido, principalmente, a la necesidad de reducir los costes de producción. A su introducción ha ayudado una reducción en los precios de los equipos y un incremento en sus prestaciones. Los sistemas basados en esta tecnología proveen información sustancial sobre los atributos de los objetos presentes en una escena y son capaces de analizar los objetos en regiones del espectro electromagnético que están más allá de los límites humanos, como el ultravioleta o el infrarrojo. La amplitud espectral de los sistemas ópticos artificiales les permite ser utilizados para la predicción de la madurez o la inspección de la calidad. Los procesos de postcosecha se han beneficiado enormemente de las técnicas de visión artificial, y son actualmente capaces de inspeccionar la calidad de los productos de manera individual y objetiva [12].

Dentro de algunas de las aplicaciones desarrolladas en este ámbito podemos mencionar algunos aspectos de los proyectos desarrollados por el El Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA), a través del Centro de Agroingeniería [12].

- **Análisis de imágenes hiperespectrales:** Usado para detectar las podredumbres y otras enfermedades graves alteran esos compuestos químicos y hacen aparecer otros debidos a hongos, por lo que esta técnica se ha empleado en el Centro de Agroingeniería para intentar la detección temprana de podredumbres en poscosecha.

la detección y selección de enfermedades en papas y posteriormente realizar una separación de estas.

Dentro de los proyectos realizados para la detección de cocos usando distintos algoritmos de visión artificial se puede mencionar el desarrollado por RIZON [14], en el que desarrolla un método para la detección de cocos usando momentos geométricos invariantes (figura 1.7), haciendo uso de las características estadísticas de los cocos (tamaño, forma y orientación) para determinar la presencia de estos dentro de imágenes digitales, este algoritmo resulta muy efectivo ya que no es tan sensible al ruido de la imagen por lo que la detección resulta ser efectiva, sin embargo la desventaja radica en la cantidad de cálculos que se realizan para el procesamiento, lo que llega a ser demasiado lento. Otro método usado también para este fin, es el desarrollado por el mismo autor RIZON [15], en el que hace una comparación entre la transformada circular de Hough (figura 1.8.a) y el método de intersección de cuerdas (figura 1.8.b) propuesto por KIM & KIM [16], el cual es un método en el que se hace uso de cuatro puntos de los bordes del coco para determinar el centro de este, con ello se realiza la detección de cocos dentro de la imagen de análisis, teniendo como desventaja su sensibilidad al ruido de la imagen.

1.4. Sistemas electrónicos para la transmisión inalámbrica

Las tecnologías de redes inalámbricas han tenido un rápido desarrollo en los últimos años. Hemos pasado de los veteranos infrarrojo (Irda) para comunicaciones punto a punto a las WPAN de corto alcance y multipuntos como “BlueTooth” o las redes de rango de alcance medio multisaltos como “ZigBee”. Otras tecnologías inalámbricas que podemos nombrar son, la tecnología WIFI para redes locales (WLAN), la tecnología “WIMAX” para redes WMAN. También la telefonía celular de largo alcance (GPRS) o el desarrollo de las comunicaciones M2M con tecnología inalámbrica. El desarrollo más interesante es el de las redes de sensores inalámbricos (WSN), debido a sus múltiples aplicaciones, en distintos sectores (seguridad, medio ambiente, industria, agricultura etc.) [17].

Dentro de ese tipo de comunicaciones las usadas en este proyecto son de tipo WI - FI para la toma de imágenes de los cocos en la palmera y otro tipo de comunicación RF (radiofrecuencia) usada para el control de los actuadores implementados en el sistema construido. Estos dos tipos de comunicaciones se describen en el siguiente apartado.

1.4.1. Comunicación por módulos de Radiofrecuencia

La radiofrecuencia es básicamente una emisión electromagnética que se produce mediante un circuito oscilador que genera frecuencias superiores a las ultrasónicas, es decir, por encima de 30 KHz [18].

Las comunicaciones inalámbricas por RF se pueden dividir en las que no cumplen ningún protocolo estándar y las que cumplen un protocolo estándar, y en las normativas sobre sus distintas frecuencias de trabajo, que a la vez definen velocidad de transmisión o ancho de banda y campo de aplicación.

Aunque existen una gran variedad de tipos de modulaciones de señales de radiofrecuencia, en este apartado nos centraremos en el tipo de modulación digital, específicamente la del tipo FSK.

La modulación FSK (Frequency-shiftkeying) es un tipo de modulación de frecuencia cuya señal modulante es un flujo de pulsos binarios que varía entre valores predeterminados.

En los sistemas de modulación por salto de frecuencia, FSK, la señal moduladora hace variar la frecuencia de la portadora, de modo que la señal modulada resultante codifica la información asociándola a valores de frecuencia diferentes (figura 1.9).

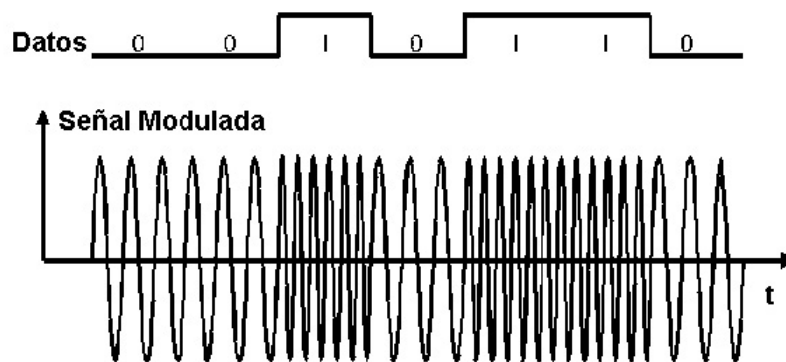


Figura 1.9: Modulación FSK

La ventaja de este tipo de modulación es la mejor robustez ante la presencia de interferencias. La desventaja es la complejidad del sistema (mayor costo) y el consumo que permanece siempre presente durante la transmisión. Se utiliza en los módems de baja velocidad. Se emplea separando el ancho de banda total en dos bandas, los módems pueden transmitir y recibir datos por el mismo canal simultáneamente. El módem al que se “llama” se pone en el modo de llamada y el módem que

“responde” pasa al modo de respuesta gracias a un conmutador que hay en cada módem [19].

Este tipo de modulación consiste en asignar una frecuencia diferente a cada estado significativo de la señal de datos. Para ello existen dos tipos de modulación FSK:

- FSK Coherente: Esta se refiere cuando en el instante de asignar la frecuencia se mantiene la fase de la señal.
- FSK No Coherente: Aquí la fase no se mantiene al momento de asignar la frecuencia. La razón de una modulación FSK no coherente ocurre cuando se emplean osciladores independientes para la generación de las distintas frecuencias. La modulación FSK se emplea en los módem en forma general hasta velocidades de 2400 baudios.

1.4.2. Redes Inalámbricas

La integración de los dispositivos móviles, Internet y la conectividad inalámbrica ofrece una oportunidad extraordinaria para que las organizaciones puedan extender su información y servicios hasta los clientes móviles profesionales. La correcta planeación, tomando en cuenta la combinación de estos tres factores, ayuda a reducir los costos operativos e incrementar la productividad de una gran variedad de sistemas[20].

Gran parte de los nuevos dispositivos están preparados para la conectividad inalámbrica en Redes de Áreas Personales, Locales y Extensas por sus siglas en inglés PAN, LAN y WAN respectivamente. Son muchas las organizaciones que, a partir de estándares abiertos, proporcionan hardware, software y controladores complementarios para adecuarse a los métodos de conectividad inalámbrica.

Una red inalámbrica también puede ser conocida como una red WLAN, la cual es una red en la que una serie de dispositivos (PCs, workstations, impresoras, servidores, etc) se comunican entre sí en zonas geográficas limitadas sin necesidad de tendido de cable entre ellos. La gran ventaja de esta tecnología es que ofrece movilidad al usuario y requiere una instalación muy sencilla. Para la realización de la transmisión de información entre dispositivos se debe cumplir con un tipo de protocolo de comunicación, y en el caso de las WLAN cumplen con los estándares genéricos aplicables al mundo de las LAN cableadas (i.e. IEEE 802.3 o equivalentes) pero necesitan una normativa específica adicional que defina el uso de los recursos radioeléctricos. Estas normativas específicas definen de forma detallada los protocolos de la capa física (PHY) y de la capa de Control de Acceso al Medio (MAC) que regulan la conexión vía radio[21].

El primer estándar de WLAN lo generó el organismo IEEE (Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos) en 1997 y se denomina IEEE 802.11. Desde entonces varios organismos internacionales han desarrollado una amplia actividad en la estandarización de normativa de WLAN y han generado un abanico de nuevos estándares. En USA el grueso de la actividad lo mantiene el organismo IEEE con los estándares 802.11 y sus variantes (b, g, a, e, h, ..) y en Europa el organismo relacionado es el ETSI con sus actividades en Hiperlan-BRAN.

La denominación Wi-Fi (Wíreless- Fidelity) aplicada al protocolo inalámbrico IEEE 802.11b significa que, vía radio, mantiene con fidelidad las características de un enlace Ethernet cableado. Por extensión se conoce como WiFi 5 al protocolo IEEE 802.11a que es un estándar de la misma familia para la banda de 5 GHz. Dado que estos protocolos Wi-Fi ya están implementados en múltiples productos comerciales podemos considerar que se han convertido en el estándar "de facto" para las aplicaciones WLAN en detrimento del estándar Hiperlan2 del ETSI.

A continuación se describen algunos aspectos de interés relacionados con los protocolos Wi-Fi:

1. Las redes WLAN podemos encontrar dos tipos de topología: Red Ad-Hoc y Red Modo Infraestructura.

Una red "Ad Hoc" consiste en un grupo de ordenadores que se comunican cada uno directamente con los otros a través de las señales de radio sin usar un punto de acceso. Los ordenadores de la red inalámbrica que quieren comunicarse entre ellos necesitan usar el mismo canal radio y configurar un identificador específico de WiFi (denominado ESSID) en "Modo Ad Hoc".

Se conoce como configuración "Modo Infraestructura" a la forma típica de trabajar cuando se utilizan Puntos de Acceso (AP). Si queremos conectar nuestra tarjeta Wi-Fi a uno de ellos, debemos configurarla para trabajar en este modo de trabajo. Es mas eficaz que la red ad-hoc, en la que los paquetes "se lanzan al aire, con la esperanza de que lleguen al destino..", mientras que el modo Infraestructura gestiona y se encarga de llevar cada paquete a su sitio mejorando, además, la velocidad. Este tipo de configuración se puede observar en la figura 1.10.

2. Las características técnicas de los protocolos IEEE.811 se describen a continuación:

- IEEE 802.11: Fue el primer estándar disponible y permite dos variantes para el interfaz aire: DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum y FH-SS (Frequency Hopped Spread Spectrum). La capacidad alcanzada es de 0.5 Mbps (según fabricante).



Figura 1.10: Topología de red con Puntos de Acceso (AP)

- IEEE 802.11b es el estándar que lidera los desarrollos actuales de WLAN. Emplea solamente DS-SS y utiliza modulación con forma de onda CCK (Complimentary Code Keying) lo que permite alcanzar hasta 11 Mbps de velocidad.
 - IEEE 802.11a, es una evolución del 802.11b, opera en la banda de 5 GHz y ofrece una capacidad de hasta 54 Mbit/s. El interfaz aire utiliza multiplexión OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing).
 - IEEE 802.11g (versión “draft” ó provisional desde Octubre 2002). Con multiplexión OFDM permite hasta 54 Mbps de capacidad máxima en la banda de 2.4 Ghz. Permite interoperabilidad con IEEE 802.11b utilizando un interfaz aire SS-DS y ofreciendo hasta 11 Mbps de capacidad.
 - El estándar IEEE 802.11a utiliza la banda de 5 GHz que en Europa no está asignada en este momento de forma prioritaria para aplicaciones WLAN por lo que actualmente tiene que compartir banda con otras aplicaciones. La norma IEEE 802.11h es una evolución del IEEE 802.11a que permite asignación dinámica de canales y control automático de potencia para minimizar los efectos interferentes.
3. La seguridad es uno de los aspectos esenciales para la aceptación de las WLAN por usuarios empresariales o para aplicaciones públicas. Como todas las tecnologías radio, las WLAN no se

pueden confinar dentro de los muros de un edificio por lo que deben extremarse las medidas de seguridad, ya que en caso contrario se abriría la red LAN a todo aquel que con una tarjeta WLAN y una antena direccional quiera conectarse.

El protocolo IEEE 802.11 provee seguridad mediante dos atributos: autenticación y el cifrado ó criptografía. Autenticación (verificar que una entidad, en este caso un cliente terminal, es realmente quien dice ser) es siempre un paso previo para autorizar a este cliente a comunicarse con otro o con el punto de acceso en el área de cobertura.

Por último, para poder realizar una conexión inalámbrica de tipo WLAN normalmente los componentes que integran ese sistema podemos mencionar los siguientes: Terminales de Usuario (Clientes), dotados de una Tarjeta Interfaz de Red (NIC) que incluye un transceptor radio y la antena; Puntos de Acceso (Access Points o APs), que permiten enviar la información de la red cableada (por ejemplo Ethernet) hacia los NIC/Clientes; y Controlador de APs necesario para despliegues que requieren varios APs por razones de cobertura y/o tráfico. Este último suele incorporar funcionalidad de AP, de cliente VPN, de cliente RADIUS para labores de autenticar y autorizar con un servidor AAA apropiado (Autenticación, Autorización y Accounting), de routing y de firewalls.

1.4.3. Aplicación de los sistemas de comunicación inalámbrica en agricultura

Para aplicaciones de monitorización y control en agricultura, actualmente en muchos casos se utilizan redes de sensores inalámbricos que ofrecen una densidad de puntos de medida lo suficientemente alta como para medir parámetros del terreno, de la planta y del entorno según la variabilidad espacial del suelo, conociendo con exactitud qué ocurre en cada parcela, y tomar las decisiones adecuadas para optimizar el cultivo. El sistema está formado por pequeños nodos autónomos, que recogen datos y los transmiten utilizando otros nodos cercanos como repetidores de la señal[22].

Con este sistema se integran sensores de variables del terreno (temperatura, humedad, contenido de agua, etc.), de la planta (humedad y temperatura de las hojas, grosor del tronco, etc.) y factores climáticos (temperatura, humedad ambiental, radiación solar, viento, lluvia, etc.).

La red de sensores vuelca la información a un sistema experto, que analiza las medidas y genera alertas que avisan al responsable del cultivo por mail o por SMS. El usuario puede acceder a los datos desde cualquier conexión a Internet o desde un dispositivo móvil.

El responsable del cultivo dispondrá, de esta forma, de las herramientas para analizar las variables

que influyen en el crecimiento de sus productos y tomar las decisiones adecuadas, e incluso anticipar la llegada de enfermedades del cultivo analizando los datos históricos y actuales de los parámetros ambientales para determinar cuándo se están dando las condiciones idóneas de propagación.

El conocimiento preciso y exacto de estas variables, en un número de puntos de medida adecuado, permitirá aplicar técnicas de agricultura de precisión y optimizar las técnicas de tratamiento de los cultivos, obteniendo beneficios de cuatro tipos:

- Optimiza el uso de recursos, permitiendo aplicar estrategias de fertirrigación (riego) específicas para cada tipo de suelo (gestión eficaz del riego) y la aplicación diferenciada de insumos agroquímicos y fitosanitarios.
- Mejora la calidad de la producción, al permitir la aplicación de técnicas de déficit (stress) hídrico y poder monitorizar con fiabilidad la exposición de las plantas a la radiación solar.
- Reduce la contaminación por fertilizantes. Se puede limitar la aplicación indiscriminada de fitosanitarios y pesticidas, con lo que se reduce el impacto medioambiental de las prácticas agrícolas.
- Mejora la prevención de enfermedades del cultivo, controlando de forma precisa los parámetros que inciden en la propagación de enfermedades, mediante modelos de predicción.

2.1. Diseño general del sistema

El diseño completo del robot se dividió en tres secciones (figura 2.1), de las cuales la primera sección la integran el software de control del robot, este software se encuentra escrito en lenguaje C# de la plataforma visual.Net y es el encargado de manipular todos los componentes del robot (cámara y actuadores) en forma remota. La segunda sección del sistema la integran los elementos encargados de comunicar al ordenador con el robot en forma inalámbrica utilizando los protocolos de comunicación TCP/IP y USB/USART/RF (radiofrecuencia), y por último se tiene al sistema mecánico el cual constituye la parte física del robot. Esta la integran la estructura del robot, una cámara IP, los actuadores encargados de mover la cámara y el sistema electrónico que se encarga del funcionamiento de los elementos mencionados. Es importante mencionar que los modelos desarrollados del sistema mecánico se realizaron en SolidWorks y la simulación de los modelos cinemáticos del robot se llevaron a cabo usando el Software MATLAB.

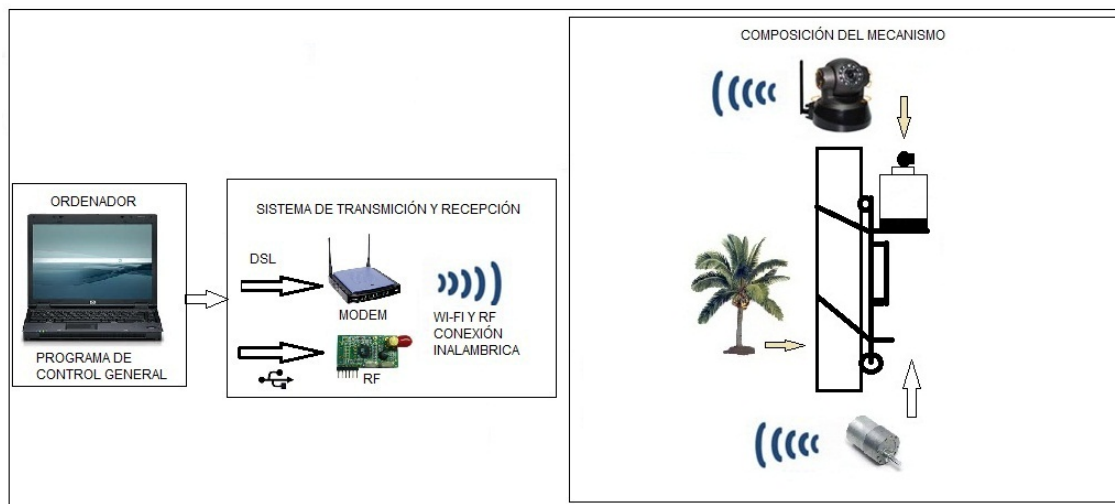


Figura 2.1: Diagrama general del sistema robótico.

2.2. Sistema mecánico

Para la realización del diseño mecánico del robot fue muy importante tener en consideración las características físicas de la palmera con el objetivo de establecer las dimensiones del robot además de poder determinar el mecanismo que sería usado para realizar el ascenso del robot a la palmera.

Las características físicas de las palmeras se determinaron tomando una muestra de 100 palmeras en el Rancho “Loma Bonita” ubicado en el municipio de Petatlán, Estado de Guerrero. En dicho estudio se obtuvieron los diámetros de las palmeras a 1 metro de altura con el objetivo de determinar la dimensión máxima a la cual debía ajustarse el robot durante el ascenso. Asimismo se estimó la altura de las palmeras con el propósito de establecer la distancia máxima a la cual estaría posicionado el robot respecto al sistema de control, esto debido a que la comunicación entre dichos sistemas se llevaría a cabo en forma inalámbrica. Un aspecto muy importante que también se consideró fue el nivel de inclinación promedio de las palmeras. La primera aseveración de las palmeras fue considerar un tallo completamente recto y sin inclinación (figura 2.2), pero en realidad existen grandes variaciones entre las formas del tallo e inclinaciones.

El ángulo de inclinación de las palmeras se estimó tomando una imagen de estas y trazando un triángulo como se muestra en la figura 2.3. El ángulo formado entre los lados a y c , ayudó a determinar el nivel de inclinación promedio de las palmeras dentro de la huerta de estudio.



Figura 2.2: Variaciones físicas en el tallo de distintas palmeras.



Figura 2.3: Trazado de triángulo para estimar el ángulo de inclinación en las palmeras.

Una vez obtenidas las características de las palmeras a las que subiría el robot, se procedió a establecer un diseño que permitiera el ascenso del sistema sobre el tallo de la palmera. El robot debe ser ligero y usa la menor cantidad de motores posibles, reduciendo la cantidad de dispositivos electrónicos usados para su control. Por otro lado, el diseño debe considerar que durante el ascenso éste debe ajustarse automáticamente sobre el tallo de la palmera para no resbalar.

Para realizar las tareas de ascenso del robot se realizaron 3 diseños diferentes de los cuales se construyó y se probó uno que es el que se describe en este apartado. De los otros diseños solo se realizó un bosquejo y no se efectuaron en forma física debido a su complejidad, dado el número de motores que utilizarían. Mayor información se presenta en el apéndice [A](#).

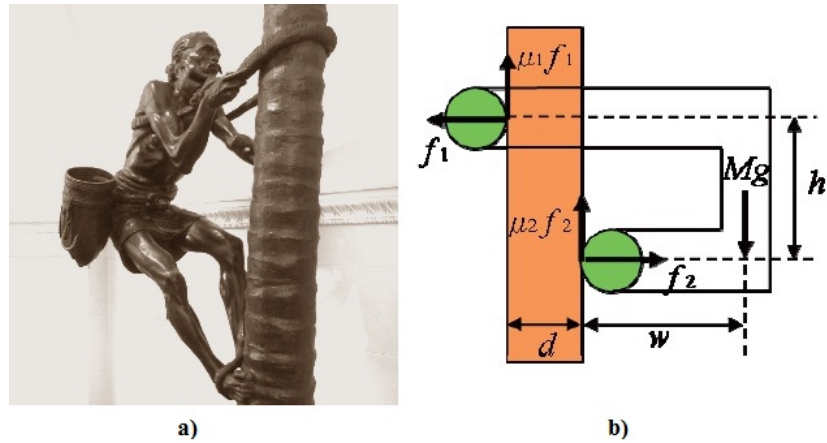


Figura 2.4: Principio usado para el diseño del robot.

El diseño de la estructura del robot construido se llevó a cabo basándose en la forma en que los cortadores de cocos trepan las palmeras (figura 2.4 a). Ésta consiste en colocar una cuerda alrededor de la palmera y colgar el cuerpo sobre ella, apoyándose con los pies en la parte baja y sosteniéndose con una cuerda. El propia masa de la persona evita que las cuerdas se deslicen hacia abajo lo que permite que la persona pueda subir sobre la palmera. Este principio se puede observar en la figura 2.4 b, donde se muestra cómo se comportan las fuerzas que actúan entre la persona y la palmera.

Basándose en el principio descrito, el diseño resultante tiene la forma mostrada en la figura 2.5.a, la cual consta de dos partes: una superior (figura 2.5.b) que simula a los brazos de una persona y otra inferior (figura 2.5.c) que simula a sus piernas. Los brazos del robot se encuentran en forma de brazos abiertos, lo que ayuda a que el robot pueda ajustarse a los distintos diámetros de las palmeras (figura 2.6).

Para lograr que el sistema pueda subir a la palmera se implementó un mecanismo de biela - manivela (figura 2.6.a), en el que la manivela se encuentra acoplada a un motor (88960088, ACdelco), y este a su vez se encuentra fijo en la parte inferior de la estructura mientras que la biela está acoplada con la parte superior. El funcionamiento del mecanismo es el siguiente: primero, suponiendo que la posición inicial (0°) de la biela - manivela es la mostrada en la figura 2.6.b y que la manivela gira en sentido antihorario, entonces al girar de 0° a 180° la fuerza generada por esta tiende a bajar a la parte superior de la estructura. Toda la masa del sistema se carga sobre esa parte lo que ayuda a que no se deslice y que funcione como un punto fijo, logrando que la parte inferior sea la parte móvil. Cuando la manivela gira de 180° a 360° la masa del sistema se carga sobre la parte inferior lo cual logra que

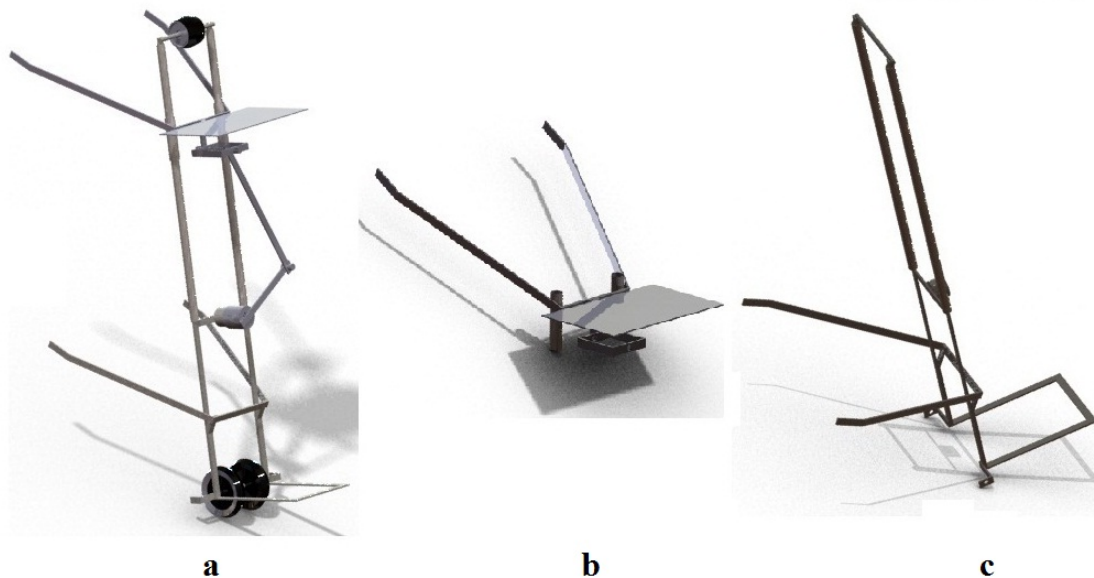


Figura 2.5: Estructura del robot.

esta parte funcione como punto fijo. La parte superior es la que se desliza hacia arriba. Este proceso se repite hasta que el robot llega al punto deseado sobre la palmera. El desplazamiento del robot se realiza en forma lineal según la longitud de la manivela, y este desplazamiento se realiza a través de unas barras fijas en la parte inferior del robot (figura 2.6). A través de estas se desplazan los elementos superiores ayudando a que el robot no pierda el equilibrio durante el ascenso. En el momento en que la parte superior se encuentra desplazándose, se va ajustando a la forma de la palmera, al igual que la parte inferior del robot.

El análisis matemático que describe el comportamiento cinemático del sistema construido y del mecanismo usado se presenta en el siguiente apartado.

2.2.1. Análisis cinemático del sistema de ascenso del robot

En este caso se puede considerar que el movimiento de ascenso del robot se transforma en movimiento lineal gracias al movimiento circular del mecanismo biela - manivela y cuyo análisis cinemático se puede realizar a partir del diagrama de la figura 2.7, en donde:

l : longitud de la biela.

r : radio de la manivela.

C : desplazamiento del robot por cada medio ciclo del motor.

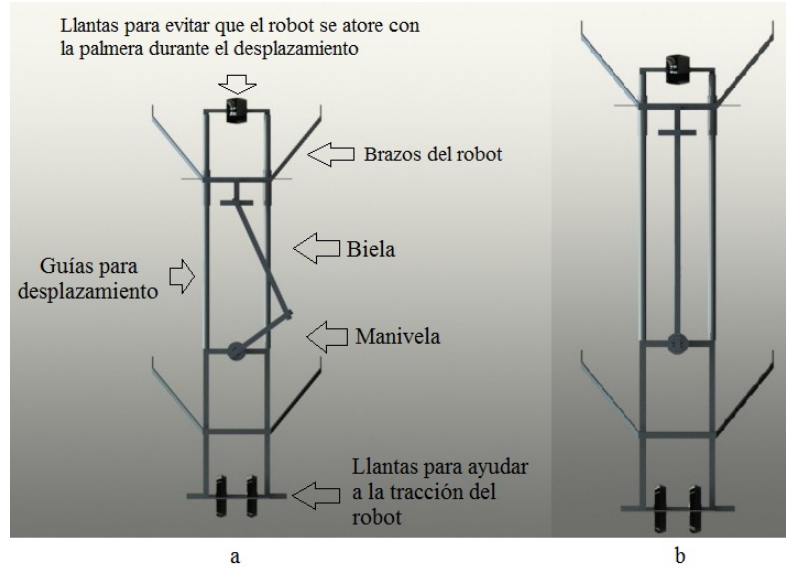


Figura 2.6: Mecanismo en funcionamiento.

x : posición de las estructuras del robot (superior e inferior) referida al punto muerto superior.

α : ángulo girado por el motor contado desde el punto muerto superior.

β : ángulo que forma la biela con el eje paralelo al tallo de la palmera.

De acuerdo a estas variables y constantes se puede obtener la expresión de desplazamiento del robot en la palmera, tanto en la estructura superior como en la inferior. Esta expresión queda definida por la ecuación 2.1 en donde el desplazamiento está definido por los ángulos α y β .

$$x = r(1 - \cos \alpha) + l(1 - \cos \beta) \quad (2.1)$$

La ecuación 2.2, relaciona el desplazamiento en función del ángulo generado directamente por el movimiento del motor (ángulo α).

$$r * \sin \alpha = l * \sin \beta \Rightarrow \sin \beta = \frac{r * \sin \alpha}{l} \quad (2.2)$$

Llamando λ a la relación entre la longitud de la manivela y de la biela

$$\lambda = \frac{r}{l} \Rightarrow \sin \beta = \lambda * \sin \alpha \Rightarrow \beta = \arcsin(\lambda * \sin \alpha) \quad (2.3)$$

De la expresión 2.3 se obtiene el valor de β para cada posición α de la manivela. Como $\cos \beta = \sqrt{1 - \sin^2 \beta}$. Sustituyendo $\sin \beta$ por su valor en función de α , se tiene $\cos \beta = \sqrt{1 - \lambda^2 * \sin^2 \alpha}$. Sus-

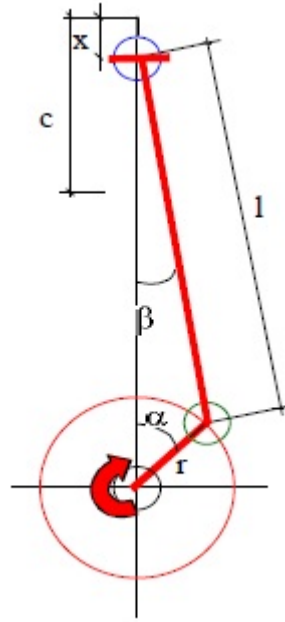


Figura 2.7: Mecanismo biela - manivela.

tituyendo este valor en la ecuación de desplazamiento se obtiene la expresión que describe el movimiento del robot en función del ángulo girado por la manivela (ec. 2.4).

$$x = r * (1 - \cos \alpha) + l * (1 - \sqrt{1 - \lambda^2 * \sin^2 \alpha}) \quad (2.4)$$

Expresando a l como $l = \frac{r}{\lambda}$ se obtiene finalmente la expresión de movimiento del robot (ec. 2.5).

$$x = r * (1 - \cos \alpha) + \frac{r}{\lambda} * (1 - \sqrt{1 - \lambda^2 * \sin^2 \alpha}) \quad (2.5)$$

La velocidad lineal de ascenso del robot sobre la palmera se obtiene de la derivada de la ecuación de movimiento (ec. 2.6).

$$V = \frac{dx}{dt} = \frac{dx}{d\alpha} * \frac{d\alpha}{dt} \quad (2.6)$$

Donde $\omega = \frac{d\alpha}{dt}$ es la velocidad angular de la manivela, por lo tanto, la velocidad lineal de ascenso del robot queda definida por la ecuación 2.7.

$$V = r \left(\sin \alpha + \frac{\lambda * \sin \alpha * \cos \alpha}{\sqrt{1 - \lambda^2 * \sin^2 \alpha}} \right) * \omega \quad (2.7)$$

La aceleración del sistema robótico se obtiene al aplicar la segunda derivada a la ecuación de movimiento, o bien, la primera derivada a la ecuación de velocidad (ec.2.8).

$$a = \frac{dV}{dt} = \frac{dV}{d\alpha} * \frac{d\alpha}{dt} \quad (2.8)$$

Esta operación da como resultado la ecuación 2.9, en donde: $\omega = \frac{d\alpha}{dt}$

$$a = \frac{-\left(\lambda \cos \alpha + \sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \alpha}\right) \left[\cos \alpha (\lambda^2 \sin^2 \alpha - 1) + \lambda \sin^2 \alpha (1 - \lambda^2 \sin^2 \alpha)^{\frac{3}{2}} \right]}{(1 - \lambda^2 \sin^2 \alpha)^{\frac{5}{2}}} r \omega \quad (2.9)$$

2.2.2. Análisis cinemático del robot

En esta sección se realiza el desarrollo del modelo matemático que describe el comportamiento de las fuerzas que actúan sobre el sistema, para ello consideremos el diagrama de fuerzas mostrado en la figura 2.8.

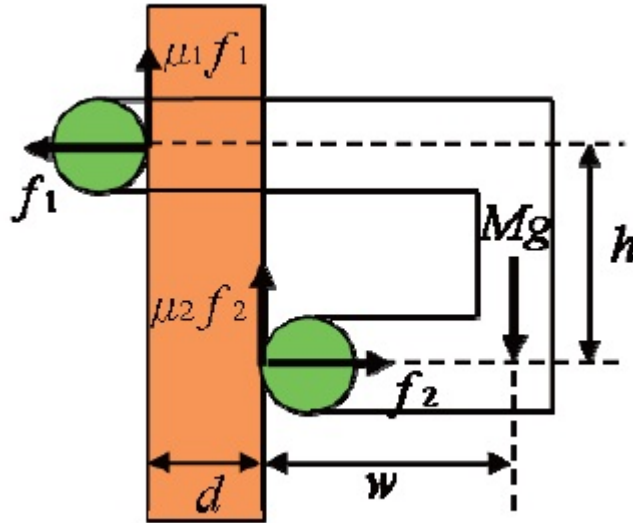


Figura 2.8: Modelo del mecanismo de ascenso.

De acuerdo a la figura 2.8, la suma de fuerzas que actúan sobre el sistema pueden obtenerse. Los puntos que hacen contacto con la palmera proporcionan las siguientes ecuaciones de equilibrio.

$$\mu_1 F_1 + \mu_2 F_2 = Mg \quad (2.10)$$

$$F_1 = F_2 \quad (2.11)$$

y la ecuación de equilibrio del momento en el punto inferior de contacto está dada por

$$hF_1 - \mu_1 dF_1 = Mgw \quad (2.12)$$

Donde:

M - masa del robot;

μ_1 y μ_2 - coeficientes de fricción;

F_1 y F_2 - fuerza que ejerce la palmera sobre la cuerda y las ruedas respectivamente;

d - diámetro de la palmera;

h - altura entre los puntos de contacto entre la palmera y la sección de análisis;

g - aceleración de gravedad.

Ahora, considerando que el material que realizan el contacto entre la palmera y el robot son del mismo tipo, se puede suponer que los coeficientes de fricción de ambos elementos con respecto al tallo de la palmera es el mismo.

$$\mu_1 = \mu_2 = \mu \quad (2.13)$$

De las ecuaciones anteriores se obtiene la ecuación 2.14, la cual expresa la fricción requerida para que el robot no resbale.

$$\mu = \frac{h}{d + 2w} \quad (2.14)$$

Sustituyendo 2.14 en 2.12 se obtiene el valor de la fuerza ejercida por la palmera sobre los puntos de contacto del robot tal como lo muestra la siguiente ecuación, con la cual se describe el comportamiento del robot cuando este no está en movimiento.

$$F_1 = F_2 = F = \frac{d + 2w}{2h\mu} Mg \quad (2.15)$$

Debe notarse que los valores de μ_1 y μ_2 dependen del estado de la superficie del tallo de la palmera y podrían no ser iguales.



Figura 2.9: Sistema de adquisición de imágenes.

2.3. Sistema de visión artificial

El objetivo central del modelo de visión artificial para la detección de cocos es desarrollar una herramienta que permita al robot determinar la presencia de cocos y en base a esa información encontrar el centro del mismo dentro de la imagen, con la finalidad de contar con datos para la determinación del punto de corte del coco. Esto ayudará a que en trabajos posteriores se pueda implementar en el robot un cortador que permita cortar los cocos en forma automática.

Dado que el proyecto también buscó la eliminación de cables para la comunicación del robot con el programa de control, la obtención de las imágenes y videos capturados por el robot fueron realizadas mediante una cámara IP inalámbrica de la marca PANASONIC modelo BL - C20A, cuyo protocolo de comunicación es implementado siguiendo el usado por la comunicación WI - FI. Posteriormente la cámara debió conectarse a un router inalámbrico lo que permitió realizar la comunicación con el programa de control que se encontraba instalado en un ordenador, todo este proceso se puede apreciar en la figura 2.9.

La instalación de la cámara sobre el robot se realizó en la parte superior de este. Con la finalidad de tener una visión más amplia sobre el entorno en el cual se encontraba desplazando el robot, se desarrolló un mecanismo que moviera la cámara en dos dimensiones sobre su propio eje tal como lo muestra la figura 2.10.

El proceso de detección de cocos, siguió los pasos mostrados en el diagrama de la figura 2.11. Para esta tarea se tomaron un total de 100 fotografías de cocos a una distancia entre 40 a 50 cm y la resolución de trabajo de estas fotografías fue de 500x375 pixeles.

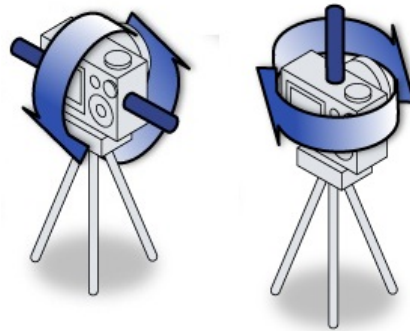


Figura 2.10: Ejes de movimiento de la cámara.

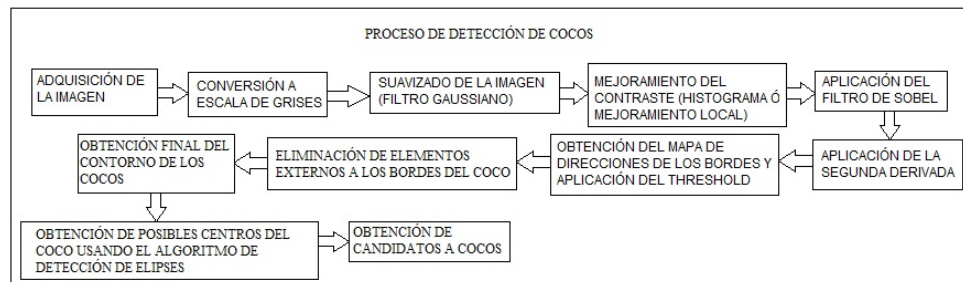


Figura 2.11: Proceso para la detección de cocos.

2.3.1. Transformación de la imagen a niveles de grises

Una vez que la escena de interés ha sido observada y capturada, tenemos nuestra herramienta básica de trabajo, *una imagen*. Esta imagen obtenida por la cámara utilizada se encuentra en formato RGB (red, green and blue, por sus siglas en inglés). La imagen generada se puede representar en forma matemática por un modelo tridimensional, es decir, la información referente a la combinación de los tres colores en cada pixel de la imagen se encuentra almacenada en una matriz de tres dimensiones. El proceso de detección de objetos usando las técnicas convencionales de procesamiento digital de imágenes requiere de la transformación de la matriz de color a una matriz de niveles de grises. Esta matriz contiene el nivel de gris resultante al combinar las intensidades de los tres colores básicos (rojo, verde y azul) y se representa por valores entre 0 y 255, en donde, “0” representa al color negro y “255” al color blanco. Existen varios modelos para la obtención de los niveles de grises de la imagen y en este trabajo se usó la ecuación 2.16 propuesta por KUMAR & VERMA [23] en donde:

F_y : Representa a la intensidad de nivel de gris en el pixel de la imagen resultante,

F_R, F_G, F_B : Representa a las intensidades rojo, verde y azul de la imagen original.

$$F_y = 0.333 * F_R + 0.5 * F_G + 0.1666 * F_b \quad (2.16)$$

2.3.2. Convolución

Para realizar el proceso de mejoramiento de la imagen y la detección de bordes se define una serie de máscaras o kernels y posteriormente se aplican a los píxeles de la imagen. La aplicación de estos kernels se lleva a cabo haciendo uso de una herramienta matemática denominada convolución. La convolución es un operador matemático que transforma dos funciones f y g en una tercera función que en cierto sentido representa la magnitud en la que se superpone f y una versión trasladada e invertida de g .

La convolución de f y g se denota $h = f * g$ y se lee f convolución de g . Esta se define como la integral del producto de ambas funciones después de desplazar una de ellas una distancia η (ecuación 2.17).

$$f(t) * g(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\eta)g(t - \eta) d\eta \quad (2.17)$$

La ecuación 2.17 es válida para procesos continuos, pero una imagen no se puede considerar como un proceso continuo sino como un proceso discreto, por lo que la ecuación anterior no se puede aplicar directamente a la imagen y debe transformarse a su forma discreta dando como resultado la ecuación 2.18.

$$h[m, n] = f[m] * g[m] = \sum_{i=-\infty}^{\infty} \sum_{j=-\infty}^{\infty} f[i, j]g[m - i, n - j] \quad (2.18)$$

2.3.3. Mejoramiento de la imagen

El principal objetivo de las técnicas de mejora de imágenes es procesar una imagen dada de forma que la imagen resultante sea más apropiada que la imagen original para la detección de objetos. Existen varias técnicas para el mejoramiento de imágenes y en su mayoría se basan en una mejora puntual en el que un nivel de gris u se transforma en otro nivel de gris v usualmente en el mismo rango, mediante la ecuación 2.19.

$$v = T(u) \quad (2.19)$$

Dentro de las técnicas de mejoramiento de imágenes se pueden mencionar al mejoramiento por contraste, uniformización del histograma, aplicación del filtro gaussiano, etc. Sin embargo, en este documento solo se hará referencia al filtro gaussiano.

El filtro gaussiano también se conoce como filtro de suavizado o filtro de paso bajo. Tiene por objeto reducir el ruido y/o efectos que pueden presentarse en una imagen a consecuencia del proceso de captura, digitalización y transmisión. Su utilización es normalmente necesaria antes de la aplicación de un detector de bordes como puede ser el de Sobel.

Estos filtros están especialmente indicados para suprimir rangos de frecuencias altos. Esto implica que el uso de los mismos tendrá el efecto de un emborronamiento de todas aquellas características asociadas con altas frecuencias (fronteras, saltos, ruido, etc.).

Matemáticamente el filtro gaussiano en su forma discreta queda definido por la función 2.20, por lo que el suavizado de la imagen resulta de la convolución del filtro obtenido con la imagen.

$$smoothfilter[i, j] = \frac{1}{\sqrt{2 * \pi * \sigma}} * e^{-\frac{i^2 + j^2}{2 * \sigma^2}} \quad (2.20)$$

2.3.4. Detección de bordes

Los primeros pasos de la visión tratan de identificar rasgos en la imagen que son relevantes para estimar la estructura y propiedades de los objetos en la escena. Los bordes corresponden a cambios locales significativos en una imagen, y son probablemente los rasgos más importantes para el análisis de la misma. Estos se encuentran en la frontera entre dos regiones diferentes, siendo su detección un paso importante para la recuperación de información.

La detección de bordes es esencialmente una operación de detección de cambios de intensidad significativos. En una dimensión, estos cambios están asociados con un pico local de la primera derivada, por lo que en dos dimensiones podemos asociarlo con derivadas parciales.

En su mayoría, la forma de obtención de bordes de una imagen se realiza mediante un proceso de filtrado. La aplicación de un filtro a una imagen digital se logra mediante el uso de un filtroventana. Cada píxel se multiplica por el valor correspondiente en el filtro, los valores resultantes se suman y el valor resultante sustituye al valor de intensidad del píxel central.

La segmentación basada en la detección de bordes es muy utilizada. Estos bordes marcan la localización de los puntos de la imagen donde se producen discontinuidades en los niveles de gris. Si se desea encontrar los objetos individuales presentes en una imagen, parece lógico que si se encuentran las fronteras de tales objetos con el fondo se podrá segmentar los objetos de la escena general.

En concreto el filtro de Sobel es un filtro de aproximación al gradiente. El cálculo de la derivada direccional de una función nos habla de cómo se producen los cambios en tal dirección. Tales cambios asociados con las altas frecuencias, suelen corresponder a los bordes de los objetos presentes en las imágenes.

Partiendo de que el operador gradiente se define como:

$$\nabla(I(x, y)) = \frac{\partial I}{\partial x}u_x + \frac{\partial I}{\partial y}u_y \quad (2.21)$$

Definiendo los filtrados de convolución G_x y G_y como:

$$G_x = \frac{\partial I}{\partial x} = I(x, y) * h_1(x, y) \quad (2.22)$$

$$G_y = \frac{\partial I}{\partial y} = I(x, y) * h_2(x, y) \quad (2.23)$$

Obteniendo h_1 y h_2 mediante una aproximación a la derivada con la resta. Es decir, si se consideran los píxeles de la siguiente matriz:

$$\begin{pmatrix} z_1 & z_2 & z_3 \\ z_4 & z_5 & z_6 \\ z_7 & z_8 & z_9 \end{pmatrix}$$

las derivadas resultantes son:

$$\frac{\partial f}{\partial x} = z_5 - z_6 \quad y \quad \frac{\partial f}{\partial y} = z_6 - z_8 \quad (2.24)$$

Obteniendo unas matrices de convolución h_1 y h_2

$$h_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad h_2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} \quad (2.25)$$

En el caso de que no se desee considerar la dirección del vector gradiente, sino sólo su módulo, se escribe:

$$|I_G(x - y)| = \sqrt{G_x^2(x, y) + G_y^2(x, y)} \quad (2.26)$$

Una aproximación mejor al gradiente está dada por las expresiones:

$$\frac{\partial f}{\partial x} = (z_3 + 2z_6 - z_9) - (z_1 + 2z_4 - z_7) \quad (2.27)$$

$$\frac{\partial f}{\partial y} = (z_1 + 2z_2 - z_3) - (z_7 + 2z_8 - z_9) \quad (2.28)$$

Dando lugar a las matrices h_1 y h_2 .

$$h_1 = \frac{1}{4} \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{pmatrix} \quad h_2 = \frac{1}{4} \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{pmatrix} \quad (2.29)$$

Estas matrices se conocen como máscaras de Sobel. Mediante ellas se calcula el gradiente en las direcciones horizontal y vertical respectivamente.

En términos generales la aplicación del filtro de Sobel da como resultado la ecuación 2.32.

$$|\nabla f| = sobel_{merged}[i, j] = \sqrt{(sobel_{vert}[i, j])^2 + (sobel_{hor}[i, j])^2} = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2} \quad (2.30)$$

en donde $sobel_{vert}[i, j]$ y $sobel_{hor}[i, j]$ es el resultado de realizar la convolución de h_1 y h_2 con la imagen, y $sobel_{merged}[i, j]$ contiene el mapa de bordes de Sobel.

Por ultimo, al obtener los bordes de Sobel se procede a realizar la binarización de la imagen resultante, en donde todos aquellos tonos de grises por debajo de un umbral se convierten en cero y los restantes en uno, obteniendo como resultado el mapa de bordes de la imagen.

El resultado anterior genera una imagen con los bordes gruesos, lo que en algunas ocasiones complica su tratamiento para procesamientos posteriores. Una forma adecuada de “adelgazar” estos bordes es mediante la aplicación de la segunda derivada, la cual se puede representar de la siguiente manera

$$\nabla^2(G * f) = \frac{\partial^2(G * f)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2(G * f)}{\partial y^2} \quad (2.31)$$

en donde f es la imagen y G es el filtro Gaussiano de suavizado.

Considerando la linealidad de la convolución, se sigue que

$$\nabla^2(G * f) = (\nabla^2 G) * f \quad (2.32)$$

donde $(\nabla^2 G)$ es el laplaciado del filtro Gaussiano y tiene la forma de “un sombrero mexicano” y se puede representar mediante la siguiente matriz

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -2 & -1 & 0 \\ -1 & -2 & 16 & -2 & -1 \\ 0 & -1 & -2 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

El objetivo de este filtro es encontrar todos los puntos de los bordes que cruzan por cero, resultando un método más robusto para la detección de bordes.

Hasta este punto se tienen detectados los bordes de los objetos presentes en la imagen, por lo que el siguiente paso consiste en el reconocimiento de esos objetos. En este caso de estudio los objetos de interés son los cocos, y los métodos usados para esta tarea se describen en el siguiente capítulo.

En general, la integración del proceso de suavizado de la imagen, la aplicación del filtro de Sobel y la supresión de “no máximos” se conoce como algoritmo de Canny [24]. El detector de contornos de Canny sigue los siguientes pasos:

- Reducción de ruido. Se suaviza la imagen con un filtro gaussiano reduciendo el ruido, los detalles y las texturas que no interesan.
- Cálculo del gradiente. Para la obtención del gradiente se aplica el filtro Sobel a la imagen suavizada.
- Supresión de “no máximos”. Una vez calculado la dirección del gradiente en el paso anterior, se debe encontrar la dirección que mejor se aproxima a la normal al borde. En este caso se eliminan los puntos que no tienen un valor máximo de gradiente según la dirección perpendicular al contorno.

- Histéresis. En este paso se definen los bordes definitivos, seleccionando sólo aquellos píxeles cuyo gradiente se encuentra entre dos umbrales establecidos.

Una vez se ha completado este proceso, se obtiene como resultado una imagen binaria en la que cada píxel se define como píxel de borde o como píxel no perteneciente a borde.

Al disminuir la desviación típica de la función gaussiana de suavizado se reduce el efecto de suavizado, por lo que en la imagen de bordes se incrementará el número de aristas. Por el contrario, al aumentar dicho parámetro se obtendrán aquellos contornos que correspondan con límites más contrastados, si bien ello conlleva un aumento del error en su posición.

2.3.5. Detección de cocos usando el método de detección de elipses

La detección de cocos se realizó usando el método propuesto por XIE & JI [25], el cual es un método usado para la detección de elipses en imágenes digitales. En este caso se hizo la analogía de que el contorno de un coco toma una forma elíptica, lo que permitió implementar el modelo.

Este modelo se basa en la forma geométrica de la elipse y en base a sus parámetros se realiza la detección de estos elementos.

Este método considera en primer lugar al eje mayor de la elipse para encontrar los demás parámetros rápida y eficientemente. Además de requerir solo un acumulador unidimensional para almacenar los posibles candidatos a parámetros de la elipse.

Para una elipse arbitraria existen cinco parámetros desconocidos: (x_0, y_0) para el centro, α para la orientación, (a, b) para el eje mayor y el eje menor. Usualmente se necesita un conjunto de cinco píxeles para calcular todos los parámetros y para obtenerlos se siguen los siguientes pasos:

Para cada par de píxeles (x_1, y_1) y (x_2, y_2) , se asume que ellos son los vértices del eje mayor de la elipse, calculándose los cinco parámetros de la elipse:

$$x_0 = \frac{x_1 + x_2}{2} \quad (2.33)$$

$$y_0 = \frac{y_1 + y_2}{2} \quad (2.34)$$

$$a = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (2.35)$$

$$\alpha = a \tan \left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \right) \quad (2.36)$$

La figura 2.12 muestra la geometría de la elipse. f_1 y f_2 son los focos y (x, y) es el tercer punto necesario para calcular el quinto parámetro. La distancia entre (x, y) y (x_0, y_0) debe ser menor que la distancia entre (x_1, y_1) y (x_0, y_0) o entre (x_2, y_2) y (x_0, y_0) . Así que la longitud media del eje menor puede ser estimada por las siguientes ecuaciones.

$$b^2 = \frac{a^2 d^2 \sin^2 \tau}{a^2 - d^2 \cos^2 \tau} \quad (2.37)$$

donde $\cos \tau$ es

$$\cos \tau = \frac{a^2 + d^2 - f^2}{2ad} \quad (2.38)$$

y d es la distancia entre (x, y) y (x_0, y_0) .

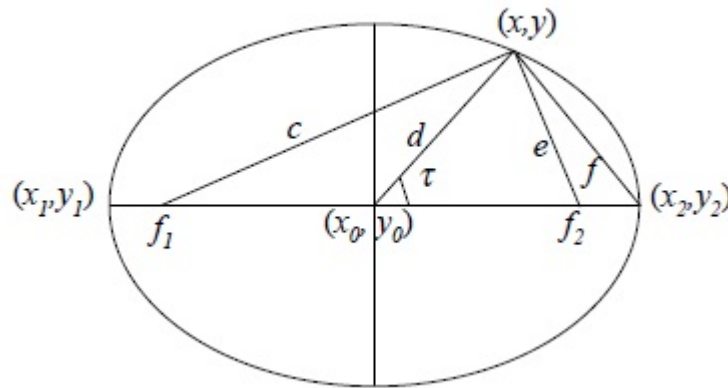


Figura 2.12: Geometría de la elipse.

Consecuentemente, usando las ecuaciones 2.33 y 2.38 es posible calcular los cinco parámetros de la elipse. Ya que solamente se necesita revisar la longitud del eje menor, se puede usar una matriz unidimensional para acumular los votos obtenidos al revisar esa dimensión. Si los votos superan el valor umbral, entonces se puede decir que se ha encontrado una elipse. Se calculan los parámetros y se remueven todos los pixeles cercanos a cierta distancia de los puntos pertenecientes a la elipse encontrada. Posteriormente se pone a cero la matriz del acumulador y se revisa el siguiente par de pixeles hasta acabar de analizar toda la imagen.

2.4. Software de control y diseño electrónico

El sistema de control principal del robot se realizó mediante un software escrito en lenguaje C# de la plataforma .NET (ver información adicional en el apéndice B). A este programa se le integraron todos los elementos necesarios para que la comunicación con el robot se pudiera efectuar en forma inalámbrica. La función del programa fue recibir las imágenes transmitidas por la cámara IP desde el punto en que se encontraba el robot, esto para poder determinar la presencia de cocos en esa posición mediante el algoritmo ya antes explicado. Por lo que para efectuar esta detección se programaron todas las rutinas descritas dentro de este programa.

Para realizar el movimiento de la cámara ampliando el ángulo de visión se implementó una sección en donde el usuario seleccionaba la dirección de movimiento y la cámara realizaba el desplazamiento deseado. La comunicación entre el robot y el programa se realizó con dos tipos de comunicación. Uno usando el protocolo de internet para comunicarse con la cámara y otro por radiofrecuencia para comunicarse con los elementos que se encargaban de mover la cámara.

La comunicación por radiofrecuencia se realizó conectando un microcontrolador PIC18F4550 con el ordenador usando comunicación USB y posteriormente se conectó un módulo de radiofrecuencia de 915 MHz en el microcontrolador. Del lado del robot se implementó un módulo igual al mencionado solo que este se integró con un AVR ATMEGA32. Este microcontrolador era el encargado de ejecutar las rutinas según lo indicaba la información recibida (ver características técnicas de estos elementos en el apéndice C).

Cuadro 2.1: Características de baterías usadas.

Marca	Voltaje Nominal	masa
SERCOM	12V @ 7Ah	2.7 kg
STEREN	12V @ 4Ah	1.7 kg

La alimentación de energía del robot se probó usando dos tipos de baterías cuyas características se muestran en la tabla 2.1. Estas pruebas se realizaron midiendo el tiempo de duración de la batería durante el funcionamiento del robot considerando el momento en que la batería se encontraba completamente cargada hasta el momento en que el motor dejaba de funcionar debido a la falta de

corriente suministrada por la batería, además se midió la corriente consumida por el robot.

Resultados y discusión

En este capítulo se presentan los resultados del sistema construido considerando los modelos matemáticos tanto del sistema mecánico como del modelo de visión artificial. Dado que el prototipo se compone de varios sistemas, los resultados se presentarán en forma separada haciendo referencia a cada elemento del sistema desarrollado.

3.1. Caracterización fisonómica de cocotero (“Coconus Nucifera”)

Para el diseño del robot es necesario conocer las características fisonómicas de las palmeras donde operará el robot, midiendo la inclinación, altura y el diámetro a 1 m de altura sobre el suelo. Los datos adquiridos se muestran en el apéndice D. El diámetro de la palmera fue la característica más importante que se consideró para el diseño del robot, ya que este debe ajustarse a los diferentes diámetros de la palmera, ajustándose para evitar que se resbale. El diámetro a 1 metro de altura es importante porque en este punto se coloca el robot para iniciar el ascenso. En este diámetro la palmera presenta su mayor grosor y no se consideró la inclinación de la palmera durante el diseño, sin embargo, sí se evaluó el comportamiento del robot para los tipos de inclinación que se tenían. En cuanto a la altura, esta se consideró solo para verificar la distancia de alcance para la comunicación inalámbrica entre la cámara y el ordenador.

Cuadro 3.1: Tabla de características físicas de la muestra de palmeras estudiadas.

Altura de la plamera (m)	6	7	8	9	10	11	12	13
% de Muestra	12	6	11	19	13	13	16	10
Inclinación (°)	7	5.33	6.18	6.16	6	6.38	5.31	6.9
Diámetro (cm)	28.43	28.44	27.49	27.44	27.66	27.84	27.83	28.17

En resumen, las características físicas de las palmeras estudiadas pueden verse en la tabla 3.1. En esta tabla se muestran los promedios obtenidos de inclinación y diámetro realizando una clasificación respecto a la altura de la palmera. Por otro lado, también se muestra el porcentaje de palmeras que corresponden a determinada altura.

Analizando los datos de inclinación, se puede observar que esta característica no depende completamente de la altura de la palmera. Por lo que haciendo referencia a las observaciones tomadas durante el muestreo, se observó que esta característica depende en parte de la topografía del terreno en donde se encontraban plantadas, ya que en la mayoría de los casos, a mayor pendiente mayor es la inclinación de estas. Ahora, tomando los resultados de la tabla 3.2, se observa que la inclinación promedio de toda la muestra es de 6.16°, la inclinación mayor es 24° y la inclinación menor es 2°. Ninguna palmera se encuentra completamente derecha por lo que se consideró en el diseño inclinaciones menores al valor promedio. Todas las palmas con inclinación por debajo del promedio se consideraron como rectas y la mayoría de la pruebas se realizaron en plantas de este tipo, salvo casos especiales que sirvieron para observar el comportamiento del robot en este tipo de palmeras.

Como el diámetro de la palmera fue la principal característica que se consideró para el diseño del robot, fue muy importante analizar las variaciones de diámetros con respecto a sus alturas, con lo que al obtener un promedio de estos datos se pudo definir las dimensiones de los brazos del robot. Los brazos debían acoplarse completamente a la variación de diámetros de las palmeras para todo el huerto, tomándose como dato principal al diámetro mayor de la muestra (tabla 3.2). Revisando los datos de esa tabla se observa que el diámetro promedio para la muestra estudiada es 28.31 cm con una desviación estándar de 1.74 obteniendo un valor máximo de muestra de 31.55 cm y un valor mínimo de 23.87 cm.

Otra de las mediciones que se realizaron a las palmeras, fue la determinación de los puntos en

Cuadro 3.2: Estadísticas de la muestra de palmeras estudiadas.

	Diámetro (cm)	Inclinación (°)	Altura (m)
Promedio	28.31	6.16	9.68
Desviación estándar	1.74	3.31	2.17
Valor Máximo	31.51	24	13
Valor Mínimo	23.87	2	6

los que el robot ya no podía avanzar más, es decir, los puntos en los que iniciaban las hojas de las palmeras. En este caso, se determinó la distancia entre el robot y los puntos de corte del coco para lo que se obtuvo un promedio de 61.7 cm con una desviación estándar de 9.5 (ver tabla del apéndice G). Esta distancia deberá considerarse en trabajos futuros en el diseño del cortador de cocos.

3.2. Diseño mecánico del robot: Prototipo Metálico

Una vez efectuadas las mediciones físicas de las palmeras se realizó el diseño mecánico del robot. El primer prototipo construido se puede observar en la figura 3.1.A. Este sistema se construyó con estructura metálica y se realizó con la finalidad de evaluar y validar el funcionamiento del mecanismo propuesto para el ascenso del robot usando un solo motor como medio de impulso para esta tarea. En la primera prueba se verificó que el sistema biela - manivela funcionara correctamente como medio para hacer que el robot pudiera desplazarse sobre la palmera. Se obtuvieron desplazamientos de 50 cm en 15 segundos dando una rapidez de 0.033 m/s. Dentro de los inconvenientes hallados se encuentran que el sistema no poseía un medio de ajuste al sistema de sujeción que presionara al robot sobre la palmera. Esto provoca que solo suba una distancia en la que no existen cambios significativos en el diámetro de la palmera. Al momento en que el brazo superior o inferior del robot ya no puede acoplarse a cambios en el diámetro en donde se encuentra, esto ocasiona que se resbale (ver figura 3.2).

Una de las modificaciones que inicialmente se realizaron al primer diseño, fue la incorporación de un sistema de apoyo para la tracción de la parte inferior del robot, agregandose un par de llantas con motor (figura 3.1. B), evitando que el sistema resbalara durante el ascenso, ya que el motor se mantenía activado durante todo el ascenso. Esta modificación ayudó en las tareas mencionadas, sin

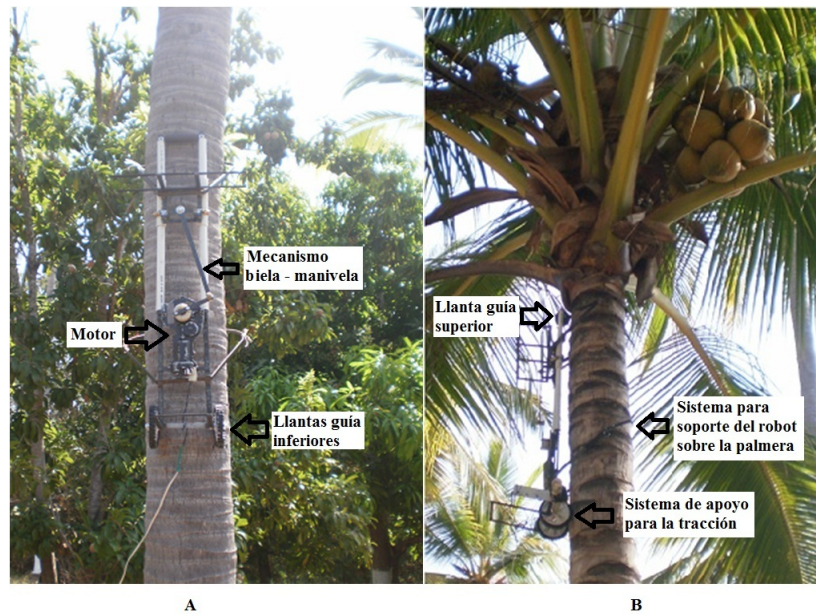


Figura 3.1: Sistema mecánico del robot. (A). Primer diseño, (B).Modificaciones del primer diseño.

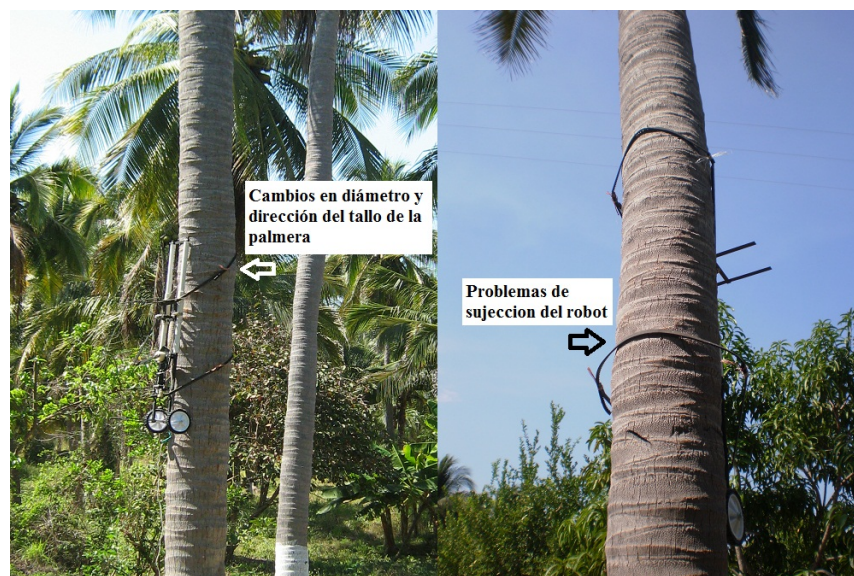


Figura 3.2: Casos de falla de ascenso de prototipo metálico.

embargo al no tener el sistema un ajuste para la sujeción del robot, este continuaba resbalándose en los puntos en los que ya no alcanzaba a ajustarse. El robot se desplazó 2.3 metros en 27 segundos dando una rapidez de 0.085 m/s, observando una mejoría respecto al primer diseño.

Considerando esas modificaciones, también se evaluó el comportamiento del robot incorporando

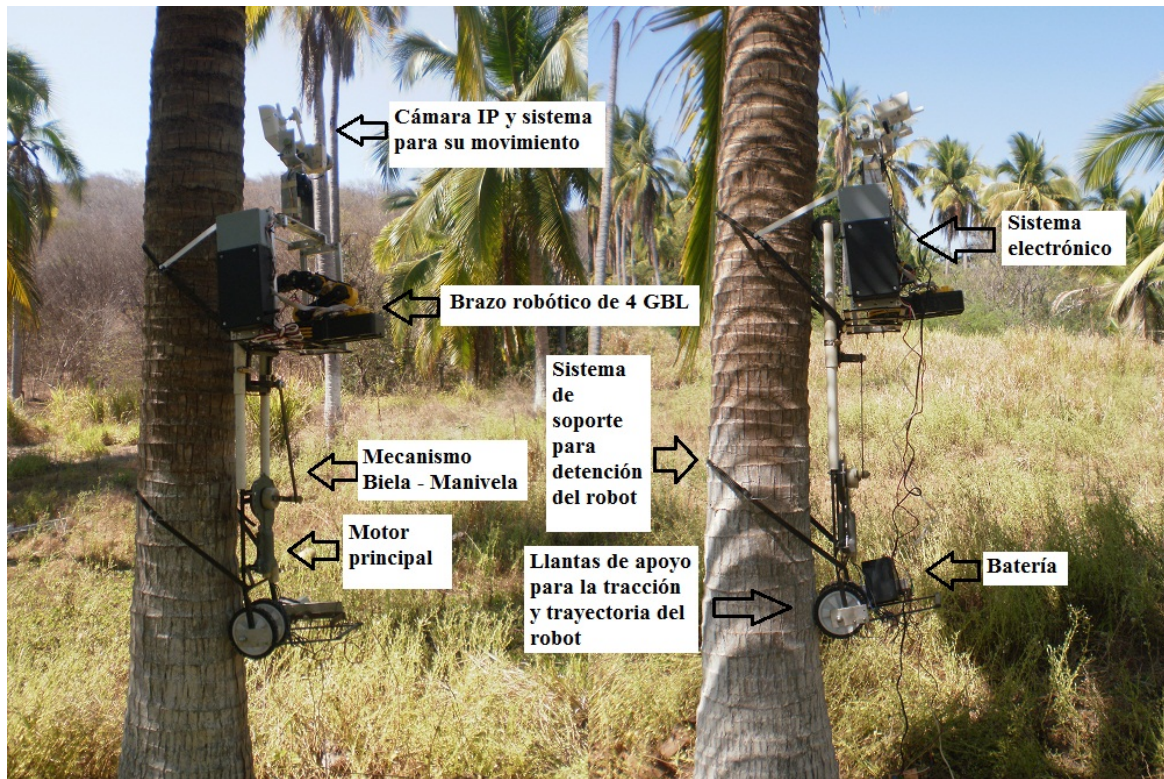


Figura 3.3: Sistema mecánico del robot construido con estructura metálica.

todos los sistemas que lo integrarían. Estos son: sistema de visión (cámara y mecanismo para su movimiento), brazo robótico y sistema electrónico. El resultado obtenido (figura 3.3) al incorporar estos sistemas muestran que las variaciones que existían respecto al sistema sin carga son el cambio en la velocidad. Además de que la carga provoca que cuando sube la sección superior del robot ocasiona la pérdida del equilibrio, ocasionando que las llantas de la parte inferior del robot salgan del trayecto del tallo de la palmera. Para las pruebas de este sistema se obtuvo un desplazamiento de 40 cm en un tiempo de 25 segundos, dando una velocidad de 0.016 m/s.

Por otro lado, con este sistema también se pudo evaluar el funcionamiento del mecanismo para la realización del movimiento de la cámara, además de la transmisión de las imágenes desde la cámara hasta el ordenador. Durante estas pruebas se determinó que la velocidad angular adecuada para la cámara debía ser entre 0.314 rad/seg y 0.209 rad/seg, además de que al momento en que se tomaran las fotografías, el robot debía estar estático, ya que en caso contrario, al obtener imágenes en movimiento estas aparecerían con distorsiones afectando la forma del coco, lo cual complicaría el proceso de detección.



Figura 3.4: Sistema mecánico del robot construido con PVC.

3.3. Diseño mecánico del robot: Prototipo de PVC

Se construyó otro robot utilizando tubos de PVC con lo que se consiguió disminuir la masa original del este, de 5.3 kg a 3.2 kg considerando solo la estructura con el motor y mecanismo incluido, además de que los brazos de este diseño se hicieron de forma que fueran móviles, es decir, que pudieran ir acoplándose al diámetro de la palmera conforme se realizaba el ascenso del robot. Se incorporó un sistema con resortes a fin de que estos ajustaran al sistema de sujeción del robot a la palmera, evitando que el robot resbalara durante el ascenso (figura 3.5).

Al realizarse las pruebas del robot construido con PVC sin carga, se consiguió que este lograra ascender distancias mucho mayores que el diseño realizado con estructura metálica, además de que la rapidez de ascenso también aumentó, por ejemplo se recorrió una distancia de 11 metros en 88 segundos, dando una rapidez de 0.125 m/s. En otra palmera el robot subió una distancia de 6 metros en 58 segundos dando una rapidez de 0.103 m/s. Las figuras que muestran el ascenso del robot sobre la palmera se muestran en la figura 3.6. Sin embargo uno de los inconvenientes de este diseño radica

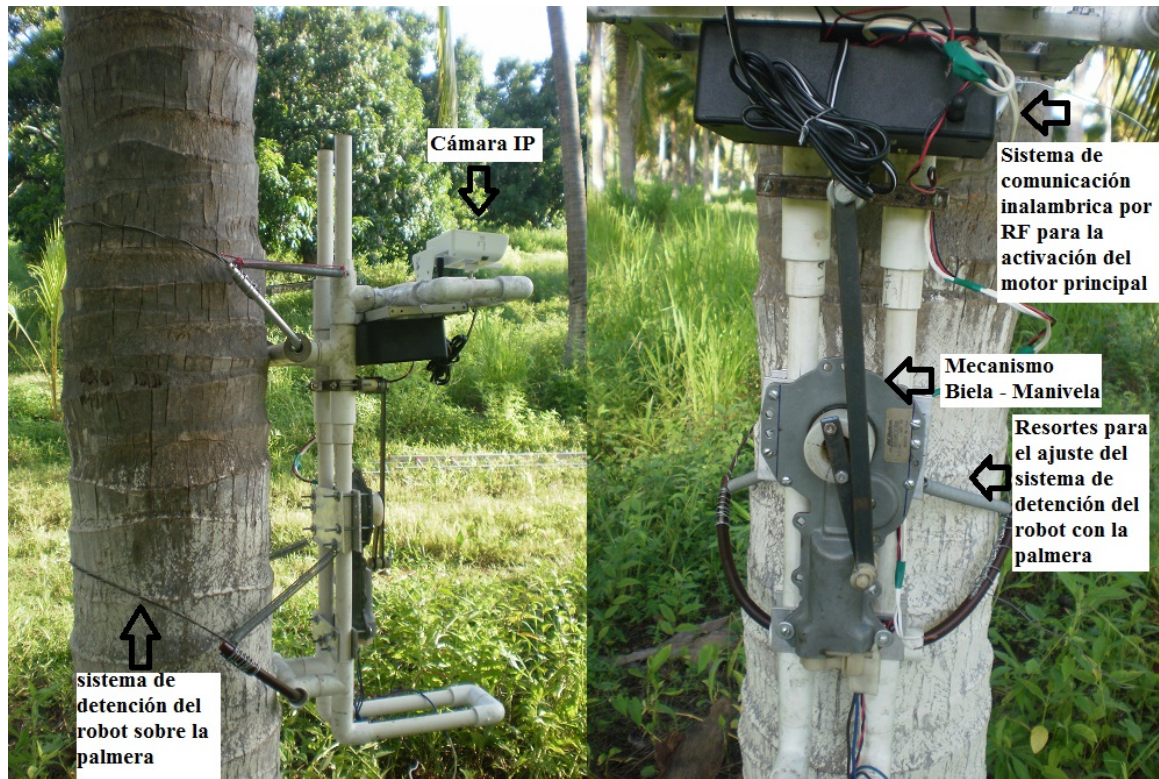


Figura 3.5: Sistema mecánico final del robot construido con PVC.

en que no es capaz de soportar mucha carga, debido al tipo de material usado, ya que al implementar los sistemas que integrarían al robot y realizar las pruebas de ascenso, los elementos que servían de guía para el desplazamiento de la parte inferior y superior del robot se flexionaban ocasionando que el motor parara, por consiguiente ya no se movía. Fue por ello que solo se implementó la cámara IP sin el sistema de movimiento, lo que sirvió para verificar el funcionamiento del sistema de transmisión de imágenes con los dispositivos cámara - ordenador. En cuanto a la masa máxima soportada por este sistema fue de 0.9 kg, una cantidad muy pequeña respecto a lo que pesa el sistema de visión completo que es 3.2 kg, incluyendo el brazo robótico y el sistema electrónico.

Uno de los aspectos evaluados en el robot, fue el comportamiento de este dentro de superficies irregulares (figura 3.7). En primer lugar, se observó el comportamiento del robot para palmeras inclinadas y se aprecia que el robot no se mantiene sobre la trayectoria en la que se coloca, ya que en teoría debía desplazarse linealmente sobre la palmera. Sin embargo se va direccionando por la fuerza de gravedad hacia la parte inferior de la palmera (considerando la inclinación), y esto ocurre en todos los casos similares. Otra característica observada durante esta prueba, fue que el robot también tiene



Figura 3.6: Resultados de ascenso del robot.



Figura 3.7: Resultados de ascenso del robot en una palmera con superficie irregular.

la capacidad de ajustarse a la forma del tallo, aunque debe de considerarse que el tallo no debe de tener cambios muy significativos en su dirección y en el diámetro tal como sucede con la palmera mostrada en la figura 3.7.

Dentro de las principales características que afectan el desplazamiento del robot sobre la palmera están: los puntos en donde se encontraba la hoja de la palmera, que debido a los residuos remanentes en la palmera en el momento en que la hoja de la palmera cae, generando “pestañas” en estos puntos (figura 3.8). Si las palapas no caen estrangulan a la palma y generan cinturas. Al desplazarse el



Figura 3.8: Superficies que afectan el desplazamiento y velocidad del robot durante el ascenso.

sistema de sujeción del robot sobre estas superficies provoca que se atore e impide el desplazamiento del robot. Otra característica de las palmeras que impiden el desplazamiento del robot sobre esta, es la presencia de hojas secas de la palmera que permanecen colgando sobre ella (figura 3.7).

De acuerdo a las pruebas realizadas, los resultados obtenidos de los prototipos construidos se presentan en la tabla 3.3.

Cuadro 3.3: Masa soportada y velocidad de los diseños construidos.

Diseño de robot	Diseño metálico			Diseño de PVC			
Masa Soportada (kg)	0	0	3.2	0	0	0.7	0.9
Masa Total (kg)	5.3	5.3	8.5	3.2	3.2	3.9	4.4
Distancia Recorrida (m)	0.5	2.3	0.4	11	6	1.5	0.8
Tiempo (s)	15	27	25	88	58	18	14
Rapidez (m/s)	0.033	0.085	0.016	0.125	0.103	0.083	0.057

Cabe mencionar que en el diseño elaborado solo se consideró el ascenso del robot y no se tomó en cuenta el sistema para descenso ni para el giro del mismo a través de la palmera. Por lo que la continuación de este trabajo podría consistir en la elaboración de estos mecanismos, o bien en la elaboración del sistema de corte para los cocos, ya sea para todo el rácimo, o bien coco por coco.

3.3.1. Análisis mecánico del robot

Considerando las variables de las ecuaciones 2.5, 2.7 y 2.9 las dimensiones del robot se establecieron de la siguiente manera, para este caso, los valores de las masas y los diámetros de las palmeras se obtuvieron de los resultados mostrados anteriormente.

- $r = 8$ cm (radio de la manivela)
- $l = 24$ cm (longitud de la biela)
- $\omega = 64$ rpm (velocidad angular del robot)

Con estos datos es posible determinar los valores de distancia, velocidad y aceleración del sistema robótico a medida que este se desplaza sobre la palmera, este comportamiento se da en función al ángulo de giro del motor, para esto, consideremos lo descrito en la sección 2.2 lo que da como resultado lo mostrado en las gráficas 3.9, en ellas se aprecia que la velocidad y la aceleración tienen un comportamiento senoidal, mientras que la aceleración tiene ciclos en los que se forma una gráfica semejante a la campana de Gauss.

También, usando las ecuaciones mencionadas es posible encontrar el desplazamiento, velocidad y aceleración máxima instantánea lo que resulta:

- Desplazamiento máximo = 16.0 cm.
- Velocidad máxima = 56.54 cm/s.
- Aceleración máxima = 71.48 cm/s^2

El desplazamiento mostrado corresponde al ciclo completo del movimiento del motor, lo que hace que en cada ciclo de movimiento ($180^\circ/\text{ciclo}$) la distancia recorrida sea 8 cm, esto es debido a que durante un ciclo el motor desplaza a la estructura superior del robot y en el siguiente ciclo el robot desplaza a la estructura inferior.

El siguiente análisis corresponde a comportamiento cinemático del robot, para ello, recurriendo a las ecuaciones 2.14 y 2.15, se tiene que los valores de las variables de estas ecuaciones son:

- $h = 35$ cm
- $d = 23.88 - 32.15$ cm

- $w = 20$ cm
- $M1 = 5.5$ kg (Masa de la estructura superior del robot con carga)
- $M2 = 3.0$ kg (Masa de la estructura inferior del robot con carga)

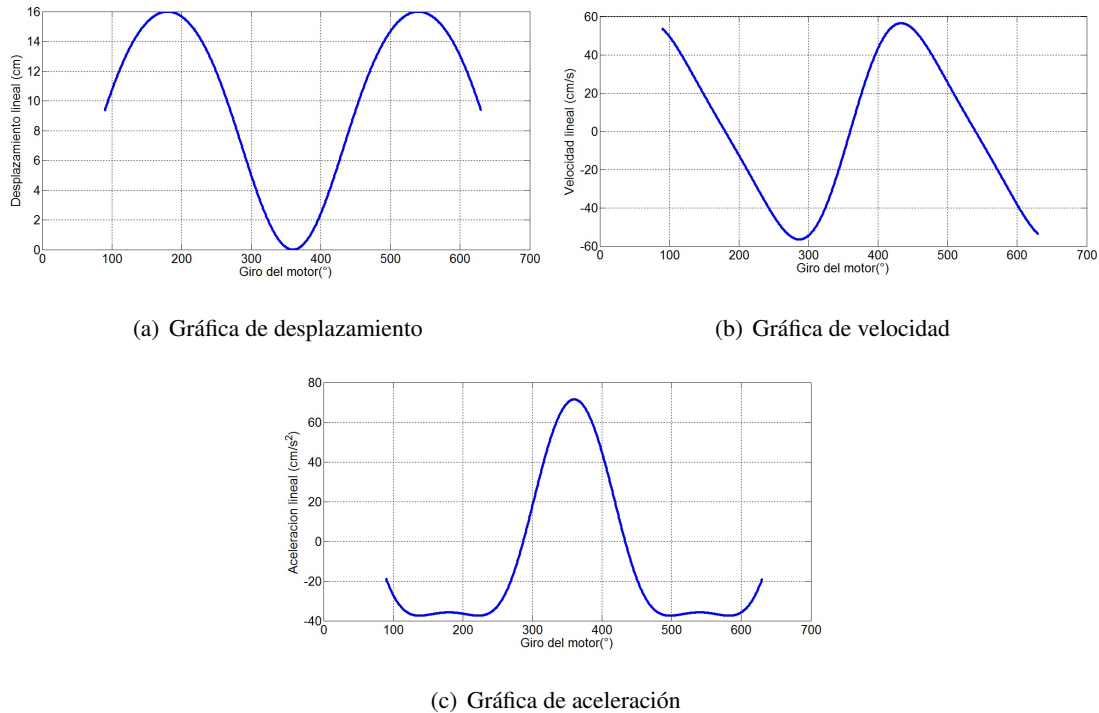


Figura 3.9: Gráficas de movimiento del robot

Al realizar el análisis de fricción del robot respecto al diámetro del tallo de la palmera y la fuerza ejercida respecto a la fricción se obtienen las gráficas 3.10.

3.4. Discusión de los resultados obtenidos del sistema mecánico

La elaboración del prototipo contruido permitió validar el mecanismo propuesto para el ascenso del robot mediante la implementación de un solo motor como medio de potencia para esta tarea. Los mejores resultados obtenidos en cuanto a rapidez y distancia recorrida se dieron con el robot desarrollado con PVC. Sin embargo por los problemas que se dieron en relación a la masa soportada, se observó que la mejor manera de solucionar este problema sería construyendo el robot en forma metálica, basándose en la forma de la estructura implementada en el diseño del robot hecho con PVC,

3.4 Discusión de los resultados obtenidos del sistema mecánico

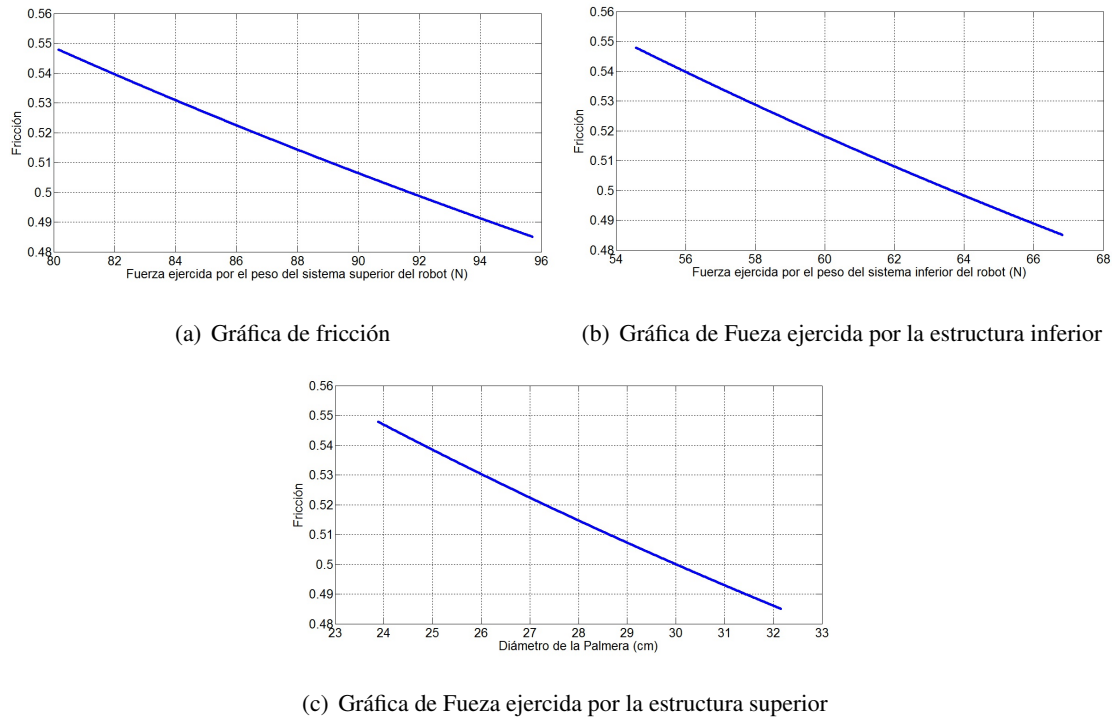


Figura 3.10: Gráficas de fuerza y fricción ejercida por el robot sobre la palmera.

aunque se vería afectada la rapidez de ascenso. Esto se solucionaría mediante la incorporación de un sistema de tracción en el robot tanto en la parte superior como en la parte inferior, tal como se hizo con la modificación del primer diseño.

Por tanto, las modificaciones y mejoras que se realizaron en el prototipo desarrollado son:

- Construir el robot de estructura metálica basándose en el diseño final del robot hecho con PVC.
- Implementar un sistema de tracción en las estructuras inferior y superior del robot a fin de compensar los problemas de aumento de masa del robot al desarrollarse con estructura metálica.
- Implementar un sistema de ruedas en el sistema de sujeción a fin de evitar que estos se “atoren” durante el ascenso debido a las imperfecciones del tallo de la palmera.
- Para el descenso del robot se propone implementar un mecanismo que afloje los resortes de los brazos del robot, lo que provocará que se vaya deslizando poco a poco hacia abajo.
- Para la realización del sistema de corte de los cocos se propone implementar un brazo robótico de 3 grados de libertad, uno de desplazamiento lineal y dos de desplazamiento rotacional.

3.5. Sistema de visión artificial

Como ya se mencionó, el sistema de visión artificial se desarrolló con la finalidad de contar con una herramienta que permitiera la identificación de cocos mediante un modelo matemático programado dentro de un ordenador. Este modelo se probó usando un grupo de imágenes obtenidas por una cámara IP que eran transmitidas en tiempo real hacia una laptop que se encargaba de realizar el procesamiento correspondiente para la detección del coco dentro de la ubicación actual del sistema mecánico.

El procesamiento se realizó siguiendo los pasos del diagrama de la figura 2.11. Para esta secuencia de procesos se obtuvieron los siguientes resultados:

3.5.1. Obtención de la imagen

La adquisición de la imagen se realizó mediante un programa instalado en un ordenador que a su vez se comunicaba con la cámara mediante el protocolo de comunicación IP Wi - Fi. Se instaló un router inalámbrico que funcionó como medio de conexión entre estos dos dispositivos, lo cual permitió separar físicamente estos elementos evitando el uso innecesario de cables para su comunicación. Esta instalación puede apreciarse en la figura 3.11. A. Otra característica de este sistema radicó en la distancia a la que pudieron interactuar los tres dispositivos (cámara - router - ordenador), dando una distancia de aproximadamente 100 metros entre la cámara y el ordenador. Es decir, la cámara y el router pueden comunicarse a una distancia de 50 metros de igual forma que el router con el ordenador, dando como resultado la distancia ya mencionada.

Una vez realizada la comunicación cámara - ordenador, el software de control usado se encargó de mostrar visualmente las imágenes que la cámara estaba transmitiendo (figura 3.12). Lo que permitió que durante el ascenso del robot se pudiera apreciar la trayectoria seguida por este. El sistema permitió determinar la distancia a la cual resulta más conveniente posicionar la cámara respecto a la ubicación de los cocos, con la finalidad de obtener la mayor precisión posible durante la detección de los cocos. Para ampliar el ángulo de visión de la cámara, esta se integró a un dispositivo que pudiera dar el movimiento mostrado en la figura 2.10 teniendo como resultado el mecanismo de la figura 3.11.(B), cuya instalación dentro del robot se aprecia en la figura 3.3.

Algunas de las imágenes obtenidas al variar la posición de la cámara respecto al tallo de la palmera y a la ubicación del racimo de cocos, aparecen en la tabla 3.4 (los resultados complementarios se

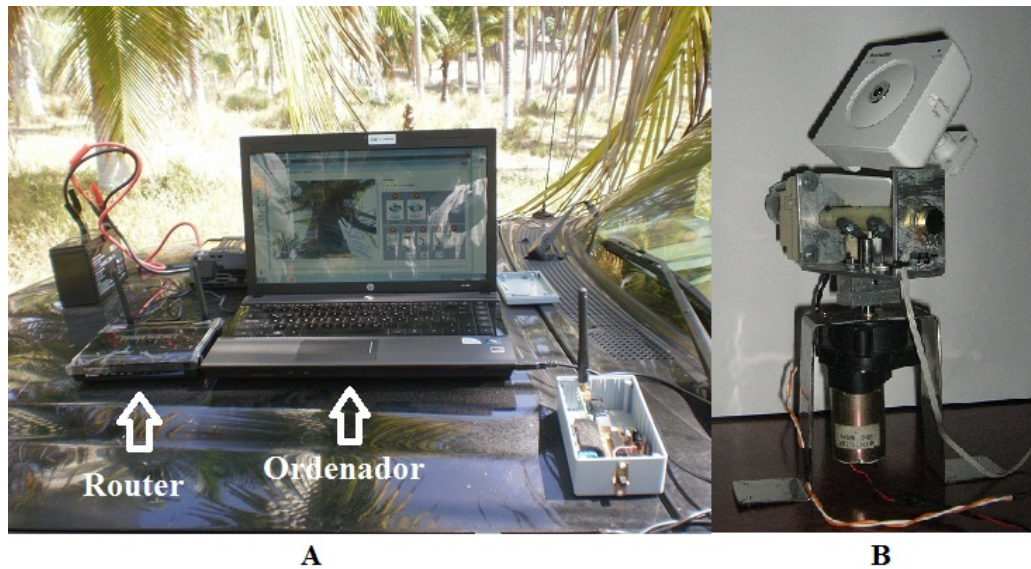


Figura 3.11: Sistema para la adquisición de las imágenes. (A)Ordenador - Router, (B) Sistema para movimiento de la cámara.

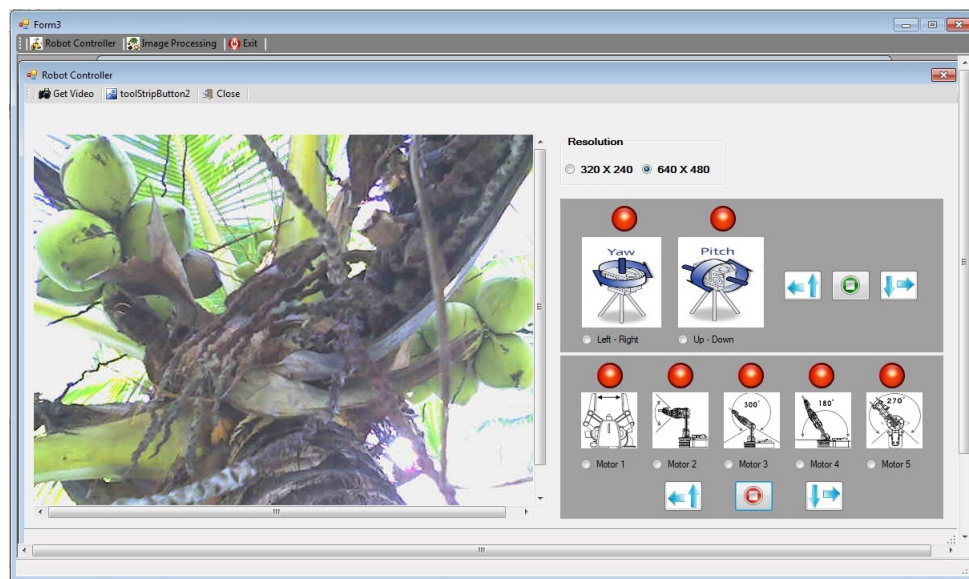


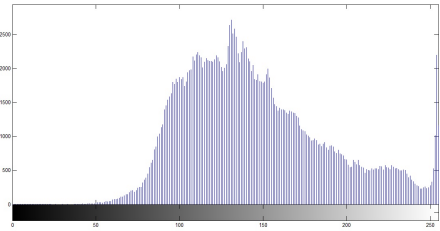
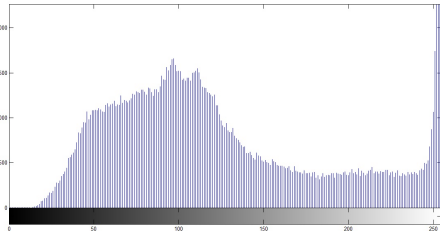
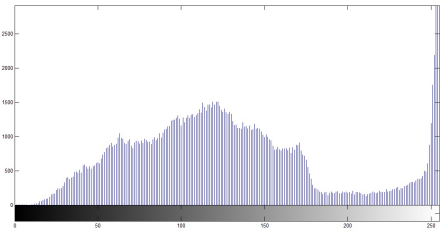
Figura 3.12: Imagen adquirida por el ordenador.

presentan en el apéndice F y su análisis se realiza en la sección 3.5.4). Estos resultados se evaluaron dentro del modelo de visión desarrollado para poder determinar la distancia y ubicación adecuada de la cámara con el fin de obtener los mejores resultados durante la detección de los cocos.

Cuadro 3.4: Obtención de imágenes a distintas distancias (cámara - cocos) (D1): Distancia Cámara - Cocos, (D2): Distancia Coco - Tallo de la palmera

Imagen	D1	D2
	150 cm	65 cm
	120 cm	52 cm
	170 cm	32 cm
	80 cm	20 cm
	100 cm	30 cm

Cuadro 3.5: Transformación de las imágenes capturadas de formato de color RGB a niveles de gris con sus respectivos histogramas.

Imagen Gris	Histograma
	
	
	

3.5.2. Niveles de grises de la imagen

Una vez obtenida la imagen de interés, representada en el formato de color RGB (Red - Green - Blue), para realizar el análisis sobre la presencia de cocos es necesario realizar la conversión a niveles de grises. La imagen en nivel de gris nos proporciona una imagen que se representa mediante

una matriz bidimensional. Los resultados obtenidos durante este procesamiento usando el programa desarrollado y usando la ecuación 2.16 se muestran en las figuras de la tabla 3.5.

Durante esta transformación de niveles de color a escala de gris existen 256 niveles de gris almacenados en un vector de 8 bits tomando valores de 0 a 255, donde 0 representa al negro y 255 representa al blanco. Esta información puede verse en los histogramas del cuadro 3.5, el cual muestra la distribución de niveles de gris de toda la imagen considerando las imágenes adquiridas por el sistema desarrollado.

3.5.3. Mejoramiento de la imagen y obtención de los bordes

El mejoramiento de la imagen se realizó con la finalidad de resaltar el contorno de los elementos existentes dentro de esta, además de eliminar la presencia de ruido. El método de suavizado utilizó el filtro Gaussiano, aunque también se usó el mejoramiento de la imagen por contraste y por ecualización del histograma. Los resultados finales no fueron satisfactorios para la tarea de interés ya que en ninguno de los casos se realizó detección alguna de los elementos de los cocos. Estos resultados aplicando dichos métodos de mejoramiento se pueden apreciar en la figura 3.13.

La ecualización del histograma es una operación orientada a repartir de manera uniforme los niveles de gris entre los píxeles de la imagen (figura 3.14). Este procedimiento asigna mayor rango de nivel digital de la imagen de salida a los niveles digitales más frecuentes en la imagen de entrada. En consecuencia, en la imagen realzada quedan mejor contrastados los niveles de gris ocupados por más celdillas en la imagen primitiva.

Respecto al mejoramiento por contraste, este método consiste en resaltar o definir un nivel de gris dentro de la imagen, ocasionando que todos los píxeles cuyo nivel de gris esté dentro del nivel seleccionado adquieran el mismo valor de intensidad (figura 3.15).

La detección de bordes se realizó usando el método de Sobel, el cual nos proporciona los bordes en las direcciones del eje “x” y del eje “y”, además de que con este método se logra eliminar bordes que se encuentran dentro del coco que en los pasos posteriores pudieran afectar el procesamiento de la imagen obteniendo resultados no satisfactorios. Integrando los métodos de mejoramiento y detección de bordes de Sobel se obtiene el algoritmo de Canny que resulta muy eficiente en cuanto a la detección de todos los bordes tanto débiles como fuertes, con lo que se obtiene la parte circundante del coco, dando como resultado una forma muy parecida a un círculo. Estos resultados se obtienen de una mejor manera usando el algoritmo de Sobel tal como se ve en la figura 3.16.

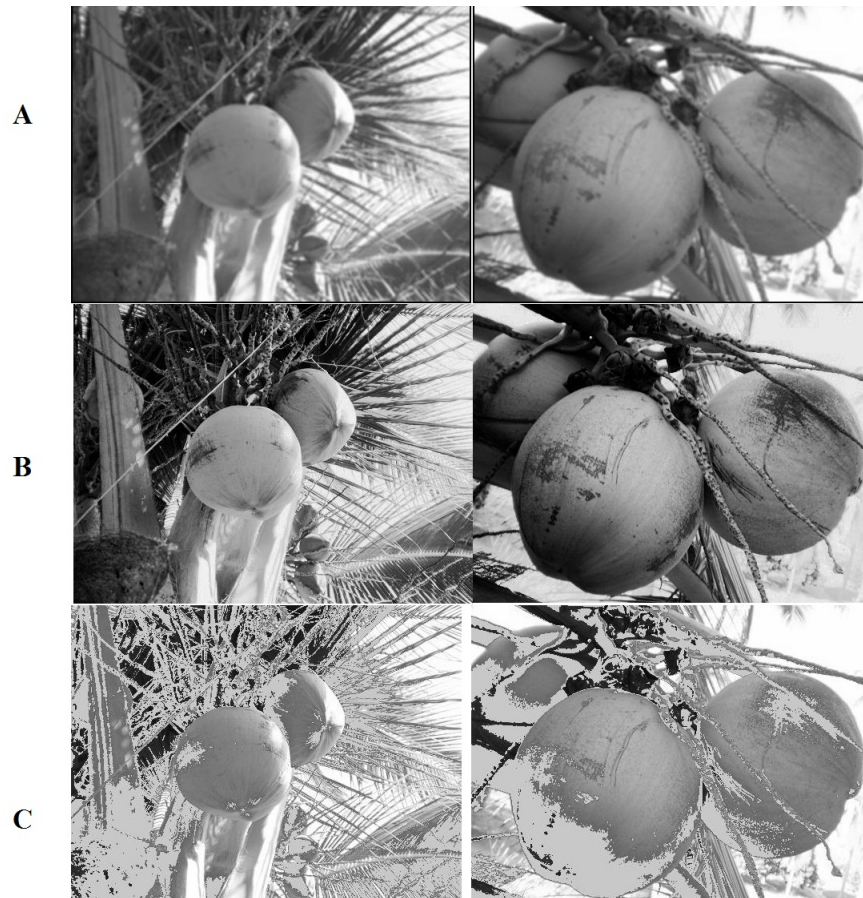


Figura 3.13: Mejoramiento de la imagen. (A) Usando un filtro Gaussiano, (B) Ecuilización del histograma, (C) Cambio de contraste.

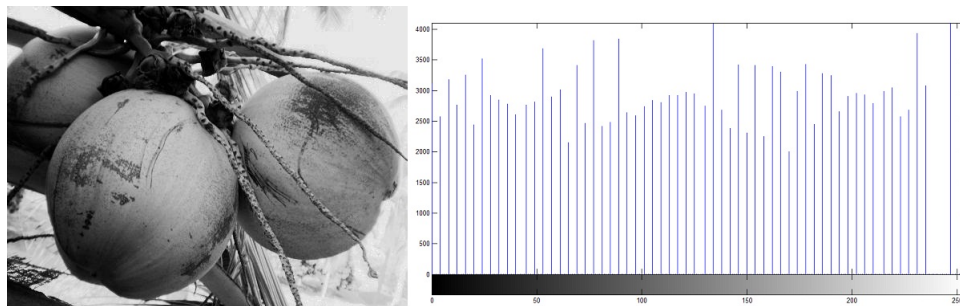


Figura 3.14: Ecuilización del histograma.

Con el filtro de Sobel los bordes obtenidos quedan representados con distintos niveles de intensidad, por lo que para obtener los bordes finales se aplica un valor umbral dando como resultado una imagen binaria que solo toma los valores 0 y 1 para su representación, en donde “0” representa al

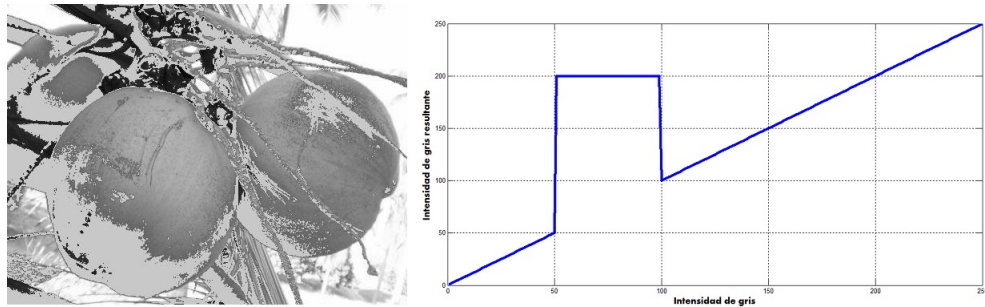


Figura 3.15: Mejoramiento por cambio de contraste.

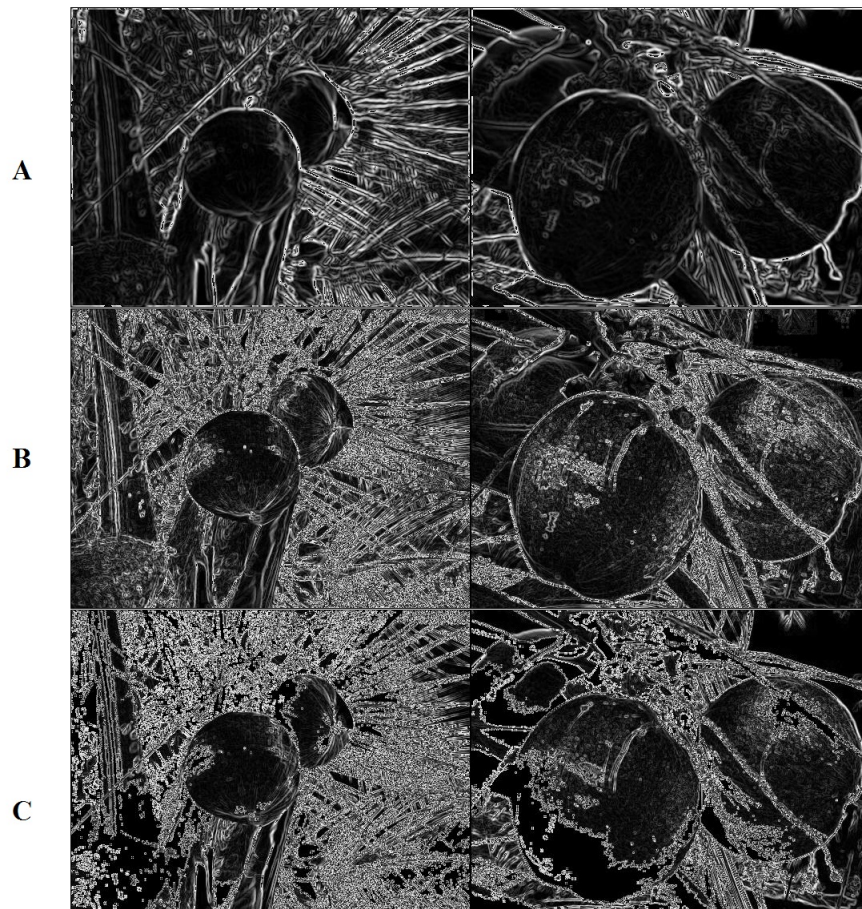


Figura 3.16: Detección de bordes usando el filtro de Sobel.

negro y en este caso representa un pixel de un borde y “1” representa a un pixel fuera de un borde ó al nivel blanco. La imagen mostrada en la figura 3.17 representa los resultados de la umbralización y por ende, los resultados finales de la obtención de bordes de la imagen de interés.

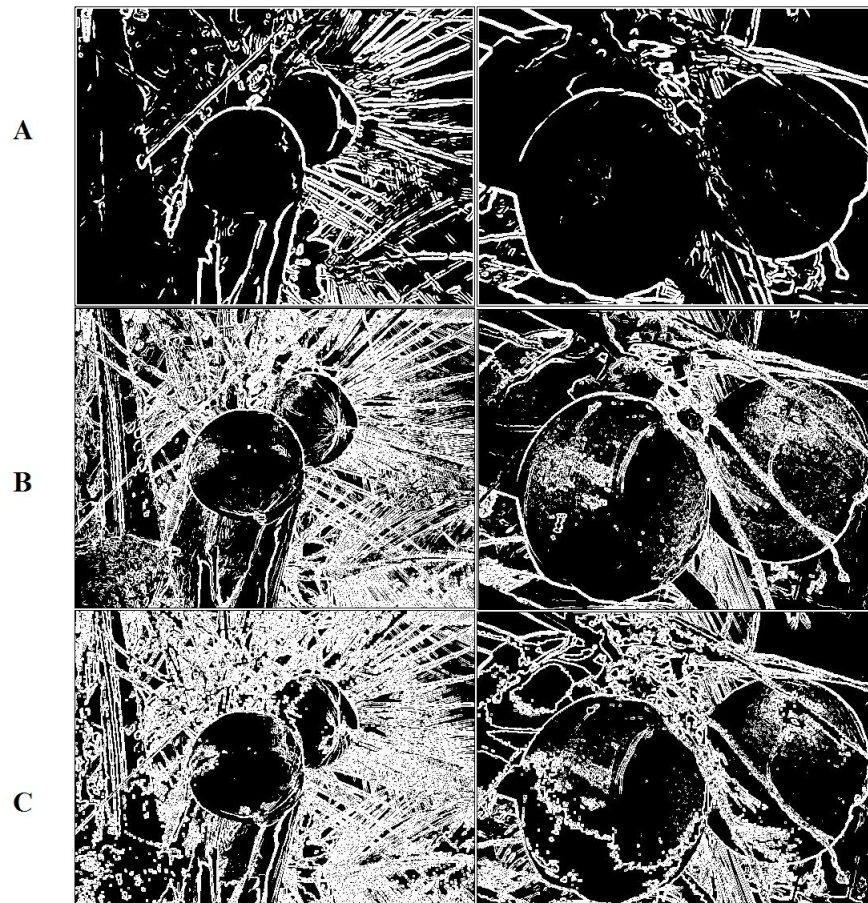


Figura 3.17: Obtención final de bordes por umbralización.

3.5.4. Detección final de cocos

Una vez determinados los bordes de la imagen representados mediante una matriz binaria, se generó una matriz que contuviera la ubicación de los píxeles que representan los bordes de la imagen analizada, con la finalidad de poder implementar el algoritmo descrito en la sección 2.3.5 del capítulo 2. Los resultados obtenidos se aprecian en la figura 3.18.

Estos resultados dependieron en gran medida de los valores de umbral utilizados durante la detección de bordes después de la aplicación del filtro de Sobel, ya que al variar este valor también variaba el mapa de bordes de salida afectando directamente a la representación de los cocos dentro de la imagen tal como puede observarse en la figura 3.19. En esa figura también se aprecia que mientras más grande sea el valor de umbral, los elementos presentes en la imagen van perdiendo forma, lo que hace más difícil la detección de los cocos. Lo ideal es usar valores entre 15 y 30 tal como lo veremos

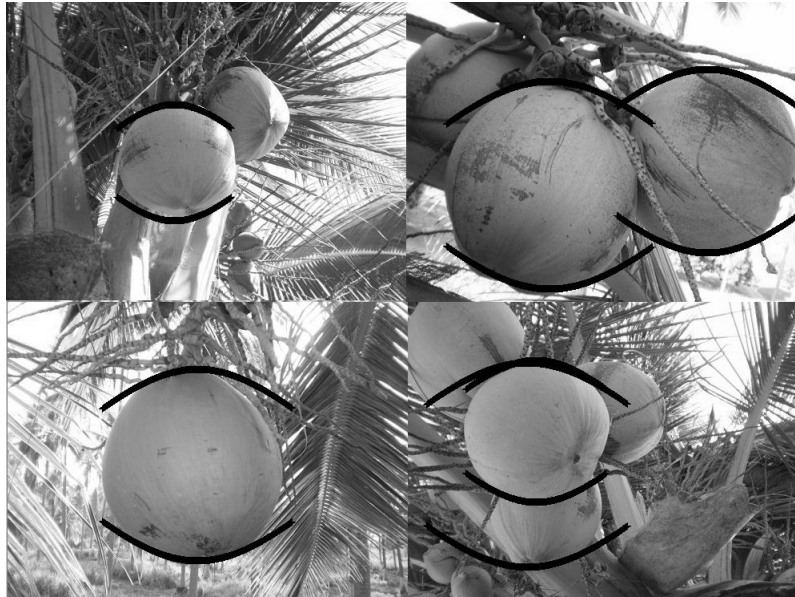


Figura 3.18: Cocos detectados en las imágenes de análisis.

a continuación.

Para la determinación del valor de umbral óptimo se realizaron pruebas a 50 imágenes con distintas cantidades de cocos presentes en la misma. Posteriormente se aplicaron 9 niveles distintos de umbralización, obteniendo los resultados de la tabla 3.6 (para mayor detalle ver tablas del anexo F). También se midió la eficiencia del algoritmo desarrollado, considerando la cantidad de cocos detectados respecto a la cantidad presente en el rácimo. Esta eficiencia arrojó los resultados mostrados en la tabla mencionada y se observó que la eficiencia más alta que se obtiene es de 66.3 %. Esto se debe en gran medida a las cantidades de cocos que se consideraron dentro del rácimo, además de que para rcimos con una cantidad de cocos superior a 5 existen elementos que se ocultan entre sí ocasionando que el algoritmo detecte el rácimo completo como un solo elemento.

Cuadro 3.6: Tabla de eficiencia por valor de umbral aplicado

Valor Umbral	0	15	20	25	30	35	40	45	50
Eficiencia	0	58.9	66.3	65.8	63.2	58.2	56.1	20.8	10.3

Con los resultados anteriores se generó la gráfica 3.20, en donde se puede apreciar que el nivel adecuado de umbralización es un valor entre 20 y 25, ya que para valores mayores se pierde la forma

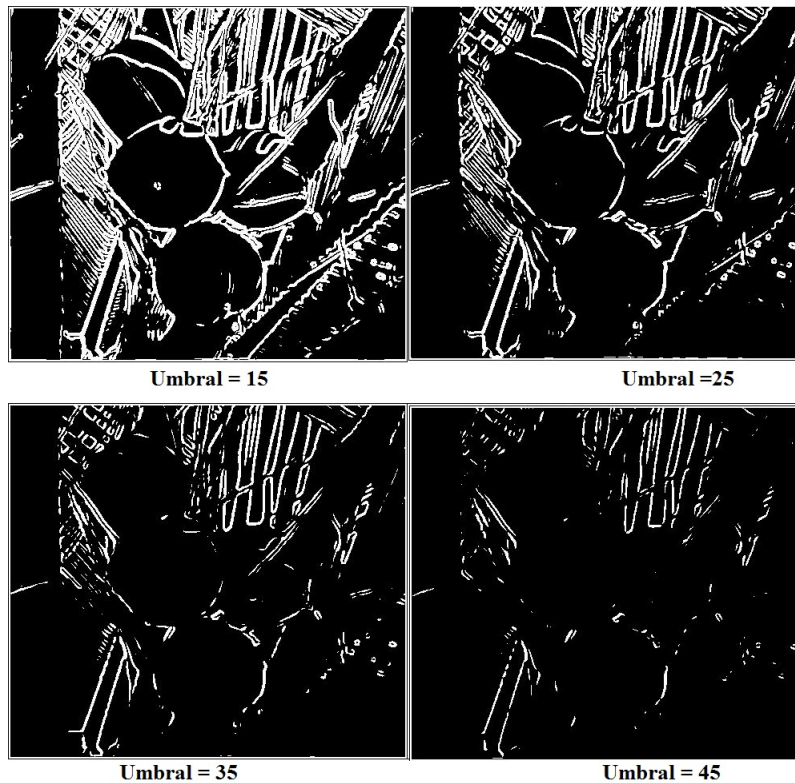


Figura 3.19: Cambios del mapa de bordes respecto al cambio del valor de umbral.

de la imagen, y para valores pequeños se generan líneas que hacen más complicado definir la forma del coco.

Es importante mencionar que el éxito del programa no solo depende del valor de umbralización sino también de la distancia a la que se tome la fotografía, además de la cantidad de cocos presentes en la misma. En la tabla 3.7 se presenta la eficiencia del algoritmo utilizado respecto a la cantidad de cocos presentes en el racimo y considerando también la distancia a la que se encuentra la cámara. Estos datos se clasificaron para una distancia en donde la eficiencia fuera mayor a 50 % a fin de obtener mejores resultados durante el procesamiento.

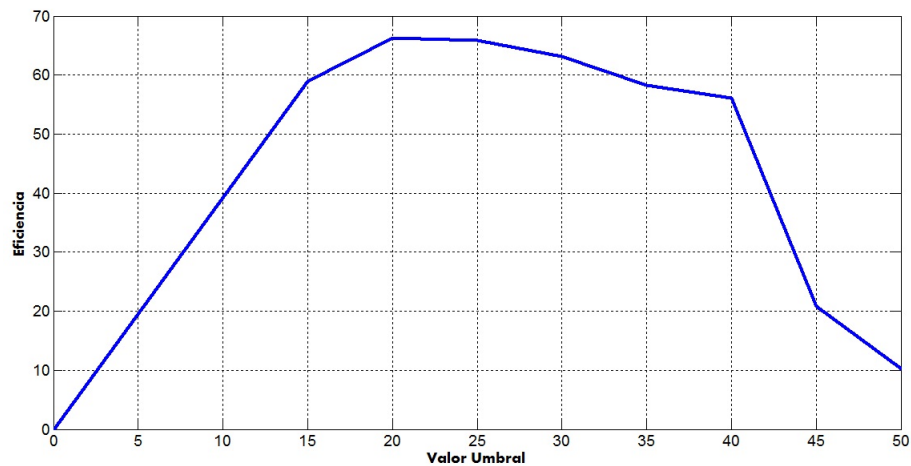


Figura 3.20: Eficiencia obtenida al variar el valor de umbral de la imagen después de aplicar el filtro de Sobel.

Cuadro 3.7: Tabla de distancias Cámara - Cocos

Cantidad de cocos	Eficiencia promedio (%)	Distancia Cámara - Cocos (cm)
1	100	34
2	78.6	37.14
3	62.5	41.25
4	66.1	47.14
5	52	48

Con los datos obtenidos se generó la gráfica 3.21. Esta información permitió obtener la distancia a la cual debe posicionarse la cámara para una mejor captura de la imagen, a fin de obtener los mejores resultados durante la detección de los cocos. Esta distancia también varía de acuerdo a la cantidad de cocos por cada rácimo, además del tamaño de los mismos.

Otro aspecto importante que se destaca de los datos anteriores es el hecho de que mientras mayor sea la cantidad de cocos presentes en el rácimo, la eficiencia del algoritmo va disminuyendo ocasionando que la detección se haga más deficiente por ese aspecto.

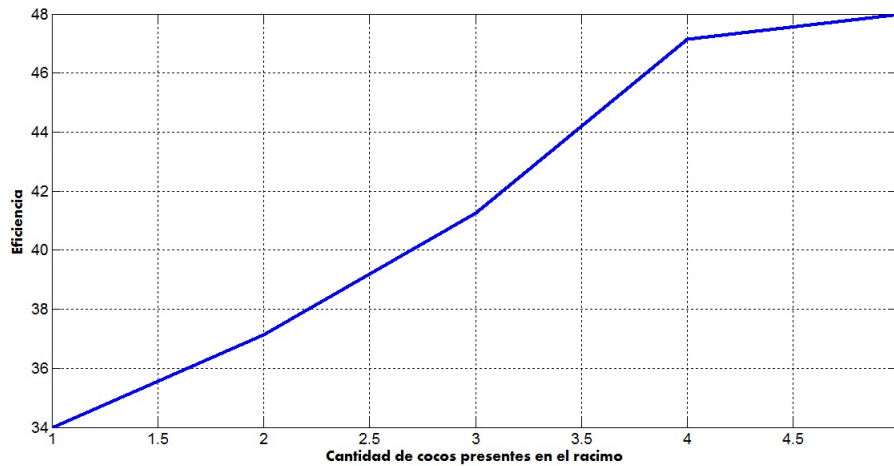


Figura 3.21: Distancia promedio para la obtención de la imagen con respecto a la cantidad de cocos.

3.5.5. Discusión de los resultados obtenidos durante el procesamiento de de las imágenes

Debido a las necesidades de los cocos dentro del ámbito comercial, nuevos métodos han sido desarrollados para asistir un proceso de corte mediante un griper. Esto podría hacerse usando procesamiento de imágenes, con lo cual se haría más rápida esta tarea [14].

Durante este trabajo se propuso la implementación de un algoritmo que permitiera la detección de cocos, considerando la forma circular que presentan. Para ello se optó por adaptar el algoritmo descrito en la sección 2.3.5 usado para la detección de elipses en una imagen digital. Los aspectos que se consideraron para el uso de este algoritmo fueron: la cantidad de variables usadas para su tratamiento y la rapidez en el procesamiento que el autor menciona; además de la lógica de funcionamiento que maneja. Esto hace que la programación de este método resulte más sencilla y el tratamiento de la información se realice en un corto tiempo.

La eficiencia del método de detección de cocos en imágenes digitales depende completamente del éxito en los resultados de todo el tratamiento que se le da a la imagen, desde su adquisición hasta la detección de bordes. La adquisición de la imagen se ve influenciada por el tipo de cámara y la resolución de esta, ya que la velocidad con la que trabaja el algoritmo está relacionada directamente con la cantidad de píxeles que tiene la imagen (resolución). Mientras más alta sea esta mayor cantidad de cálculos deberán efectuarse en todo el proceso ocasionando que el tiempo de ejecución del programa sea mayor. En este caso, al usarse una cámara IP se tuvo la ventaja de que la resolución

que maneja es de un valor muy pequeño (0.1536 MP) lo que facilita el procesamiento de la imagen y al mismo tiempo se logró la eliminación de cables entre el ordenador y la cámara. En el caso en que la cámara hubiera presentado una resolución mayor esto habría implicado la creación de un método dentro del programa a fin de reducir el tamaño de la imagen para su procesamiento y de igual forma habría aumentado el tiempo de ejecución de todo el proceso. Otro aspecto importante en cuanto a la calidad de la cámara es que una cámara IP captura las imágenes usando solo la luz ambiente. Esto provoca que la toma presente muchas sombras ocasionando que la forma del coco dentro de la imagen se vea afectada por ese factor. Una solución a este problema sería acondicionar un dispositivo para que funcionara como “flash” al momento de realizar la toma de la foto. En cuanto a la distancia a la que debe colocarse la cámara respecto al rácimo de cocos para que estos aparezcan completamente en la toma fotográfica varía mucho, ya que depende en gran medida de la cantidad de cocos presentes en el rácimo. Considerando una cantidad entre 1 y 5 cocos, la distancia promedio resulta ser 42 cm, tal como lo vimos en la sección 3.5.4. Sin embargo, en muchos casos la posición final del robot respecto al rácimo de cocos en la mayoría de los casos es mayor a esa distancia, por lo que para solucionar ese problema sería necesario implementar un mecanismo que pudiera trasladar la cámara lo más cerca posible a los cocos, obteniendo como resultado la distancia requerida. El problema de esto radicaría en la masa de ese sistema ya que provocaría que el robot se hiciera más pesado afectando su funcionamiento. Otra opción sería usar una cámara con zoom que pudiera acercar la toma, solo que el problema en este caso sería que al hacer eso la resolución de la imagen disminuye generando una imagen borrosa y con elementos difíciles de identificar.

Posterior a la identificación de la imagen tenemos la conversión a escala de grises. En este caso los resultados obtenidos dependen directamente de la calidad de la imagen en cuanto a iluminación presentada, ya que al aplicar este proceso a una imagen con sombras generaría una imagen muy oscura, con bordes difíciles de identificar, haciendo muy deficiente la detección de los cocos.

La detección de bordes se encarga de definir los contornos del coco, por lo que en este proceso es muy importante que la fotografía en grises se encuentre con todos sus elementos bien definidos, lo que permite una mejor identificación de estos. Por otro lado es importante que la imagen no contenga ruido ya que esto ocasionaría que el mapa de bordes presente secciones que no correspondan a un borde dentro de los elementos de análisis. Esa fue la razón por la que se usó el filtro Gaussiano ya que este filtro realiza una difuminación de la imagen logrando hacer que los bordes de los elementos contenidos en la imagen se vuelvan más gruesos, permitiendo mejores resultados. A diferencia de los

algoritmos de mejoramiento de la imagen por histograma y por contraste, estos hacen que los niveles de gris se uniformicen por toda la fotografía o bien que ciertos niveles de gris resalten más sobre otros. El problema que se tuvo en estos casos radicó en el hecho que al presentarse una imagen con mucha iluminación en ciertas secciones y al aplicarse la equalización del histograma o cambio de contraste, ciertas secciones de los cocos pierden su forma, lo que hace más complicada su identificación.

Como se mencionó en la sección anterior, otro de los aspectos relevantes durante el mapeado de bordes, fue la elección de un buen nivel de umbralización a fin que los bordes no pierdan forma y con ello lograr que los bordes fuertes sean los que resalten sobre los bordes débiles. Para ello notamos que los mejores resultados se obtuvieron cuando usamos un valor entre 25 y 30 ya que en valores mayores se pierde completamente la forma de los cocos dentro de la imagen, y para valores menores se presenta la presencia de ruido dentro de la imagen.

Una vez que se tuvo el mapa de bordes se aplicó el algoritmo propuesto para la detección de los cocos presentes en la fotografía de interés. En este proceso se observó que además de todos los factores ya mencionados también influye el tamaño del coco y por ende la distancia a la que se tome la fotografía. Dentro de los aspectos de programación considerando este factor, se encuentra que las variables de entrada que se deben tomar en cuenta son diferentes para cada tamaño de cocos. Revisando el algoritmo propuesto vemos que las variables importantes son: los radios interno y externo a aplicar, ya que para valores pequeños solo se detectarán cocos pequeños y grandes para el caso contrario. Para ello se definió un rango entre 40 y 200 píxeles para cocos pequeños y 100 y 400 píxeles para cocos grandes.

Al referirse a la eficiencia mostrada por el método para la detección de cocos, se observa que es muy pequeña y debe ser mejorada. Sin embargo estos resultados se obtuvieron en gran medida debido a la cantidad de cocos que se estaba manejando, y por otro lado a la superposición que estos presentaban dentro del rácimo, ya que al contar la cantidad de cocos en el rácimo también se consideraron los que se encontraban ocultos unos de otros. Esto ocasionaba que la detección se hiciera complicada y solo se detectaran los cocos que se encontraban al frente.

Los factores que influyeron para la obtención de un buen resultado durante la detección de cocos se resumen en el siguiente listado.

- Calidad de la cámara en términos de resolución.
- Cantidad de iluminación presente en el medio al momento de tomar la fotografía.

- Distancia y posición a la que se coloca la cámara respecto a los cocos.
- Estado de movimiento en el que se encuentra el robot al tomar la fotografía.
- Presencia de hojas de las palmeras que pudieran afectar la visibilidad de los cocos dentro de esta.
- Sobreposición de los cocos en el rácimo.
- Tamaño de los cocos.
- Valor de umbralización.
- Tamaño de los radios manejados al aplicar el algoritmo usado (vease sección 2.3.5).

Entre las mejoras que pueden proponerse para esta tarea están las siguientes:

- Implementar un dispositivo a la cámara que tenga el funcionamiento de un “flash” para aumentar la iluminación en los cocos y evitar problemas de sombra en la imagen.
- Implementar un dispositivo que permita el desplazamiento de la cámara a fin de acercarla más a donde se encuentran los cocos con la finalidad de tener la distancia óptima encontrada entre esta y los cocos.
- Acondicionar el programa para que se adapte automáticamente al tamaño de los cocos. Esto se lograría mediante la implementación de una red neuronal, la desventaja radicaría en el tiempo de procesamiento ya que el proceso se haría más lento.
- Acondicionar el programa para que detecte tanto cocos unitarios como rcimos completos como un solo elemento.

3.5.6. Sistema eléctrico

Las características del sistema eléctrico del robot se muestran en la tabla 3.8, estos valores de consumo se presentan respecto a la masa soportada por el robot, haciendo referencia también a los dos tipos de baterías usadas. Los datos representan el consumo de corriente del robot suponiendo su operación en forma cntinua.

Cuadro 3.8: Consumo eléctrico del robot.

Masa Estructura Superior (kg)	1.5	2.2	2.7
Masa Estructura Inferior (kg)	1.7	1.7	1.7
Masa Total (kg)	3.2	3.9	4.4
Duración Batería de 12V @ 7A (Horas)	5	4.5	3
Duración Batería de 12V @ 4A (Horas)	4	3	1.5
Consumo de Batería de 12V @ 7A (mA)	150	200	320
Consumo de Batería de 12V @ 4A (mA)	150	200	320

Dentro de estos resultados, se observa que con la masa que requiere soportar el robot la batería de 12V @ 7A resulta ser la adecuada para esta tarea, sin embargo, al incorporar esta el sistema mecánico hacen que el sistema se vuelva más pesado lo que llevaría a realizar modificaciones en la selección del motor usado, para ello, considero recomendable usar la batería de 12V @ 4A que es menor en tamaño y masa (1.7kg aproximadamente) que aunque tiene una menor duración proporcina la carga suficiente para realizar las tareas que requiere el robot.

CAPÍTULO 4

Conclusiones

El diseño de un robot trepador de palmeras para la detección de cocos constituye una forma de realizar la aplicación de la robótica en el sector agrícola, así como la utilización de la visión artificial como herramienta para la identificación de objetos, lo cual permitirá generar un avance en el desarrollo de robots trepadores y en la identificación de cocos bajo diversas condiciones de estos, tales como el tamaño y ubicación dentro de la palmera.

Considerando los resultados obtenidos y haciendo referencia al modelo implementado para el ascenso del robot sobre la palmera, se puede concluir que el mecanismo de biela - manivela a pesar de ser muy rústico resulta efectivo para esta tarea además de que ayuda a disminuir la presencia de motores sobre el robot, lo que disminuye considerablemente la cantidad de dispositivos electrónicos necesarios para su control. Por otro lado, la implementación de un sistema de resortes en los brazos del robot lograron que estos se ajustaran al diámetro de la palmera evitando que este resbalara durante el ascenso.

Tomando en cuenta al módulo de control a distancia, se concluye que esta es una buena opción para manipular al robot, lo que permite eliminar la presencia de cables que puedan afectar el funcionamiento óptimo del robot, además de que permite que a una distancia significativa se puede realizar la manipulación del mismo.

Respecto al sistema de visión artificial, la modificación del modelo usado para la detección de

elipses funciona correctamente para la detección de cocos considerando la forma circular de estos. Aunque se obtuvo una eficiencia no tan considerable, se observó que el éxito de este método depende completamente de los resultados obtenidos en todo el procesamiento anterior a la aplicación del algoritmo. Cabe mencionar que el uso de una cámara IP como medio de captura de las imágenes de los cocos dentro del robot resulta ser una buena opción para esta tarea, ya que se evita el uso de cables para su comunicación con el ordenador, además de que permite la separación de estos elementos logrando su manipulación a grandes distancias.

Como conclusión final y tomando en cuenta toda la caracterización fisonómica de la palma se sugiere que las características del robot sean:

- La masa soportado por la estructura superior del 5 kg, lo que incluye el sistema de visión artificial.
- Dado que la posición final del robot se encuentra a una distancia promedio de 61.7 cm, es importante que se coloque un sistema en la cámara para que esta se posicione a una distancia promedio de 42 cm.
- Se recomienda usar una batería de 12 V a 4 Amperes.
- La abertura de los brazos del robot sea de 35 cm con la finalidad de adaptarse a un diámetro mayor de las palmeras.

APÉNDICE A

Diseños desarrollados del sistema mecánico

El diseño de este robot se basó en el sistema basado en el comportamiento de los Koalas al trepar los árboles [26]. Este robot está diseñado para trepar columnas y su mecanismo de trepado no depende del diámetro ni del material de la columna.

Este robot está basado en los diagramas de las figuras A.1, A.2 y A.3, estas figuras muestran las vistas frontal, lateral y en perspectiva del robot. El robot está diseñado para que funcione en base a tornillos sin fin accionados por motores de corriente directa (CD).

El segundo sistema robótico propuesto consistió en la forma en que un podador de árboles realiza esta tarea en Japón, entre sus principales características consiste en la óptima posición del centro de gravedad del robot[27].

En la figura A.4 se observa el bosquejo mecánico de robot, y en la figura A.5 se muestra el diseño físico de este.

Las razones por las que no se desarrollo este protitipo residen en el hecho que para su construcción se requerían 4 motores lo que haría que el sistema se hiciera muy pesado en cuanto al sistema electrónico del mismo, además de que el diseño no se adapta fácilmente al cambio de diámetros del medio que esta subiendo, en este caso, al diámetro de la palmera.

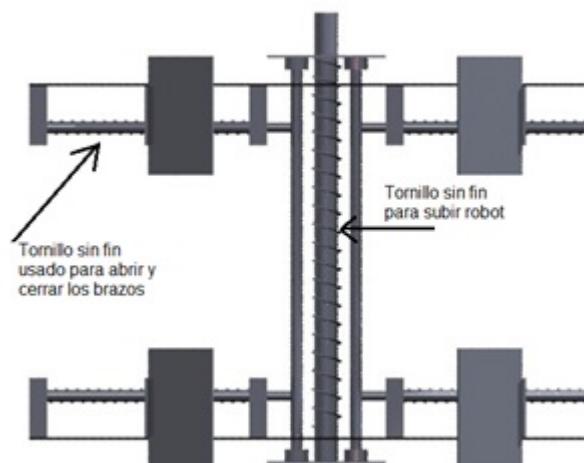


Figura A.1: Vista frontal de robot Koala.

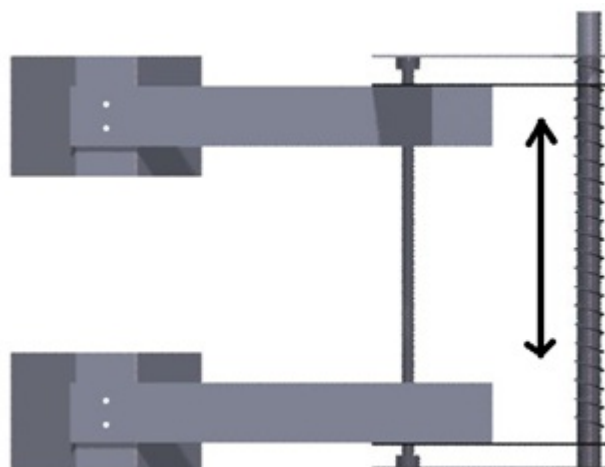


Figura A.2: Vista lateral de robot Koala.

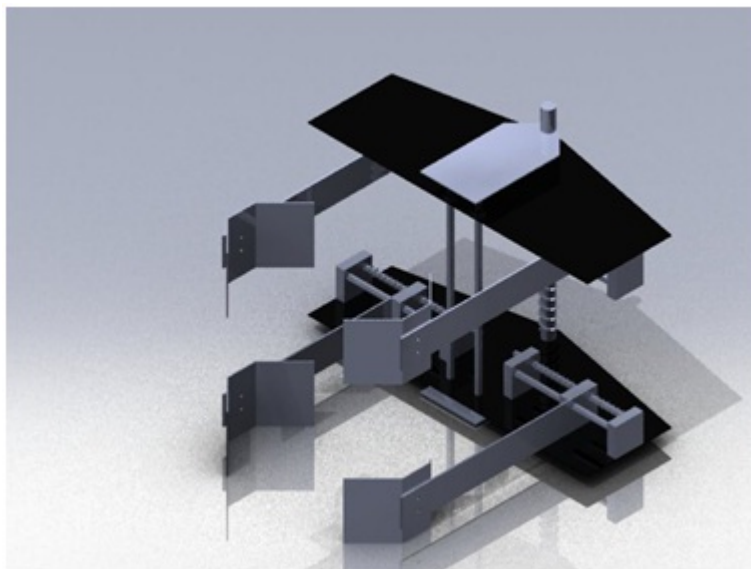


Figura A.3: Vista en perspectiva de robot Koala.

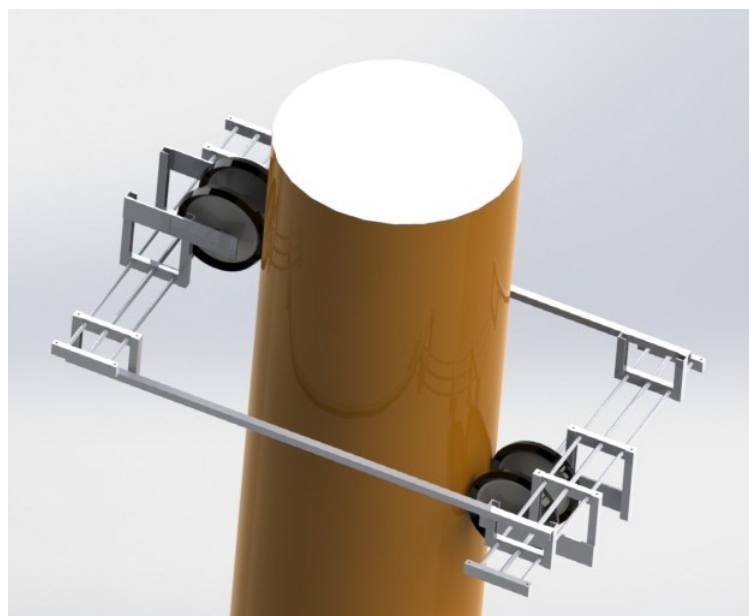


Figura A.4: Diseño de robot podador.



Figura A.5: Prototipo de robot podador.

APÉNDICE B

Ventanas desarrolladas del software de control

En este apartado se muestran las ventanas desarrolladas del programa de control del robot, en la figura B.1 se muestra la ventana en donde el usuario puede observar las imágenes transmitidas por el robot, además de que en este lugar también se realiza el control de movimiento de la cámara.

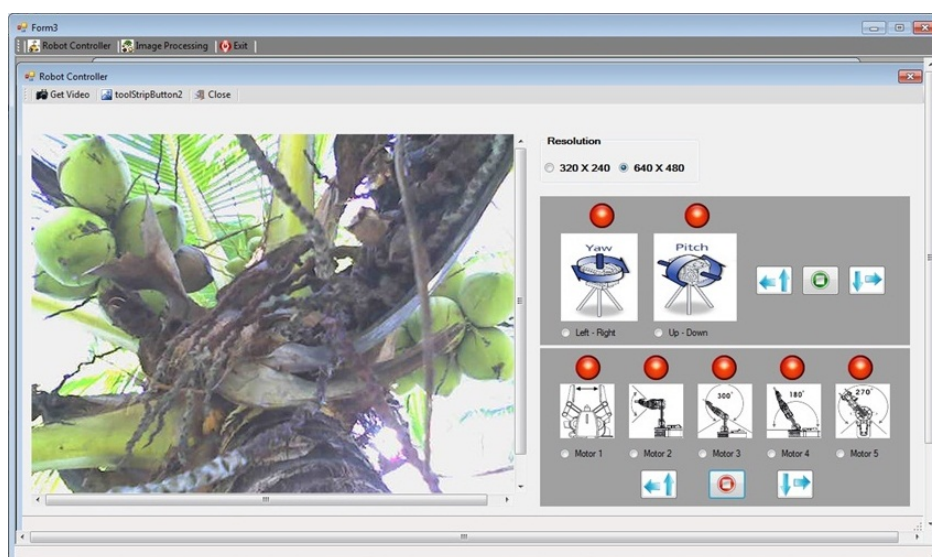


Figura B.1: Ventana para adquisición de imágenes y control del robot.

La ventana mostrada en la figura B.2 es usada para realizar el procesamiento de la imagen y poder

observar los resultados obtenidos para la detección de cocos.

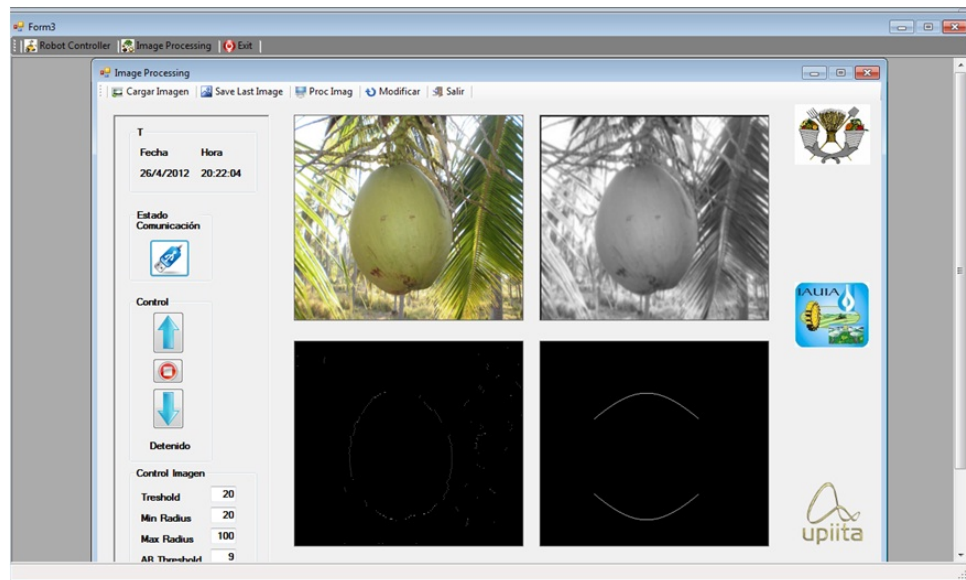


Figura B.2: Ventana para el procesamiento de imagenes.

A continuación se presentan los códigos usados para la programación de la ventana principal del programa.

```
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.ComponentModel;
using System.Data;
using System.Drawing;
using System.Text;
using System.Windows.Forms;

namespace Comunicacion_Trepador
{
    public partial class Main_Page : Form
    {
        public Main_Page()
        {
```

```
        InitializeComponent();
    }

    private void cmdExit_Click(object sender, EventArgs e)
    {
        Application.Exit();
    }

    private void cmdRobotControl_Click(object sender, EventArgs e)
    {
        if (!Robot_Controller.HayInstancia)
        {
            Robot_Controller frmForm2 = new Robot_Controller();
            frmForm2.MdiParent = this;
            frmForm2.Activate();
            frmForm2.Show();
            frmForm2.BringToFront();
        }
        else
        {
            Robot_Controller.InstanciaActiva.Activate();
        }
    }

    private void cmdImProcessing_Click(object sender, EventArgs e)
    {
        if (!Image_Processing.HayInstancia)
        {
            Image_Processing frmForm1 = new Image_Processing();
            frmForm1.MdiParent = this;
            frmForm1.Activate();
        }
    }
}
```

```
        frmForm1.Show();  
        frmForm1.BringToFront();  
    }  
    else  
    {  
        Image_Processing.InstanciaActiva.Activate();  
    }  
}  
}
```

APÉNDICE C

Características generales de los dispositivos usados

El sistema electrónico para el control del robot a distancia usando radiofrecuencia se basó en los microcontroladores PIC18F4550 y el AVR ATMEGA32 así como el módulo de radiofrecuencia HM-TR915/TTL. Las características de estos dispositivos se describen a continuación.

C.1. Dispositivos electrónicos

C.1.1. PIC18F4550

El PIC18F4550 pertenece a la familia de microcontroladores PIC18Fxx, el cual es una familia de microcontroladores de alto rendimiento, son microcontroladores de 16 bits con convertidores analógico-digital integrados de 10 bits. Esta familia ha mejorado las características del núcleo, tienen 32 niveles en su pila y múltiples fuentes de interrupciones tanto internas como externas.

La separación del bus de datos e instrucciones de la arquitectura Harvard permite en forma simultánea el acceso a un amplio rango de palabras de instrucción de 16 bits y a un bus de datos de 8 bits. Existen total 77 instrucciones que están disponibles.

En el PIC18F4550 incorpora diferentes sistemas de reloj, el módulo USB utiliza la fuente primaria para cumplir las especificaciones Low Speed y Full Speed en donde se provee frecuencias de 6 y 48 MHZ respectivamente.

Existen tres tipos de memoria en esta familia: Memoria de Programa, RAM y EEPROM de datos. Los PIC18 tienen implementado un contador de programa de 21 bits con lo cual obtenemos 2Mbytes en espacio de memoria de programa, el PIC18F4550 tiene 32Kbytes de memoria Flash. La memoria de datos esta dividida en 16 bancos, los cuales solamente 8 están implementados en el PIC18F4550 (2048 bytes), los bancos 4 hasta el 7 son utilizados por el módulo USB interno mientras esté habilitado.

Los PIC18F4550 tienen múltiples fuentes de interrupciones y un vector de prioridad, esta última permite a la fuente de interrupción tener un nivel de prioridad alto o bajo. El módulo USB integrado en el PIC18F4550 tiene su propia estructura lógica de interrupciones.

El PIC18F4550 es compatible con el SIE (Serial Interface Engine) que permite una comunicación rápida con cualquier Host y el microcontrolador. La memoria USB RAM de 1 KB está localizada entre los bancos 4 y 7. El banco 4 es utilizado para el control de los endpoint (Buffer Descriptor) y los bancos restantes están disponibles para datos USB.

C.1.2. Características generales del ATmega32/32L

Microcontrolador AVR de 8 bits de alto rendimiento y bajo consumo.

1. Arquitectura RISC avanzada.

- 131 instrucciones. La mayoría de un simple ciclo de clock de ejecución.
- 32 x 8 registros de trabajo de propósito general.
- Capacidad de procesamiento de unos 16 MIPS a 16 MHz.
- Funcionamiento estático total.
- Multiplicador On-Chip de 2 ciclos

2. Memorias de programa y de datos no volátiles.

- 32K bytes de FLASH reprogramable en sistema.
- Resistencia: 1.000 ciclos de escritura / borrado.
- Sección de código añadida opcional con bits de bloqueo independientes.

3. On-Chip.

- Operación de lectura durante la escritura.
- 1024 bytes de EEPROM.
- Resistencia: 100.000 ciclos de escritura / borrado.
- 2K bytes de SRAM interna.
- Bloqueo (cerradura) programable para la seguridad del software.

4. Interface JTAG.

- Mantenimiento de eliminación de errores On-Chip.
- Programación de FLASH, EEPROM, fusibles y bits de bloqueo a través de la interface JTAG.
- Capacidades de Boundary Scan de acuerdo con el Standard (norma) JTAG.

5. Características de los periféricos.

- Dos Timer/Contadores de 8 bits con prescaler separado y modo comparación.
- Un Timer/Contador de 16 bits con prescaler separado, modo comparación y modo de captura.
- Comparador analógico On-Chip.
- Timer watchdog programable con oscilador separado On-Chip.
- Interface serie SPI maestro/esclavo.
- USART serie programable.
- Contador en tiempo real con oscilador separado.
- ADC de 10 bit y 8 canales.
- 8 canales de terminación simple.
- 2 canales diferenciales con ganancia programable a 1x, 10x o 200x.
- 4 canales de PWM.
- Interface serie de dos hilos orientada a byte.

C.1.3. Transmisor HM-TR915/TTL

Los módulos HMTR-915/TTL trabajan como transmisor y receptor, su función es la modulación y demodulación de datos, existen en lógica TTL y RS232.

Entre las características del transceiver HMTH- 915/TTL podemos mencionar:

- Modulación FSK, alta inmunidad a interferencias.
- Bandas ISM 315/434/868/915 MHz.
- Conversión de RF a UART auto controlado, confiable y fácil de usar.
- Formato UART configurable, con data rate de 300 - 19200 bps.
- Niveles TTL y RS232.

APÉNDICE D

Tablas de diámetros e inclinación de las palmeras analizadas

No. Palmera	Perímetro (cm)	Diámetro (cm)	No. Palmera	Perímetro (cm)	Diámetro (cm)
1	80	25.46	51	93	29.60
2	88	28.01	52	80	25.46
3	81	25.78	53	95	30.23
4	92	29.28	54	81	25.78
5	90	28.64	55	93	29.60
6	83	26.41	56	82	26.10
7	92	29.28	57	89	28.32
8	95	30.23	58	91	28.96
9	89	28.32	59	96	30.55
10	88	28.01	60	82	26.10
11	86	27.37	61	95	30.23
12	93	29.60	62	89	28.32
13	92	29.28	63	81	25.78
14	98	31.19	64	92	29.28

15	99	31.51	65	83	26.41
16	98	31.19	66	90	28.64
17	75	23.87	67	78	24.82
18	95	30.23	68	82	26.10
19	80	25.46	69	87	27.69
20	90	28.64	70	93	29.60
21	93	29.60	71	89	28.32
22	87	27.69	72	88	28.01
23	85	27.05	73	92	29.28
24	86	27.37	74	88	28.01
25	87	27.69	75	85	27.05
26	85	27.05	76	81	25.78
27	86	27.37	77	91	28.96
28	88	28.01	78	80	25.46
29	80	25.46	79	88	28.01
30	92	29.28	80	80	25.46
31	78	24.82	81	86	27.37
32	93	29.60	82	95	30.23
33	78	24.82	83	86	27.37
34	86	27.37	84	94	29.92
35	91	28.96	85	86	27.37
36	87	27.69	86	86	27.37
37	95	30.23	87	90	28.64
38	90	28.64	88	91	28.96
39	82	26.10	89	88	28.01
40	85	27.05	90	85	27.05
41	82	26.10	91	92	29.28
42	94	29.92	92	83	26.41
43	84	26.73	93	84	26.73

44	87	27.69	94	78	24.82
45	95	30.23	95	90	28.64
46	86	27.37	96	95	30.23
47	89	28.32	97	78	24.82
48	93	29.60	98	93	29.60
49	79	25.14	99	84	26.73
50	79	25.14	100	88	28.01

Promedio 28.10

Desv Est 1.84

Max 32.14

Min 23.87

Cuadro D.1: Diámetros

No. Palmera	Inclinación (En Grados)	No. Palmera	Inclinación (En Grados)
1	6	51	4
2	13	52	2
3	15	53	6
4	6	54	4
5	7	55	12
6	4	56	6
7	5	57	7
8	5	58	10
9	2	59	7
10	10	60	2
11	12	61	4
12	3	62	4
13	6	63	6
14	7	64	5
15	2	65	8
16	11	66	6

17	9	67	4
18	6	68	7
19	4	69	7
20	13	70	4
21	2	71	9
22	2	72	10
23	7	73	11
24	4	74	6
25	5	75	5
26	2	76	6
27	4	77	10
28	13	78	5
29	5	79	3
30	24	80	7
31	7	81	2
32	5	82	5
33	8	83	6
34	4	84	4
35	7	85	3
36	4	86	7
37	7	87	3
38	4	88	5
39	3	89	4
40	4	90	7
41	6	91	6
42	5	92	8
43	9	93	4
44	5	94	5
45	7	95	7

46	3	96	7
47	7	97	6
48	4	98	10
49	5	99	5
50	3	100	4

Promedio 6.16

Desv. Est. 3.31

Maximo 24

Mínimo 2

Cuadro D.2: Inclinación

No. Palmera	Perímetro (cm)	Diámetro (cm)	Inclinación (°)	Altura (m)
1	80	25.46	6	12
2	88	28.01	13	8
3	81	25.78	15	11
4	92	29.28	6	7
5	90	28.64	7	10
6	83	26.41	4	7
7	92	29.28	5	9
8	95	30.23	5	11
9	89	28.32	2	12
10	88	28.01	10	9
11	86	27.37	12	10
12	93	29.60	3	10
13	92	29.28	6	11
14	98	31.19	7	7
15	99	31.51	2	13
16	98	31.19	11	6
17	75	23.87	9	13
18	95	30.23	6	8

19	80	25.46	4	11
20	90	28.64	13	9
21	93	29.60	2	10
22	87	27.69	2	10
23	85	27.05	7	13
24	82	26.10	4	12
25	80	25.46	5	8
26	91	28.96	2	10
27	83	26.41	4	12
28	93	29.60	13	9
29	91	28.96	5	6
30	81	25.78	24	10
31	84	26.73	7	11
32	90	28.64	5	13
33	80	25.46	8	6
34	87	27.69	4	12
35	92	29.28	7	8
36	80	25.46	4	10
37	78	24.82	7	9
38	84	26.73	4	7
39	87	27.69	3	9
40	80	25.46	4	12
41	78	24.82	6	11
42	80	25.46	5	6
43	86	27.37	9	9
44	92	29.28	5	11
45	91	28.96	7	8
46	78	24.82	3	10
47	94	29.92	7	7

48	87	27.69	4	11
49	94	29.92	5	9
50	90	28.64	3	12
51	91	28.96	4	9
52	91	28.96	2	8
53	86	27.37	6	12
54	79	25.14	4	9
55	95	30.23	12	6
56	84	26.73	6	11
57	81	25.78	7	8
58	79	25.14	10	12
59	81	25.78	7	6
60	82	26.10	2	9
61	92	29.28	4	12
62	93	29.60	4	6
63	96	30.55	6	12
64	85	27.05	5	10
65	82	26.10	8	9
66	89	28.32	6	11
67	78	24.82	4	7
68	83	26.41	7	6
69	90	28.64	7	9
70	96	30.55	4	6
71	81	25.78	9	11
72	96	30.55	10	12
73	92	29.28	11	13
74	96	30.55	6	9
75	94	29.92	5	12
76	89	28.32	6	10

77	86	27.37	10	6
78	87	27.69	5	11
79	92	29.28	3	9
80	91	28.96	7	12
81	83	26.41	2	9
82	83	26.41	5	13
83	94	29.92	6	9
84	84	26.73	4	10
85	82	26.10	3	8
86	92	29.28	7	13
87	81	25.78	3	9
88	82	26.10	5	11
89	86	27.37	4	6
90	79	25.14	7	8
91	94	29.92	6	12
92	80	25.46	8	13
93	94	29.92	4	10
94	92	29.28	5	13
95	95	30.23	7	9
96	91	28.96	7	6
97	80	25.46	6	8
98	91	28.96	10	13
99	92	29.28	5	8
100	92	29.28	4	12
	Promedio	27.84	6.16	9.68
	Desviación Estándar	1.87	3.31	2.16
	Máximo	31.51	24	13
	Mínimo	23.87	2	6

Cuadro D.3: Medidas palmera

APÉNDICE E

Tabla de distancias entre los cocos y la cámara

Cantidad de cocos	Distancia cámara - coco (cm)	Distancia Coco - Tallo Palmera (cm)	Cantidad de cocos detectados	Eficiencia (%)
1	30	42	1	100.0
1	30	70	1	100.0
1	30	35	1	100.0
1	40	36	1	100.0
1	40	61	1	100.0
2	30	35	1	50.0
2	40	63	1	50.0
2	30	65	1	50.0
2	30	32	1	50.0
2	30	37	1	50.0
2	50	47	1	50.0
2	40	46	2	100.0
2	30	49	2	100.0
2	40	30	2	100.0

2	50	70	2	100.0
2	30	33	2	100.0
2	30	36	2	100.0
2	50	69	2	100.0
2	40	70	2	100.0
3	50	51	1	33.3
3	40	42	1	33.3
3	50	63	2	66.7
3	50	38	2	66.7
3	40	52	2	66.7
3	30	58	2	66.7
3	40	36	2	66.7
3	30	30	3	100.0
4	50	40	1	25.0
4	40	47	2	50.0
4	40	43	2	50.0
4	60	69	2	50.0
4	40	35	2	50.0
4	60	50	3	75.0
4	40	47	3	75.0
4	40	43	3	75.0
4	50	51	3	75.0
4	40	45	3	75.0
4	50	33	3	75.0
4	40	48	3	75.0
4	50	69	3	75.0
4	60	53	4	100.0
5	40	66	2	40.0
5	60	52	2	40.0

5	50	65	3	60.0
5	40	55	3	60.0
5	50	61	3	60.0
6	70	44	1	16.7
8	70	60	1	12.5
8	60	34	2	25.0
9	50	48	1	11.1
13	70	39	1	7.7

Promedio

3.57	43.92	48.88	1.92	65.8
------	-------	-------	------	------

Desviación Estándar

2.22	11.33	12.50	0.82	28.0
------	-------	-------	------	------

Cuadro E.1: Distancia

APÉNDICE F

Tablas de eficiencia del algoritmo usado para la detección de cocos

Valor Umbral 20			Valor Umbral 30		
Cantidad de cocos	Cantidad de cocos detec- tados	Eficiencia (%)	Cantidad de cocos	Cantidad de cocos detec- tados	Eficiencia (%)
4	2	50.0	4	3	75.0
2	1	50.0	2	1	50.0
3	2	66.7	3	2	66.7
1	1	100.0	1	1	100.0
3	2	66.7	3	1	33.3
4	3	75.0	4	2	50.0
4	4	100.0	4	4	100.0
5	3	60.0	5	2	40.0
2	2	100.0	2	2	100.0
3	2	66.7	3	2	66.7
3	2	66.7	3	2	66.7
2	2	100.0	2	2	100.0

4	3	75.0	4	3	75.0
5	3	60.0	5	3	60.0
3	1	33.3	3	1	33.3
3	3	100.0	3	3	100.0
8	2	25.0	8	2	25.0
4	3	75.0	4	3	75.0
9	1	11.1	9	1	11.1
3	2	66.7	3	2	66.7
2	2	100.0	2	2	100.0
2	1	50.0	2	1	50.0
4	3	75.0	4	3	75.0
5	2	40.0	5	2	40.0
4	2	50.0	4	2	50.0
4	1	25.0	4	1	25.0
2	2	100.0	2	2	100.0
4	3	75.0	4	3	75.0
2	1	50.0	2	1	50.0
3	1	33.3	3	1	33.3
4	3	75.0	4	3	75.0
2	2	100.0	2	2	100.0
2	1	50.0	2	1	50.0
4	3	75.0	4	3	75.0
4	3	75.0	4	3	75.0
2	1	50.0	2	1	50.0
4	2	50.0	4	2	50.0
5	3	60.0	5	3	60.0
4	2	50.0	4	2	50.0
2	2	100.0	2	2	100.0
1	1	100.0	1	1	100.0

1	1	100.0	1	1	100.0
8	1	12.5	8	1	12.5
1	1	100.0	1	1	100.0
5	2	40.0	5	2	40.0
2	1	50.0	2	1	50.0
1	1	100.0	1	1	100.0
2	2	100.0	2	2	100.0
6	1	16.7	6	1	16.7
2	2	100.0	2	2	100.0
13	1	7.7	13	1	7.7
Promedio			Promedio		
3.57	1.92	65.84	3.57	1.88	64.80
Desviación Estándar			Desviación estándar		
2.22	0.82	28.00	2.22	0.82	28.58

Cuadro F.1: Eficiencia

Valor Umbral 40			Valor Umbral 50		
Cantidad de cocos	Cantidad de cocos detectados	Eficiencia (%)	Cantidad de cocos	Cantidad de cocos detectados	Eficiencia (%)
4	2	50.0	4	0	0.0
2	1	50.0	2	1	50.0
3	2	66.7	3	0	0.0
1	1	100.0	1	0	0.0
3	1	33.3	3	0	0.0
4	2	50.0	4	0	0.0
4	1	25.0	4	1	25.0
5	2	40.0	5	1	20.0
2	1	50.0	2	1	50.0

3	2	66.7	3	1	33.3
3	1	33.3	3	0	0.0
2	1	50.0	2	0	0.0
4	2	50.0	4	0	0.0
5	3	60.0	5	1	20.0
3	1	33.3	3	0	0.0
3	2	66.7	3	0	0.0
8	1	12.5	8	1	12.5
4	3	75.0	4	0	0.0
9	1	11.1	9	1	11.1
3	2	66.7	3	1	33.3
2	2	100.0	2	0	0.0
2	1	50.0	2	1	50.0
4	2	50.0	4	0	0.0
5	1	20.0	5	1	20.0
4	2	50.0	4	0	0.0
4	1	25.0	4	1	25.0
2	2	100.0	2	0	0.0
4	2	50.0	4	1	25.0
2	1	50.0	2	0	0.0
3	1	33.3	3	0	0.0
4	2	50.0	4	1	25.0
2	2	100.0	2	0	0.0
2	1	50.0	2	0	0.0
4	2	50.0	4	0	0.0
4	3	75.0	4	0	0.0
2	1	50.0	2	1	50.0
4	2	50.0	4	0	0.0
5	3	60.0	5	0	0.0

4	2	50.0	4	1	25.0
2	2	100.0	2	0	0.0
1	1	100.0	1	0	0.0
1	1	100.0	1	0	0.0
8	1	12.5	8	0	0.0
1	1	100.0	1	0	0.0
5	1	20.0	5	0	0.0
2	1	50.0	2	0	0.0
1	1	100.0	1	0	0.0
2	2	100.0	2	1	50.0
6	1	16.7	6	0	0.0
2	2	100.0	2	0	0.0
13	1	7.7	13	0	0.0
Promedio			Promedio		
3.6	1.6	56.1	3.6	0.3	10.3
Desviación Estándar			Desviación estándar		
2.2	0.6	28.2	2.2	0.5	16.7

Cuadro F.2: Eficiencia 2

APÉNDICE G

Tabla de distancias entre los cocos y la posición final del robot

Cantidad de cocos detectados	Eficiencia	Distancia Robot - Cocos
1	100.0	73
1	100.0	74
1	100.0	60
1	100.0	78
1	100.0	51
1	50.0	57
1	50.0	75
1	50.0	72
1	50.0	48
1	50.0	54
1	50.0	47
2	100.0	66
2	100.0	74
2	100.0	61

2	100.0	64
2	100.0	69
2	100.0	66
2	100.0	57
2	100.0	66
1	33.3	64
1	33.3	60
2	66.7	47
2	66.7	60
2	66.7	50
2	66.7	53
2	66.7	67
3	100.0	66
1	25.0	56
2	50.0	73
2	50.0	79
2	50.0	80
2	50.0	57
3	75.0	70
3	75.0	58
3	75.0	48
3	75.0	50
3	75.0	64
3	75.0	60
3	75.0	61
3	75.0	70
4	100.0	50
2	40.0	50
2	40.0	52

3	60.0	63
3	60.0	68
3	60.0	49
1	16.7	62
1	12.5	65
2	25.0	50
1	11.1	56
1	7.7	78

Promedio

1.92	65.8	61.7
------	------	------

Desviación Estándar

0.82	28.0	9.5
------	------	-----

Cuadro G.1: Distancia Robot - Coco

Bibliografía

- [1] Secretaría de Desarrollo Rural (SEDER). *Paquete tecnológico para el cultivo del cocotero en el Estado de Colima*, Número 002, Febrero 2005.
- [2] Harries, H. C. 1971. *Coconut varieties in America*. Oleagineux. 26: 235-242 pp.
- [3] Del-Cañizo, P. J. A. 1991. *Palmeras*. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España.
- [4] Howars, F. W.; Thomas, D. I. 1980. *Transmission of palm lethal decline to Veitchia merrillii by a plant-hopper Myndus crudus*. J. Econ. Entomol. 73:715-717.
- [5] Barreiro, P. & Diezma, B. *La robotización de las labores agrícolas como apuesta de futuro*. Dpto. Ingeniería Rural. ETSI Agrónomos, http://oa.upm.es/5279/2/INVE_MEM.2009_69927.pdf; fecha de consulta 22/Nov/2011
- [6] *Libro Blanco de la Robótica: De la investigación al desarrollo tecnológico y aplicaciones futuras*. Edita: CEA - GTRob con subvención del MEC. 1ª edición, 2007, p. 37- 41. ISBN: 978-84-690-3884-0.
- [7] *Vision Robotics Corporation, Sistemas robotizados para cosechar naranjas, manzanas*. <http://visionrobotics.com>; fecha de consulta 22/Noviembre/2011
- [8] University of Warwick, <http://www2.warwick.ac.uk/fac/sci/wmg/research/robotics/mushrooms/>; fecha de consulta 22/Noviembre/2011

- [9] Ingeniería de Sistemas de Bioproducción, Facultad de Agricultura de la Universidad de Okasuma, Japón. <http://mama.agr.okayama-u.ac.jp/english/robot01.html>; fecha de consulta 22/nov/2011
- [10] Agrolmeca, *Recolector de frutos secos*, Vt-2, <http://www.agromelca.com>; fecha de consulta 22/nov/2011
- [11] R. C. Gonzalez and R. E. Woods. *Digital Image Processing*. Addison Wesley, 1992.
- [12] Blasco, J. Cubero. s, et al.; *Avances en visión artificial automática de productos hortofrutícolas*, Horticultura Global, 288 - Febrero 2010.
- [13] Thierry Pun, Marc Lefebvre, Sylvia Gil, Denis Brunet, Jean-Daniel Dessimoz, Paul Gugerli, *The Potato Operation: Computer vision for agricultural robotics*, Proc. SPIE Conf. on Advances in Intelligent Robotic Systems, Boston, USA, Nov. 10-15, 1991.
- [14] Rizon, M. & Yazid.H , et al. *Object Detection using Geometric Invariant Moment*, American Journal of Applied Sciences 2 (6): 1876-1878, 2006.
- [15] Rizon, M. & Yazid.H , et al. *Detecting circular object using hough transform and chord intersection - performance evaluation*, Geometric Modeling and Imaging, 2007. GMAI '07. 115 - 120 .
- [16] Heung Soo Kim, Jong Hwan Kim, *A two-step circle detection algorithm from the intersecting chord*, Pattern Recognition Letter, 2001, Vol. 22, pp. 787-798.
- [17] Wireless Sensor Network, <http://www.mfbarcell.es/conferencias/wsn.pdf>; fecha de consulta 24/nov/2011
- [18] Prat, Mario. 2009. Curso de radiocomunicaciones y uso táctico para la práctica del airsoft y del paintball, <http://www.ea1uro.com/pdf/Manual-de-comunicaciones.pdf>; Fecha de consulta 10/Diciembre/2011.
- [19] Mainé, J. 2005. Estado actual de las comunicaciones inalámbricas, SILICA An Avnet Division (<http://www.silica.com/>).
- [20] Microsoft/TechNet, <http://www.microsoft.com/spain/technet/recursos/articulos/3010023.aspx>; Fecha de consulta 09/Diciembre/2011.

- [21] García F.R. & Sánchez V.Q., IEEE 802.11(Wi-Fi) El estándar de facto para WLAN, BIT 137 Enero-Marzo 2003
- [22] Galtel, <http://www.galtel.es/servicios/redes-de-sensores-inalambricos-para-agricultura>, 2012; Fecha de consulta 10/Marzo/2012.
- [23] Kumar, T. & Verma. K. *A Theory Based on Conversion of RGB image to Grayimage*. International Journal of Computer Applications (0975 - 8887) Volume 7- No.2, September 2010
- [24] Canny, J. *A Computational Approach to Edge Detection*, IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, vol. pami-8, no. 6, november 1986
- [25] Xie. Y, Ji. Q. A new efficient ellipse detection method, 1051-4651/02 (c) 2002 IEEE
- [26] Sadeghi, M. & Moradi, A. *Design and Fabrication of a Column-Climber Robot (Koala Robot)*, World Academy of Science, Engineering and Technology 41 2008
- [27] Kawasaki, H. Murakami, S. et al. *Novel Climbing Method of Pruning Robot*. SICE Annual Conference 2008 August 20-22, 2008, The University Electro-Communications, Japan
- [28] Lam, L. Xu, Y. *Tree Climbing Robot: Design, Kinematics and Motion Planning*. Springer. 2012.