



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua

**SISTEMA DE CORTE DE MAZORCAS CON CONTROL AUTOMÁTICO
DE POSICIÓN APLICANDO VISIÓN ARTIFICIAL⁰**

TESIS

que como requisito parcial para obtener el grado de:

Maestro en Ingeniería

presenta:

Ing. Bernabe López Erubiel

Febrero de 2017

Chapingo, Estado de México



DIRECCION GENERAL ACADEMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
ORIGINA DE EXAMENES PROFESIONALES

⁰Tesis apoyada por CONACyT y la DGIP

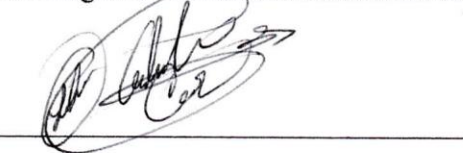


Sistema de corte de mazorcas con control automático de posición aplicando visión artificial

Tesis realizada por Erubiel Bernabe López 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 opción en mecanización*.

Director: 

Dr. Eugenio Romantchik Kriuchkova

Asesor: 

Dr. José Guillermo Cebada Reyes

Asesor: 

Dr. Noé Velázquez López

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Chapingo (UACH), a la Dirección General de Investigación y al Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua (IAUIA), así como al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo económico y la formación que me brindaron para realizar mis estudios de maestría.

Al Dr. Eugenio Romantchik, por su incansable apoyo y seguimiento en el desarrollo y culminación de este proyecto.

Al Dr. José Guillermo Cebada Reyes por el valioso conocimiento compartido y por su gran amistad.

Al Dr. Noé Velázquez López por su apreciada ayuda en la elaboración de este trabajo de investigación.

M.C. Pablo Sánchez por abrirme las puertas de sus laboratorios en la BUAP para el desarrollo de esta tesis.

Al Dr. Pedro Cruz Mesa por brindarme la confianza de continuar el trabajo de investigación de su máquina deshojadora de mazorcas para tamal.

A los hermanos de mi Alma Mater, Ing. Andrés García, Ing. Héctor Manuel Díaz y Griselda Galicia por su valioso apoyo y gran motivación para saltar cada obstáculo impuesto.

DATOS BIOGRÁFICOS

Erubiel Bernabe López es originario de Pueblillo, Papantla, Veracruz, nació el 30 de agosto de 1992. Cursó sus estudios de nivel medio superior en la Preparatoria Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, México. Generación 2007-2010. Realizó estudios de licenciatura en el programa de Ingeniería Mecánica Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, México. Generación 2010-2014. Participo en el proyecto “Instalación, difusión y adaptación de biodigestores tubulares en la región Totonaca de la Sierra Norte de Puebla y el Noroeste de Veracruz, Chinameca, Mor. y Sierra Guadalupe, Méx.” Asesorando a beneficiarios y dando talleres en cada región. Realizo su estancia pre profesional en Maquinaria Diésel S.A. (MADISA) suc. 94 Tuxtla Gutiérrez Chiapas, trabajando en el área de Servicio llevando a cabo tareas de administración y realizando equipo con los técnicos para la reparación y mantenimiento de maquinaria pesada. Formo parte del programa de Maestría en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua de la Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, México. Generación 2014-2016. Ha participado en tres congresos, dos nacionales y uno internacional, un coloquio y un encuentro regional como ponente de diversos proyectos. Coautor del Manual “Biodigestores rústicos, una alternativa sustentable para la ganadería de traspatio” y de la patente MX345727B “Equipo y método para cortar el pedúnculo de mazorcas y deshojarlas”

SISTEMA DE CORTE DE MAZORCAS CON CONTROL AUTOMÁTICO DE POSICIÓN APLICANDO VISIÓN ARTIFICIAL

AUTOMATED CUTTING SYSTEM FOR A MAIZE-HUSKING MACHINE USING ARTIFICIAL VISION

Erubiel **Bernabe López**¹ y Eugenio **Romantchik Kriuchkova**²

RESUMEN.

El diseño de máquinas deshojadoras de mazorcas de maíz (*Zea mays* L.) necesita conocer las propiedades geométricas del fruto, ya que forman los datos de entrada para evaluar los modelos matemáticos empleados en el análisis del sistema fruto-máquina. El objetivo de la investigación fue desarrollar y evaluar el sistema de corte de una deshojadora de mazorcas con control automático de posicionamiento con visión artificial. Para ello se analizaron dos variedades de mazorcas y se describieron sus variables geométricas encontrando correlación entre estas. Con esta información se diseñó el mecanismo de posicionamiento y un algoritmo de procesamiento de mazorcas mediante el software OpenCV. Se desarrolló un sistema de control para ajustar la posición del disco de corte aplicando MATLAB y tarjetas Arduino. El sistema aplica un controlador PID con tiempo de estabilización de 2.64s y un error en el corte de ± 5.7 mm.

Palabras clave: Maíz (*Zea mays* L.), sistema de control, sistema de visión artificial, controlador PD.

ABSTRACT

Designing a maize (*Zea mays* L.) husking machine requires knowing the geometric properties of the fruit, as they form the input data for evaluating the mathematical models used in the analysis of the fruit-machine system. The goal of the research was to develop and evaluate the control system for a maize-husking machine's cutting blade positioning system through an artificial vision system. For this, two varieties of maize were analyzed and their geometric variables were described finding correlation between them. With this information, the positioning mechanism and a maize processing algorithm was designed with OpenCV software. A control system was developed to adjust the position of the cutting blade by applying MATLAB and Arduino cards. The system applies a PID controller with a stabilization time of 0.04 s and a cutting error of ± 5.7 mm.

Keywords: Maize (*Zea mays* L.), control system, artificial vision system, PD controller.

¹Tesista

²Director

ÍNDICE GENERAL

SIMBOLOGÍA	xii
1. Introducción	2
1.1 Antecedentes	8
1.2 Hipótesis	12
1.3 Objetivos	13
2. Diseño del sistema de corte de mazorcas con control automático de posición del disco de corte con visión artificial	14
2.1 Diseño conceptual del mecanismo de posición del disco de corte.....	15
2.1.1 Identificación de la necesidad.	16
2.1.2 Definición de funciones.	16
2.1.3 Búsqueda de principios de solución para satisfacer las sub-funciones	16
2.1.4 Evaluación y selección de la mejor alternativa	17
2.2 Diseño detallado del sistema de ajuste de disco de corte.....	18
2.3 Diseño detallado del sistema visión artificial.....	24
2.4 Diseño detallado del sistema de eléctrico.	27
2.3 Construcción del sistema	30
3. Análisis estadístico.....	37
3.1 Análisis estadístico de una muestra de la variedad Murano.....	37
3.2 Análisis estadístico de una muestra de la variedad Argentino Blanco.....	39
3.3 Análisis estadístico de una muestra de la variedad Arroz.....	39
3.4 Resultados de las pruebas estadísticas	41
4. Sistema de control de posicionamiento del disco de corte.....	51
4.1 Determinación del modelo dinámico del sistema mediante el método de Euler-Lagrange	51
4.2 Control de movimiento	53
4.3 Determinación de ganancias	55
4.4 Caracterización del actuador lineal	58

4.5	Características de la GUI del sistema automatizado	60
4.6	Resultados de las pruebas de control	63
5.	Control visual.....	65
5.1	Recursos.....	66
5.2	Procesamiento de imágenes.....	67
5.3	Resultados de las pruebas de procesamiento de imágenes.....	72
6.	Resultados generales.....	75
7.	Conclusiones y recomendaciones	81
	Bibliografía	83
	Apéndice A. Características de la interfaz grafica.....	86
	Apéndice B. Valores estadísticos.....	89
	Apéndice C. Costos totales	93
	Apéndice D. Plano	94
	Apéndice E. Códigos	100

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Comercialización de hoja de maíz por la empresa La Esperanza.	3
Figura 2. Extracción de hojas de maíz por pequeños productores.	3
Figura 3. Venta de hojas de maíz por pacas y en paquetes.	4
Figura 4. Almacenamiento de hojas de mazorca en a) bultos y b) transporte en pacas.	5
Figura 5. Vista interior de la parte basal de una mazorca.	6
Figura 6. Sistema dinámico en malla cerrada. Fuente: (Hernández, 2010)	7
Figura 7. Banco para deshojar mazorcas.	9
Figura 8. Sistema de corte parcial de mazorcas. Fuente: (Rossi & McGuire, 1992).	9
Figura 9. Cortadora de hoja de maíz.	10
Figura 10. Deshojadora de mazorca para tamal.	10
Figura 11. Sistema de a) alimentación, b) corte y c) deshojados de mazorcas para tamal	15
Figura 12. Etapas del diseño conceptual	15
Figura 13. Diagrama de bloques de la conexión del sistema de control.	18
Figura 14. Sistema de corte planteado.	19
Figura 15. Fuerzas distribuidas sobre el eje del disco de corte de manera estática.....	19
Figura 16. Distribución de las fuerzas ejercidas sobre el mecanismo.....	21
Figura 17. Chumaceras lineales SBR20UU.	21
Figura 18. Actuador lineal LD3.	22
Figura 19. Acoplamiento del actuador lineal con la bancada y la bancada de la máquina.	22
Figura 20. Diseño conceptual del soporte de la bancada del disco de corte.	23
Figura 21. Soporte de la bancada del disco de corte y ubicación en la máquina deshojadora.	23
Figura 22. a) Simulación con sólo una sujeción en las placas delanteras, b) en la parte media y c) en la parte final.	24
Figura 23. Vista lateral del sistema de corte automático.	25
Figura 24. Parámetros de la mazorca determinados mediante visión artificial.....	26
Figura 25. Vista superior del sistema de corte automático.	27
Figura 26. Base de la cámara y ubicación en la máquina deshojadora de mazorcas.	27
Figura 27. Arduino Mega.....	28
Figura 28. Acoplamiento de la tarjeta VNH5019 con el Arduino UNO.....	28
Figura 29. Lazo cerrado de control para el actuador del sistema.....	29
Figura 30. Diagrama de bloques de los componentes del sistema de control automático para el corte de mazorcas.	29
Figura 31. Construcción del mecanismo de ajuste para el disco de corte.....	30
Figura 32. Tarjetas dentro de su compartimiento.....	30
Figura 33. Mecanismo de ajuste con el motor de disco de corte montado.	30

Figura 34. Soporte del sistema de ajuste automático de corte y bases para apoyarla	31
Figura 35. Soporte empotrado a la máquina cortadora de mazorcas.	31
Figura 36. Soporte con los carriles y chumaceras lineales.....	31
Figura 37. Posición del actuador entre el soporte y la base de nylamind.	32
Figura 38. Unión en el embolo del actuador y base.....	32
Figura 39. Soporte empotrado a la máquina y ubicación del motor del disco de corte.	32
Figura 40. Barras a apoyo colocadas y acopladas al chasis con soportes cuadrados.	33
Figura 41. Vista lateral del sistema de corte y visión artificial.	33
Figura 42. Eje del disco de corte, chumaceras y unión de acero.	33
Figura 43. Empotramiento del eje del disco con el motor.	34
Figura 44. Zona cortada en la máquina cortadora de mazorcas para permitir el movimiento del sistema de control.	34
Figura 45. Posición del disco de corte respecto a la banda transportadora.....	34
Figura 46. Sistema de control ensamblado completamente.	35
Figura 47. Fallos en el dispositivo, a) unión de nylamind barrida, b) eje pandeado, c) mazorca cortada incorrectamente y d) mazorca completamente dañada por el corte irregular.	35
Figura 48. Vista lateral del sistema de corte con control automático de posición con visión artificial.	36
Figura 49. Mazorcas de la variedad Murano.....	37
Figura 50. Parámetros geométricos medidos.	38
Figura 51. Mazorcas de la variedad Argentino Blanco.....	39
Figura 52. Muestra de cien mazorcas variedad Arroz.....	40
Figura 53. Corte longitudinal de una mazorca.....	40
Figura 54. Parámetros geométricos medidos en mazorcas de la variedad Arroz.....	41
Figura 55. Datos experimentales y línea de regresión.	42
Figura 56. Datos experimentales y superficie de ajuste de la relación a) lbco-lbdm-lt, y b) lbco-lbdm-dm.	44
Figura 57. Procesamiento de Mazorcas en OpenCV para determinar el área en pixeles negros.	46
Figura 58. Determinación de la distancia de la base al centroide de una mazorca de maíz en OpenCV....	46
Figura 59. Posición del actuador respecto al eje x.	51
Figura 60. Control proporcional en Simulink.	56
Figura 61. Control PD en Simulink.	56
Figura 62. Respuesta del sistema a una entrada escalón.	57
Figura 63. Control PID en Simulink.....	58
Figura 64. Calibración del actuador lineal.	60
Figura 65. Panel de control de la GUI para pruebas de los controladores.	61
Figura 66. Valores generados por el controlador a) P, b) PD, c) PD con acotaciones, d) PID y e) PID con acotaciones.....	61
Figura 67. Diagrama de flujo de la GUI de prueba de controladores	62
Figura 68. Punto de referencia.	63
Figura 69. Gráficos de a) distancia medida y b) error de posición.	63
Figura 70. Comportamiento de distintos tipos de controladores en el sistema de ajuste del disco de corte.	64

Figura 71. Fuerza estimada por los controladores.	64
Figura 72. Cámara Web.	65
Figura 73. Escala HSV de colores. Fuente: (Keyence México S.A. DE C.V., 2013).	66
Figura 74. Ubicación del centroide de un objeto. Fuente: (Russel, 2004).	68
Figura 75. Diagrama de flujo del programa para determinar el contorno de la mazorca.	69
Figura 76. Diagrama de flujo del programa para determinar el contorno de la mazorca.	69
Figura 77. Método de medición de la mazorca por triángulos semejantes.	71
Figura 78. Diagrama de flujo para medir mazorcas.	71
Figura 79. Extracción del color propio de mazorcas en Visual C y OpenCV con exceso de ruido.	72
Figura 80. Localización de mazorcas y encierro en rectángulo, con presencia de ruido excesivo.	73
Figura 81. Extracción del color de la mazorca y su localización, encierre en rectángulo y determinación de parámetros sin exceso de ruido.	73
Figura 82. GUI para la localización de mazorcas y parámetros en MATLAB.	74
Figura 83. Estructura de control visual.	75
Figura 84. Rango de corte óptimo en una mazorca.	76
Figura 85. Mazorcas colocadas en la tolva de la máquina para su posterior corte.	77
Figura 86. Pruebas de extracción de color para mazorcas por el sistema de visión.	77
Figura 87. Diferentes valores de lbco medidas	78
Figura 88. Mazorcas cortadas con el sistema de corte con control automático con visión artificial.	78
Figura 89. Calidad de corte por el sistema de corte con control automático con visión artificial.	80

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Producción de maíz sur de Veracruz ciclo primavera verano 2003-2004.....	4
Cuadro 2. Características de la hoja de maíz según Agroindustrias del Río.....	5
Cuadro 3. Clasificación de los robots según AFRI.....	8
Cuadro 4. Principios de solución para satisfacer las sub-funciones principales.	16
Cuadro 5. Escala para la asignación de valores.	17
Cuadro 6. Principios de solución para satisfacer las sub-funciones principales.	17
Cuadro 7. Coeficiente de correlación de Pearson (r) para dos parámetros.	41
Cuadro 8. Resumen del análisis de varianza de la combinación lbco-lbdm.	42
Cuadro 9. Coeficiente de correlación múltiple (R) y Coeficiente de determinación (R2) entre cinco diferentes combinaciones con tres parámetros.....	43
Cuadro 10. Resumen del Análisis de varianza de la combinación lbco-lbdm-lt.....	43
Cuadro 11. Resumen del Análisis de varianza de la combinación lbco-dm-lbdm.....	43
Cuadro 12. Coeficiente de correlación múltiple (R) y Coeficiente de determinación (R2) entre cinco combinaciones con cinco parámetros.	44
Cuadro 13. Coeficiente de correlación múltiple (R) y Coeficiente de determinación (R2) entre cinco parámetros.....	45
Cuadro 14. Coeficiente de correlación de Pearson (r) para dos parámetros.	45
Cuadro 15. Coeficiente de correlación múltiple (R) y Coeficiente de determinación (R2) entre tres parámetros.....	45
Cuadro 16. Coeficiente de correlación múltiple (R) y Coeficiente de determinación (R2) entre cuatro parámetros.....	45
Cuadro 17. Coeficiente de correlación de Pearson (r) para dos parámetros.	46
Cuadro 18. Coeficiente de correlación múltiple (R) y Coeficiente de determinación (R2) entre diez diferentes combinaciones con tres parámetros.....	47
Cuadro 19. Coeficiente de correlación múltiple (R) y Coeficiente de determinación (R2) entre diez diferentes combinaciones con cuatro parámetros.	47
Cuadro 20. Resumen del Análisis de varianza de la combinación lbco-dm-lbdm-lbc.....	48
Cuadro 21. Coeficiente de correlación múltiple (R) y Coeficiente de determinación (R2) entre cuatro diferentes combinaciones con cinco parámetros.....	48
Cuadro 22. Resumen del Análisis de varianza de la combinación lbco-dm-lbdm-lt-lbc.	48
Cuadro 23. Resumen del Análisis de varianza de la combinación lbco-dm-lbdm-A-lbc.	48
Cuadro 24. Coeficiente de correlación múltiple (R) y coeficiente de determinación (R2) con seis parámetros.....	49
Cuadro 25. Resumen del Análisis de varianza de la combinación lbco-dm-lbdm-lt-A-lbc.....	49
Cuadro 26.. Ganancias determinadas por el método de Ziegler y Nichols.	58

Cuadro 27. Variación de voltaje de un encoder de un LD3 respecto a su posición.	59
Cuadro 28. Velocidades del actuador LD3 a distintos voltajes.....	60
Cuadro 29. Tiempos de estabilización de controladores.....	64
Cuadro 30. Resultados obtenidos por el sistema de corte de mazorcas con control automático de posición con visión artificial con una muestra de mazorcas de la variedad Arroz.	79
Cuadro 31. Estadística descriptiva de una muestra de 46 mazorcas de la variedad Arroz.	80

SIMBOLOGÍA

Símbolo	Unidades	Parámetro
$lbco$	cm, mm	Longitud de la base al diámetro de corte óptimo
do	cm, mm	Diámetro de corte óptimo
dm	cm, mm	Diámetro mayor
$lbdm$	cm, mm	Longitud de la base al diámetro mayor
lt	cm	Longitud total
A	píxeles	Área de la mazorca
lbc	píxeles	Distancia de la base al centroide
q	cm	Posición expresada en coordenadas articulares
$\dot{q}$	cm/s	Velocidad expresada en coordenadas articulares
$\ddot{q}$	cm/s ²	Aceleración expresada en coordenadas articulares
$\tilde{q}$	cm	Error de posición expresado en coordenadas articulares
qd	cm	Posición deseada expresada en coordenadas articulares
x	cm	Posición expresada en coordenadas cartesianas
$\dot{x}$	cm/s	Velocidad expresada en coordenadas cartesianas
$\ddot{x}$	cm/s ²	Aceleración expresada en coordenadas cartesianas
$\tilde{x}$	cm	Error de posición expresado en coordenadas cartesianas
xd	cm	Posición deseada expresada en coordenadas cartesianas
$\kappa(q, \dot{q})$	N m	Energía cinética
$\mathcal{U}(q)$	N m	Energía potencial
$L(q, \dot{q})$	N m	Lagrangiano
g	m/s ²	Gravedad
$M(q)$	N m	Matriz de masas e inercias expresada en coordenadas articulares
$g(q)$	m/s ²	Par gravitacional expresado en coordenadas articulares
m	kg	Masa
v	cm/s	Velocidad
Kp	N/cm	Ganancia proporcional o de posición
Kv	N s/cm	Ganancia derivativa o de velocidad
Ki	N/cm s	Ganancia integral
$X1$	cm	Error de posición expresado en variables de estado
$\dot{X}1$	cm/s	Velocidad articular directa expresada en variables de estado
$X2$	cm/s	Velocidad articular expresada en variables de estado
$\ddot{X}2$	cm/s ²	Aceleración articular expresada en variables de estado

1. Introducción

El maíz (*Zea mays*) es la base de la alimentación de los mexicanos, por representar la mitad del volumen total de alimentos que se consumen cada año y proporcionar a la población cerca de la mitad de las calorías requeridas. Sin embargo, durante las últimas décadas se observa un incremento mínimo en su producción. A pesar de que existe una gran demanda de mercado de maíz de grano blanco y harinoso para hacer tortillas, los productores tienen dificultad para participar en los mercados de maíz a grano porque las variedades criollas que siembran no poseen algunas de las características de calidad que las agroindustrias procesadoras requieren (Hellin, et al., 2013). En 2006, la producción ascendió a 21.3 millones de toneladas, en tanto que la demanda fue de 26.2 millones de toneladas (Castañeda, 2007). De esta manera, el maíz no satisface las necesidades de la sociedad, por lo cual se recurre anualmente a importaciones, cerca de cinco millones de toneladas provenientes de Estados Unidos.

El maíz para especialidades (pozolero, palomero, para totomoxtle, etc.) suele recibir un sobreprecio en comparación con el vendido en los mercados a granel, además algunos mercados especializados son más accesibles para los agricultores que producen volúmenes pequeños del grano (Hellin, et al., 2013). Esto da pie a que actualmente, además de utilizar la planta de maíz como forraje para el ganado y como materia orgánica para el suelo (Dowswell C., et al., 1996), se aprovechen algunas de las partes de la planta como la hoja o totomoxtle (Figura 1), para diferentes usos, entre los cuales se encuentra el uso de estas para envoltura de tamal (Castañeda, 2007). Aquellos agricultores que producen para la venta comercializan en mercados regionales o a intermediarios que los transportan a mercados más distantes, en Puebla o en la ciudad de México. Las hojas de maíz son utilizadas enteras en su gran mayoría para la producción de tamales, en cambio las que se exportan a Estados Unidos son cortadas en su base para hacerlas más uniformes livianas y fáciles de embalar. El transporte es un punto importante por lo que la industria se ha desarrollado en localidades justo en las rutas más importantes o en aquellas con buen acceso para vehículos. En la región totonaca, las hojas de maíz se comercializan tradicionalmente en los

mercados regionales, pero en las últimas décadas el Mercado de exportación se ha desarrollado gracias a la demanda de la comunidad hispana en Estados Unidos. Además, estos platillos están ocupando un lugar destacado en la gastronomía estadounidense (King, 2007).



Figura 1. Comercialización de hoja de maíz por la empresa La Esperanza.

Existe una industria de hojas de maíz en el suroeste de estados Unidos que contrata a productores mexicanos pero el grueso de la actividad está en manos nacionales. Las zonas más importantes de producción de hojas se encuentran cerca del municipio de Chalco, en el estado de México, Atlixco en Puebla, y Tetela y Cuautla en Morelos. Jalisco, Colima Nayarit, Michoacán, Oaxaca y Tamaulipas también registra la elaboración de hojas de maíz (Long & Villareal, 1998). Por otro lado, los pequeños productores de maíz casi no cuentan con maquinaria y equipo agrícola especializados y venden sus cosechas a precios bajos (Figura 2). Además, por falta de capacitación no aplican correctamente el paquete tecnológico.



Figura 2. Extracción de hojas de maíz por pequeños productores.

En la zona totonaca existen variedades de maíz criollo como el maíz arroz, ancho blanco, olote delgado, media semilla blanco, chiquito blanco, olotillo blanco, argentino blanco, amarillo, negro y pinto, de estas las variedades más utilizadas son maíz arroz y argentino (variedad moderna acriollada). Las hojas para el mercado interno generalmente son producto de industria de tipo familiar. Las hojas son embaladas en manojos de 15 a 20 hojas cada una, los manojos a su vez son agrupados en rollos de 4 manojos cada uno, lo rollos son adquiridos en pacas de 150 rollos (Figura

3). El precio local varia de 5 a 7 pesos por manojo, donde un productor obtiene alrededor de 50 pesos por paca en ganancia bruta. Una vez llegada a los centros urbanos las hojas se reclasifican para uniformar la calidad. El método de embalaje determina la calidad de las hojas y varía por compradores. Las pacas pesan alrededor de 45 kg y se venden a unos 750 pesos (King, 2007).



Figura 3. Venta de hojas de maíz por pacas y en paquetes.

El precio bajo del grano de maíz hizo que las hojas de maíz se transformaran en una opción rentable ya que estas ofrecen una ganancia 9 veces superior a la venta de grano (Cuadro 1). Aunque algunos productores la consideran una fuente de ingreso adicional otros la consideran la principal fuente de ingresos.

Cuadro 1. Producción de maíz sur de Veracruz ciclo primavera verano 2003-2004.

Actividad o insumo	Costo (pesos)	Maíz grano	
		Cantidad	Costo total \$MNM/ha
Labores primarias y siembra			2740
Cosecha			
Arrancar elotes(jornales)	60	9	540
Transporte(viajes)	100	3	300
Remoción de hojas de elote(jornales)	60	5	300
Remoción de grano(jornales)	60	9	540
Cosechar hojas de elote(rollos)	1	1200	1200
Costo de producción con hojas			4420
Costo de producción sin hojas			5620
Ingreso total por producto			
Grano(kg/ha)	1.60	3000	4800
Hojas de maíz(\$/rollo)	3.50	1200	4200
Ingreso neto grano			380
Ingreso neto grano + hoja de maíz			3380

Fuente: (King, 2007).

Hoy en día se trata de explotar mecanizando el proceso para agilizar su obtención de hojas. La beneficiadora Agroindustrias del Rio clasifica la hoja cortada con dispositivos cortantes en siete categorías y presentaciones (Cuadro 2): segunda nacional, primera nacional, PC-8, PC-9, selecta,

selecta especial y selecta especial en malla, de las cuales las cinco últimas son de exportación y las dos últimas sólo las comercializan por pedido. La longitud y ancho de las hojas son factores importantes en la determinación de la calidad de la hoja, siendo las más grandes la de mayor calidad. Se indica un índice de diámetro sobre longitud de mazorca IDMZ_LMZ establecido como *diámetro de mazorca/longitud de mazorca*, que se relaciona con la calidad elotera para la valoración de la diversidad local de mazorcas (Ortiz, et al., 2013).

Cuadro 2. Características de la hoja de maíz según Agroindustrias del Río.

	Calidad de la hoja de maíz						
Características	Segunda nacional	Primera nacional	PC8	PC9	Selecta	Selecta especial	Selecta especial en malla
Longitud(cm)	Mayor a 15	Mayor a 17.5	16.5 a 18.75	18.75 a 22.5	Mayor a 22.5	Mayor a 20	Mayor a 20
Ancho(cm)	Sin restricción	10 minino	10 mínimo	12.5 mínimo	Mayor a 15	Mayor a 17.5	Mayor a 17.5

Fuente: (Cruz, et al., 2010).

Estos mercados especializados comparten tienen deficiencias tanto en infraestructura como en organización con una baja concentración; a pesar de que hay algunos compradores industriales importantes, éstos representan una participación mínima del mercado (Hellin, et al., 2013). Si bien la producción para el Mercado interno se limita para muchos agricultores, esta se encuentra casi totalmente fuera de su alcance. Los problemas más usuales incluyen la falta de volumen suficiente para interesar compradores y la dificultad para cumplir con los estándares de calidad pues no tienen la capacidad de absorber los costos de transporte ni desarrollar la infraestructura de apoyo necesaria (Figura 4).



a)



b)

Figura 4. Almacenamiento de hojas de mazorca en a) bultos y b) transporte en pacas.

Dado que la producción de hojas de maíz es abastecida por variedades criollas, su variabilidad morfológica la convierte en un problema de mecanización importante. Tanto el clima como las diferencias de altitud explican la gran diversidad de cultivos. En América se estima que

existen cerca de 250 razas de maíz (Benz, 1986) y de estas se encuentran más de 75 en México (Sánchez, et al., 2000). Es reconocido que los productores conservan la diversidad del cultivo por razones sociales, económicas y culturales, o cuando las variedades locales muestran un comportamiento agronómico superior al de las variedades mejoradas (Moreno, et al., 2006).

Cada mazorca es una inflorescencia femenina de la planta de maíz, esta consiste en un raquis u olote que está cubierto por semillas, esta a su vez se une al tallo principal mediante un pedúnculo del cual a su vez nacen los lóbulos comúnmente conocidos como hojas. Para cosechar la hoja esta debe desprenderse del pedúnculo totalmente, como se nota en la Figura 5 es decir que para un óptimo corte la distancia de corte debe ser igual a la longitud del pedúnculo. Localizar esta distancia resulta imposible a simple vista pues este parámetro depende de la variedad de maíz y de las características físicas de esta.



Figura 5. Vista interior de la parte basal de una mazorca.

En este punto las nuevas tecnologías crean un punto de partida para la mecanización y posterior automatización del proceso de extracción de hojas. El control automático se ha convertido en una parte importante e integral en los procesos industriales y agrícolas (Ogata, 2010). Los sistemas de control son clasificados en sistemas de lazo abierto (o no automáticos) y sistemas de lazo cerrado (retroalimentados o automáticos) (Hernández, 2010) como se observa en la Figura 6.

El control realimentado se refiere a una operación que, en presencia de perturbaciones, tiende a reducir la diferencia entre la salida de un sistema y alguna entrada de referencia, y lo realiza tomando en cuenta esta diferencia. Aquí sólo se especifican con este término las perturbaciones impredecibles, ya que las perturbaciones predecibles o conocidas siempre pueden compensarse dentro del sistema

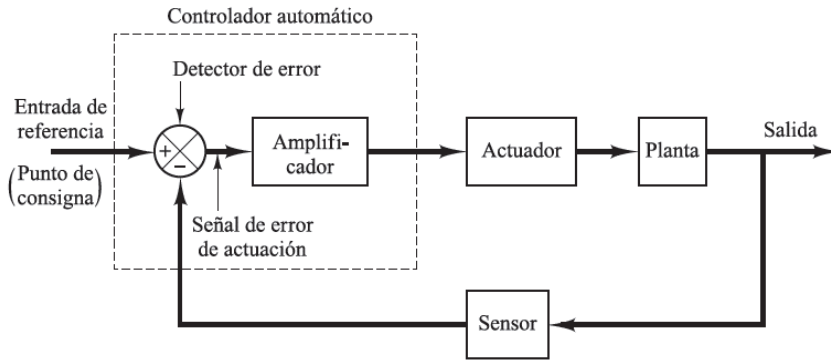


Figura 6. Sistema dinámico en malla cerrada. Fuente: (Hernández, 2010)

La visión artificial, una tecnología que se utiliza para inspeccionar la apariencia en muchos campos de investigación requiere una buena iluminación, hardware de adquisición de imagen (lente, cámara de TV, tarjeta de captura de imagen, PC, los cables entre la cámara y la captura a bordo o PC), y software de adquisición y procesamiento para la extracción de la característica y la comprensión de la imagen. El factor más importante es el dispositivo de iluminación cuando se construye el sistema de visión artificial. En las operaciones de clasificación de fruta, en particular, muchas tienen superficies brillantes debido a las capas cuticulares en las superficies. Esto puede a veces causar formación de ruido visual en la superficie, donde se pierde la información de píxeles, lo que hace difícil la adquisición de imágenes de alta calidad. La eliminación del ruido de los alrededores es el asunto más importante en la construcción de un sistema de visión artificial, así como para garantizar una condición de iluminación uniforme para la inspección de la fruta. Existen numerosos métodos de reconocimiento de objetos que pueden adoptarse sobre la base de diversas funciones, que incluyen la forma, el tamaño, propiedades espectrales, o la textura (Kondo, 2006).

Aunado a estas tecnologías se encuentran los sistemas de control automático que regulan un sistema mecanizado en función de sus datos de entrada y salida, aplicando técnicas de la ingeniería eléctrica en el diseño de sensores e interfaces, la ciencia computacional contribuye con la base para programar estos dispositivos para realizar la tarea deseada. Procesos repetitivos como viene siendo la cosecha de hojas de maíz se buscan automatizar para realizar producciones que beneficien y contribuyan a la conservación de la variedad de razas de maíz mientras a la par genera un método de explotación masivo. El control automático es una de las disciplinas que ha demostrado su eficacia en la industrialización. Este es propiamente usado en la robótica cuya definición está determinada por distintas organizaciones que distingue según conceptos de mercado; una de las más aceptadas en la propuesta por la Asociación de Industrias Robóticas (RIA)

en 1981. Un robot es un manipulador multifuncional reprogramable, capaz de mover material, piezas herramientas o dispositivo especializados, según trayectorias variables, programadas para realizar tareas diversas (Sánchez, 2004). La Asociación Francesa de Robótica Industrial (AFRI) clasifica los robots por generaciones (Barrientos , et al., 1997) (Cuadro 3).

Cuadro 3. Clasificación de los robots según AFRI

1ra Generación	Repite la tarea programada secuencialmente. No toma en cuenta las posibles alteraciones de su entorno.
2da Generación	Adquiere información limitada de su entorno y actúa en resultado. Puede localizar, clasificar (visión artificial) y detectar esfuerzos para adaptar sus movimientos en consecuencia.
3ra Generación	Su programación se realiza mediante el empleo de un lenguaje natural. Posee la capacidad para la planificación automática de sus tareas.

Los robots en su estructura mecánica dependen del uso que se les quiera dar, adoptando la forma que mejor convenga, componiéndose de un sistema manipulador, un subsistema de accionamiento y un subsistema sensorial que se encarga de brindar información entorno y su tarea. El subsistema de control se encarga de controlar los movimientos que esté utilizando la información del subsistema sensorial.

1.1 Antecedentes

La extracción de hojas de maíz se practica en pequeña escala por los productores, los métodos para extraer la hoja de tamal son 1) en forma manual, 2) deshojado manual con ayuda de un banco con disco dentado y 3) extracción mecanizada de la hoja.

El banco con disco dentado es una banquilla de madera que tiene una cabecera perpendicular a la banca donde se empotra un aro de metal con un diámetro aproximado de 30 cm en la zona interior dentada (Figura 7). Los productores realizan el corte con ayuda de este banco apoyando el cuerpo en la banca y haciendo pasar la base de la mazorca por el disco con rapidez; al dar la vuelta completa se corta la hoja por una sola línea y dando un fuerte jalón se desprenden todas las hojas y la mazorca con grano se queda atorada en el aro. Esta herramienta requiere de cierta habilidad en su uso ya que pues puede resultar muy peligrosa para inexpertos (Cruz, et al., 2010). El rendimiento de este método es de un promedio de 80 mazorcas*h⁻¹.



Figura 7. Banco para deshojar mazorcas.

Existen diversos métodos y sistemas de deshojado de mazorcas que se enfocan principalmente en el cuidado del grano y desechan las hojas, como maquinaria con rodillos, que por fricción arrancan todas las hojas dañándolas considerablemente, pues no se pretende hacer uso de estas más que como forraje. Una máquina que corta parcialmente las mazorcas de maíz donde la parte basal y final son cortadas para un deshojado posterior que permita tener elotes para enlatar (Rossi & McGuire, 1992); la máquina corta la parte basal y final bajo una calibración previa que no permite alteraciones de la distancia de corte de los extremos de la mazorca durante su funcionamiento (Figura 8).

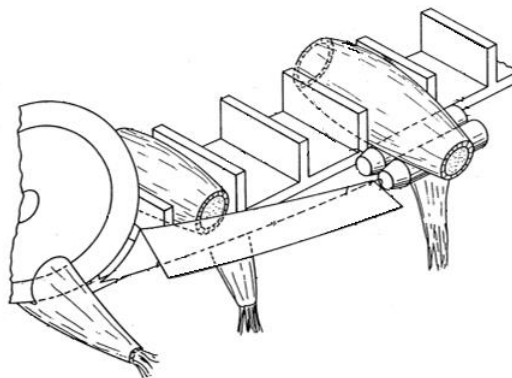


Figura 8. Sistema de corte parcial de mazorcas. Fuente: (Rossi & McGuire, 1992).

En el Instituto Tecnológico Superior de Teziutlán se ha desarrollado un prototipo de maquinaria de accionamiento por pedal (Figura 9), que funciona de manera similar a una guillotina, mediante un pedal basculante atado a un chicote, utiliza para hacer el corte dos cuchillas

encontradas que funcionan como tijeras y con una estructura metálica. La cuchilla móvil se mantiene estable por un resorte unido al chasis y se acciona con el cable del pedal al hacer presión sobre el con el pie. La mazorca se coloca entre las cuchillas y se corta el extremo basal agilizando así su deshojado (Rodríguez, 2010). Este diseño tiene la desventaja de que la posición de las cuchillas encontradas ocasiona que la hoja no tenga un corte uniforme y está en función de la fuerza del operador.

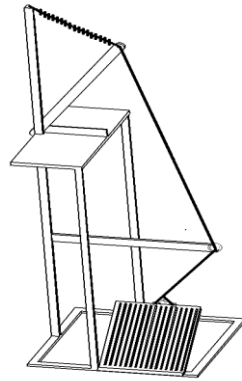


Figura 9. Cortadora de hoja de maíz.

En la maquinaria para este propósito, la calidad de las hojas depende de la variedad de maíz y el método de corte (Cruz, et al., 2010). Para esto se describe una máquina (Figura 10), que mediante diferentes sistemas realiza la separación de las hojas. Esta máquina tiene un rendimiento de $790 \text{ mazorcas} \cdot \text{h}^{-1}$, esto significa una ventaja en comparación con la extracción manual de hasta 10 veces.

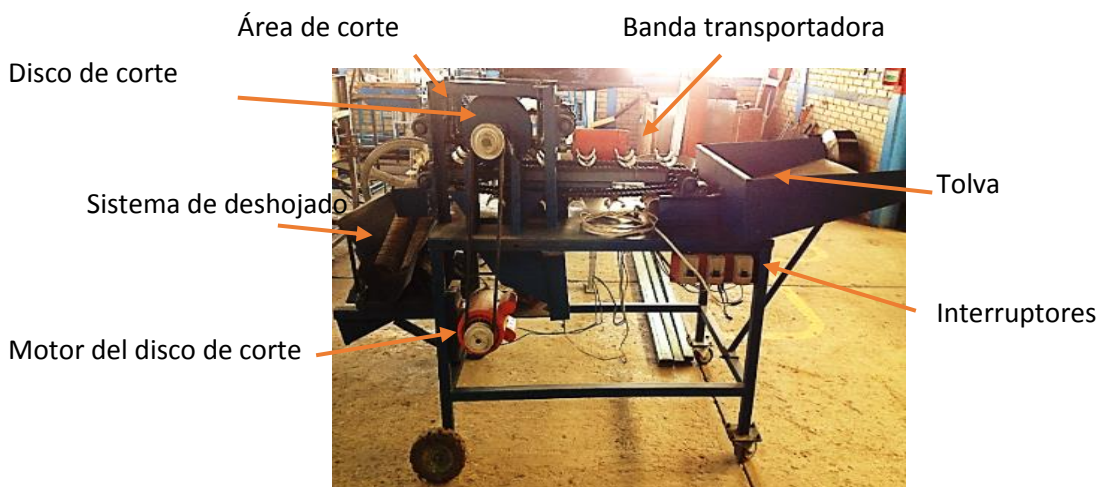


Figura 10. Deshojadora de mazorca para tamal.

Este sistema tiene el inconveniente de que, al colocar la mazorca en la banda transportadora manualmente, el disco de corte, por ser fijo, corta la parte basal, sea cual sea su posición, cortando el pedúnculo incompleto, donde las hojas no se separan del todo, o más de lo necesario llevándose con el grano de maíz excesivo. Los daños generados a las hojas son de un máximo de 3.41% a las hojas por la máquina y un 53.35% de grano desperdiciado con una media de 10.94% (Cruz, et al., 2010). Estos valores indican que la máquina tiene deficiencias relacionadas con la geometría variable de las mazorcas. La consideración de las propiedades dimensionales son factores a tomar en cuenta en el diseño de una máquina con un objetivo particular (Pérez, et al., 2012), como lo es obtener la longitud de las hojas mayores, esta es una variable que determina la calidad y por ello debe serse preciso al ejecutar el corte.

Para mejorar opciones de venta y diseño de las máquinas en la industria agroalimentaria se usan las propiedades físicas, mecánicas, biológicas, térmicas, etc. de los productos agrícolas, así como sus modelos matemáticos creados a partir de dichas características (Prado, et al., 2012). Las propiedades experimentales de los productos constituyen datos de entrada para modelos teóricos que simulan un desempeño de las máquinas y lo analizan para mejorar y optimizar el diseño (Mayans, et al., 2016). Las características agronómicas de las mazorcas han sido ampliamente estudiadas, de estos rasgos, los parámetros de longitud y ancho son generalmente determinados como indicadores de productividad, se han caracterizado mazorcas del híbrido de maíz súper dulce delicia para su procesamiento industrial (Ávila M., et al., 2008). De manera similar se reportan datos de diámetro y longitud de mazorca en centímetros para las razas Bolita, Celaya y Pepitilla y dos híbridos comerciales A7573' de Asgrow y 'AS900' de Aspros en Tehuacán, Puebla, indicando la existencia de variación entre las evaluaciones (Ortiz, et al., 2013). Se midió el diámetro, longitud y peso de una variedad de mazorcas para diseñar una máquina de corte y deshojado (Cruz, et al., 2010). Se determinaron propiedades como diámetro del fruto, diámetro y longitud del pedicelo del mango, para poder aplicarse en el diseño de maquinaria de cosecha por vibración (Mayans, et al., 2016).

También se han caracterizado química y morfológicamente las hojas de maíz, así como las propiedades biométricas (longitud y diámetro) para producir papel (Prado, et al., 2012). Se han evaluado las propiedades mecánicas del fruto de mango bajo pruebas de compresión axial dinámica y la pérdida de peso estableciendo que las propiedades mecánicas del fruto son un referente importante para el diseño de materiales de empaque y operaciones de manejo post-

cosecha (Pérez, et al., 2009). Santos-Hernández *et al.* (2012) diseñaron un dispositivo para la cosecha mecanizada del mango ataulfo usando las características físicas del fruto.

Existen comportamientos proporcionales entre las características dimensionales del mango y su variedad (Mayans, et al., 2016). Este comportamiento podría presentarse entre distintos frutos, en una mazorca, se plantea que pudiesen existir correlaciones entre las diferentes características dimensionales de estas, en específico entre los parámetros geométricos, para ayudar a determinar la posición de corte ideal respecto al deshojado. El conocimiento de las propiedades físico mecánicas durante la evaluación de modelos matemáticos de la dinámica del sistema fruto-pedúnculo se precisa, para poder optimizar los regímenes de trabajo de las máquinas como se ha ido utilizando para frutos como nim y café (Bouza, et al., 2007).

El uso de un sistema de visión artificial proporciona un conjunto de funciones de análisis de patrones e imágenes, proporcionando atributos numéricos de los objetos o escenarios que se examinan (Velázquez, et al., 2011). Además, permite la caracterización de las propiedades dimensionales de manera más precisa y rápida. Se utilizó el análisis de imágenes circulares de coco para determinar dos parámetros, la circularidad y el diámetro de Feret, para predecir el lugar del corte y optimizar la extracción de la pulpa en coco (Hahn, et al., 2012). Un robot trepador de cocos que, mediante un procesamiento basado en un algoritmo de detección de elipses, identifica la presencia de cocos en la palmera fue descrito (Ramírez & Hahn, 2013).

1.2 Hipótesis

La tarea de corte de mazorcas para deshojarlas de manera mecanizada se lleva a cabo con un corte transversal en la parte basal de la mazorca. Todas las mazorcas son cortadas a una distancia promedio elegida con base en el juicio personal del operador; esta distancia puede estar sujeta a la geometría específica de cada una de estas, involucrando su largo, ancho, área, etc. y determinarse mediante un sistema de visión artificial. El proceso de corte puede mejorarse mediante la implementación de un sistema de control automático que ajuste el disco de corte a la distancia correcta donde el pedúnculo de la mazorca se corte totalmente y no se desperdicie grano al sincronizarse con el sistema de visión artificial.

1.3 Objetivos

El objetivo de la investigación se dividió de la siguiente manera:

General:

- Diseñar, construir y evaluar un sistema que ajuste automáticamente el disco de corte de una máquina deshojadora de mazorcas mediante visión artificial.

Particulares:

- Determinar la existencia de propiedades geométricas en las mazorcas que permitan establecer un modelo de distancia desde la base al corte óptimo.
- Diseñar y construir el sistema corte de una máquina deshojadora de mazorcas con control automático.
- Elaborar un programa que permita controlar el sistema de corte de una máquina deshojadora de mazorcas.
- Elaborar un programa que mediante un sistema de visión artificial determine los parámetros geométricos de una mazorca.
- Diseñar y construir el sistema de visión artificial que determine las características geométricas de la mazorca
- Evaluar el sistema de corte de mazorcas con control automático de posición con visión artificial.

2. Diseño del sistema de corte de mazorcas con control automático de posición del disco de corte con visión artificial

Antes de iniciar con la metodología del diseño, primero se describe la máquina deshojadora de mazorcas para tamal en general, esta se divide en tres principales sistemas:

-Sistema de alimentación: (Figura 11a) para este sistema se utilizan catarinas de 12 dientes y cadenas de número 60 sobre las cuales se colocan los contenedores de PVC semicirculares. El motor necesario para accionar el sistema de alimentación y el de sujeción es de $\frac{1}{4}$ hp. Se utilizan chumaceras de piso de $\frac{3}{4}$ de pulgada (19 mm) marca SKF. Se utilizan ejes de $\frac{3}{4}$ de pulgada (19 mm) de acero AISI C.R 1018. En la transmisión se utiliza un reductor de 60:1, la velocidad de alimentación es de 0.0355 m/s. Se utiliza una cadena número 60 con catarinas de 12 dientes. Este sistema se acciona mediante dos engranes de 40 dientes de la transmisión del sistema de alimentación. La velocidad del avance de la cadena es de 0.0035 m/s. el diámetro del eje es de $\frac{3}{4}$ de pulgada (19 mm) de acero AISI C.R 1018. Las chumaceras de piso a utilizar son de $\frac{3}{4}$ de pulgada marca SKF.

-Sistema de corte: (Figura 11b) consiste en disco de corte de 250 mm con filo tipo navaja para cortar la mazorca de maíz y se requiere un motor de 2 hp. Dos chumaceras de piso de 1 pulgada. La velocidad de trabajo del disco es de 1740 rpm. El diámetro del eje es de 1 pulgada (25 mm) de acero AISI C.R 1018. Este sistema es fijo durante el trabajo por lo que el corte se realiza a una distancia predeterminada.

-Sistema de deshojado: (Figura 11c) se utilizan dos rodillos para deshojar la mazorca de 124 mm de diámetro recubierto con caucho. Para invertir el sentido de giro se utilizan engranes de 54 y 66 dientes. La transmisión está constituida por poleas y bandas. El motor necesario para accionar el sistema es de $\frac{1}{4}$ hp. Los rodillos se colocan con relación a la horizontal a 25° . El diámetro del eje es de 1 pulgada (25 mm) de acero AISI C.R 1018. Las chumaceras a utilizadas son de 1 pulgada (25 mm) de la marca SKF. La velocidad de trabajo del rodillo lento es de 87.93 rpm y del rápido 111.16 rpm.



a)



b)



c)

Figura 11. Sistema de a) alimentación, b) corte y c) deshojados de mazorcas para tamal

2.1 Diseño conceptual del mecanismo de posición del disco de corte.

Dadas las limitaciones, carencias y diseño en la deshojadora de mazorcas se siguió el método descrito en la Figura 12 cuya aplicación para la creación, mejora e innovación de productos o herramientas permite definir el problema y las especificaciones requeridas para obtener el bosquejo de una máquina.

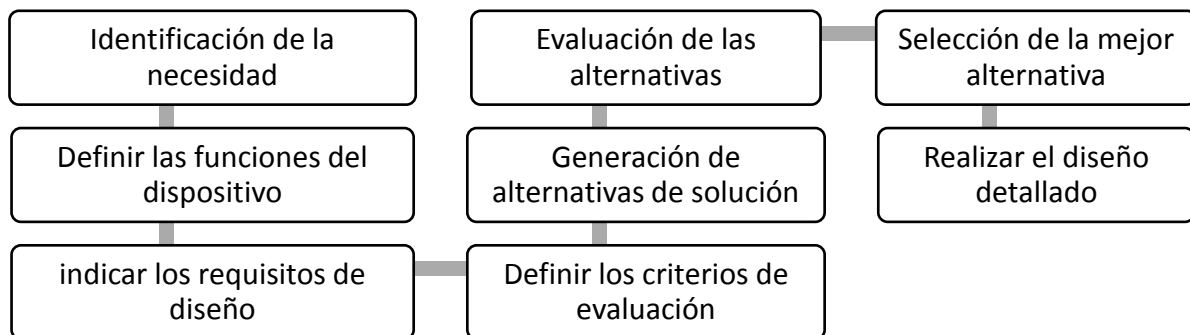


Figura 12. Etapas del diseño conceptual

2.1.1 Identificación de la necesidad.

La necesidad consiste en realizar un corte óptimo de la parte basal de la mazorca; es decir, el corte en el que se aprovecha al máximo la longitud de las hojas considerando el punto en el cual todas las hojas se desprenden. Debido a que la longitud de las hojas es directamente proporcional a su calidad y por lo tanto al precio de estas. Es por ello la necesidad de diseñar una máquina para deshojar la mazorca de con ajuste automático de la distancia de corte. El sistema de corte es fijo y está en función de la pericia del operador al colocar las mazorcas. Esto genera cortes errados y por ende pérdida de grano y desgarre de hojas. Reemplazar la función de elegir la zona de corte por el operador a discreción y el sistema de corte por un sistema de ajuste automático mediante mecanismos o herramientas más precisas. Esto constituye tres nuevos sistemas complementarios del sistema de corte.

2.1.2 Definición de funciones.

Para realizar el ajuste automático de la distancia de corte de las mazorcas en un rango de 10 cm, garantizando un corte óptimo que se refleja en buena calidad y precios competitivos el mecanismo deberá de realizar las siguientes subfunciones:

- Cortar las hojas de la mazorca.
- Desplazar el motor eléctrico unido al disco de corte.
- Sensor la posición del disco de corte.
- Determinar los parámetros geométricos de la mazorca.
- Determinar la longitud óptima de corte

2.1.3 Búsqueda de principios de solución para satisfacer las sub-funciones

En el Cuadro 4 se indican algunos principios de solución para satisfacer las sub-funciones principales del mecanismo.

Cuadro 4. Principios de solución para satisfacer las sub-funciones principales.

Sub-Función	Alternativas	
	1	2
Cortar la hoja de la mazorca	Disco de filo liso	Disco de filo liso
Ajustar la distancia de corte	Tornillo embalado	Actuador lineal
Desplazamiento de motor	Bancada sobre rieles con chumaceras	Bancada sobre rieles con chumaceras
Alimentación	Eléctrico (5-12v)	Eléctrico (5-24v)
Sensar la posición del disco de corte	Encoder óptico o magnéticos	Encoder absoluto (Potenciómetro)
Medir la mazorca	Sensor laser	Visión artificial
Control del mecanismo	Arduino.	Arduino.

2.1.4 Evaluación y selección de la mejor alternativa

Según la asignación de valores a los parámetros de acuerdo a una escala preestablecida de calificación en el Cuadro 5 se realizó la evaluación de las alternativas de diseño. En el Cuadro 6 se realiza la evaluación de las variantes.

Cuadro 5. Escala para la asignación de valores.

Puntos	Nivel de la solución
0	Ineficaz
1	Inadecuada
2	Poco conveniente
3	Aceptable
4	Adecuada
5	Satisfactoria
6	Buena con detalles
7	Buena
8	Muy buena
9	Excede los requerimientos
10	Ideal

Fuente: Cruz, 2005.

Cuadro 6. Principios de solución para satisfacer las sub-funciones principales.

Criterio de evaluación	Alternativas	
	1	2
Costo de inversión	5	4
Precisión	8	8
Funcionamiento simple	6	7
Baja complejidad de componentes	6	8
Poco requerimiento de espacio	8	8
Poca complejidad de diseño	6	7
Seguridad	7	7
Reparación	7	8
Operación simple	6	8
Total	59	65

Al realizar la evaluación se concluye que el mecanismo adecuado para el ajuste automático de la distancia de corte, se compone de un actuador lineal con retroalimentación. Para obtener las dimensiones de la mazorca se cuenta con un sistema de visión artificial, el cual envía información al control del sistema.

El método para cortar mazorcas para su deshojado con mayor facilidad y menos daños a los granos de maíz, que consiste en captar una imagen de la mazorca en una tarjeta de adquisición de imágenes en la posición de corte, analizar los parámetros geométricos de la imagen de la mazorca en una unidad de control con un algoritmo desarrollado en función de la correlación entre los mismos, para determinar la zona de corte óptima, donde se corta el pedúnculo, todas las hojas quedan libres y es posible deshojarlas rápidamente y sin mucho esfuerzo, todo esto en un procesador que a partir de esta información y con una tarjeta controladora de motores activara el actuador para mover el órgano de corte a la posición optimizada y cortar la mazorca. En la Figura 13 se nota que además el actuador retroalimenta el sistema con el dato de la posición. También es función del sistema controlar los diferentes motores de la máquina deshojadora de mazorcas, motor del disco (M1), motor de la banda transportadora (2) y el motor del sistema de deshoje (3).

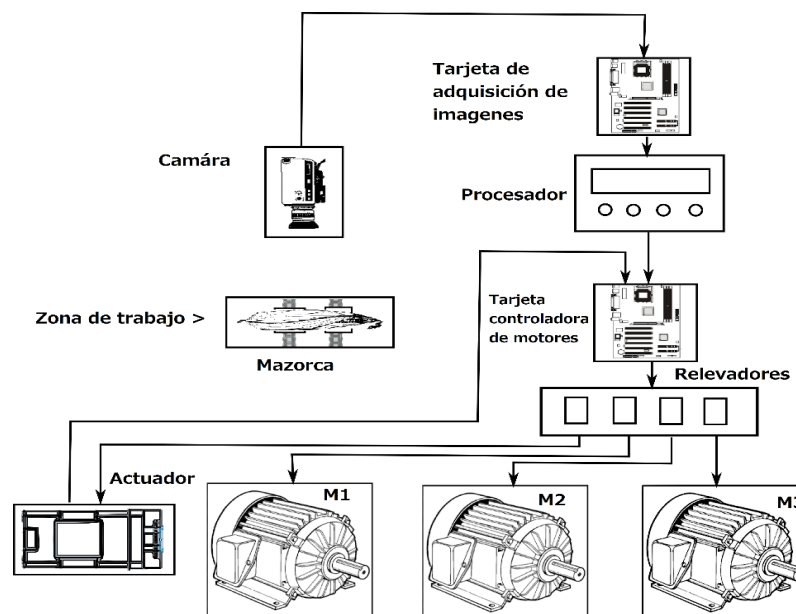


Figura 13. Diagrama de bloques de la conexión del sistema de control.

2.2 Diseño detallado del sistema de ajuste de disco de corte.

El corte en la parte basal de la mazorca para que puedan ser desprendidas las hojas se realiza mediante un disco liso, con un diámetro exterior de 250 mm, de 32 mm de diámetro interior y 1.6 mm de espesor de carburo de tungsteno con un ángulo de filo de 14°. La potencia del motor eléctrico del sistema de corte se compone de la potencia consumida para superar la resistencia de corte y de la potencia gastada para vencer la resistencia a la fricción que surge en los mecanismos de la máquina. El motor usado es un motor eléctrico de 2 hp (1.492 KW), cuya frecuencia de rotación es de 1740 rpm (Baldor Electric Company, 2016). Se consideró la energía específica o unitaria de corte para la hoja de maíz, considerando la probabilidad de que el disco corte grano y olote teniendo de esta manera que la fuerza de resistencia al corte por el disco W_{corte} (Cruz, et al.,

2010) es 40.87 N. Las dimensiones del eje del disco se encuentran establecidas por lo que al diseñar el mecanismo de ajuste las limitaciones espaciales hacen que se considere sólo una chumacera (Figura 14).

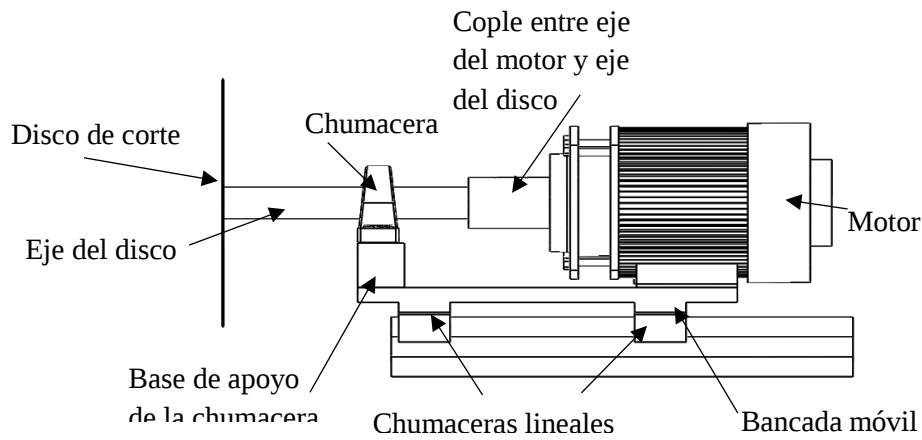


Figura 14. Sistema de corte planteado.

En la Figura 15 se muestra el diagrama de cuerpo libre de las cargas a las que se somete el árbol del disco de corte, estas son el peso de disco (10.7 N) y la resistencia al corte de la mazorca de maíz (40.87 N). Debido a que el eje se monta directamente al motor y este a su vez se haya soportado por el mecanismo de ajuste se considera que el eje se encuentra empotrado.

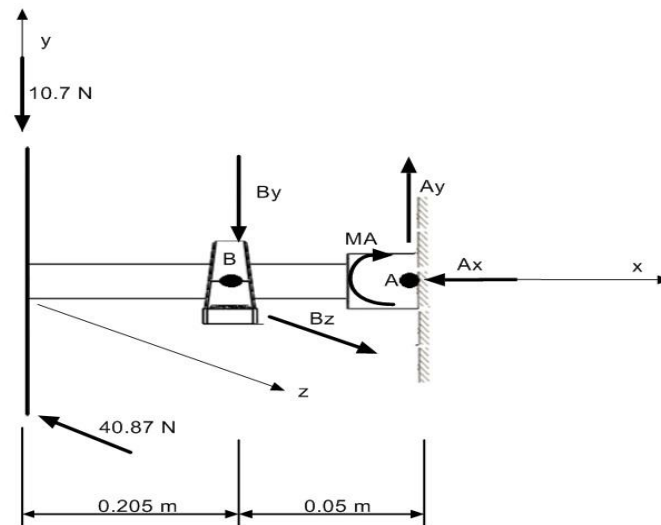


Figura 15. Fuerzas distribuidas sobre el eje del disco de corte de manera estática.

Al realizar el análisis estático en el plano XY se tiene que la suma de momentos respecto al punto B es:

$$\circlearrowleft \sum M_B = -10.7 \text{ N} (0.205 \text{ m}) - A_y(0.05 \text{ m}) = 0 \quad (2.1)$$

$$Ay = 43.87 \text{ N} \quad (2.2)$$

La suma de las fuerzas en el eje X y Y son respectivamente:

$$\sum F_x = Ax = 0 \quad (2.3)$$

$$\sum F_y = -10.7 \text{ N} - By + Ay = 0 \quad (2.4)$$

$$-10.7 \text{ N} - By + 43.87 \text{ N} = 0 \quad (2.5)$$

$$By = 33.17 \text{ N} \quad (2.6)$$

De esta manera haciendo la suma de momentos respecto al punto A se tiene que:

$$\cup \sum M_A = -10.7 \text{ N} (0.255 \text{ m}) - 33.17 \text{ N} (0.05 \text{ m}) + MA = 0 \quad (2.7)$$

$$MA = 4.387 \text{ Nm} \quad (2.8)$$

Con las reacciones conocidas en A se determina la reacción en el plano XZ mediante la suma de los momentos respecto a ese mismo punto:

$$\cup \sum M_A = 40.87 \text{ N} (0.255 \text{ m}) - Bz(0.05 \text{ m}) + MA = 0 \quad (2.9)$$

$$Bz = 296.177 \text{ N} \quad (2.10)$$

La carga radial resultante en el punto B es:

$$RB = \sqrt{By^2 + Bz^2} \quad (2.11)$$

$$\sqrt{(33.17 \text{ N})^2 + (296.177)^2} = 298.03 \text{ N} \quad (2.12)$$

Ya que no existe carga radial en las chumaceras se puede calcular la carga básica como:

$$C = \left(\frac{60 L_h n}{10^6} \right)^{\frac{1}{\alpha}} RB \quad (2.13)$$

Donde:

C: Carga básica [N]; RB: Carga equivalente, igual a la carga axial, [N]; α : Factor para rodamientos de bolas, [1]; $\alpha=3$; L_h : vida en horas; $L_h=3000$; n: velocidad de rotación.

$$C = \left(\frac{60 \cdot 3000 \cdot 1740}{10^6} \right)^{\frac{1}{3}} 298.03 = 2023.95 \quad (2.14)$$

Se seleccionó una chumacera de 1 pulgada (SKF, 2016) cuya capacidad de carga dinámica es 10 800 N y carga estática de 4000 N siendo esta la más adecuada para el mecanismo. De esta manera se procedió a realizar el análisis estático del sistema. Dado que el dispositivo se desplaza

en un sólo eje coordinado como se muestra en la Figura 16, la fuerza de fricción se determina como la fuerza normal multiplicada por el coeficiente de fricción, como en la ecuación (2.15).

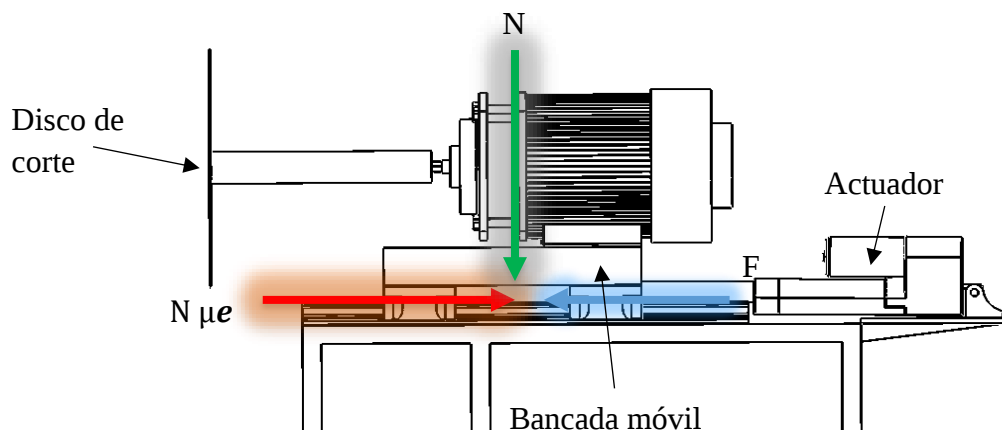


Figura 16. Distribución de las fuerzas ejercidas sobre el mecanismo.

$$F = N \mu e \quad (2.15)$$

Donde F: fuerza de empuje ejercida por el actuador de la bancada de manera horizontal, N; μe : Coeficiente de fricción estático, adimensional; N: Fuerza normal ejercida por el disco, el motor, chumaceras y bancada [N]. Se calcula por la siguiente formula:

$$N = (D + M + C + B) \quad (2.16)$$

Dónde D: peso del disco y su eje; M: peso del motor; C: peso de la chumacera; B: peso de la bancada

El motor junto con el disco de corte, eje, chumaceras ejercen una fuerza neta de 225.63 N, la bancada de 40x40cm (suficiente para asentar el motor) deberá tener máximo 68.67 N, lo que da un total de 294.3 N ejercidos de forma normal.

Los rodamientos usados son el modelo lineal SBR20UU (Figura 17). Estas son chumaceras abiertas que se desplazan sobre un riel de aluminio. Permiten un desplazamiento suave y preciso, y dado que el dispositivo se montará sobre una máquina que produce vibraciones mecánicas considerables es una característica favorable.

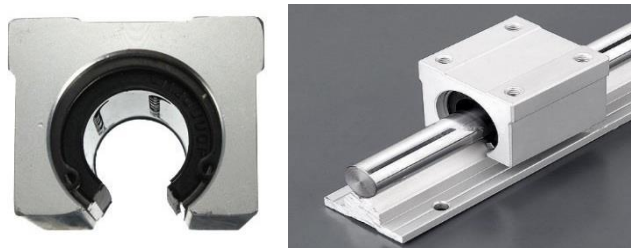


Figura 17. Chumaceras lineales SBR20UU.

Además, estas cuentan con coeficiente de fricción estático de 0.05 aproximadamente, lo que permite calcular la fuerza requerida por el actuador con la ecuación (2.17):

$$F = 294.3 \text{ N} * 0.05 = 14.715 \text{ N} \quad (2.17)$$

Se eligió el actuador lineal LD3 (Figura 18), éste puede ejercer horizontalmente una fuerza de empuje y jale de 1200N máximo, trabaja con 12V/24V a 3.5 A con un desplazamiento de 6 in máximo. Cuenta con un sistema de retroalimentación basado en un encoder de tipo absoluto (Pololu, 2016) que está incluido en la carcasa del modelo.

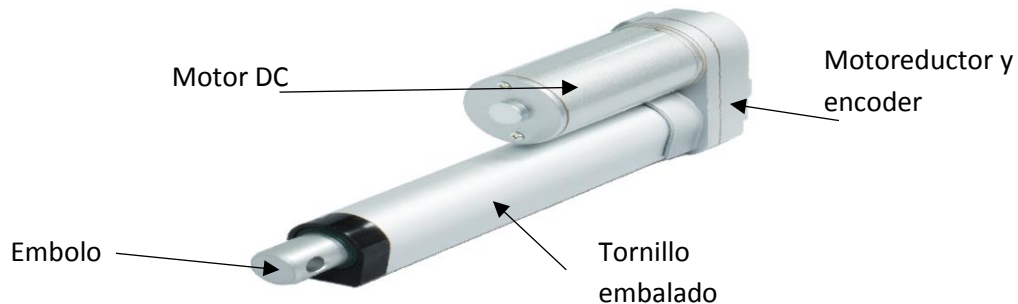


Figura 18. Actuador lineal LD3.

Se nota que el actuador lineal tiene la capacidad suficiente para mover la bancada. El diseño conceptual el actuador se acopla con dos uniones de aluminio, como se muestra en la Figura 19.

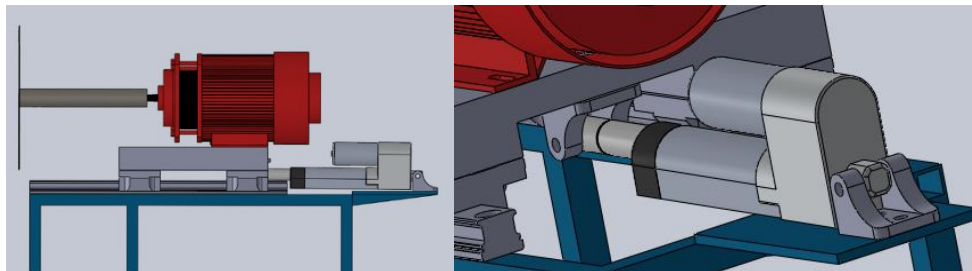


Figura 19. Acoplamiento del actuador lineal con la bancada y la bancada de la máquina.

El diseño del soporte se realizó bajo los bocetos de la Figura 20, considerando las limitaciones del chasis de la máquina deshojadora.

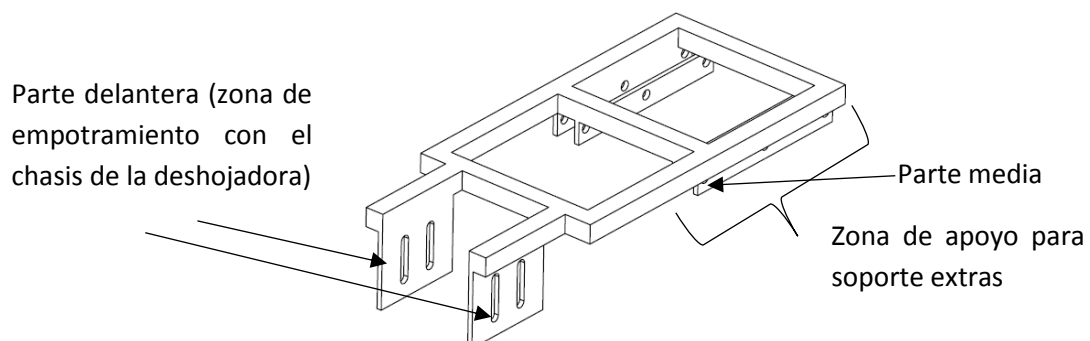


Figura 20. Diseño conceptual del soporte de la bancada del disco de corte.

El soporte ajustado al chasis tiene una medida menor a la del soporte de las chumaceras original por lo que es necesario cortar la placa. Por ello también se diseñó un soporte extra que permite colocar las chumaceras en su posición con el fin de usar la deshojadora con o sin el sistema de control automático. El soporte se acopla a la máquina procurando que el disco de corte se encuentre sobre la línea de corte preestablecida (Figura 21).

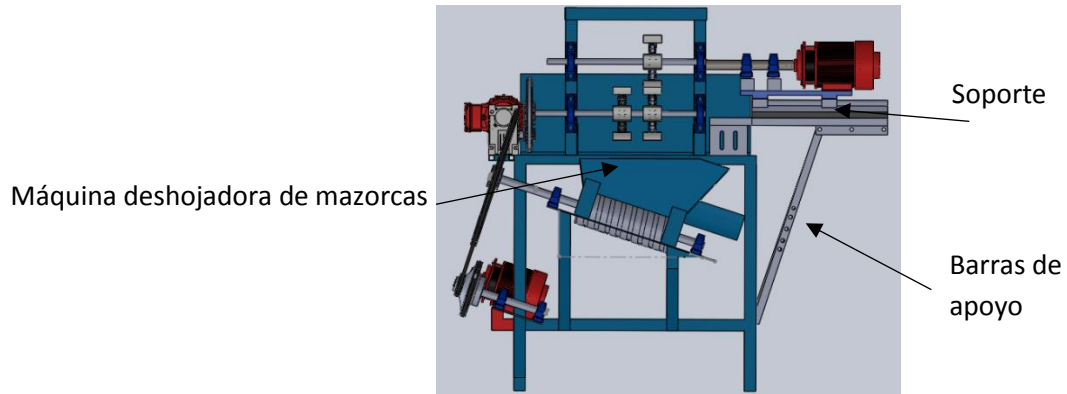
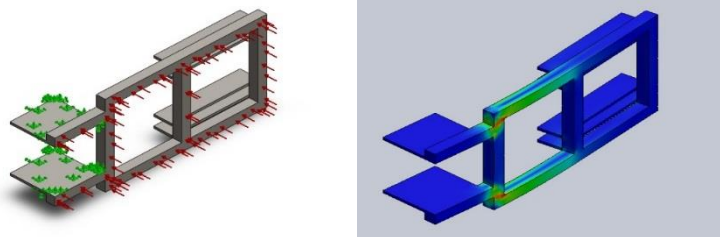
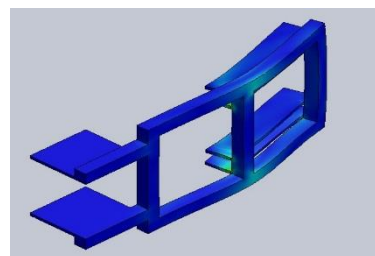
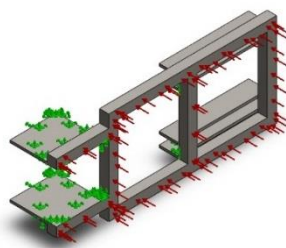


Figura 21. Soporte de la bancada del disco de corte y ubicación en la máquina deshojadora.

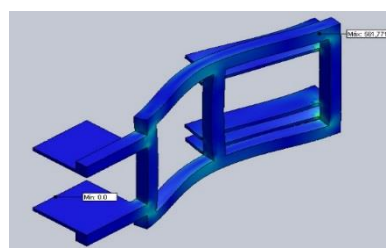
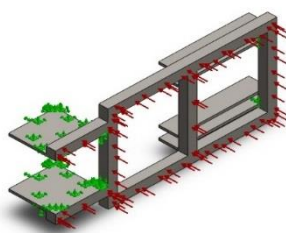
La base de la bancada se diseñó con los siguientes datos, PTR de 1'' y placa de acero aleado de $\frac{1}{4}$, con límite elástico de 620422000 N/m² y un límite de tracción de 723826000 N/m². Bajo estas se realizaron las pruebas de deformación en SolidWorks (Figura 22) con una carga de 884 N/m² (flechas de color rojo) simulando el esfuerzo y deformación al colocar sujeciones en la parte delantera donde se empotra al chasis de la máquina deshojadora. También se simuló con un apoyo en de barras soporte en la parte media y luego en la parte final.



a) Desplazamiento resultante	0.0345439 mm
Tensión	1942640 N/m ²



b) Desplazamiento resultante	0.000695895 mm
Tensión	490074 N/m ²



c) Desplazamiento resultante	0.00047702 mm
Tensión	561772 N/m ²

Figura 22. a) Simulación con sólo una sujeción en las placas delanteras, b) en la parte media y c) en la parte final.

Se nota que la mayor deformación se lleva a cabo cuando sólo existe la sujeción en la parte delantera del soporte (Figura 22a), pero aun así la tensión generada no supera el límite elástico ni de tracción, esto indica que la pieza no fallará. Aun así, un desplazamiento de 0.03 mm generaría un movimiento en el soporte que inclinaría el disco de corte. Esta inclinación puede provocar un fallo en el corte de mazorcas por lo que se procedió a analizar los datos generados por la simulación con apoyos, en la parte media (Figura 22b) la deformación es mayor que en la parte final (Figura 22c), ambas simulaciones no sobrepasan el límite de elástico y de tracción, por lo que la simulación con mayor deformación indicará el lugar donde debe colocarse un soporte para minimizar el movimiento del disco de corte.

2.3 Diseño detallado del sistema visión artificial.

El sistema de visión artificial debe constar de una tarjeta de adquisición de imágenes y una cámara matricial cuyo sensor cubra un área que está formada por una matriz de píxeles de tecnología CCD (Charge – Coupled – Device) formados por miles de diodos fotosensibles posicionados de forma muy precisa en la matriz, ubicada en un soporte y enfocada de manera que recoge la imagen de toda la superficie de trabajo. Además, debe contar con software especializado

para el procesamiento de imágenes. Existen el mercado varios programas que se enfocan en este objetivo, uno de ellos pertenece al entorno de programación de MATLAB. También existe software de carácter libre como OpenCV, que es capaz de trabajar con más entornos como Python, C, Visual C, etc. Determinadas estas partes del sistema se procedió a detallar el método del funcionamiento que recogerá este, desde los parámetros físicos necesarios para calibrar el sistema, hasta los parámetros variables generados por el software del sistema.

La banda transportadora tiene canjilones que separan las mazorcas a una por corte, y estos se disponen a una distancia L , que es la suma de el diámetro del disco de corte D , la distancia entre el extremo de un canjilón a la tangente del disco de corte a , y el radio r de un canjilón (Figura 23).

$$L = a + r + D \quad (2.18)$$

La distancia a , está en función de la velocidad v a la que se mueva la banda transportadora, y el tiempo de ajuste de órgano de corte t_a , dado por:

$$a = v \cdot t_a. \quad (2.19)$$

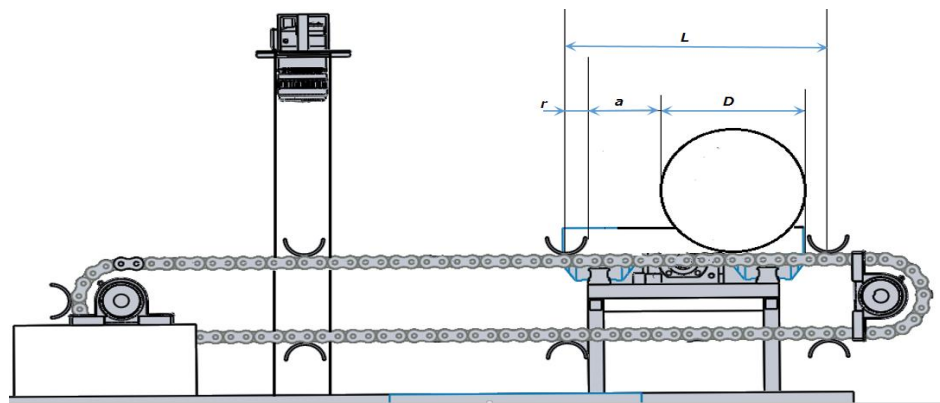


Figura 23. Vista lateral del sistema de corte automático.

Esta distancia a indicara la productividad en la máquina la establecer la cantidad de mazorcas que se pueden analizar por unidad de tiempo. Una vez que se ha efectuado el corte la parte basal cae por un conducto de desechos colocado bajo la zona de corte, a continuación, la mazorca cortada sigue por la banda transportadora hasta el punto de retorno donde cae por gravedad al sistema de deshoje de rodillos giratorios.

La cámara conecta con un procesador de imágenes. Esta recibe la imagen de la cámara, la segmenta y genera la parametrización de la imagen de la mazorca, estableciendo los parámetros geométricos. La tarjeta de adquisición de imágenes conecta a su vez con una unidad de control. A la tarjeta de control de motores le llegan las señales de realimentación procedentes del encoder de posición ubicado en el actuador que además envía la información a la tarjeta de procesamiento para determinar la distancia a la que se encuentra el disco de corte (d_c). Los amplificadores

conectan además con un bloque de alimentación específico que se encarga de suministrarles la energía necesaria para su funcionamiento.

La tarjeta de control de motores mantiene activos los tres motores eléctricos mientras este proceso llega a su etapa inicial en la zona de fotografías y tienen un lapso específico de tiempo programado para esperar mientras no haya presencias de mazorcas hasta que determina debe detenerse. Cuando el sistema de ajuste del órgano de corte esté ubicado la mazorca pasará por la línea de corte mientras la siguiente mazorca es analizada. Como se muestra en la Figura 24 el sistema de visión artificial se encarga de calcular el parámetro de la distancia de corte óptimo ($lbco$), y a partir de este dato calcula con una tarjeta de procesamiento la distancia del centro de la cámara al corte óptimo ($lcam$); conociendo el ancho de trabajo de la cámara (atc), se localiza la posición de la mazorca como x_0 que al sumarle $lbco$ se convierte en la distancia x_1 . Con estos valores se aplica la ecuación:

$$lcam = \frac{atc}{2} - x_1 \quad (2.20)$$

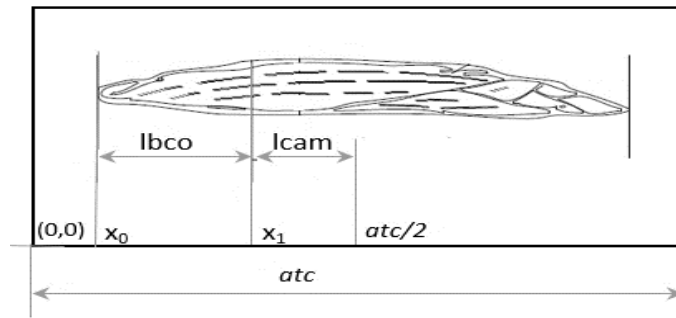


Figura 24. Parámetros de la mazorca determinados mediante visión artificial.

Dada lcc se puede calcular la distancia de corte de la mazorca al origen del dispositivo xd (Figura 25), restando la distancia del centro de la cámara al corte óptimo ($lcam$) a la distancia preestablecida del origen al centro de la cámara (lcc).

$$xd = lcc - lcam \quad (2.21)$$

El actuador se retroalimenta y ajusta con la señal del controlador en función del dato de esta fórmula controlando el desplazamiento por el encoder hasta que se ubica en la posición esperada.

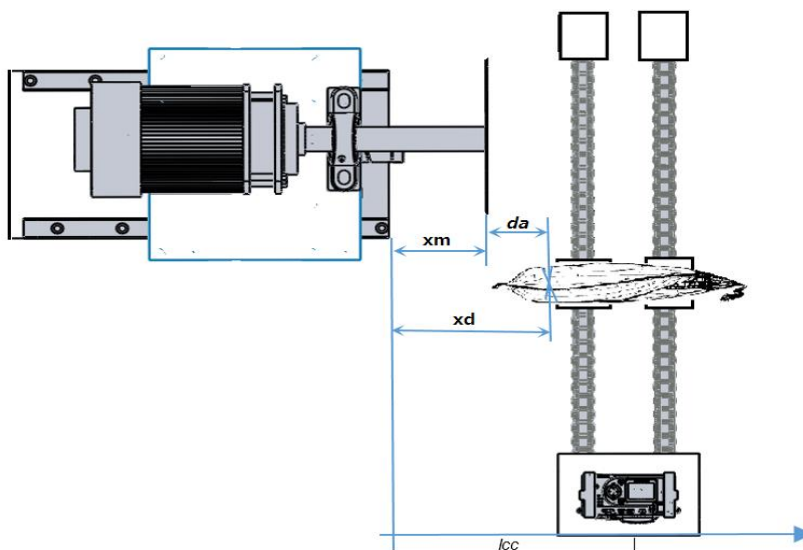


Figura 25. Vista superior del sistema de corte automático.

La tarjeta de procesamiento se faculta de calcular la distancia de ajuste (da) del disco de corte teniendo en cuenta la posición del disco de corte (xm), con la siguiente ecuación:

$$da = xd - xm \quad (2.22)$$

La cámara se empotra en la máquina de manera independiente por lo que se propuso una estructura hecha de barras de metal como se muestra en la Figura 26 y se coloca en la deshojadora al inicio de la banda transportadora.

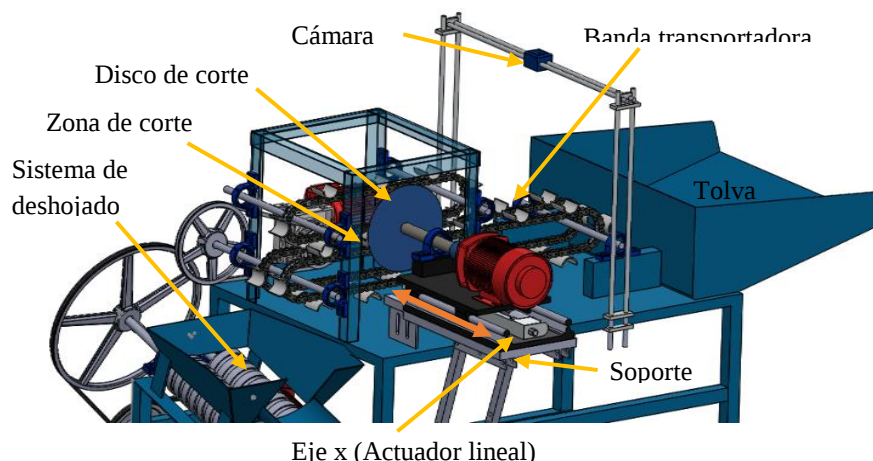


Figura 26. Base de la cámara y ubicación en la máquina deshojadora de mazorcas.

2.4 Diseño detallado del sistema de eléctrico.

El sistema de visión artificial tiene como fuente de alimentación la computadora, la cual a su vez esta alimentada por un convertidor de corriente a 12V DC. La interfaz entre el procesador

y el sistema de adquisición de imágenes es a través de un cable USB 2.0 que maneja un voltaje de 5V.

El sistema de control por su parte, tiene componentes que necesitan de convertidores analógicos digital, un regulador de voltaje para el actuador y una interfaz física que sincronice estos elementos. Para llevar a cabo la tarea de conversión analógica del actuador a una señal digital se usó la tarjeta Arduino Mega (Figura 27). Esta es una placa electrónica basada en el ATmega1280. Cuenta con 54 pines digitales de entrada / salida (de los cuales 14 pueden utilizarse para salidas PWM), 16 entradas analógicas y un resonador cerámico de 16 MHz. Además, su costo es muy accesible y es una placa de arquitectura abierta (open source) (Cebada, et al., 2016) lo que le brinda un amplio rango de softwares con los que trabajar como son MATLAB, Visual C, LabView, Python, etc. Esta tarjeta servirá además como una interfaz física entre la computadora y el actuador.



Figura 27. Arduino Mega

Para el diseño de la interfaz visual entre los controladores y el usuario se realizó aplicando la herramienta GUIDE. Este es un entorno de programación visual disponible en MATLAB para realizar y ejecutar programas que necesiten ingreso de datos. Tiene las características básicas de todos los programas visuales como Visual Basic o Visual C++.

Para controlar el actuador lineal se requiere de un puente H para cambiar la dirección del giro del motor. Un Puente H es un circuito electrónico que permite a un motor eléctrico DC girar en ambos sentidos, *avance* y *retroceso*. Para este trabajo se utilizó el controlador de motores VNH5019 por su rápida conexión con la tarjeta Arduino (Figura 28) y su rango de trabajo de 5v a 24v.



Figura 28. Acoplamiento de la tarjeta VNH5019 con el Arduino UNO.

El sistema de control desarrollado está constituido por tres partes (Figura 29), la parte I se refiere al proceso llevado a cabo en el CPU que tiene como datos de entrada el dato generado por la cámara (Icam), y empleado algoritmos transforma este dato en el dato de la distancia deseada

(qd) que mediante un controlador de la familia PID determina una variable de control F , que es un voltaje proporcional a la fuerza aplicada por el actuador, la parte II se encarga de transformar esta información en un voltaje PWM de un nivel bajo (5 V) a un voltaje alto V_d (20 V) obtenida de una fuente de poder externa, este voltaje es enviado a la parte III hasta lograr posicionar el disco de corte en qd; el encoder del actuador mide el dato de la posición deseada y regresa este valor en forma de voltaje bajo V_m a la parte II en la tarjeta de lectura que convierte este dato en una señal digital, distancia medida x_m que se regresa a la CPU.

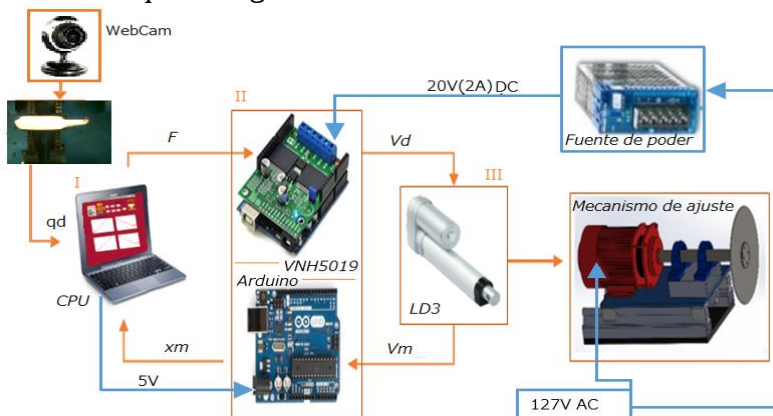


Figura 29. Lazo cerrado de control para el actuador del sistema.

Para accionar los motores del disco M1 y de la banda transportadora de mazorcas M2 se necesita un módulo de relevadores para poder manejar un voltaje alto mediante una fuente de voltaje bajo. Esto se llevó a cabo mediante un módulo de relevadores de 5v de 2 canales mediante la interfaz de un Arduino UNO. La conexión se realizó como se muestra en la Figura 30. El motor destinado al sistema de deshojado M3 no se contempló por ser un sistema independiente de la máquina.

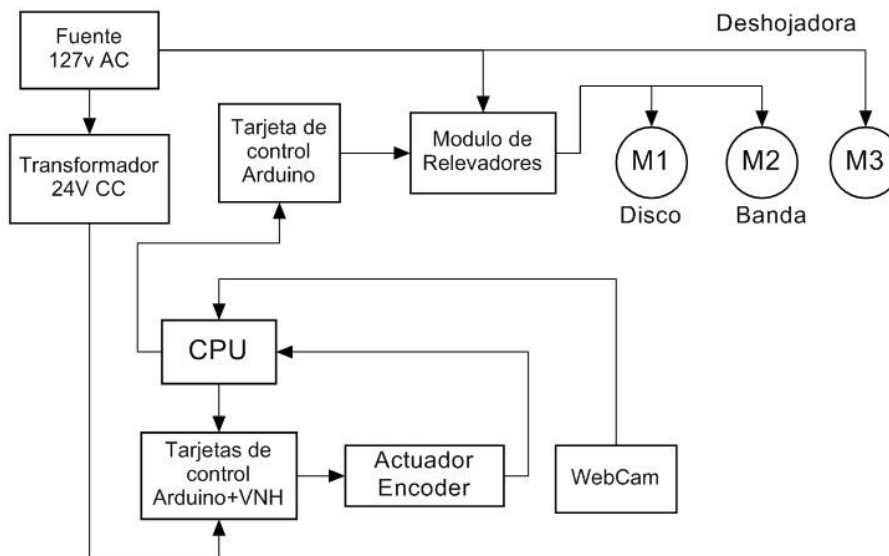


Figura 30. Diagrama de bloques de los componentes del sistema de control automático para el corte de mazorcas.

2.3 Construcción del sistema

El mecanismo de ajuste del disco de corte se construyó en base al diseño planteado con anterioridad (Figura 31) sobre una base de nylamind con barras y chumaceras de aluminio.

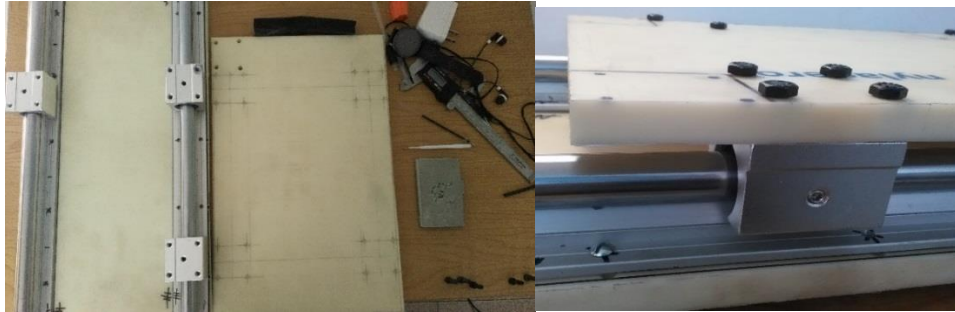


Figura 31. Construcción del mecanismo de ajuste para el disco de corte.

Las tarjetas controladoras se ensamblaron dentro de un compartimento plástico de 10x6cm para protegerlas del polvo, se agregó un interruptor de seguridad que corta la corriente hacia las tarjetas y el actuador lineal de la fuente de alimentación (Figura 32).

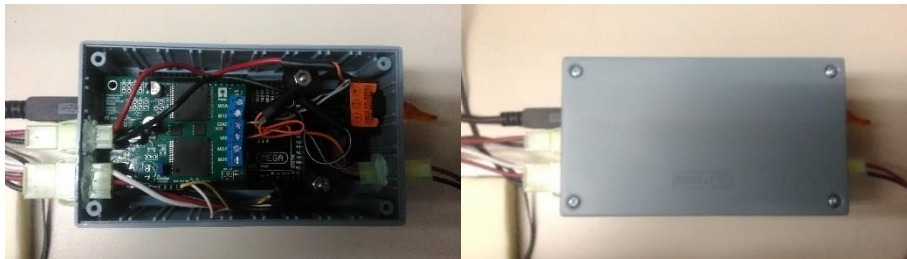


Figura 32. Tarjetas dentro de su compartimiento.

Se realizaron pruebas del sistema de control con el motor montado y funcionando, esto se ejecutó sin el disco de corte como se muestra en la Figura 33 sin mostrar cambios diferentes de los obtenidos con las pesas.

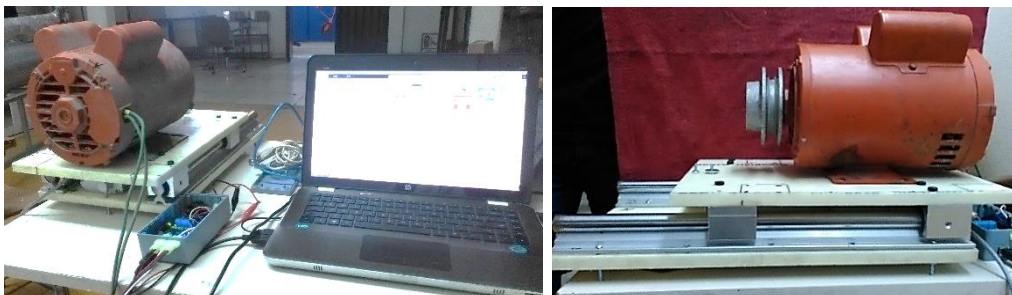


Figura 33. Mecanismo de ajuste con el motor de disco de corte montado.

La base para el mecanismo de ajuste se construyó en PTR de una pulgada, las barras que sostienen a esta base se construyeron de modo ajustable para colocarse en la parte central o extrema de la base. También se construyeron los soportes para dichas barras en placa de $\frac{1}{4}$ " (Figura 34).

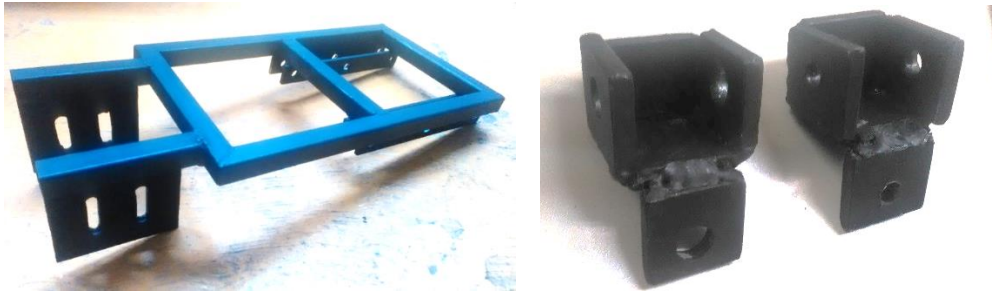


Figura 34. Soporte del sistema de ajuste automático de corte y bases para apoyarla

La parte que soportaba las chumaceras del eje del disco de corte se cortó hasta una altura de 10 cm, altura suficiente para nivelar el soporte con la base y el motor a la misma altura a la que se efectúa el corte. El soporte se empotró a la máquina con tornillería estándar (Figura 35).



Figura 35. Soporte empotrado a la máquina cortadora de mazorcas.

Sobre el soporte se atornillaron los carriles de aluminio nivelando y calibrando para lograr perpendicularidad entre ellas. Sobre estas se colocan las chumaceras lineales (Figura 36).



Figura 36. Soporte con los carriles y chumaceras lineales.

Entre la placa de nylamind (que soporta el motor y los demás aditamentos) y el mismo soporte, se colocó el actuador lineal. La placa de nylamind de soporte se colocó sobre de esta para atornillarse a su vez a las chumaceras lineales según las especificaciones de diseño (Figura 37).

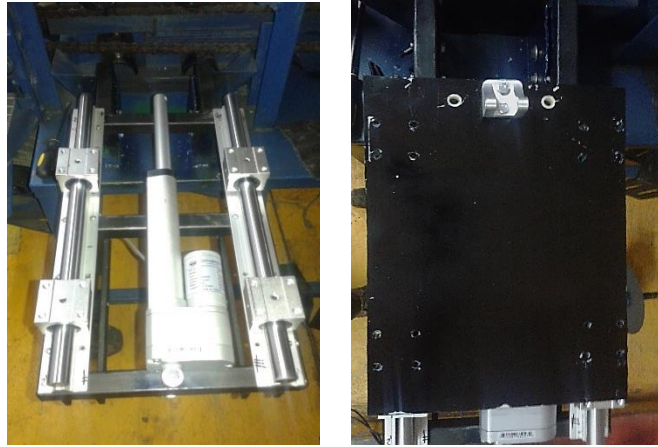


Figura 37. Posición del actuador entre el soporte y la base de nylamind.

El actuador lineal se atornilló con dos tuercas de calibración que ajustan la nivelación del LD3 y garantizan que este se encuentra perpendicular al suelo y a la base de nylamind (Figura 38).

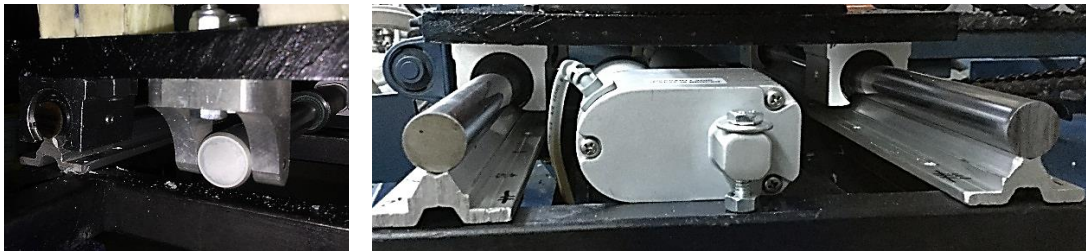


Figura 38. Unión en el embolo del actuador y base.

El soporte se empotró al chasis de la máquina mediante tornillos y se colocaron las barras soporte en la parte final, dado que ahí se produce la menor deformación (Figura 39).

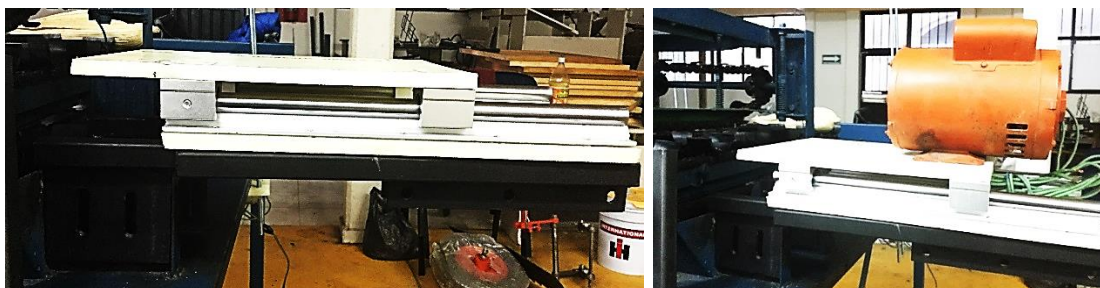


Figura 39. Soporte empotrado a la máquina y ubicación del motor del disco de corte.

Las barras de apoyo se acoplaron al chasis con los soportes construidos como se muestra en la Figura 40



Figura 40. Barras a apoyo colocadas y acopladas al chasis con soportes cuadrados.

El soporte para la webcam se construyó con varillas roscadas de $\frac{1}{2}$ y placa de nylamind para las sujeciones (Figura 41).



Figura 41. Vista lateral del sistema de corte y visión artificial.

Para colocar el eje del disco cortador al motor se construyó un cople reductor en acero 1014 y se prescindíó del uso de una de las chumaceras (Figura 42). El empotramiento se realizó con la ayuda de cuñas y tornillos opresores (Figura 43).



Figura 42. Eje del disco de corte, chumaceras y unión de acero.



Figura 43. Empotramiento del eje del disco con el motor.

La máquina deshojadora de mazorcas cuenta con un recuadro donde se soportan los engranajes de la banda que oprime a las mazorcas al pasar por la zona de corte. Esta estructura permite sostener las mazorcas firmemente y evitar un mal corte. Además, sirve de sistema de seguridad al evitar que el disco, en caso de fallo, salga disparado. Para efectos de movimiento del sistema de control, fue necesario cortar esta estructura por una de sus aristas (Figura 44).

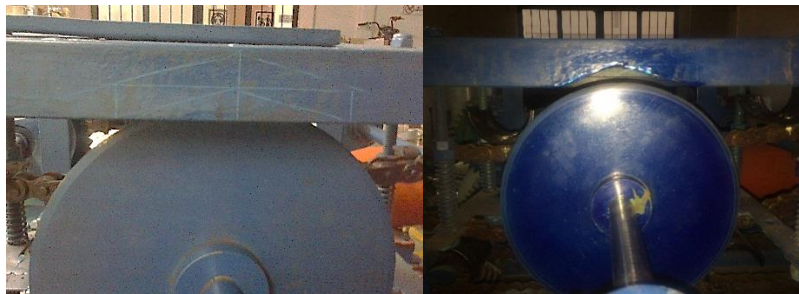


Figura 44. Zona cortada en la máquina cortadora de mazorcas para permitir el movimiento del sistema de control.

El motor se empotró a la bancada de tal modo que el disco de corte estuviera a una distancia aproximadamente de 1mm de la línea de trayectoria de la banda transportadora (Figura 45). Esto para tener un rango de ajuste mayor.



Figura 45. Posición del disco de corte respecto a la banda transportadora.

Finalmente, el sistema de control automático se construyó como se muestra en la Figura 46.



Figura 46. Sistema de control ensamblado completamente.

De este modo es posible realizar cortes sin el sistema de control; con el disco posicionado a la distancia mínima, es decir, con el actuador completamente extendido. Al llevar a cabo pruebas de corte se generó un fallo muy peligroso, el desprendimiento del disco de corte. Al realizar la revisión de las partes involucradas en el fallo se encontró que la pieza de sujeción entre el disco de acero 1014 y el eje del mismo material estaba construida en nylamind. Esta pieza al ser sometida a esfuerzos cedió la cuerda que contenía y chocó con la banda transportadora (Figura 47).



a)



b)



c)



d)

Figura 47. Fallos en el dispositivo, a) unión de nylamind barrida, b) eje pandeado, c) mazorca cortada incorrectamente y d) mazorca completamente dañada por el corte irregular.

Este hecho tuvo como consecuencia que el eje sufrió un pandeo considerable. Al cambiar la pieza de sujeción de plástico por una tuerca de acero se notó que el pandeo producido al eje generaba demasiadas vibraciones, hasta el punto de mover a las mazorcas de su lugar en la banda transportadora. Por ello se manufacturó otro árbol con las mismas dimensiones y material obteniendo finalmente el mecanismo como se muestra en la Figura 48.



Figura 48. Vista lateral del sistema de corte con control automático de posición con visión artificial.

3. Análisis estadístico

Para poder utilizar visión artificial en el corte de las mazorcas se necesitaba saber la distancia óptima del corte de las mazorcas, para ello se realizó el experimento de registrar las medidas de tres muestras de mazorcas, para poder analizarlas y determinar si existe una correlación entre sus parámetros geométricos.

3.1 Análisis estadístico de una muestra de la variedad Murano

El experimento se realizó durante el mes de noviembre de 2014, con una muestra de 50 mazorcas de maíz blanco de la variedad Murano (Figura 49), procedentes del estado de Morelos. Las mediciones se llevaron a cabo con un Vernier digital marca Truper® con una tolerancia de $\pm 0.05\text{mm}$ y una cinta métrica Pretul® con una tolerancia de $\pm 0.1\text{mm}$, en el laboratorio de metrología del Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo.



Figura 49. Mazorcas de la variedad Murano

Las dimensiones geométricas seleccionadas para utilizarse posteriormente como parámetros en el estudio se midieron en una sola vista superior (Figura 50). Se determinó la longitud total de cada mazorca (l_t), el diámetro mayor (dm) y la longitud de la base a esta (l_{bdm}). El diámetro de corte óptimo (do) se determinó cortando transversalmente a partir de 5 cm desde la base, cada 5 mm hasta notar que el pedúnculo se cortara completamente. Una vez terminado los cortes, se midió el diámetro de corte óptimo (do); finalmente, para obtener la longitud de la base al diámetro de corte óptimo (l_{bco}) se restó de l_t la longitud sobrante (Figura 50).

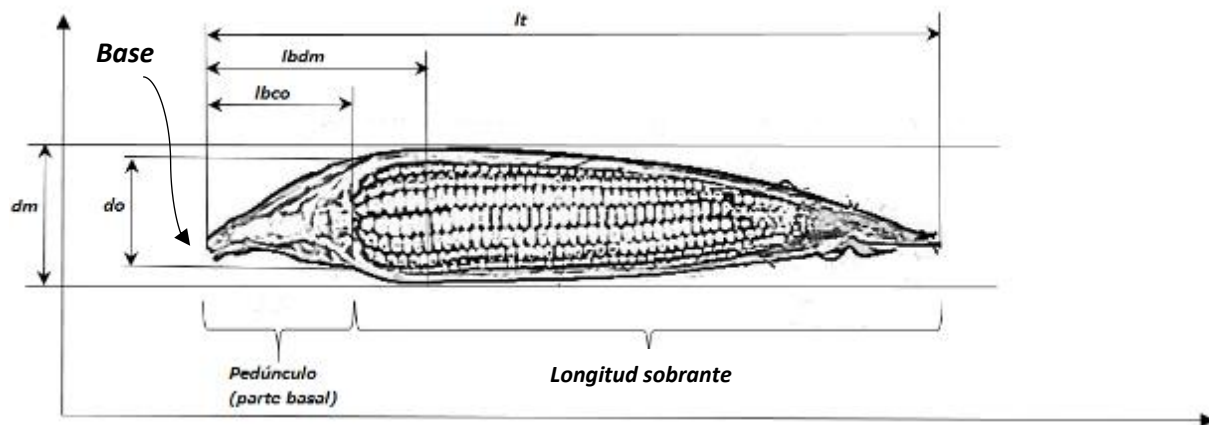


Figura 50. Parámetros geométricos medidos.

Con el módulo de pruebas de estadística del paquete Microsoft Excel versión 2013 se realizó el análisis estadístico para encontrar una posible relación significativa entre las variables a considerar.

Se utilizaron el coeficiente de correlación de Pearson (r), y se estableció que para que la correlación fuese significativa, esta debía cumplir la siguiente condición: $r \geq 0.90$. Se efectuaron diez combinaciones de dos variables con cinco parámetros.

Se hizo un análisis de varianza para determinar la existencia de un grado de correlación entre las variables de las combinaciones seleccionadas (Infante & Zárate de Lara, 1984), para probar la siguiente hipótesis $H_0: \beta_0 = 0$ contra $H_a: \beta_0 \neq 0$, donde β_0 es la pendiente de la regresión del posible modelo matemático. Se seleccionó un nivel de confianza $\alpha = 0.05$.

De la combinación elegida se buscó un modelo de matemático que relacionara estos dos parámetros, a través de una regresión lineal, exponencial, logarítmica, potencial y polinómica de segundo y tercer grado. Se evaluó cada modelo calculando el coeficiente de determinación y se eligió el más adecuado en base en su grado de correlación y su sencillez para poder ser programada y usarse en un software de visión artificial. Se valoró la ecuación obtenida a través del cálculo del error absoluto.

Después se realizaron diez combinaciones de tres variables con cinco parámetros y se calcularon los coeficientes correlación múltiple (R) y el coeficiente de determinación (R^2). Se estableció que para una correlación significativa se debía cumplir la siguiente condición, $R \geq 0.90$. Se llevó a cabo un análisis de varianza de las variables cuyas combinaciones cumplieron la condición antes mencionada, para probar la hipótesis $H_0: \beta_0 = \beta_1 = \beta_2 \dots \beta_n = 0$ contra $H_a: \beta_0 = \beta_1 = \beta_2 \dots \beta_n \neq 0$ donde $\beta_0 = \beta_1 = \beta_2 \dots \beta_n$ son las pendientes de la regresión del modelo matemático que se busca. Para las combinaciones que cumplieron este criterio se buscó relacionarlas mediante una regresión lineal. De los coeficientes obtenidos se establecieron los modelos lineales. El cálculo del error absoluto entre ambas ecuaciones y la sencillez del modelo para uso en aplicaciones agrícolas fueron los puntos a tomar en cuenta para elegir la mejor igualdad.

El procedimiento usado para combinar cinco parámetros de tres variables se repitió para cuatro y cinco variables.

3.2 Análisis estadístico de una muestra de la variedad Argentino Blanco.

Con una muestra de 32 mazorcas de maíz procedentes del ejido Pueblillo del municipio de Papantla, Veracruz (Figura 51), se llevaron a cabo mediciones con un Vernier digital marca Truper® con una tolerancia de $\pm 0.05\text{mm}$ y una cinta métrica Pretul® con una tolerancia de $\pm 0.1\text{mm}$. Se siguió la metodología anterior, pero considerando que la variable de interés do necesita de la variable de interés lbco para ser determinada, a partir de este momento se obvió. Teniendo en cuenta sólo una variable de interés, se llevó a cabo el posterior análisis estadístico con la metodología anterior. Para este caso se consideró que la variedad criolla que presenta una varianza mucho mayor que una variedad híbrida, se consideró que el coeficiente de correlación de Pearson y el coeficiente de correlación múltiple debía satisfacer que $r, R \geq 0.65$.



Figura 51. Mazorcas de la variedad Argentino Blanco

3.3 Análisis estadístico de una muestra de la variedad Arroz

De una muestra de 103 mazorcas de maíz (Figura 52), comúnmente llamadas “hojeras”, recolectadas de manera aleatoria con un productor del ejido de Primero de Mayo del municipio de Papantla, Veracruz, que son usadas principalmente para la extracción y venta de hojas se midieron los parámetros de lbdm, lbco, dm y lt. Cada mazorca fue marcada con un número para su identificación y se tomó registro fotográfico de cada una de ellas. El registro fotográfico se realizó sobre un área color rojo con una cámara Fujifilm® de 12MP colocada de manera paralela al área de captura.



Figura 52. Muestra de cien mazorcas variedad Arroz

Para medir el parámetro DM se usó un calibrador de alturas marca MITUTOYO con escala milimétrica de 300 mm con una precisión de $\pm 0.05\text{mm}$. Esta se determinó haciendo pasar la mazorca sobre una base fija paralela a la base del calibrador y midiendo el punto más alto. Una vez localizado el punto más alto se midió el parámetro LBDM con un Vernier Trupper®. Este proceso se realizó 3 veces para cada mazorca con el fin de tener un promedio de la medida más confiable.

El parámetro Lt se midió con una cinta métrica marca Trupper® y se registró. La medida de lbco se realizó cortando cada mazorca por la base para visualizar el pedúnculo (Figura 53) para posteriormente medirla con el Vernier y registrar.



Figura 53. Corte longitudinal de una mazorca

Se realizó un procesamiento de cada imagen con el software Visual C 2010 y OpenCV 249 para determinar el área en píxeles que contenía. De este análisis se incluyó el área como un parámetro a evaluar en el análisis estadístico con la variable A. Una vez determinado el área se localizó el centroide mediante la rutina Moment de OpenCV, luego aplicada una rutina modificada del comando findContours, se encerró en un rectángulo cada mazorca, de este rectángulo se programó la localización del punto medio del lado tangente a la base, a partir del cual se determinó la variable de la distancia de la base al centroide (lbc) (Figura 54).

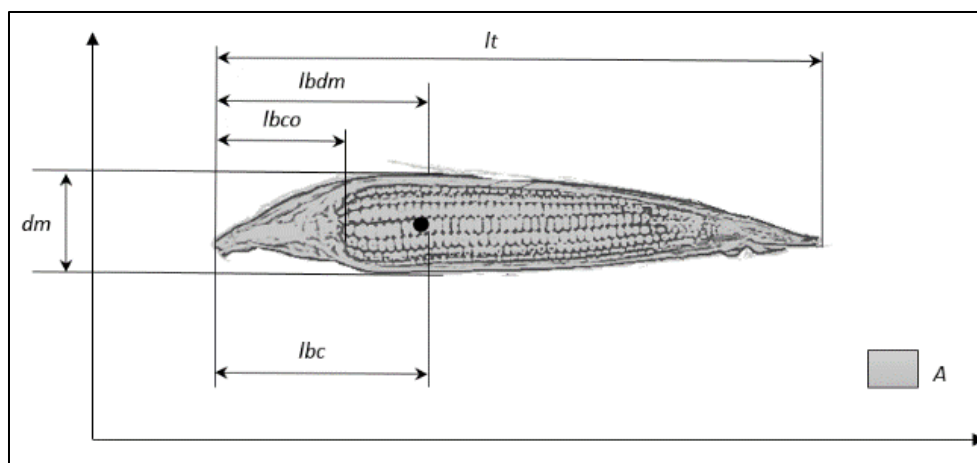


Figura 54. Parámetros geométricos medidos en mazorcas de la variedad Arroz.

Se determinó r para las combinaciones de los parámetros conservando la variable de interés $lbco$ teniendo de ese modo cinco combinaciones de dos variables con cinco parámetros. Se estableció que para que un valor fuese significativo debía cumplir la condición $r \geq 0.65$.

Las combinaciones para tres, cuatro, cinco y seis variables se realizaron siguiendo el método descrito para la variedad Murano aplicando un criterio de selección del coeficiente de correlación múltiple $R \geq 0.65$. El cálculo del error absoluto entre las ecuaciones y la sencillez del modelo para uso en aplicaciones agrícolas fueron los puntos a tomar en cuenta para elegir la mejor igualdad.

3.4 Resultados de las pruebas estadísticas

El experimento tuvo como longitud total de la mazorca una mínima de 30 cm, una máxima de 41.5 cm, una media de 35.38 cm, mientras Cruz-Meza et al. (2010) reportan en sus pruebas longitudes máximas de 31.6 cm, y la máquina señalada trabaja con mazorcas con un mínimo en longitud de 16 cm.

De las diez combinaciones de dos variables, $lbco$ se relacionó positivamente con la variable $lbdm$ con una correlación de 0,91 (Cuadro 7) lo que indica que existe una fuerte relación entre estos dos parámetros.

Cuadro 7. Coeficiente de correlación de Pearson (r) para dos parámetros.

Parámetros			r	Parámetros			r
do	dm	0.537 [¶]		do	lbco	0.021 [¶]	
do	lbdm	-0.125 [¶]		lbco	lt	0.666 [¶]	
lbco	dm	-0.043 [¶]		dm	lbdm	-0.049 [¶]	
lbco	lbdm	0.905		dm	lt	0.150 [¶]	
do	lt	0.203 [¶]		lbdm	lt	0.600 [¶]	

[¶]Correlación no significativa.

De los parámetros de la combinación indicada se probó que existe una pendiente distinta de cero del modelo buscado. Para esto se realizó un análisis de varianza (Cuadro 8) teniendo en cuenta el valor de $F_{n, 0.05}^m$ (Infante & Zárate de Lara, 1984), el estadístico $F = 216.39$ se comparó contra $F_{1, 0.05}^{48} = 4.04$. Como: $F > F_n^m$ se prueba que existe al menos un grado de correlación entre las variables.

Cuadro 8. Resumen del análisis de varianza de la combinación lbco-lbdm.

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F
Regresión	1	196.36	196.35	216.39
Residuos	48	43.55	0.91	
Total	49	239.91		

En esta prueba se encontró relación entre el sistema fruto-pedúnculo de una mazorca, de manera semejante Mayans Céspedes et al. (2016) determinó que las dimensiones geométricas del mango influyen sobre el sistema fruto-pedicelo. Mediante una regresión lineal se ajustaron los datos una curva (Figura 55) cuya ecuación que se utilizara posteriormente para encontrar la distancia óptima de corte:

$$lbco = A_1 + B_1 * lbdm \quad (3.1)$$

donde $A_1 = 0.8738$, $B_1 = -0.2384$.

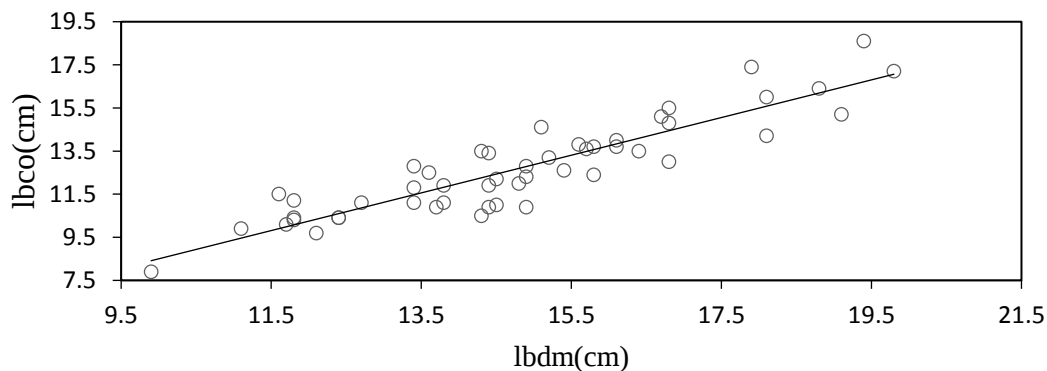


Figura 55. Datos experimentales y línea de regresión.

Al evaluar la ecuación (3.1) se obtuvo un error absoluto $\epsilon_1 = 0.737$ cm. Para la composición con tres variables se realizaron diez combinaciones entre cinco variables obteniendo sus coeficientes de correlación múltiple y coeficiente de determinación (Cuadro 9).

Cuadro 9. Coeficiente de correlación múltiple (R) y Coeficiente de determinación (R²) entre cinco diferentes combinaciones con tres parámetros.

Parámetros			R	R ²	Parámetros			R	R ²
do	lt	lbco	0.254 [¶]	0.064	lbco	dm	lt	0.681 [¶]	0.464
lbco	lt	do	0.676 [¶]	0.457	do	dm	lbdm	0.545 [¶]	0.297
do	lt	lbdm	0.369 [¶]	0.136	lbco	dm	do	0.067 [¶]	0.004
lbco	lbdm	lt	0.917	0.842	do	dm	lt	0.550 [¶]	0.303
do	dm	lbco	0.538 [¶]	0.289	lbco	dm	lbdm	0.904	0.818

[¶]Correlación no significativa.

Al analizar el Cuadro 9 se nota que las combinaciones lbco-lbdlm-lt y lbco-dm-lbdlm tienen un coeficiente de correlación mayor a 0.90, por lo que se comprobó la existencia de un modelo mediante un análisis de varianza para cada una.

De la primera combinación se obtuvo el estadístico F=125.27 (Cuadro 10) que se comparó con $F_{2, 0.05}^{48} = 3.19$. Como: $125.27 > 3.19$ se concluye que existe un grado de correlación entre las variables ensayadas.

Cuadro 10. Resumen del Análisis de varianza de la combinación lbco-lbdlm-lt.

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F
Regresión	2	202.0	101.0	125.27
Residuos	47	37.89	0.81	
Total	49	239.90		

Al analizar los datos de la combinación lbco-dm-lbdlm, se observa en el Cuadro 11 que $F=105.94$. Dado que $105.9 > F_{1, 0.05}^{48}$ existe evidencia experimental de que hay un grado de correlación entre los parámetros.

Cuadro 11. Resumen del Análisis de varianza de la combinación lbco-dm-lbdlm.

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F
Regresión	2	196.35	98.18	105.94
Residuos	47	43.55	0.93	
Total	49	239.91		

La regresión lineal se llevó a cabo para ambas composiciones y se ajustó cada superficie a los datos (Figura 56). De los coeficientes obtenidos por esta se establecieron dos modelos que se evaluaron mediante el análisis del error absoluto:

$$lbco = A_2 + B_2 * lbdlm + C_2 * lt \quad (3.2)$$

donde $A_2=-4.1894$, $B_2=0.7624$, $C_2=0.1582$.

$$lbco = A_3 + B_3 * lbdm + C_3 * dm \quad (3.3)$$

donde $A_3=-0.3329$, $B_3=0.8739$, $C_3=0.0014$.

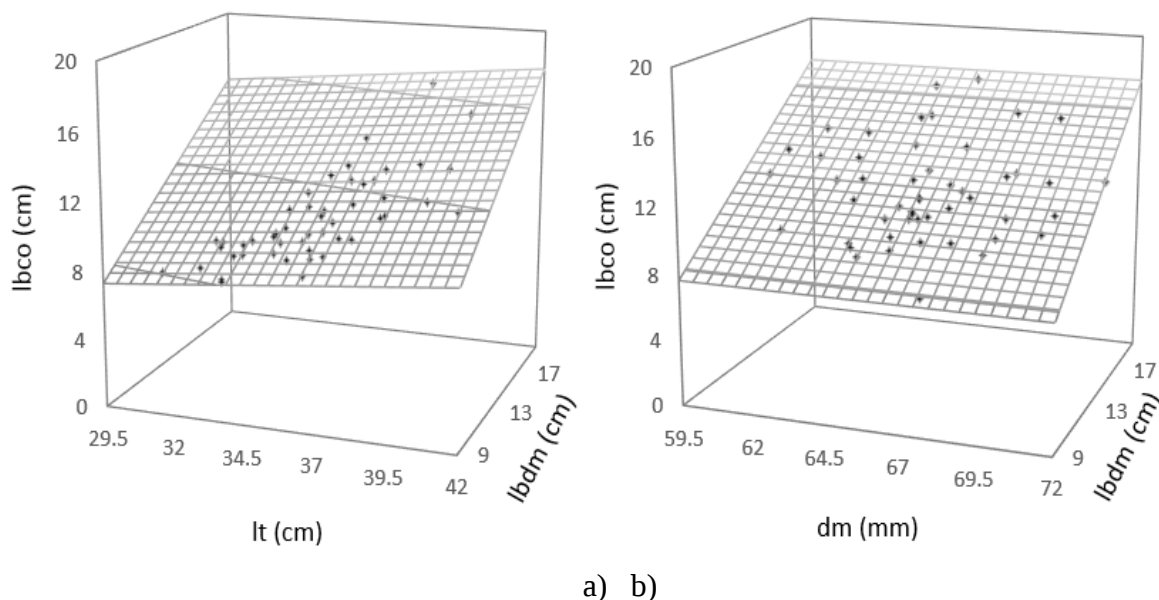


Figura 56. Datos experimentales y superficie de ajuste de la relación a) lbco-lbdlm-lt, y b) lbco-lbdlm-dm.

Al evaluar las ecuaciones se obtuvo para (3.2) un error absoluto $\epsilon_2=0.691$ cm, y para la ecuación (3.3) $\epsilon_3=0.737$ cm. Dado que la ecuación (3.2) tiene un coeficiente de correlación más alto, es comprensible que tenga un error absoluto menor que la ecuación (3.3). Para calcular la variable lbdm en la ecuación (3.2) es necesario encontrar primero dm, teniendo entonces tres variables a medir para calcular lbco, mientras que (3.3) requiere sólo de dos.

Se procedió a buscar una correlación entre 4 y 5 variables, pero se nota que no existe una correlación que supera los 0.90 (Cuadro 12 y Cuadro 13), por lo que no se llevó a cabo la regresión múltiple ni el análisis de varianza.

Cuadro 12. Coeficiente de correlación múltiple (R) y Coeficiente de determinación (R^2) entre cinco combinaciones con cinco parámetros.

Parámetros				R	R^2
dm	lbdm	lbco	do	0.358 [¶]	0.128
dm	lbdm	lbco	lt	0.331 [¶]	0.120
dm	lbdm	do	lt	0.329 [¶]	0.108
dm	lbco	do	lt	0.234 [¶]	0.055
lbdm	lbco	do	lt	0.334 [¶]	0.111

[¶]Correlación no significativa.

Cuadro 13. Coeficiente de correlación múltiple (R) y Coeficiente de determinación (R²) entre cinco parámetros.

Parámetros					R	R ²
dm	lbdm	lbco	do	lt	0.360 [¶]	0.130

[¶]Correlación no significativa.

Para la variedad Argentino Blanco se obtuvieron los coeficientes e correlación de Pearson presentados en el Cuadro 14 donde nota que no existen relaciones significativas.

Cuadro 14. Coeficiente de correlación de Pearson (r) para dos parámetros.

Parámetros		r
lbdm	lbco	0.071 ^b
lt	lbco	0.088 ^b
dm	lbco	0.372 ^b

^b Correlación no significativa

Se calculó el coeficiente correlación múltiple para tres combinaciones con tres parámetros y una para cuatro parámetros (Cuadro 15 y Cuadro 16) pero se observa que tampoco existe correlación significativa entre las composiciones. Esto podría deberse a la poca cantidad de muestras que no es suficiente para que los datos tiendan a una distribución normal.

Cuadro 15. Coeficiente de correlación múltiple (R) y Coeficiente de determinación (R²) entre tres parámetros.

Parámetros			R
lt	dm	lbco	0.380 ^b
dm	lbdm	lbco	0.375 ^b
lt	lbdm	lbco	0.107 ^b

^b Correlación no significativa

Cuadro 16. Coeficiente de correlación múltiple (R) y Coeficiente de determinación (R²) entre cuatro parámetros.

Parámetros				R
lt	dm	lbdm	lbco	0.380 ^b

^b Correlación no significativa

Los datos obtenidos manualmente de la muestra de 103 mazorcas se tabularon en el Cuadro A.3; el registro fotográfico y el posterior procesamiento de las imágenes permitió la binarización de las imágenes extrayendo el color propio de las mazorcas convirtiéndolos en píxeles negros, el

conteo de ellos determina el área de la mazorca (Figura 57) integrándose como un dato estadístico más.



Figura 57. Procesamiento de Mazorcas en OpenCV para determinar el área en pixeles negros.

La variable lbc (Figura 58) se midió en pixeles y se registró en el Cuadro A.4. El valor de A y lbc se calcularon considerando un tamaño de pixel de 0.0000296 m determinado por la precisión de la cámara, pero se manejaron en pixeles por comodidad.

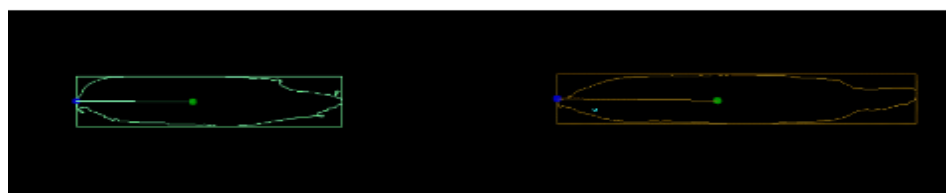


Figura 58. Determinación de la distancia de la base al centroide de una mazorca de maíz en OpenCV.

Los valores medidos en pixeles presentan un error de ± 30 pixeles por imagen procesada generado por el ruido presente en cada toma fotográfica. En el Cuadro A.5 se nota que el largo máximo de esta variedad es similar a la de la variedad Murano, pero esta tiene una varianza mayor, esto se debe a que la variedad Arroz es criolla mientras que la primera es híbrida. Esta variabilidad prevé una correlación menor entre las variables. Además, esta tiene una varianza de lbco de 1.6 cm, comparada con los 4.9 cm de la muestra híbrida, la muestra criolla podría generar un algoritmo que no necesite un gran ajuste, por lo que se debe considerar para el diseño de máquinas deshojadoras de mazorcas.

Al observar los datos de correlación del coeficiente de Pearson (Cuadro 17) y el coeficiente de correlación múltiple para tres parámetros (Cuadro 18) se nota que no existe una correspondencia significativa. Se nota que los coeficientes más altos son aquellos donde la variable lbdm aparece.

Cuadro 17. Coeficiente de correlación de Pearson (r) para dos parámetros.

Parámetros		r	r ²
lbco	lt	0.380 ^b	0.144
lbco	dm	0.286 ^b	0.082
lbco	lbdm	0.610 ^b	0.373
lbco	A	0.371 ^b	0.138
lbco	lbc	0.433 ^b	0.187

^b Correlación no significativa

Cuadro 18. Coeficiente de correlación múltiple (R) y Coeficiente de determinación (R²) entre diez diferentes combinaciones con tres parámetros.

Parámetros			R	R ²	Parámetros			R	R ²
lbco	dm	lbdm	0.635 ^p	0.403	lbco	dm	lbdm	0.635 ^p	0.403
lbco	lt	A	0.407 ^p	0.166	lbco	lt	A	0.407 ^p	0.166
lbco	lbdm	A	0.624 ^p	0.389	lbco	lbdm	A	0.624 ^p	0.389
lbco	dm	A	0.374 ^p	0.140	lbco	dm	A	0.374 ^p	0.140
lbco	dm	lt	0.423 ^p	0.179	lbco	dm	lt	0.423 ^p	0.179
lbco	lbdm	lt	0.616 ^p	0.379	lbco	lbdm	lt	0.616 ^p	0.379
lbco	lt	lbc	0.466 ^p	0.217	lbco	lt	lbc	0.466 ^p	0.217
lbco	dm	lbc	0.474 ^p	0.224	lbco	dm	lbc	0.474 ^p	0.224
lbco	lbdm	lbc	0.641 ^p	0.410	lbco	lbdm	lbc	0.641 ^p	0.410
lbco	lbc	A	0.460 ^p	0.211	lbco	lbc	A	0.460 ^p	0.211

^p Correlación no significativa

En el Cuadro 19 se muestran los valores de los coeficientes de correlación múltiple para cuatro parámetros, de los cuales sólo la combinación lbco, dm, lbdm y lbc cumple la condición de significancia. También es notorio que después de la variable lbco, lbc cuenta con los valores de correlación más altos.

Cuadro 19. Coeficiente de correlación múltiple (R) y Coeficiente de determinación (R²) entre diez diferentes combinaciones con cuatro parámetros.

Parámetros				R	R ²
lbco	dm	lbdm	lt	0.637 ^p	0.406
lbco	dm	lt	A	0.423 ^p	0.179
lbco	lbdm	lt	A	0.624 ^p	0.389
lbco	dm	lbdm	A	0.635 ^p	0.403
lbco	dm	lbdm	lbc	0.657	0.431
lbco	lt	A	lbc	0.471 ^p	0.222
lbco	lbdm	A	lbc	0.642 ^p	0.412
lbco	dm	A	lbc	0.475 ^p	0.225
lbco	dm	lt	lbc	0.493 ^p	0.243
lbco	lbdm	lt	lbc	0.641 ^p	0.410

^p Correlación no significativa

Al realizar el análisis de varianza (Cuadro 20) se comparó el estadístico $F_{3, 0.05}^{102} = 2.69$ con $F=25.05$, dado que $F > F_{3, 0.05}^{102}$ se tiene que existe un grado de correlación entre las variables a lo que se realizó una regresión lineal.

Cuadro 20. Resumen del Análisis de varianza de la combinación lbco-dm-lbldm-lbc.

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F
Regresión	3.00	70.22	23.41	25.05
Residuos	99.00	92.52	0.93	
Total	102.00	162.75		

De la regresión lineal múltiple se obtuvo la siguiente ecuación:

$$lbco = A_4 + B_4 * dm + C_4 * lbldm + D_4 * lbc \quad (3.4)$$

donde $A_4 = -1.92$, $B_4 = 0.03$, $C_4 = 0.03$ y $D_4 = 0.01$.

Esta ecuación se evaluó y obtuvo $E_4 = 0.755$ cm que comparada con la ecuación (3.3) tiene una diferencia de 0.018 cm en el error absoluto evaluado. Para la combinación de cinco parámetros dos composiciones tienen un coeficiente de correlación múltiple mayor a 0.65, por lo que ambas se analizaron mediante el análisis de varianza (Cuadro 21).

Cuadro 21. Coeficiente de correlación múltiple (R) y Coeficiente de determinación (R^2) entre cuatro diferentes combinaciones con cinco parámetros.

Parámetros					R	R^2
lbco	dm	lbldm	lt	A	0.637 ^b	0.406
lbco	dm	lbldm	lt	lbc	0.657	0.432
lbco	dm	lt	A	lbc	0.499 ^b	0.249
lbco	lbldm	lt	A	lbc	0.643 ^b	0.413
lbco	dm	lbldm	A	lbc	0.662	0.438

^b Correlación no significativa

Del Cuadro 22 y Cuadro 23 se sabe que $F > F_{4, 0.05}^{102} = 2.46$, comprobando la existencia de una correlación significativa entre los parámetros, de modo que se realizó una regresión múltiple para cada combinación.

Cuadro 22. Resumen del Análisis de varianza de la combinación lbco-dm-lbldm-lt-lbc.

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F
Regresión	4.00	71.22	17.80	19.06
Residuos	98.00	91.53	0.93	
Total	102.00	162.75		

Cuadro 23. Resumen del Análisis de varianza de la combinación lbco-dm-lbldm-A-lbc.

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F
Regresión	4.00	70.34	17.58	18.65
Residuos	98.00	92.41	0.94	
Total	102.00	162.75		

De la regresión lineal múltiple se obtuvieron las siguientes ecuaciones:

$$lbco = A_5 + B_5 * dm + C_5 * lbdm + D_5 * A + E_5 * lbc \quad (3.5)$$

donde $A_5=-2.32$, $B_5=0.05$, $C_5=0.03$, $D_5=0.00$ y $E_5=0.01$.

$$lbco = A_6 + B_6 * dm + C_6 * lbdm + D_6 * lt + E_6 * lbc \quad (3.6)$$

donde $A_6=-1.74$, $B_6=0.03$, $C_6=0.03$, $D_6=-0.01$ y $E_6=0.01$.

Al evaluar las igualdades se encontró para (3.5) un error $\epsilon_5=0.761$, para la ecuación (3.6) un error $\epsilon_6=0.759$. En el Cuadro 24 se observa que la combinación de seis parámetros también cumple la condición, a lo que se llevó a cabo el análisis de varianza. Esta combinación presenta además el valor más alto de correlación múltiple.

Cuadro 24. Coeficiente de correlación múltiple (R) y coeficiente de determinación (R²) con seis parámetros.

Parámetros						R	R ²
lbco	dm	lbdm	lt	A	lbc	0.662	0.438

Se comparó el estadístico $F_{5, 0.05}^{102} = 2.3$, con F del Cuadro 25, evidenciando que $F > F_{5, 0.05}^{102}$, así que se prosiguió a realizar la regresión lineal.

Cuadro 25. Resumen del Análisis de varianza de la combinación lbco-dm-lbdm-lt-A-lbc.

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F
Regresión	5.00	71.32	14.26	15.13
Residuos	97.00	91.42	0.94	
Total	102.00	162.75		

Se obtuvo la siguiente ecuación, que una vez evaluada se valoró el error $\epsilon_7=0.757$, que es mayor que el error de la ecuación (3.6).

$$lbco = A_7 + B_7 * dm + C_7 * lbdm + D_7 * lt + E_7 * A + F_7 * lbc \quad (3.7)$$

donde $A_7=-2.62$, $B_7=0.05$, $C_7=0.03$, $D_7=0.02$, $E_7=0.00$ y $F_7=0.01$.

Aunque la variedad Murano presentó los valores más altos de correlación, su uso para comercio de hojas es mínimo, en las zonas productoras de maíz para hoja, se cultivan variedades criollas con un alto índice de variabilidad en su tamaño. Esta particularidad hace que la ecuación (3.4) sea

la más conveniente para usarse en un entorno de programación considerando que el error absoluto en la distancia de corte es de menos de 8 mm en todas las ecuaciones.

Finalmente, el análisis de los parámetros geométricos, involucrando tres nuevas variables, diámetro del corte óptimo, longitud de la base al corte óptimo y longitud de la base al diámetro mayor demostró que existe una relación entre los parámetros medidos de las mazorcas que permite determinar la longitud de la base al diámetro de corte óptimo mediante un modelo matemático. Se desarrollaron los algoritmos para calcular dos parámetros más a considerar en el análisis, área y longitud de la base al centroide, mediante el uso del software OpenCV. Estos valores permitieron establecer que la distancia de la base al corte óptimo puede determinarse mediante un modelo que este intimamente ligado con las variables longitud de la base al diámetro mayor y longitud de la base al centroide.

A partir de los datos experimentales se establecieron tres modelos lineales para calcular la longitud de la base al diámetro de corte óptimo en una variedad híbrida uniforme de maíz de la variedad Murano. El primer modelo necesita un parámetro, la longitud de la base al diámetro mayor. Los siguientes modelos requieren, a parte del anterior, otro parámetro, la longitud total y el diámetro mayor cada una respectivamente.

También se generaron cuatro modelos para determinar la longitud de la base al diámetro de corte óptimo en una variedad criolla de maíz Arroz. El primero involucrando la longitud de la base al diámetro mayor, la distancia de la base al centroide y el diámetro mayor, el segundo implicando también el área, y el tercero en vez de esta la longitud total. La cuarta ecuación incluye todas las anteriores variables.

Es posible usar estos modelos para calcular la longitud de corte idónea en mazorcas de maíz de la variedad Murano y Arroz. Los modelos pueden programarse para un sistema de visión artificial que mejore el proceso de corte de mazorcas en maquinaria con este propósito, obteniendo hojas de mayor longitud. Dado que la productividad de una máquina deshojadora de mazorcas para tamal es nueve veces superior a la manual, el aplicar estas ecuaciones en un sistema de control automático para mejorar dicha maquinaria, incrementaría la eficiencia de la cosecha obteniendo mejores resultados en calidad de hojas y un menor desperdicio de grano.

4. Sistema de control de posicionamiento del disco de corte

El mecanismo del ajustador se diseña como un sólido cuyo centro de gravedad se mueve de igual manera que el mecanismo por lo que su localización indica la posición del mecanismo en el tiempo se muestra en la Figura 59. El modelo dinámico se plantea como un sistema con un sólo grado de libertad en el plano horizontal, por ello no se incluye en la ecuación del modelo dinámico el efecto de la gravedad generado por el peso del mecanismo $W = mg$ y la fuerza normal N , a esta. Además, la fuerza de fricción $f(q, F)$ es mínima por lo que se omite.

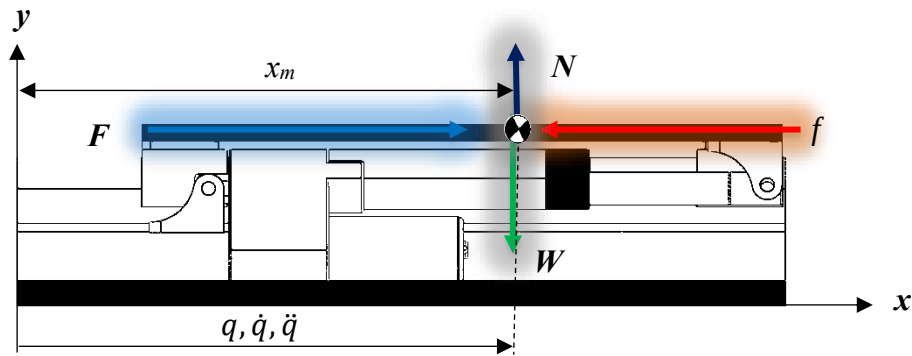


Figura 59. Posición del actuador respecto al eje x.

4.1 Determinación del modelo dinámico del sistema mediante el método de Euler-Lagrange

Para facilitar la manipulación de las ecuaciones de control y su posterior uso en lenguajes de programación se establecen las variables de estado (Kelly & Santibañez, 2003), en función de una posición real q y una posición deseada q_d que será un valor constante y definirá el error de posición $\tilde{q}$:

$$X1 = \tilde{q} = q_d - q \quad (4.1)$$

$$\dot{X1} = \dot{\tilde{q}} = -\dot{q} \quad (4.2)$$

$$X2 = \dot{q} \quad (4.3)$$

$$\dot{X2} = \ddot{q} \quad (4.4)$$

Donde X_1 representa el error de posición y X_2 es la velocidad de ajuste del disco de corte. Mediante el método de Euler-Lagrange se establece la ecuación que rige el sistema (Sánchez, 2004). Para ello se aplicaron los siguientes pasos.

4.1.1 Cálculo de la cinemática directa.

En este paso se buscan las coordenadas del centro de masa en el plano (x, y), a través del análisis de la Figura 59 se tiene que:

$$x = q \quad (4.5)$$

4.1.2 Cálculo de los vectores de velocidad.

Esta etapa consiste en obtener el vector de velocidad derivando el vector de posición de la siguiente manera:

$$v = \frac{dx}{dt} \quad (4.6)$$

4.1.3 Cálculo de la rapidez del sistema de corte con control automático de posición.

Se calcula aplicando la norma del vector $v^2 = IIvII = v^T v$, por lo tanto:

$$v^2 = \dot{q}^2 \quad (4.7)$$

4.1.4 Cálculo de la energía cinética $\kappa(q, \dot{q})$ y potencial $\mathcal{U}(q)$.

La Energía cinética está definida como el trabajo necesario para acelerar un objeto de una masa dada desde su posición de equilibrio hasta una velocidad deseada, definida como:

$$\kappa(q, \dot{q}) = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}I\dot{q}^2 \quad (4.8)$$

Donde m es la masa de la partícula, v es la velocidad, I es el momento de inercia y q es la posición.

La Energía potencial gravitatoria es la energía que el sistema tiene debido a su posición en el espacio, no a su movimiento

$$\mathcal{U}(q) = mgh \quad (4.9)$$

Donde m es la masa, g la gravedad y h la altura en la componente z . Por tanto

$$\kappa(q, \dot{q}) = \frac{1}{2}m\dot{q}^2 \quad (4.10)$$

$$\mathcal{U}(q) = mgq_z \quad (4.11)$$

4.1.5 Obtención del Lagrangiano.

El lagrangiano es la diferencia entre la energía cinética y la energía potencial, es decir:

$$L(q, \dot{q}) = \frac{1}{2}m\dot{q}^2 - mgq_z \quad (4.12)$$

Donde q_z es cero por ser sistema con un sólo grado de libertad, lo que convierte al lagrangiano en:

$$L(q, \dot{q}) = \frac{1}{2} m \dot{q}^2 \quad (4.13)$$

4.1.6 Aplicación de las ecuaciones de movimiento de Euler-Lagrange.

Finalmente se calcula la ecuación dinámica del modelo aplicando la ecuación de movimiento para un manipulador con n grados de libertad dada por:

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial \dot{q}_i} \right] = m \ddot{q} \quad (4.14)$$

El resultado es una ecuación que asemeja a la segunda ley de Newton, donde F es la fuerza ejercida por el actuador lineal.

$$\rightarrow m \ddot{q} = F \quad (4.15)$$

Sustituyendo la ecuación (4.4) en la ecuación (4.15) y despejando $\ddot{X}_2$ se tiene entonces un modelo de la forma:

$$\ddot{X}_2 = m^{-1} F \quad (4.16)$$

4.2 Control de movimiento

La estructura de control es una expresión matemática diseñada para aplicar el torque aplicado en la ecuación dinámica. El modelo matemático servirá para la aplicación de controladores de movimiento o trayectorias y la utilización de los métodos de optimización global para hallar ganancias que permitirán ajustar del comportamiento del sistema.

Este tipo de control denominado control de posición mueve el efector final del sistema de una posición inicial q_0 a una posición deseada q_d , es decir encontrar la fuerza F necesaria para que la posición real tienda a la posición deseada cuando el tiempo tiene al infinito (Sánchez, 2004).

$$\lim_{t \rightarrow \infty} q(t) = q_d \quad (4.17)$$

El controlador PID es un actor principal en el teatro de la automatización. El termino P produce una señal que es proporcional al error entre los valores real y deseado de la variable controlada (temperatura de un fluido, velocidad de un motor eléctrico, posición de la cabeza de lectura de un lector de discos compactos, etc.). Esto genera la compensación básica por control retroalimentado, produciéndose una señal de control cuyo propósito es que la señal al ser controlada se incremente cuando es demasiado baja y que disminuya cuando es demasiado alta. El termino I retroalimenta la integral respecto al tiempo del error. Este término resulta en una señal de corrección muy grande

cuando el error no es cero. El termino derivativo D actúa sobre la derivada respecto al tiempo del error. Esto resulta en una señal correctiva de control tan pronto como el error empieza a crecer o a decrecer, y puede entonces esperarse que esta acción previsoras resulte en una respuesta rápida.

4.2.1 Proporcional P

Este tipo de controlador es el más sencillo que puede emplearse en el control del manipulador (Kelly & Santibáñez, 2003). Su descripción matemática viene dada por:

$$F = K_p X_1 \quad (4.18)$$

Donde K_p es una matriz simétrica definida positiva y seleccionada por el diseñador, denominada ganancia de posición. El vector τ se sustituye por F teniendo en cuenta las dimensiones para K_p [N/cm].

4.2.2 Proporcional Derivativo PD.

Este es una extensión directa del controlador Proporcional cuya ley de control está formada por un término proporcional al error de posición y termino proporcional a la derivada de este. Su ecuación viene dada por:

$$F = K_p X_1 - K_v X_2 \quad (4.19)$$

Las ganancias K_p y K_v son matrices simétricas definidas positivas de diseño denominadas ganancia de posición y ganancia de velocidad (o derivativa) respectivamente, dan a la ecuación igualdad dimensional teniendo las siguientes unidades K_p [N/cm] y K_v [Ns/cm].

El control PD localiza el par o fuerza, que al aplicarse al sistema en una articulación sólo depende de esta articulación y no de las demás (Kelly & Santibáñez, 2003); este hecho permite el uso de ganancias constantes. Además, sólo requiere la medición de la posición q sin necesidad de especificar la velocidad ni aceleración, esta característica se ajusta al sistema de corte de mazorcas adecuadamente pues no se controla la velocidad, sólo la posición.

4.2.3 Proporcional Derivativo PD+ con acciones acotadas

Este tipo de controlador se caracteriza por regir la energía estimada dentro de los límites de saturación del motor, es decir mantiene el par calculado dentro de los límites físicos reales entregados por el actuador (Cebada, 2016). Su estructura se representa como:

$$F = K_p \tanh(X_1) - K_v \tanh(X_2) \quad (4.20)$$

4.2.4 Proporcional Integral Derivativo PID

La introducción de un componente Integral al control PD para intentar llevar a cero el error de posición genera una estructura nueva del siguiente modo:

$$F = K_p X_1 + K_v X_2 + K_i \int X_1 \quad (4.21)$$

Donde las matrices K_p , K_v y K_i llamadas ganancias proporcional, derivativa e integral respectivamente, son simétricas y definidas positivas convenientemente elegidas, que aplicado en el sistema se tiene:

Aunque la mayoría de los manipuladores usan este tipo de controladores, pues su uso está justificado por la evidencia experimental, la sintonización de las ganancias es mucho más complicada (Kelly & Santibáñez, 2003),

4.2.5 Proporcional Integral Derivativo PID con saturación con acciones acotadas

Esta estructura es una consecuencia directa de aplicar el término Integral en el control Proporcional Derivativo PD+ con acciones acotadas, del siguiente modo:

$$F = K_p \tanh(X_1) + K_v \tanh(X_2) + K_i \int \tanh(X_1) \quad (4.22)$$

4.3 Determinación de ganancias

Las ganancias K_p y K_v están determinadas por convencionalismo como (Cebada, et al., 2016) $K_p \leq 0.8(F_{\max})$ y $K_v \leq 0.25 K_p$, donde $F_{\max}$ viene dada como la fuerza neta máxima $F=1200$ N establecida en la hoja de especificaciones del actuador lineal (Pololu, 2016). De este modo se tiene que:

$$K_p = 960 \text{ N/cm} \quad (4.23)$$

$$K_v = 240 \text{ Ns/cm} \quad (4.24)$$

Una manera rápida de probar estas ganancias es sustituir en la ecuación de movimiento del mecanismo y evaluarla en Simulink para valorar su funcionamiento:

► Proporcional P

El control P se sustituye en la ecuación de movimiento del sistema (4.16) teniendo así:

$$\ddot{X}_2 = m^{-1}(K_p X_1) \quad (4.25)$$

Esta ecuación puede representarse en un diagrama de bloques en Simulink, como se muestra en la Figura 60 cuya ganancia K_p es ingresada junto con los demás parámetros de sistema. Al ejecutar esta simulación con una respuesta de escalón para una distancia deseada $q_d = 5$ cm, se obtiene un resultado que se estabiliza 1.44 s. Esto indica que el valor de la ganancia es correcto.

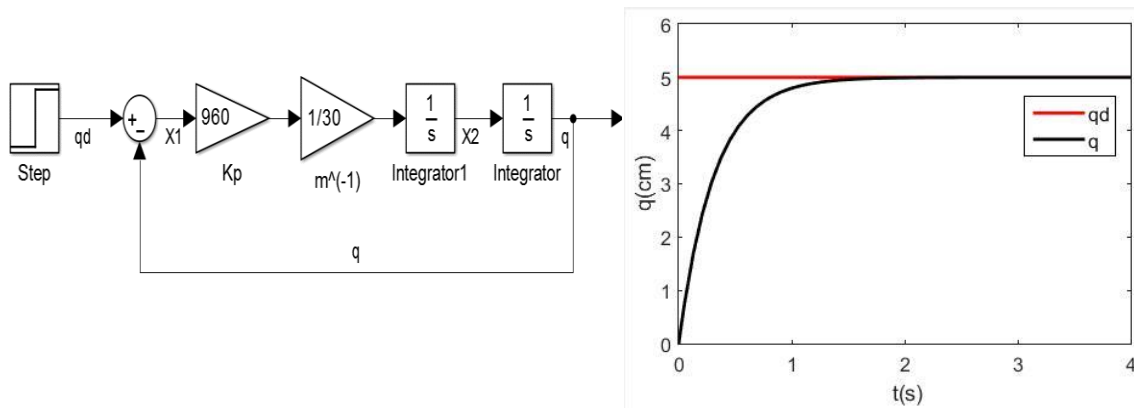


Figura 60. Control proporcional en Simulink.

► Proporcional Derivativo PD

El control PD se sustituye en la ecuación de movimiento del sistema (4.16) teniendo así:

$$\ddot{X}2 = m^{-1}(Kp * X1 - Kv * X2) \quad (4.26)$$

Esta ecuación puede representarse en un diagrama de bloques en Simulink, como se muestra en la Figura 61 cuya ganancia Kp Kv son ingresados junto con los demás parámetros de sistema. Al ejecutar esta simulación con una respuesta de escalón para una distancia deseada $q_d = 5$ cm, se obtiene un resultado que se estabiliza en 0.89 s. Esto indica que el valor de la ganancia es correcto.

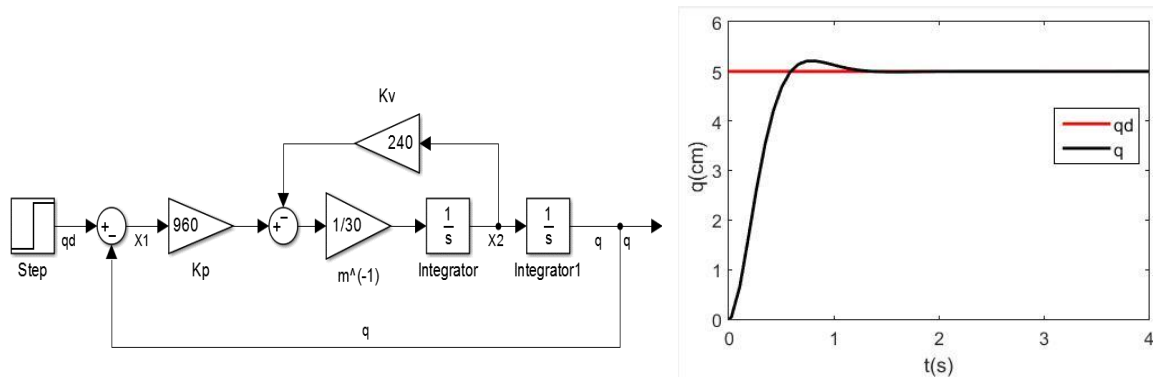


Figura 61. Control PD en Simulink.

► Proporcional Integral Derivativo PID

El método de sintonización de controladores PID de Ziegler-Nichols permite definir las ganancias proporcional, integral y derivativa de forma empírica a partir de un ensayo con del sistema en lazo abierto con escalón unitario (Mazzone, 2010).

En la Figura 62 se puede ver representado en rojo la entrada escalón al actuador. En azul se representa la salida del sistema q . El escalón de entrada está 10% abajo del valor nominal de entrada. Para calcular los parámetros se comienza por trazar una línea recta tangente a la señal de salida del sistema que está dibujada en la imagen con una recta a trazos. Este intervalo se mide desde que la señal escalón sube, hasta el punto de corte de la recta tangente con el valor inicial del sistema; como puede apreciarse, la respuesta del sistema presenta un retardo, también llamado tiempo muerto, representado por t_1 .

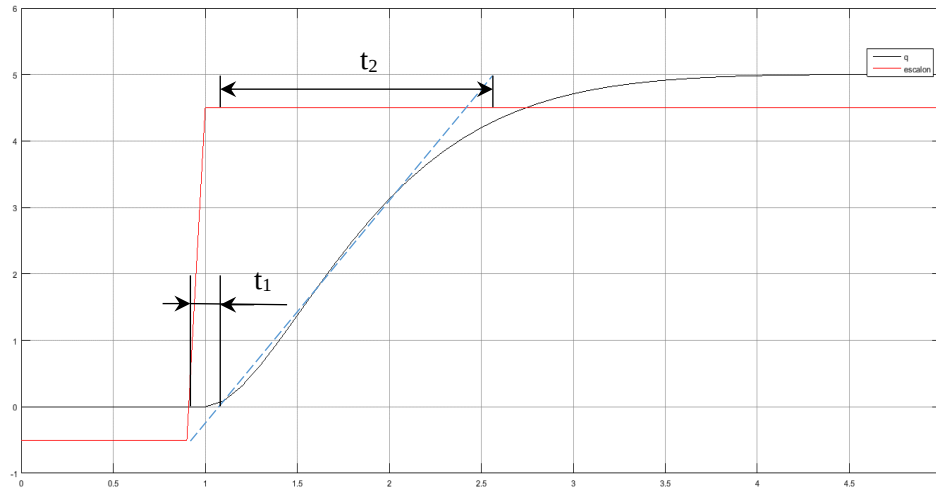


Figura 62. Respuesta del sistema a una entrada escalón.

El tiempo t_2 es el tiempo de subida. Este tiempo se calcula desde el punto en el que la recta tangente corta al valor inicial del sistema hasta el punto en el que la recta tangente llega al valor final del sistema.

Se tiene que aproximadamente $t_1 = 0.16 \text{ s}$ y $t_2 = 1.5 \text{ s}$. Se tiene además que considerar las siguientes relaciones:

$$T_i = 2 t_1 \quad (4.27)$$

$$T_d = 0.5 t_1 \quad (4.28)$$

dónde: T_i es la constante de tiempo integral y T_d es la constante de tiempo derivativa.

Esta información permite conocer las ganancias K_i y K_d con las siguientes relaciones:

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} \quad (4.29)$$

$$K_v = K_p T_d \quad (4.30)$$

Con lo que las ganancias iniciales se proponían como en el inciso a del Cuadro 26. Al sustituir el controlador en la ecuación (4.16) se tiene que:

$$\dot{X}_2 = m^{-1}[K_p X_1 + K_v \dot{X}_1 + K_i \int_0^t X_1(\sigma) d\sigma] \quad (4.31)$$

La ecuación (4.36) es fácilmente representada en Simulink como se observa en la Figura 63 y su respuesta al escalón, donde la primera aproximación se ajustó de manera manual hasta lograr una sintonización en menos de 1.4 s, teniendo de este modo las ganancias del inciso b) en el Cuadro 26.

Cuadro 26.. Ganancias determinadas por el método de Ziegler y Nichols.

	Kp	Ki	Kv
a)	960	3000	96
b)	960	2000	192

Se puede concluir que las ganancias propuestas en la segunda opción son los que hacen que el sistema se estabilice por lo que se seleccionaron para posteriores pruebas.

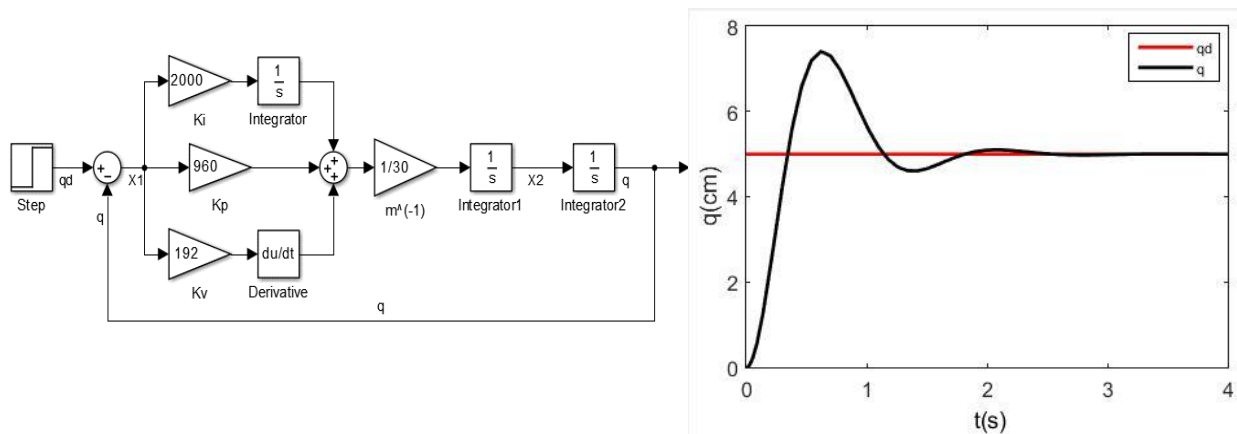


Figura 63. Control PID en Simulink

4.4 Caracterización del actuador lineal

El actuador lineal es un tornillo embalado que se mueve dentro de un émbolo y es accionado por un servomotor. Su movimiento está limitado a un punto muerto final que es la distancia lineal del émbolo totalmente extendido y un punto muerto inicial. El mecanismo de accionamiento está basado en un juego de engranes que determinan el torque especificado, o en este caso la fuerza lineal ejercida. El actuador lineal LD3 cuenta con un sistema de retroalimentación con una decodificación absoluta; es decir, un encoder absoluto. Este genera mensajes digitales que representan la posición actual del embolo del actuador. No es necesario ir a la posición referencial como con los encoder de tipo incremental si la energía se pierde (West Instruments de México S.A., 2006). Para caracterizar este movimiento se realizó un experimento de variación de voltaje para determinar la relación de posición. En el Cuadro 27 se nota que la relación de variaciones de

voltaje del encoder es proporcional a la distancia medida. Esto hace que la relación de posición sea fácilmente calculada por una regresión lineal como:

$$\text{distancia medida} = 3.58 (\text{voltaje medido}) - 0.27 \quad (4.32)$$

Cuadro 27. Variación de voltaje de un encoder de un LD3 respecto a su posición.

		Voltaje[V]	Distancia[cm]
1	$V_{\max}$	4.32	15.24
2		4.19	14.64
3		3.72	13.14
4		3.24	11.34
5		2.59	9.04
6		1.95	6.74
7		1.19	4.04
8		0.93	3.04
9		0.41	1.14
10	$V_{\min}$	0.14	0.24

Considerando un valor inicial de voltaje y posición cero, se tiene que la ley de control del encoder está dada por la ecuación de una recta que pasa por el origen:

$$\text{distancia} = \frac{\text{distancia total}}{\text{voltaje máximo}} \text{ voltaje} \quad (4.33)$$

Es decir que la distancia medida o deseada q_m es una función que depende del voltaje medido v_m :

$$q_m = \frac{15.24}{4.32} v_m \quad (4.34)$$

Una vez caracterizado el encoder se procedió a probar el actuador con pesos para comprobar su funcionamiento y velocidad tope (Figura 64). El motor del disco de corte tiene un peso de 20 kg por lo que la prueba se llevó a cabo con esa medida. Los valores se capturaron en el Cuadro 28 donde se nota que el valor para el tiempo de recorrido del punto muerto inicial al final no existe una variación considerable en la corriente, por lo que se considera que el actuador funcionara sin problemas. Dado que por convencionalismo se tiene que un motor debe tener un rango de trabajo menor al de saturación, esto para evitar sobre trabajar el motor. Por ello se seleccionó un voltaje de 20V a 2.8 A.



Figura 64. Calibración del actuador lineal.

Cuadro 28. Velocidades del actuador LD3 a distintos voltajes

Voltaje[V]	Amperaje [A]	Tiempo de recorrido[s]	Velocidad[cm/s]
24	3	5.9	2.58
23	3	5.97	2.55
20	2.8	7.06	2.16
17	3	8.1	1.88
17	2.8	8.22	1.85
12	3	11.6	1.31

4.5 Características de la GUI del sistema automatizado

Una interfaz es una Conexión física y funcional entre dos aparatos o sistemas independientes, en este caso para el diseño de la interfaz visual entre los controladores y el usuario se aplicó la herramienta GUIDE de MATLAB. Se ha aplicado este software por su rápida respuesta de sistemas de control (Ogata, 2010). En la Figura 65 se muestra el panel principal de la GUI creada para probar los diferentes controladores que se tienen. Esta ventana cuenta con los siguientes elementos:

- Tiempo: Se ingresa el numerador que se requiere para tener cierto tiempo de muestreo.
- Muestreo: Es el denominador del tiempo de muestreo y se asigna a la variable h.
- Ganancia Kp: Es una variable usada por los controladores se asigna a la variable kp. Expresa la relación entre la amplitud de una señal de salida respecto a la señal de entrada.
- Ganancia Ki: se asigna a la variable ki.
- Ganancia Kv: se asigna a la variable kv
- XD: Se escribe la medida deseada. Esta simula la entrada enviada por el sistema de visión artificial para ajustar a cierta posición el disco de corte. Se asigna a la variable xd.
- Voltaje suministrado por el encoder: Es una medida de referencia del voltaje suministrado al encoder en caso de que esta varíe. Se asigna a la variable mul.



Figura 65. Panel de control de la GUI para pruebas de los controladores.

En esta sección también se halla un menú desplegable que muestra los distintos controladores. Por debajo se visualiza la cantidad de energía estimada por cada controlador al ejecutar el programa. En esta misma ventana se muestran cuatro axes en donde se grafican el error de posición, la posición del encoder, la energía estimada y el voltaje medido del encoder (Figura 66).

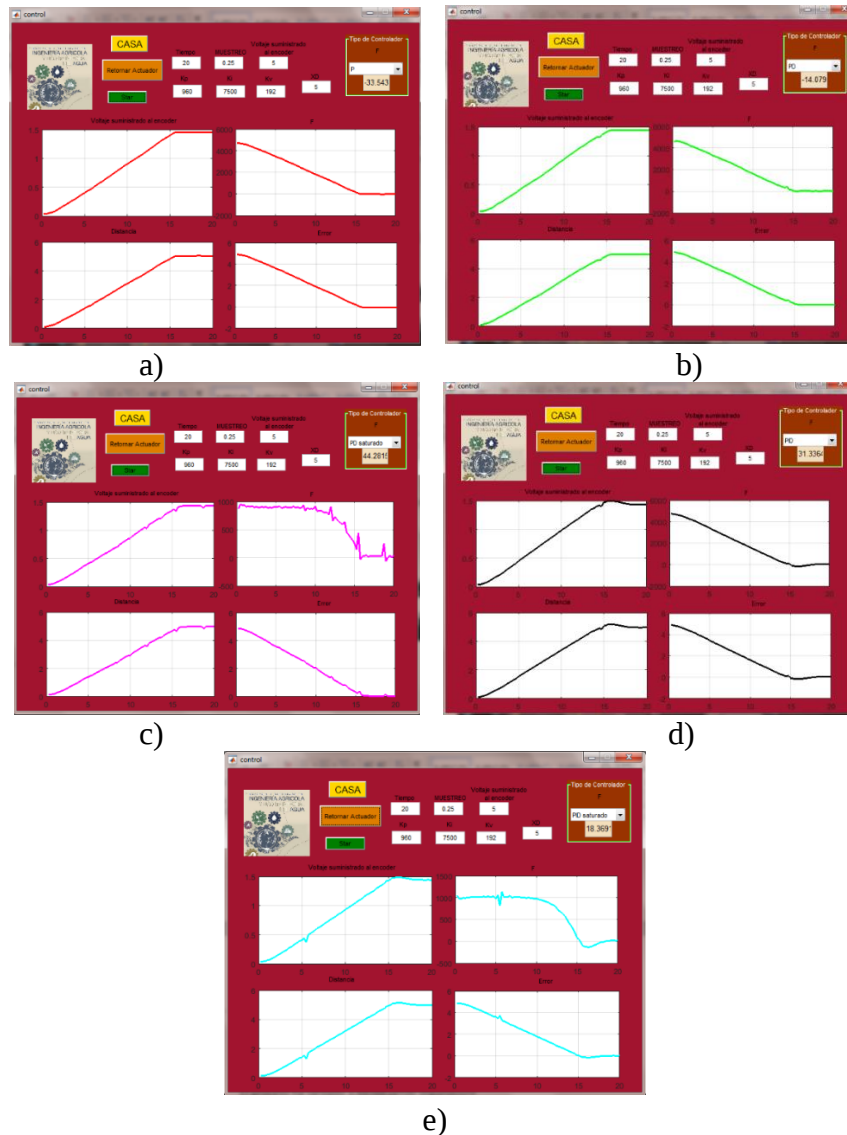


Figura 66. Valores generados por el controlador a) P, b) PD, c) PD con acotaciones, d) PID y e) PID con acotaciones

La GUI se desarrolló como se muestra en la Figura 67 el inicio del programa se realiza al presionar el botón conectar que comienza la comunicación serial entre las tarjetas Arduino y la PC. Esto permite el ingreso de los datos en el panel principal. Al ejecutar el programa de Ejecutar hasta un tiempo final determinado por un ciclo de muestreo, en el que el lazo de control interactúa entre los datos ingresados por el usuario y los valores medidos por el encoder; de esta manera se estima la posición y el error de posición.

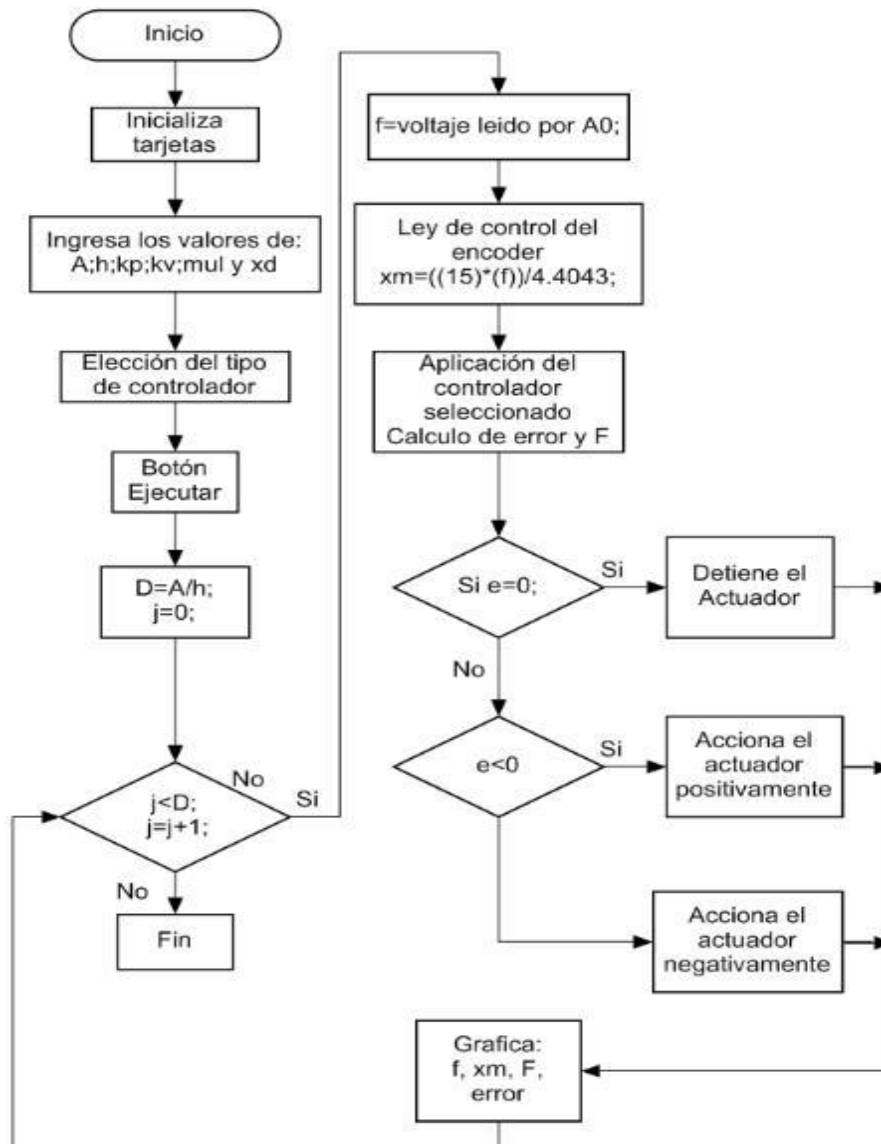


Figura 67. Diagrama de flujo de la GUI de prueba de controladores

Al aplicar un determinado controlador se generan los resultados de la fuerza estimada F y el error de posición, es en base a este último que se determina la acción del motor del actuador. Esta rutina permite además graficar estos resultados y visualizarlos de manera rápida y amigable con el usuario.

4.6 Resultados de las pruebas de control

El sistema de control deposición del disco d corte se probó con cada controlador haciendo que el mecanismo iniciara en la posición cero hasta una distancia deseada de 5 cm (Figura 68).

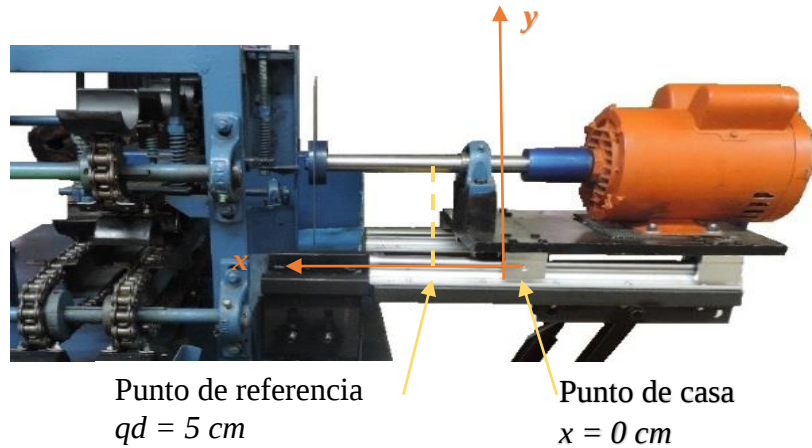


Figura 68. Punto de referencia.

En la Figura 69 se nota que el error de posición es inversamente proporcional a la distancia recorrida; esto es porque a medida que la distancia medida se acerca a la medida deseada, el error disminuye desde un error especificado hasta intentar alcanzar el cero.

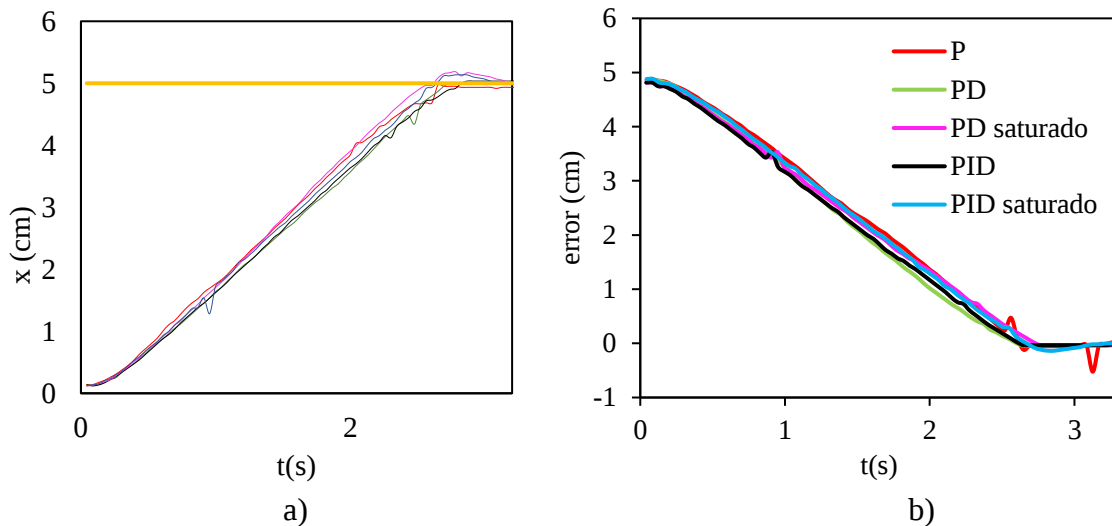


Figura 69. Gráficos de a) distancia medida y b) error de posición.

En un acercamiento en la Figura 70 se nota que el sistema de control de la posición del disco trabajando con el controlador PD es más rápido, el más lento es el PD saturado. Sin embargo, al analizar los tiempos de estabilización en el Cuadro 29 se tiene el tiempo en que se alcanza el error de posición cero (t_0) y el tiempo en que logra estabilizar el mecanismo (t_e); se observa que

el controlador PID lo logra antes que PD. La diferencia entre estos tiempos hace notar que el controlador PID tiene el menor tiempo lo cual lo convierte en el más veloz del experimento.

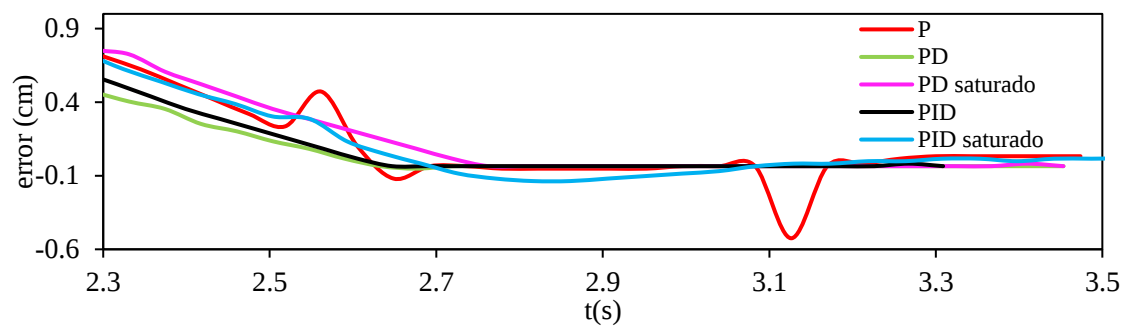


Figura 70. Comportamiento de distintos tipos de controladores en el sistema de ajuste del disco de corte.

Cuadro 29. Tiempos de estabilización de controladores.

	P	PD	PD saturado	PID	PID saturado
	[s]				
t0	2.65	2.63	2.76	2.65	2.68
te	2.78	2.72	2.81	2.69	2.77

De manera similar en la Figura 71 la fuerza estimada se comporta como el error de posición, con la diferencia de que para los controladores saturados la fuerza nunca sobrepasa la fuerza máxima real ejercida por el actuador LD3.

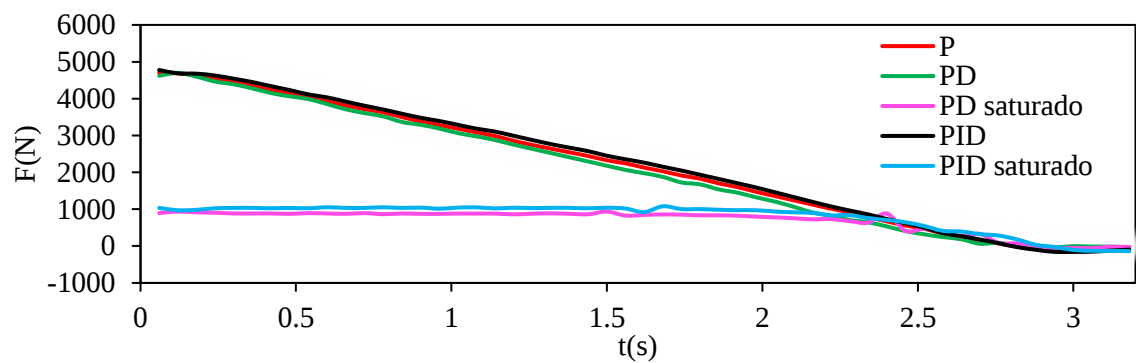


Figura 71. Fuerza estimada por los controladores.

De estas pruebas se concluye que en general los cinco controladores son buenos, pues logran trabajar aproximadamente a la máxima velocidad del actuador y estabilizarse en no más de 0.13s, pero considerando el menor tiempo se eligió el PID para trabajar en la máquina finalmente.

5. Control visual

La principal función del sistema de visión es la de filtrar en tiempo real mazorcas que pasen por el sistema de alimentación y evaluar sus características geométricas requeridas, lbdm, dm, lt, A, lbc y calcular efectivamente lbco. Se eligió una cámara web PC-320425 de 4.8 mm, 800x600 píxeles y un sensor CMOS (Figura 72) para realizar la adquisición de imágenes por su bajo costo y suficiente resolución.



Figura 72. Cámara Web.

Dado que las imágenes a color necesitan datos RGB (rojo-verde-azul), un filtro de color convierte cada píxel en el CCD a un píxel rojo, verde o azul. Utilizando un nivel de 0 a 255 en cada uno de estos píxeles a color, se puede construir una imagen en el controlador de visión, mediante estos datos cromáticos.

El sistema para expresar numéricamente los colores se llama sistema cromático, y se representa por lo general como un espacio tridimensional con tres ejes. De los varios sistemas de color, el sistema cromático HSV que emplea las tres componentes de: tono, saturación y brillo, es el más cercano al del ojo humano, y el más adecuado para el procesamiento de imágenes. El brillo (V) en el eje vertical entre más alto más luminoso, la saturación (S): Eje horizontal, entre más alejado más vivo. Y el tono (H): El tono representa el color real y cambia a medida que se muda la posición en el círculo se muestran en la Figura 73.

Las cámaras a color reciben 80000 veces más datos que las cámaras monocromáticas. Esto es ventajoso para un procesamiento de imágenes más detallado, pero su proceso toma mucho más tiempo en comparación con las imágenes monocromáticas. El procesamiento de la escala de grises y de la escala de grises RGB es útil para mantener los detalles, al tiempo que hace las inspecciones más rápidas, algo que el procesamiento binario o de color no puede hacer.

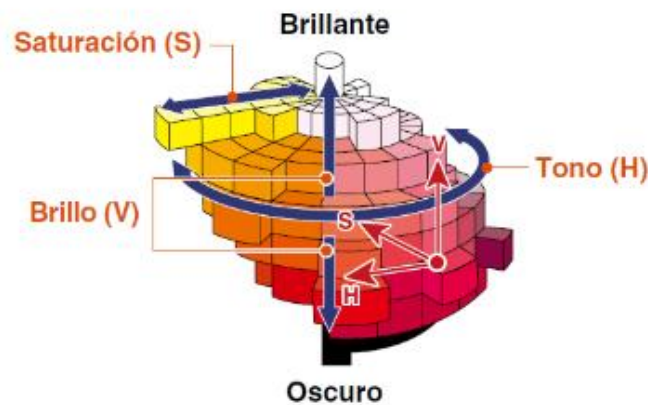


Figura 73. Escala HSV de colores. Fuente: (Keyence México S.A. DE C.V., 2013).

El procesamiento de color a gris convierte una imagen a color en una imagen en escala de grises, utilizando una gama de colores elegida como la luminosidad máxima. El resto de los colores se convierten a un rango de valores en escala de grises, en base a los colores seleccionados. Dado que se utiliza tanto información de brillo como de color, la distinción entre colores similares como el dorado y el plateado, se distingue fácilmente en escala de grises.

5.1 Recursos

El software OpenCV es una biblioteca libre de visión artificial originalmente desarrollada por Intel. Desde que apareció su primera versión alfa en el mes de enero de 1999, se ha utilizado en infinidad de aplicaciones. Desde sistemas de seguridad con detección de movimiento, hasta aplicativos de control de procesos donde se requiere reconocimiento de objetos. Esto se debe a que su publicación se da bajo licencia BSD, que permite que sea usada libremente para propósitos comerciales y de investigación con las condiciones en ella expresadas. Tiene estructuras básicas de datos para operaciones con matrices y procesamiento de imágenes. Permite visualizar datos

muy sencillamente y extraer información de imágenes y vídeos. Tiene funciones de captura y presentación de imágenes.

Visual C++ (también conocido como MSVC++, Microsoft Visual C++) es un entorno de desarrollo integrado (IDE) para lenguajes de programación C, C++ y C++/CLI. El lenguaje de programación utilizado por esta herramienta, de igual nombre, está basado en C++ y es compatible en la mayor parte de su código con este lenguaje, a la vez que su sintaxis es exactamente igual. En algunas ocasiones esta incompatibilidad impide que otros compiladores, sobre todo en otros sistemas operativos, funcionen bien con código desarrollado en este lenguaje. En esta plataforma se integran las bibliotecas de OpenCV, y se trabaja en ella mediante programación en lenguaje C.

El paquete de adquisición de imágenes de MATLAB sirve entre otras cosas para adquirir imágenes de diversos dispositivos e importarlos al entorno de trabajo de este. El ToolBox de procesamiento de imágenes proporciona un conjunto de funciones que amplía la capacidad de realizar análisis de imágenes ya que estas se representan como matrices.

5.2 Procesamiento de imágenes

Para poder extraer un color determinado primero se debe realizar la adquisición de las imágenes por hardware específico, los cuadros capturados se convierten de una imagen RGB a HSV. Después de esto es posible extraer el color deseado mediante algoritmos locales, un paso extra es la eliminación de ruido visual, para posteriormente mostrar la imagen resultante.

Durante el programa se llevan a cabo funciones que se definen por las librerías de OpenCV siendo estas:

- **Threshold:** esta función extrae el fondo de una imagen mediante el análisis de píxeles, donde se define un umbral sobre el cual aquellos píxeles que no cumplan esta condición son asignados por un valor 1 o 0, logrando así tener una imagen binaria.
- **Erode:** Suaviza los bordes de manera que cierra píxeles a un arreglo más fino.
- **Dilate:** expande píxeles de un color para poder así rellenar huecos y eliminar ruidos.

- Moments: esta función permite localizar el centroide de un objeto conociendo la capa de píxeles extraída.

Dado que se requiere en esencia de esta última propiedad es necesario definirla:

El centroide es un punto que define el centro geométrico de un objeto. El centroide del área superficial de un objeto se puede encontrar subdividiendo el área en elementos dA y calculando los momentos de esos elementos de área con respecto a cada uno de los ejes coordenados (Figura 74), esto es:

$$\bar{x} = \frac{\int_A \tilde{x} dA}{\int_A dA} \quad (5.1)$$

$$\bar{y} = \frac{\int_A \tilde{y} dA}{\int_A dA} \quad (5.2)$$

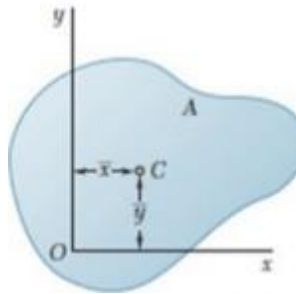


Figura 74. Ubicación del centroide de un objeto. Fuente: (Russel, 2004).

5.2.1 Programación en visual C

La rutina se llevó a cabo según el diagrama mostrado en la Figura 75 y Figura 76. En la primera parte A carga el video generado por la webcam y realiza el procesamiento por cada cuadro. Genera las ventanas de ajuste de extracción y empieza a aplicar el algoritmo de detección de mazorcas hacia la parte B. Esta sección usa el algoritmo Threshold que extrae una determinada región de color condicionada por la ventana de ajuste. En base a esta extracción delimita los puntos que cumplen con esta condición y de acuerdo a su cercanía es capaz de detectar que píxeles establecen el contorno de cada objeto. Para cada contorno ubicado se dibujan los rectángulos de menor área posibles con aproximación de vectores hacia los objetos. Finalmente muestra los resultados y regresa a la sección A donde si el usuario no detiene el proceso se repite el bucle.

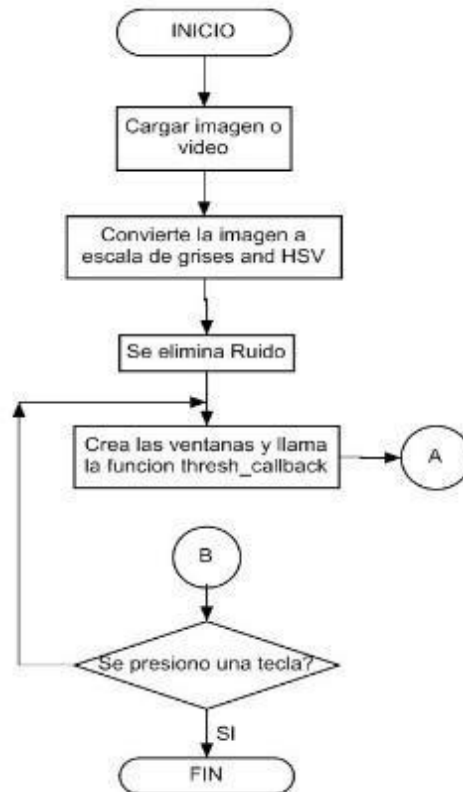


Figura 75. Diagrama de flujo del programa para determinar el contorno de la mazorca.

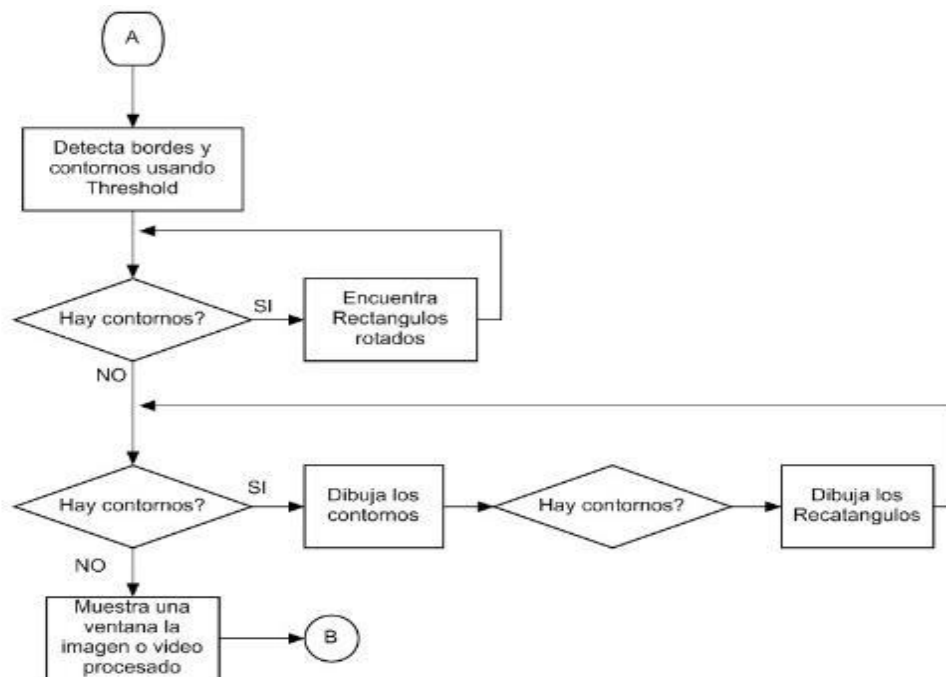


Figura 76. Diagrama de flujo del programa para determinar el contorno de la mazorca

El tamaño del objeto es calculado por la similitud de dos triángulos semejantes OAB y OCE (Figura 77):

$$\frac{D}{H} = \frac{Df}{h} \Rightarrow H = \frac{D*h}{Df} \quad (5.3)$$

Esta fórmula da el tamaño real del objeto en el sensor de la cámara, después es necesario pasar del tamaño real a pixeles. Esto puede hacerse calculando otra proporción:

$$factor = \frac{S}{r_c} \quad (5.4)$$

Donde

S: es el tamaño del sensor de la cámara. En este caso es de 4.8 mm

r_c: es la resolución dada por el fabricante. 800x600pixeles. (Para este caso se usó la resolución del ancho).

$$factor = \frac{4.8 \text{ mm}}{800 \text{ pixeles}} = 0.006 \text{ mm/pixeles} \quad (5.5)$$

La fórmula finalmente sería:

$$H = \frac{factor*D*h}{Df} \quad (5.6)$$

Se desconoce el valor de la distancia focal, pero se calculó mediante un experimento, donde a una distancia conocida D=625 mm se midió H sobre una pared totalmente paralela a la cámara teniendo como medición 395 mm, de esta manera se determinó Df.

$$\frac{D}{H} = \frac{Df}{h} \Rightarrow Df = \frac{D*h}{H} \quad (5.7)$$

$$Df = \frac{625 \text{ mm} * 4.8 \text{ mm}}{395 \text{ mm}} = 7.595 \text{ mm} \quad (5.8)$$

El tamaño de pixel es una relación de la siguiente forma: S/ancho de resolución, por lo que el tamaño de pixel tp resulta aproximadamente 6 micrones

Para cada parámetro determinado se aplica la ecuación de transformación:

$$dato_{real} = \frac{0.006 D \text{ dato}_{pixeles}}{7.595} \quad (5.9)$$

Esta ecuación se agrega en el diagrama de flujo como se muestra en la Figura 78.

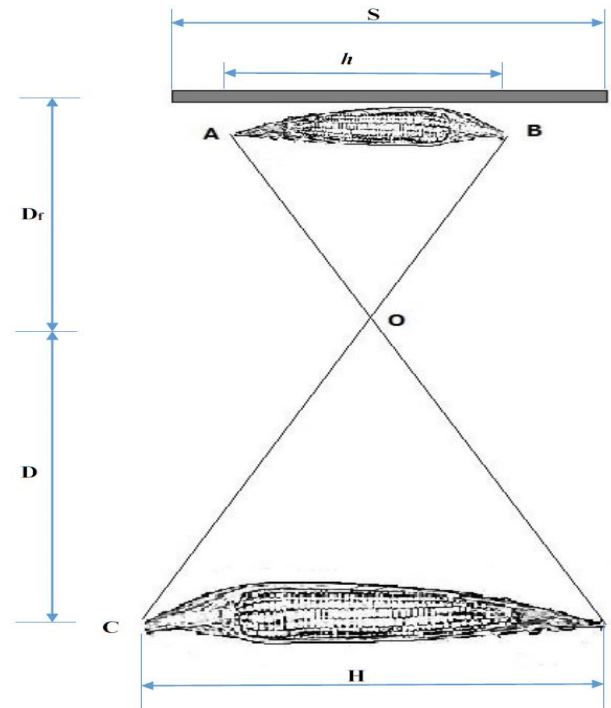


Figura 77. Método de medición de la mazorca por triángulos semejantes.

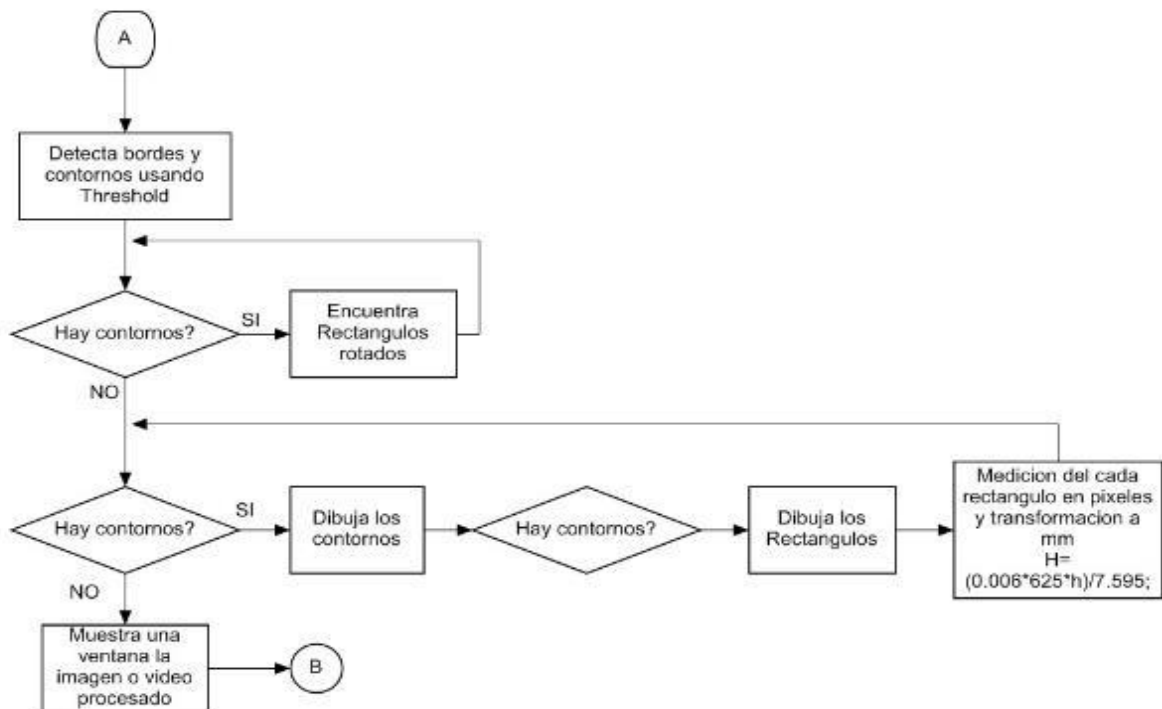


Figura 78. Diagrama de flujo para medir mazorcas.

5.2.2 Programación en MATLAB

Para esta función se desarrolló en GUI de MATLAB una interfaz para procesar imágenes basada en el algoritmo de Bhargav Anand desarrollado en 2010 y modificado para manipular el plano de colores RGB (Cebada, 2016) a través de la siguiente ecuación:

$$W = R_{max} R_{ajus} + G_{max} G_{ajus} - B_{max} B_{ajus} \quad (5.10)$$

Donde R_{max} es el valor máximo del rojo, G_{max} es el valor máximo del verde y B_{max} es el valor máximo del azul, cuyo valor máximo es uno; R_{ajus} , G_{ajus} y B_{ajus} son los factores de atenuación para los planos rojo, verde y azul, estos valores son asignados por el usuario y varían de $[0, 255]$.

Una vez extraído el color especificado se calcula el centroide del objeto y mediante el comando `regionprops` de MATLAB encierra a la mazorca en un rectángulo. Conocidas estas características es posible determinar los demás parámetros geométricos, requeridos con los parámetros intrínsecos de la cámara que se localizaron con anterioridad.

5.3 Resultados de las pruebas de procesamiento de imágenes.

La prueba inicial de procesamiento de imágenes dio como resultado la extracción del color propio de la mazorca, pero este se confundía con los cangilones de la banda transportadora (Figura 79). Este problema dio como consecuencia la localización de varios elementos (Figura 80).

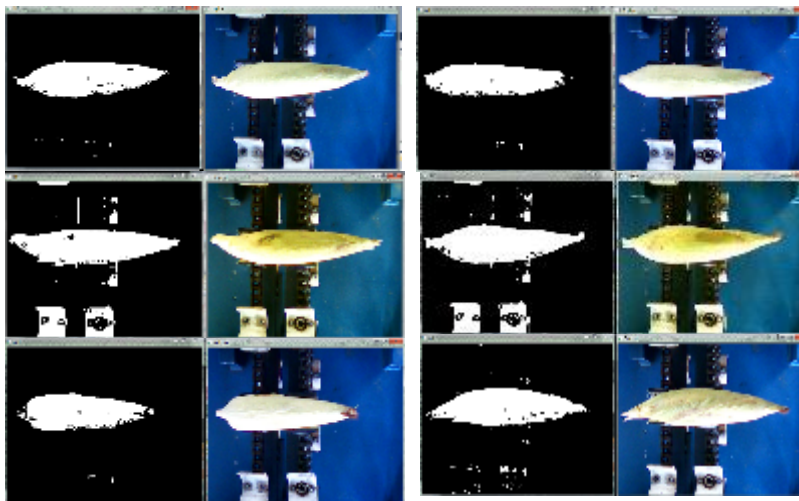


Figura 79. Extracción del color propio de mazorcas en Visual C y OpenCV con exceso de ruido.

Las pruebas se realizaron en el taller de diseño del departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo sin control de la iluminación.

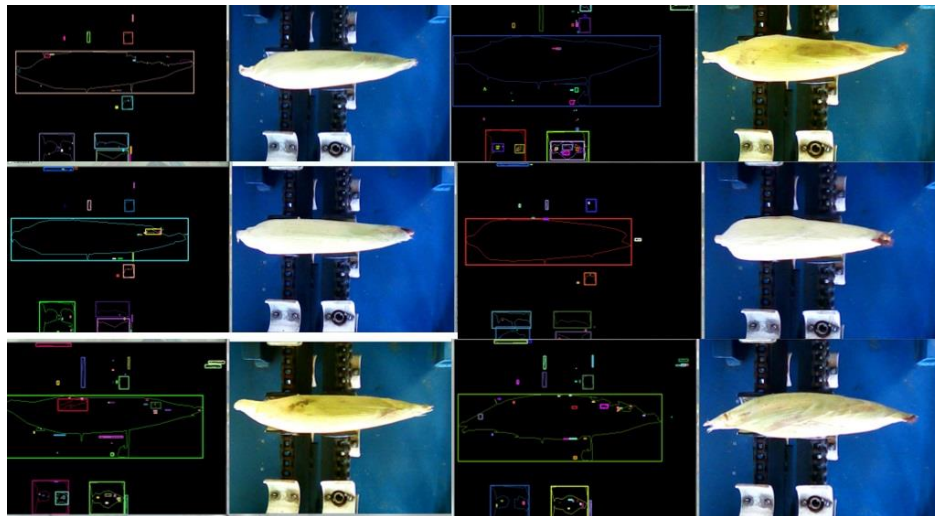


Figura 80. Localización de mazorcas y encierro en rectángulo, con presencia de ruido excesivo.

El problema se solucionó aislando la zona de trabajo de iluminación natural. Llevando a cabo las pruebas en un área con iluminación controlada. Las pruebas se realizaron con una luminosidad de 700 lúmenes a 60° del objetivo y 3m de altura. Además, los cangilones se pintaron de color negro opaco para disminuir el ruido provocado por ellos. El programa permitió de este modo localizar mazorcas y determinar sus parámetros geométricos (Figura 81).

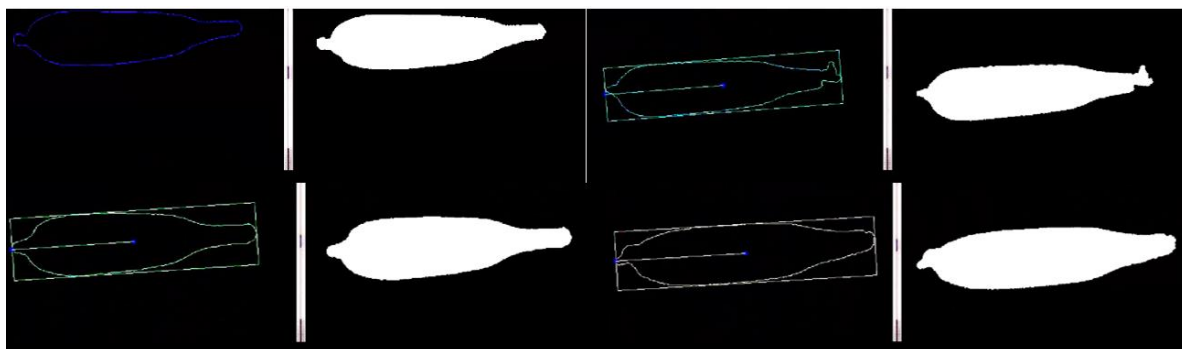


Figura 81. Extracción del color de la mazorca y su localización, encierro en rectángulo y determinación de parámetros sin exceso de ruido.

La GUI desarrollada para procesar imágenes con el paquete de procesamiento de MATLAB generó buenos resultados en la localización de la mazorca (Figura 82), pero con una calidad en la resolución menor que a la obtenida por el software Visual C. Además, el proceso

mostró requerir más capacidad de memoria por parte de la computadora, lo que ralentiza el proceso.



Figura 82. GUI para la localización de mazorcas y parámetros en MATLAB.

Ambos softwares demostraron su utilidad para localizar objetos mediante rangos de color. La capacidad de programación en lenguaje C es más sencilla lo que permite una programación más rápida y eficiente, pero MATLAB ofrece la capacidad de programar con óptimos resultados cuando se orienta a objetos.

6. Resultados generales

El sistema de corte con control automático de posición con visión artificial es una estructura que se compone de dos sistemas con objetivos diferentes, el sistema de visión artificial se encarga de analizar las mazorcas y obtener el dato lbco. Este valor es procesado y transformado en el valor de la posición deseada x_d , que será ingresado en el sistema de control, para activar el mecanismo de ajuste del disco de corte. Esta configuración tiene como principal evento la adquisición de imágenes para proporcionar la coordenada x_d (Figura 83).

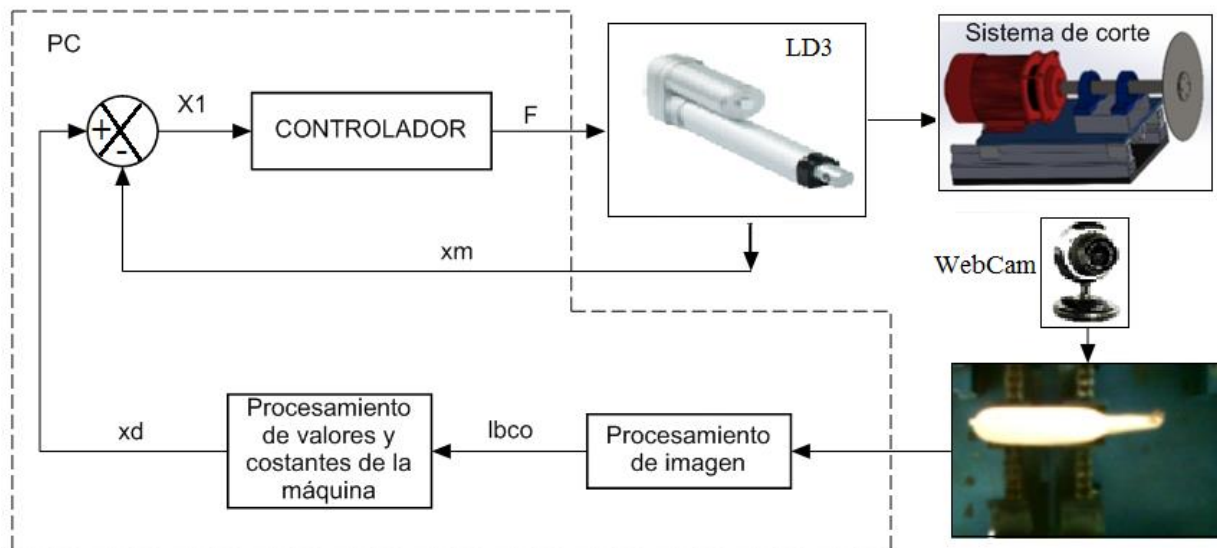


Figura 83. Estructura de control visual.

Del análisis estadístico presentado en el capítulo tres se encontraron tres ecuaciones para la variedad híbrida de maíz Murano de las cuales se seleccionó la (3.2), que se utilizó en la redacción de la patente MX345727B:

$$lbco = A_2 + B_2 * lbdm + C_2 * lt \quad (3.2)$$

donde $A_2 = -4.1894$, $B_2 = 0.7624$, $C_2 = 0.1582$.

Esta ecuación tiene un coeficiente de correlación superior a 90%, pero no es parte de una variedad que sea utilizada principalmente para venta de hoja, por lo que fueron descartadas en el uso del sistema de corte. Otras cuatro ecuaciones estudiadas en el capítulo 3 para la variedad criolla

Arroz fueron establecidas y al compararlas mediante el análisis del error absoluto ϵ se eligió la que tuviera el menor valor, quedando como tal la ecuación (3.4):

$$lbco = A_4 + B_4 * dm + C_4 * lbdm + D_4 * lbc \quad (3.4)$$

donde $A_4=-1.92$, $B_4=0.03$, $C_4=0.03$ y $D_4=0.01$.

De análisis estadístico se conoce el error proporcionado por el modelo usado $\epsilon_4=\pm 0.75\text{cm}$, esto quiere decir que el corte efectuado a la distancia $lbco$ puede variar entre ese rango, siendo este el rango de corte óptimo (Figura 84).

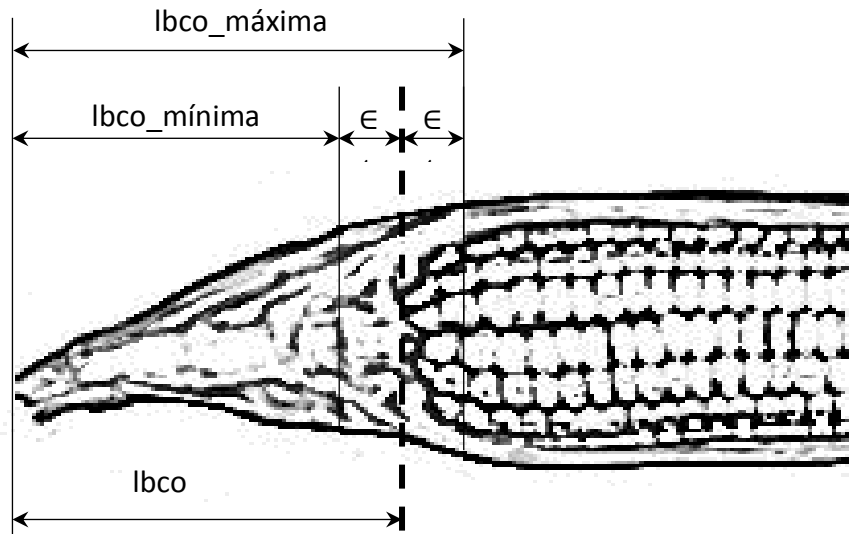


Figura 84. Rango de corte óptimo en una mazorca.

El sistema de control se llevó a cabo usando un controlador de tipo PID cuyas ganancias son $K_p=960 \text{ N/cm}$, $K_v=192 \text{ N*s/cm}$ y $K_i=200 \text{ N/s*cm}$. Este controlador se programó en la interfaz gráfica con GUIDE de MATLAB incluyendo el sistema de visión como se detalla en el apéndice A.

La valoración del sistema se llevó a cabo con una muestra de 46 mazorcas de la variedad Arroz recolectadas en la localidad Primero de Mayo en Papantla, Veracruz durante el mes de diciembre de 2016. Las mazorcas fueron colocadas en la tolva de la máquina para evaluar el sistema una por una (Figura 85).



Figura 85. Mazorcas colocadas en la tolva de la máquina para su posterior corte.

El sistema de visión artificial fue calibrado según los parámetros RGB de color necesarios en la interfaz. Esta prueba se realizó con cinco mazorcas para minimizar el ruido visual (Figura 86). Los valores de [R G B] fueron [200 0 219], con una iluminación de 900 lúmenes colocados a 60° y a 3m de altura por la parte izquierda de la máquina.

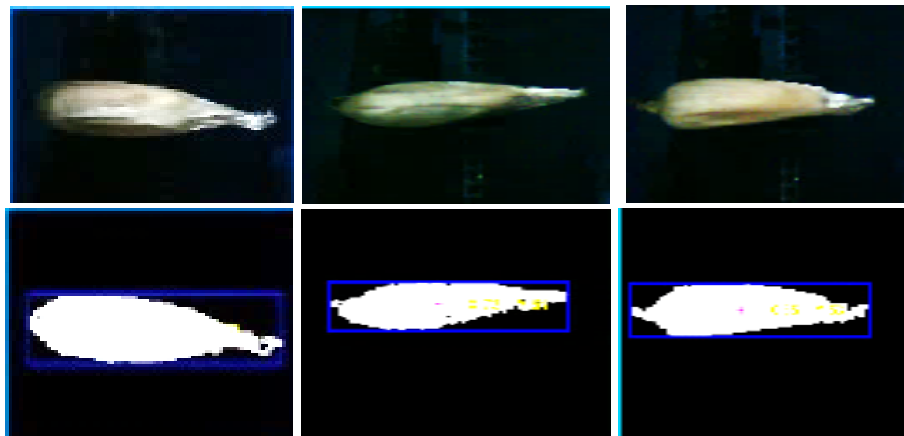


Figura 86. Pruebas de extracción de color para mazorcas por el sistema de visión.

Los parámetros obtenidos en las evaluaciones corresponden a distintos valores de lbco, el primero está dado por el sistema de visión artificial como $lbco_{calculada}$, que varía del valor medido real $lbco_{real}$, y que se transforma en la distancia de corte deseada xd , cuyo valor al ser ingresado en el sistema de control produce una distancia de corte $lbco_{cortada}$ que también es distinto de $lbco_{calculada}$ por los propios errores del sistema Figura 87.

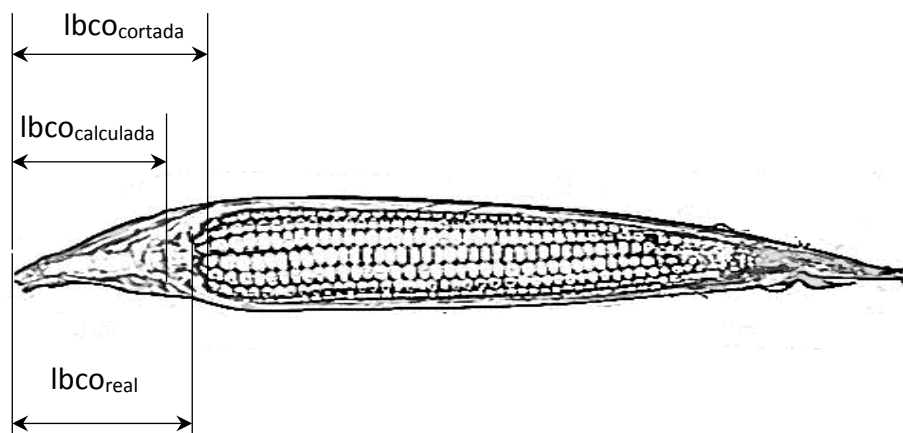


Figura 87. Diferentes valores de lbco medidas

Los valores medios y calculados fueron ingresados en el Cuadro 30. Una vez efectuado el corte por el disco Figura 88, se midió la parte basal y se determinó el error de corte, sumando o restando la parte de pedúnculo o exceso cortado. Este valor del error también se incluyó en el Cuadro 30.



Figura 88. Mazorcas cortadas con el sistema de corte con control automático con visión artificial.

Cuadro 30. Resultados obtenidos por el sistema de corte de mazorcas con control automático de posición con visión artificial con una muestra de mazorcas de la variedad Arroz.

No	xd	lbco			Error de corte	No	xd	lbco			Error de corte
		calculada	cortada	real				calculada	cortada	real	
1	14.153	14.1533	5.54	4.87	0.83	24	14.472	14.4724	8.38	8.046	0.457
2	15.391 [◊]	15.3912	5.18	4.535	0.242	25	15.258 [◊]	15.2577	6.19	5.557	1.534
3	14.146	14.1459	5.31	5.11	0.531	26	13.275	13.2746	5.58	5.304	0.608
4	15.264 [◊]	15.2637	5.05	4.288	1.439	27	13.330	13.3296	7.23	6.754	0
5	13.929	13.9285	5.78	5.95	0.983	28	13.802	13.8016	5.65	5.431	0.19
6	12.809 [◊]	12.8094	4.66	4.189	0.502	29	13.591	13.5906	6.35	6.89	0
7	13.143	13.1427	5.68	5.489	0.356	30	15.491 [◊]	15.491	5.97	5.378	1.53
8	12.952	12.9516	5.71	5.842	0.53	31	15.042	15.0419	7.12	7.268	0.558
9	12.669	12.6693	6.12	5.834	0.86	32	14.932	14.9322	6.78	6.395	0.071
10	12.643	12.6428	4.72	4.702	0.352	33	14.204	14.2043	6.51	6.486	0.156
11	13.835	13.835	5.23	5.064	0.362	34	13.694	13.6936	7.37	7.641	0
12	12.860	12.8601	5.62	5.51	0.101	35	14.612	14.6121	6.23	6.032	0
13	12.306	12.3061	5.3	5.454	0.412	36	16.112 [◊]	16.1118	5.44	5.392	0.534
14	12.407	12.4067	5.85	5.236	0.664	37	13.609	13.609	6.37	6.05	0.62
15	13.310	13.3097	6.07	6.316	0.625	38	13.794	13.7941	5.87	4.96	0
16	14.863	14.863	6.71	6.507	0.819	39	15.140	15.1401	4.93	4.12	0.535
17	13.739	13.7392	4.44	4.725	0.842	40	13.721	13.7211	6.25	6.385	0.932
18	15.514 [◊]	15.5142	6.45	5.603	1.501	41	14.611	14.6105	6.69	6.061	0.316
19	13.974	13.9738	5.14	4.15	0	42	14.102	14.1015	5.72	4.757	0.735
20	14.584	14.5841	6.66	6.117	0.63	43	15.303 [◊]	15.3031	7.15	6.28	1.677
21	12.335	12.335	6.01	5.928	0.706	44	15.302 [◊]	15.3022	6.46	5.317	1.082
22	14.940	14.9403	5.64	5.295	0	45	15.506 [◊]	15.5057	7.12	7.273	0.452
23	15.124	15.1235	7.66	7.372	0.257	46	14.667	14.6667	5.83	5.104	0.591

[◇]Valores que sobrepasan el largo del actuador (15.25 cm).

Los valores generan los estadísticos mostrados en el Cuadro 31, donde se puede notar que $lbco_{real}$ tiene un máximo de 8.5cm, sobrepasando el valor máximo localizado para una muestra de 103 mazorcas de 7.58cm, pero el valor mínimo para esta muestra fue de 3.5 cm, lo que indica esta muestra es en particular más larga que la muestra anterior. Aun así, el error promedio es de 0.568, con lo que no excede del establecido con la ecuación (3.4), esto indica que el sistema de visión funciona correctamente, pero contiene casos extraños, pues el valor de error máximo se haya en 1.67 cm, superando claramente el rango de corte óptimo.

Cuadro 31. Estadística descriptiva de una muestra de 46 mazorcas de la variedad Arroz.

	xd	lbco			
		calculada	cortada	real	error
Media	14.140	6.037	5.717	5.975	0.568
Mediana	14.124	5.920	5.534	5.883	0.533
Desviación estándar	1.003	0.831	0.943	1.164	0.451
Varianza	1.007	0.690	0.888	1.355	0.203
Rango	3.806	3.940	3.926	4.918	1.677
Mínimo	12.306	4.440	4.120	3.585	0.000
Máximo	16.112	8.380	8.046	8.503	1.677

En el Cuadro 31 se nota que la distancia deseada generada por el sistema de control tiene una variación de 3.8 cm teniendo en cuenta el valor mínimo $xd_{\min}=12.3$ y máximo $xd_{\max}=16.1$, sin embargo, el actuador tiene una extensión total de 15.24 cm, es decir que realmente hay una variación de 2.9 cm. Al tener un promedio de 3 cm como variación de ajuste cuando la máquina se encuentra trabajando con el actuador a 2.16 cm/s, se tiene un tiempo de ajuste de 1.39 s.

Se observa que la variable calculada por el sistema de visión artificial $lbco_{\text{calculada}}$, tiene un error absoluto respecto de $lbco_{\text{cortada}}$ de 0.42cm. Esto se debe a fallos en la calibración de la cámara, donde puede generarse una extracción de las mazorcas errónea, dependiendo de la posición inicial, la presencia de ruido por iluminación y falta de uniformidad en el color de los objetos. También el sistema de sujeción de mazorcas al pasar por el sistema de corte presenta movimientos notables al capturar cada elemento, esto provoca un desplazamiento que no se considera dentro del sistema de corte con control automático de posición. Por otra parte, el sistema tiene un promedio del error absoluto de $lbco_{\text{calculada}}$ respecto a $lbco_{\text{real}}$ de 0.51 cm. El corte se llevó a cabo de manera que permite usar el sistema de deshojado en un 86.99% de la muestra. La calidad de corte (Figura 89) es clara, pues se puede deshojar sin complicaciones mayores.



Figura 89. Calidad de corte por el sistema de corte con control automático con visión artificial.

Existen seis pruebas en las cuales el error fue mayor al rango establecido por el sistema de corte. Estos valores resultaron cuando la variable xd supero el rango de trabajo del actuador. Esto pudo generar las variaciones, que siguen siendo generadas por la posición en la que se coloca la mazorca, es decir errores por parte del operador.

7. Conclusiones y recomendaciones

Se diseñó y construyó un sistema de corte con control automático de la posición del disco de corte que aplicando visión artificial determina la longitud de corte óptima. Este sistema consta de:

- Un sistema mecánico formado por una bancada que se desliza sobre dos rieles de aluminio con la ayuda de cuatro chumaceras lineales. el eje del disco de corte, una chumacera, el motor eléctrico del disco de corte, el disco de corte y un cople entre el motor y el eje se ubican sobre una bancada de nylamind teniendo un peso total de 30 kg. Los rodamientos usados son el modelo lineal SBR20UU y el actuador lineal es el modelo LD3 que Cuenta con un sistema de retroalimentación basado en un encoder de tipo absoluto que está incluido en la carcasa del modelo. La cámara es una PC-320425 que se coloca sobre el chasis de la maquina deshojadora justo antes de la zona de corte sobre la banda transportadora, con un soporte de metal.

- Un sistema de control que se constituye de un actuador lineal retroalimentado con una velocidad de 2.15 cm/s que se controla mediante una interfaz gráfica creada en GUIDE-MATLAB. El sistema aplica un controlador PID que tiene tiempo de estabilización de 2.64 s.

- Un sistema de visión artificial que aplica e identifica mazorcas y genera los parámetros de largo, ancho, longitud de la base al diámetro máximo, distancia de la base al centroide y el área. Este sistema aplica una ecuación que determina la longitud de la base al corte óptimo en función de las características mencionadas anteriormente.

Los programas que controlan el sistema de corte con control automático de posición se diseñaron y crearon en un lenguaje C y MATLAB.

El sistema de corte con control automático de posición con visión artificial se evaluó con una muestra de mazorcas variedad Arroz, arrojando un error promedio del corte de ± 0.56 cm, con una efectividad del corte del 87%.

La metodología planteada para cortar las mazorcas mediante el sistema de corte con control automático de posición con visión artificial fue sometida a una revisión por parte del Instituto Mexicano de la Propiedad Intelectual, logrando la otorgación de la patente MX345727B.

La determinación de los parámetros de la mazorca para generar un modelo matemático que las describa mostró que existen modelos distintos para cada variedad de maíz, permitiendo determinar la distancia de corte óptima, en la variedad Murano se hallaron 3 modelos con un error de ± 0.72 cm y en la variedad Arroz se determinaron cuatro modelos con un error de ± 0.75 cm.

Considerando al mecanismo con sus deficiencias es importante tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

- Sintonizar las ganancias proporcional, derivativa e integral de acuerdo a métodos de optimización.
- Sustituir el actuador lineal LD3 por uno que ofrezca una velocidad de ajuste superior a 5cm/s para asegurar la productividad de la máquina.
- Establecer más modelos que describan la geometría de las mazorcas.
- Sincronizar los softwares MATLAB y Visual C con OpenCV para lograr un trabajo en conjunto.
- Sustituir el sistema de adquisición de imágenes por uno que tenga un rango de captura más amplio, y que de ser posible permita su uso sin necesidad de una computadora.
- Realizar modificaciones de diseño en la máquina deshojadora de mazorcas que permita el uso con mazorcas con un tamaño superior a los 40 cm.
- Implementar un diseño para el sistema de adquisición de imágenes que permita controlar de manera más eficiente la iluminación.
- Evaluar la eficiencia del sistema de transporte de mazorcas y proponer mejores alternativas.
- Incluir en la adición de errores del sistema la tolerancia que presenta el actuador lineal.

Bibliografía

Ávila M., E., Borges, O. L. & Bernaez J. , C., 2008. Caracterización biométrica del cultivo y perfil descriptivo de mazorcas del híbrido de maíz superdulce ‘delicia’ (BT1). *Bioagro*, 21(2), pp. 143-147.

Baldor Electric Company, 2016. *Baldor*. [En línea]
Available at: <http://www.baldor.com/>
[Último acceso: 04 03 2016].

Barrientos , A., Peñin , L. F. & Balaguer, C., 1997. Fundamentos de robotica. En: Madrid: Mc Graw Hill, pp. 11-16.

Benz, B. F., 1986. *Taxonomy and evolution of mexican maize*, Madison, Winsconsin: University of Wisconsin.

Bouza, Y., Martínez R., A., Mederos L., D. & Pérez B., P., 2007. Determinación de propiedades físico-mecánicas de los frutos del Nim relacionadas con la cosecha mecanizada por vibración. *Ciencias Técnicas Agropecuarias*, Volumen 16, pp. 37-42.

Castañeda, Y., 2007. Una visión sobre la importancia de la diversidad del maíz en México. *Christus*, Issue 762, pp. 20-22.

Cebada, J. G., 2016. *Diseño y construcción de un sistema de corte de hojas para la propagación in vitro*, Texcoco: UACH.

Cebada, J. G. y otros, 2016. Design of a Position Control Based on Cuckoo Search Tuning for a Cutter Leaves Robot. *IEEE Latin America Transactions*, 14(5), pp. 2085-2092.

Cruz, P., Romantchik Kriuchkova, E. & Hahn Schlam, F. F., 2010. Design, construction, and evaluation of a husking machine to permit the use of the husks as wrapping for tamales. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, Volumen 2, pp. 69-74.

Dowswell C., R., Paliwal, R. L. & Cantrell, R. P., 1996. *Maize in the third world*. USA: WestviewPress.

Hahn, F. F., Martínez Díaz, P. & Reyes Amador, A., 2012. Modelo teórico para predecir el lugar del corte y optimizar la extracción de la pulpa en coco. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, Issue 4, pp. 13-17.

Hellin, J. y otros, 2013. a importancia de los nichos de mercado: Un estudio de caso del maíz azul y del maíz para pozole en México. *Revista fitotecnica mexicana*, 36(Supl. 3-a), pp. 315-328.

- Hernández, R., 2010. *Introducción a los sistemas de control: Conceptos, aplicaciones y simulación con MATLAB*. 1 ed. México: PEARSON EDUCACIÓN.
- Infante, G. S. & Zárate de Lara, G. P., 1984. *Métodos estadísticos: Un enfoque interdisciplinario*. 1 ed. México: Trillas.
- Kelly, R. & Santibañez, V., 2003. *Control automático e informatica Industrial*. Ensenada México: Pearson Education.
- Kelly, R. & Santibañez, V., 2003. *Control de movimiento de robots manipuladores*. Madrid: Pearson Educación.
- Keyence México S.A. DE C.V., 2013. *Procesamiento de imágenes*. [En línea]
Available at: keyencemexico@keyence.com
[Último acceso: 21 11 2016].
- King, A., 2007. *Diez años con el TLCAN: revisión de literatura y análisis de las respuestas de los agricultores de Sonora y Veracruz, México*, México: Informe especial del CIMMYT 07-01.
- Kondo, N., 2006. Machine vision based on optical properties of biomaterials for fruit grading system. *Environment Control in Biology*, 44(3), p. 3–11.
- Long, N. & Villareal, 1998. Small product, big issues. Value constestation and cultural identities in cross-border commodity networks. *Development and Changue*, Volumen 29, pp. 725-750.
- Mayans, P., López, G. d. j., Romanchik, E. & Pérez, L., 2016. Propiedades dimensionales e inerciales del sistema fruto-pedicelo del mango relacionadas con la cosecha por vibración. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(1), pp. 163-173.
- Mazzone, V., 2010. *Controladores PID*. [En línea]
Available at: <http://iaci.unq.edu.ar>
[Último acceso: 2 1 2017].
- Moreno, L. L. y otros, 2006. Traditional maize storage methods of mayan farmers in Yucatan, Mexico: Implications for seed selection and crop diversity. *Biodivers Conserv*, Volumen 15, pp. 1771-1795.
- Ogata, K., 2010. *Ingeniería de control moderno*. Madrid: Pearson Educación.
- Ortiz, E. y otros, 2013. Rendimiento y calidad de elote en poblaciones nativas de maíz de Tehuacán, Puebla. *Revista Chapingo. Serie horticultura*, 19(2), pp. 225-238.
- Pérez, A. y otros, 2012. Caracterización física, geométrica y mecánica de huitlacoche (Ustilago maydis (D.C.) Corda). *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, Volumen 4, pp. 41-45.

Pérez, A., Villaseñor, C. A., Crisanto, V. & Corrales, J. J. E., 2009. Propiedades mecánicas y maduración de frutos de mango (*Mangifera indica* L.) bajo compresión axial. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, Volumen 1, pp. 19-23.

Pololu, 2016. *Product Data Sheet, Actuator LD3/LD3Q*. [En línea]
Available at: <https://www.pololu.com>

Prado, M. y otros, 2012. Caracterización de hojas de mazorca de maíz y de bagazo de caña para la elaboración de una pulpa celulósica mixta. *Madera y Bosques*, Volumen 18, pp. 37-51.

Ramírez, R. & Hahn, F. F., 2013. Robot trepador de palmeras y sistema asociado para la detección de cocos (*Cocos nucifera* L.). *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, Volumen 5, p. 3 – 10.

Rodríguez, N., 2010. La cortadora de hoja de maíz y su diseño. *Revista Tec*, Volumen 1, pp. 1-20.

Rossi, R. J. & McGuire, P. C., 1992. *Method and apparatus for partially husking corn*. Miami, Fla., Patente n° US5169663A.

Russel, H., 2004. Estática. En: décima ed. Mexico: Pearson Education, pp. 437-460.

Sánchez, J. J., Stuber, C. W. & Goodman, M., 2000. Isosymatic diversity in the races of maize of the Americas. *Maydica*, Volumen 45, pp. 185-203.

Sánchez, P., 2004. Control cartesiano de robots manipuladores. En: BUAP Mexico: FCE, pp. 11-16.

Santos, A. M., Cruz, P., Romantchik, E. & Hahn, F. F., 2012. Dispositivo para la cosecha mecanizada del mango ataulfo (*Manguifera indica*). *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, Volumen 4, pp. 47-53.

SKF, 2016. *Rodamientos Y y unidades de rodamientos Y SKF energéticamente eficientes*. [En línea]
Available at: www.skf.com

Velázquez, N. y otros, 2011. Detección de cenicilla en rosa usando procesamiento de imágenes por computadora. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, Volumen 17, pp. 151-160.

West Instruments de México S.A., 2006. *MANUAL DE APLICACIÓN DE ENCODERS*. [En línea]
Available at: www.westmexico.com.mx
[Último acceso: 01 11 2016].

Apéndice A. Características de la interfaz grafica

MATLAB - GUIDE permite realizar programas en un entorno visual, para proyectos que requieren de un ingreso continuo de datos. Tiene la facilidad de dividir un programa en elementos más simples (objetos) que se comunican entre sí a través de la interfaz gráfica GUI (graphical user interface) que implementa los métodos que gobiernan datos y lecturas, pudiendo actuar por separado y en conjunto (Cebada, 2016). La GUI del sistema de corte automático para deshojar mazorcas cuenta con un panel principal (Figura A1) con siete botones. El botón “Conectar Arduinos” inicia la rutina de comunicación serial entre las placas Arduino conectadas a la computadora mediante el cable USB, al conectar correctamente las placas aparecerá una ventana de precaución que señala que se está listo para iniciar a trabajar con la interfaz. El botón “desconectar” detiene el flujo de datos entre las placas Arduino y la computadora de manera segura, al presionarlo aparecerá una ventana de precaución que señala que las placas fueron desconectadas exitosamente.

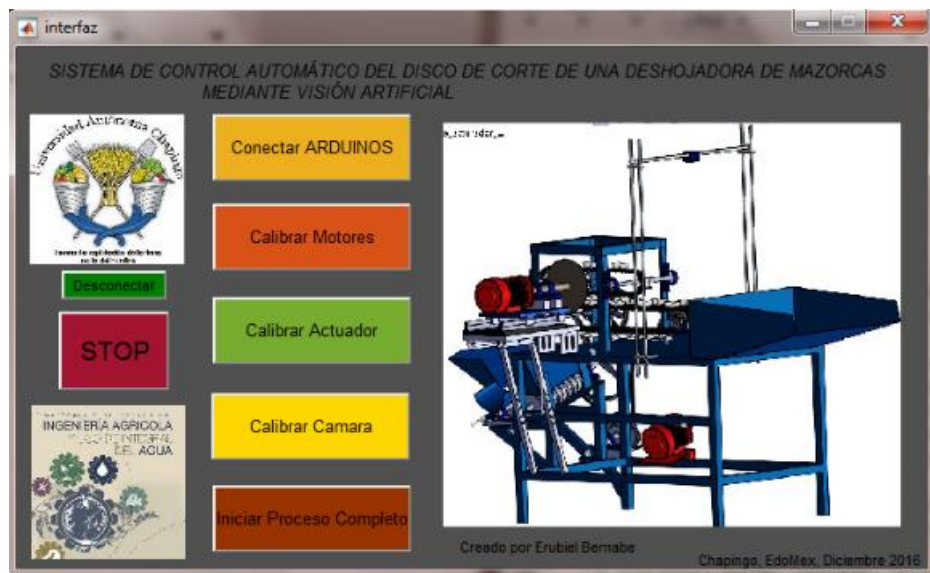


Figura A1. Panel principal.

El botón “Calibrar Motores” dirige al usuario a una ventana donde es posible accionar los motores del disco de corte y de la banda transportadora de manera independiente, para poder detenerlos con el botón de emergencia de la interfaz “Stop” (Figura A2). Esta GUI permite probar el buen funcionamiento de la maquinaria de manera manual.



Figura A2. Panel de calibración de los motores del disco de corte y la banda transportadora.

El botón “Calibrar Actuador” abre la ventana mostrada en la A3 donde se maneja un panel al que se ingresan datos referentes al funcionamiento del actuador lineal LD3. Este panel permite ajustar los valores de las ganancias K_p y K_v , así como el tipo de controlador usado para gobernar el actuador.

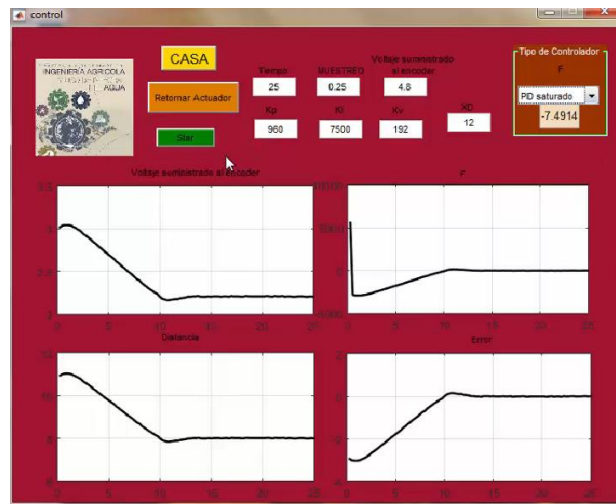


Figura A3. Panel de calibración del actuador lineal LD3.

El botón “Calibrar Cámara” lleva al panel de ingreso de datos que conciernen al control visual (Figura A.4). En la primera parte de este panel se ingresan los datos que pertenecen a la cámara y se ajustan los valores RGB en las barras deslizables de la interfaz. Al presionar el botón “Iniciar Calibración” se ejecuta el algoritmo de Bhargav (2010) modificado (Cebada, 2016), para extraer el color propio de la mazorca y generar los valores de l_t , dm , l_{bc} y l_{bco} . Una vez obtenidos estos datos se puede hacer una prueba estática (con los motores del disco y banda detenidos) al ingresar en la segunda parte del panel los valores propios del actuador y presionando “enviar datos”.

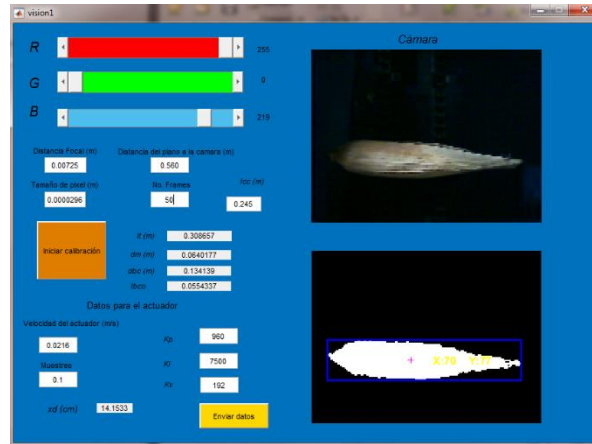


Figura A4. Panel de calibración de la cámara.

Las acciones del movimiento del actuador se reflejan en la pizarra de mapeo de datos (Figura A5. b) mostrando las gráficas de voltaje leído, fuerza estimada en el actuador con el controlador, distancia recorrida y error de posición de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo.

Finalmente, el botón “Iniciar Proceso Completo” indica el inicio del programa para calcular los parámetros geométricos de la mazorca mencionados y la variable de interés lbco. Este panel (Figura A5.a) permite modificar todavía los valores RGB a los rangos deseados, para iniciar el proceso con el botón “Iniciar” de calcula lbco y se genera el valor de la posición deseada que se ejecuta inmediatamente después graficando los datos en la pizarra (Figura A5. b) y regresando al panel anterior después para iniciar nuevamente el proceso.

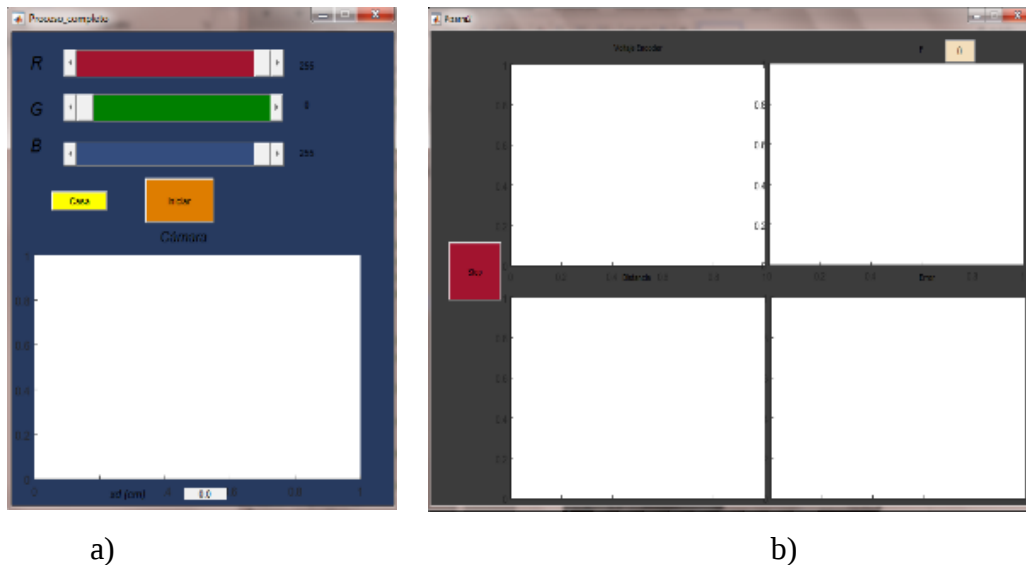


Figura A5. Panel de a) ajuste de variables RGB e inicio de proceso y b) pizarra de mapeo.

Apéndice B. Valores estadísticos

Cuadro B1. Parámetros geométricos medidos de una muestra mazorcas variedad Murano.

No.	<i>lbco</i>	<i>lt</i>	<i>lbdm</i>	<i>dm</i>	<i>do</i>	No.	<i>lbco</i>	<i>lt</i>	<i>lbdm</i>	<i>dm</i>	<i>do</i>
	cm			mm			cm			mm	
1	11.0	33.5	14.5	66.4	61.7	26	13.7	36.0	15.8	63.2	61.7
2	16.0	40.3	18.1	66.8	63.6	27	16.4	38.5	18.8	61.8	60.0
3	14.0	38.5	16.1	71.2	62.8	28	11.1	33.6	12.7	63.0	61.1
4	12.4	33.5	15.8	65.2	59.0	29	14.2	38.3	18.1	70.2	61.8
5	17.2	39.5	19.8	66.6	62.1	30	11.2	31.3	11.8	64.4	61.3
6	13.8	37.0	15.6	66.0	61.7	31	10.4	34.0	12.4	65.6	60.4
7	13.0	34.5	16.8	59.8	60.5	32	11.5	33.6	11.6	66.6	62.6
8	13.5	36.0	16.4	68.7	66.3	33	17.4	40.9	17.9	63.2	61.6
9	13.6	36.5	15.7	61.6	59.4	34	13.2	35.9	15.2	66.5	62.9
10	18.6	41.5	19.4	65.0	63.0	35	9.9	30.0	11.1	67.7	62.0
11	11.9	31.5	14.4	61.1	58.1	36	10.9	34.2	14.9	66.9	63.5
12	13.7	36.3	16.1	62.9	60.0	37	12.8	36.6	14.9	71.6	64.8
13	14.8	35.5	16.8	66.7	62.1	38	15.5	38.0	16.8	68.4	66.6
14	11.9	32.8	13.8	62.8	60.9	39	12.6	37.3	15.4	68.3	65.7
15	14.6	33.9	15.1	69.8	66.2	40	11.1	36.0	13.8	66.0	62.8
16	13.4	38.6	14.4	69.1	66.5	41	12.8	36.2	13.4	64.8	63.1
17	10.9	33.7	13.7	67.2	62.5	42	12.5	34.0	13.6	68.3	65.0
18	12.3	36.6	14.9	64.3	60.8	43	11.8	36.5	13.4	65.6	63.3
19	12.0	35.7	14.8	66.2	59.3	44	12.2	36.3	14.5	66.1	62.2
20	7.9	31.5	9.9	65.1	62.4	45	15.2	32.5	19.1	66.6	52.7
21	10.9	35.8	14.4	66.3	61.6	46	10.5	33.0	14.3	66.4	61.4
22	11.1	31.7	13.4	61.4	60.7	47	10.3	39.0	11.8	68.1	60.0
23	10.1	31.0	11.7	68.0	64.2	48	15.1	33.5	16.7	64.8	64.4
24	10.4	35.0	12.4	70.7	64.3	49	10.4	37.0	11.8	63.2	61.0
25	9.7	32.5	12.1	66.7	64.1	50	13.5	34.0	14.3	64.5	60.1

Cuadro B2. Estadísticas descriptivas de los parámetros geométricos de mazorcas de la variedad Murano.

Parámetros	<i>lbco</i>	<i>lt</i> (cm)	<i>lbdm</i>	<i>dm</i> (mm)	<i>do</i> (mm)
Media	12.70	35.38	14.80	65.95	62.12
Mediana	12.45	35.75	14.65	66.26	62.03
Desviación estándar	2.21	2.68	2.29	2.67	2.44
Varianza	4.90	7.21	5.25	7.13	5.96
Rango	10.7	11.5	9.9	11.83	13.91
Mínimo	7.9	30	9.9	59.8	52.69
Máximo	18.6	41.5	19.8	71.63	66.6

Cuadro B3. Parámetros geométricos medidos de una muestra mazorcas variedad Argentino Blanco.

Dranco.

No.	<i>lt</i>	<i>lbco</i>	<i>lbdm</i>	<i>dm</i>	No.	<i>lt</i>	<i>lbco</i>	<i>lbdm</i>	<i>dm</i>
	cm	mm				cm	mm		
1	34.4	44.25	93.24	60.89	17	27.1	31.11	99.67	51.19
2	37.1	39.68	86.77	68.29	18	37.9	71.51	129.12	63.74
3	36.7	36.37	104.9	60.48	19	34.3	21.78	86.42	61.98
4	33.5	39.49	87.33	56.54	20	36.3	40.5	81.61	51.74
5	31.2	45.53	104.53	57.92	21	30.1	25.97	89.11	56.71
6	38.4	73.63	88.31	58.51	22	37.8	43.56	116.49	68.62
7	34.9	50.08	82.04	65.28	23	35.7	32.62	97.41	52.59
8	38.8	70.67	122.44	56.91	24	30.8	51.84	92.14	55.31
9	42.9	70.06	144.97	64.65	25	41.7	46.04	118.28	66.33
10	34.9	55.55	99.88	61.56	26	36.1	46.98	115.83	36.88
11	38.8	51.87	116.9	62.29	27	38.7	55.49	105.25	50.61
12	35.7	80.96	143.49	49.91	28	35.5	44.1	90.71	54.33
13	39.7	62.87	117.93	56.84	29	41.9	96.79	142.14	67.99
14	36.6	33.61	92.48	59.3	30	34.5	77.45	93.77	53.98
15	43.1	51.52	143.4	60.8	31	31.7	33.82	91.32	54.6
16	34.9	56.44	95.17	64.14	32	32.4	17.06	79.91	47.01

Cuadro B4. Estadística descriptiva de mazorcas de la variedad Arroz.

Parámetros	<i>lt</i>	<i>lbco</i>	<i>lbdm</i>	<i>dm</i>
	cm		mm	
Media	36.06	49.97	104.78	58.06
Mediana	35.9	46.51	98.54	58.21
Desviación estándar	3.72	18.25	19.64	6.92
Varianza de la muestra	13.88	333.05	385.92	47.85
Rango	16	79.73	65.06	31.74
Mínimo	27.1	17.06	79.91	36.88
Máximo	43.1	96.79	144.97	68.62

Cuadro B5. Parámetros geométricos medidos de una muestra mazorcas variedad Arroz.

Cuadro B5. Parámetros geométricos medidos de una muestra de madera varietal F102.														
No.	lbco	lt	lbdm	dm	No.	lbco	lt	lbdm	dm	No.	lbco	lt	lbdm	dm
	cm		mm			cm		mm			cm		mm	
1	4.9	31.5	55.7	62.3	35	5.2	34.8	112.1	53.2	69	5.3	32.8	80.7	57.2
2	4.5	33.0	79.9	67.8	36	4.8	39.0	95.6	54.9	70	5.3	34.6	82.5	63.3
3	5.5	39.0	97.1	62.9	37	3.8	31.0	87.9	54.8	71	5.3	31.7	92.3	62.5
4	6.8	33.0	104.2	57.0	38	3.4	34.5	94.6	65.0	72	7.0	34.0	98.0	66.4
5	6.0	39.6	109.1	55.6	39	3.8	33.5	104.6	54.0	73	5.3	40.0	102.7	63.9
6	6.0	35.0	95.9	60.8	40	4.3	33.5	63.2	56.3	74	2.8	27.8	80.9	48.1
7	6.4	39.2	111.1	60.0	41	2.8	36.5	72.6	63.0	75	4.5	31.5	89.2	66.5
8	3.1	29.8	79.8	62.7	42	4.7	37.0	83.9	57.9	76	2.4	33.1	54.6	51.3
9	4.7	38.0	104.6	56.8	43	5.1	33.0	97.1	56.4	77	1.7	33.8	83.0	57.3
10	4.2	33.9	106.0	64.2	44	3.3	38.0	48.7	61.5	78	5.2	30.0	97.9	57.9
11	3.5	33.5	82.6	62.4	45	1.1	31.5	42.9	42.9	79	3.8	29.5	86.0	52.3
12	4.4	31.6	93.1	60.5	46	5.5	27.0	86.6	58.8	80	3.9	28.9	69.9	64.0
13	5.2	34.3	99.2	72.2	47	4.5	34.0	92.9	58.6	81	3.1	28.4	73.7	56.3
14	4.3	32.5	90.1	65.2	48	5.2	31.0	96.4	58.7	82	3.5	29.0	70.6	54.4
15	4.3	37.0	93.1	65.9	49	3.3	35.5	69.1	67.5	83	6.5	33.2	88.7	53.0
16	4.3	39.3	111.7	64.6	50	3.2	32.0	93.3	52.6	84	5.5	36.5	98.2	55.5
17	3.6	35.5	105.1	64.7	51	3.7	31.0	90.7	46.1	85	4.2	28.8	71.0	54.3
18	5.2	33.8	103.2	63.0	52	1.6	25.8	45.3	56.3	86	3.7	36.4	102.2	53.2
19	2.9	32.3	79.9	52.6	53	3.5	31.9	80.7	61.5	87	6.2	38.0	165.7	63.1
20	5.5	36.9	121.3	62.8	54	4.1	31.8	134.8	46.3	88	4.7	32.9	111.6	58.5
21	4.1	32.8	94.9	62.5	55	3.2	31.5	65.7	54.3	89	4.6	31.9	85.5	57.5
22	6.9	34.6	120.0	61.0	56	2.5	25.0	59.8	56.8	90	4.2	26.9	94.6	58.0
23	5.2	29.0	123.8	60.6	57	7.6	32.4	113.7	65.7	91	4.7	35.1	80.0	59.9
24	5.9	35.8	120.4	56.9	58	5.3	39.9	116.1	53.7	92	5.3	39.5	122.3	62.8
25	5.3	34.5	110.6	63.6	59	5.5	36.0	123.4	52.0	93	5.2	34.6	114.3	62.1
26	3.9	31.0	87.0	65.0	60	7.0	35.2	108.4	53.3	94	3.5	29.3	58.6	50.4
27	5.5	35.8	103.1	61.3	61	4.3	34.8	67.7	64.0	95	3.2	33.5	97.8	56.9
28	5.7	28.0	81.6	49.6	62	4.8	32.1	99.2	50.5	96	6.1	37.7	114.0	50.5
29	6.4	35.0	117.4	68.4	63	4.4	33.0	87.4	50.9	97	3.5	28.8	69.1	54.4
30	3.8	29.0	84.0	61.4	64	4.5	30.1	70.4	55.8	98	4.7	30.5	74.1	46.9
31	4.6	40.0	119.3	67.9	65	1.8	29.5	71.4	47.5	99	5.0	36.1	87.6	60.8
32	4.0	30.5	72.7	53.2	66	2.7	33.0	107.1	50.4	100	5.3	33.3	74.6	62.4
33	4.9	29.5	91.3	53.2	67	2.6	29.5	64.6	57.9	101	4.0	30.7	86.3	57.8
34	3.4	30.0	75.5	65.2	68	6.6	29.0	97.1	64.8	102	5.0	33.0	90.0	54.6
										103	3.7	29.9	49.1	56.2

Cuadro B6. Parámetros geométricos medidos mediante visión artificial de una muestra mazorcas variedad Arroz.

No.	A	lbc	No.	A	lbc	No.	A	lbc	No.	A	lbc
	(pixeles)			(pixeles)			(pixeles)			(pixeles)	
1	23647	188	27	24703	200	53	29507	192	79	22003	218
2	32099	196	28	17054	261	54	23742	195	80	27476	184
3	31745	231	29	32955	234	55	24705	186	81	25613	171
4	26429	206	30	25366	176	56	21154	148	82	23725	179
5	29302	234	31	35838	238	57	29634	181	83	25594	201
6	25173	181	32	21351	175	58	29434	227	84	29285	227
7	29742	229	33	23198	200	59	27218	221	85	23287	180
8	21889	159	34	25760	173	60	26077	213	86	27992	227
9	30030	270	35	24782	202	61	29976	220	87	30759	229
10	29824	205	36	29648	232	62	23652	203	88	25586	199
11	30958	273	37	23670	179	63	25767	201	89	28090	209
12	26296	184	38	31975	211	64	25820	186	90	23002	171
13	30578	208	39	25648	193	65	22934	178	91	28000	203
14	23301	183	40	26001	193	66	24103	193	92	37280	253
15	31227	201	41	31409	196	67	27306	143	93	30783	215
16	35904	230	42	33033	226	68	27930	212	94	24596	201
17	28534	209	43	27785	263	69	28053	199	95	27024	203
18	26731	204	44	28004	189	70	29627	205	96	29049	230
19	21391	171	45	18324	161	71	30568	290	97	21899	174
20	30151	223	46	27028	211	72	34207	223	98	19361	185
21	28650	204	47	25777	192	73	37312	253	99	31457	224
22	28565	220	48	26023	199	74	20448	175	100	26149	199
23	25608	186	49	32544	195	75	29834	278	101	25918	189
24	27488	219	50	21798	166	76	23325	180	102	24790	231
25	28194	214	51	20054	170	77	26853	266	103	23001	230
26	26024	181	52	23485	158	78	24003	202			

Cuadro B7. Estadística descriptiva de mazorcas de la variedad Arroz.

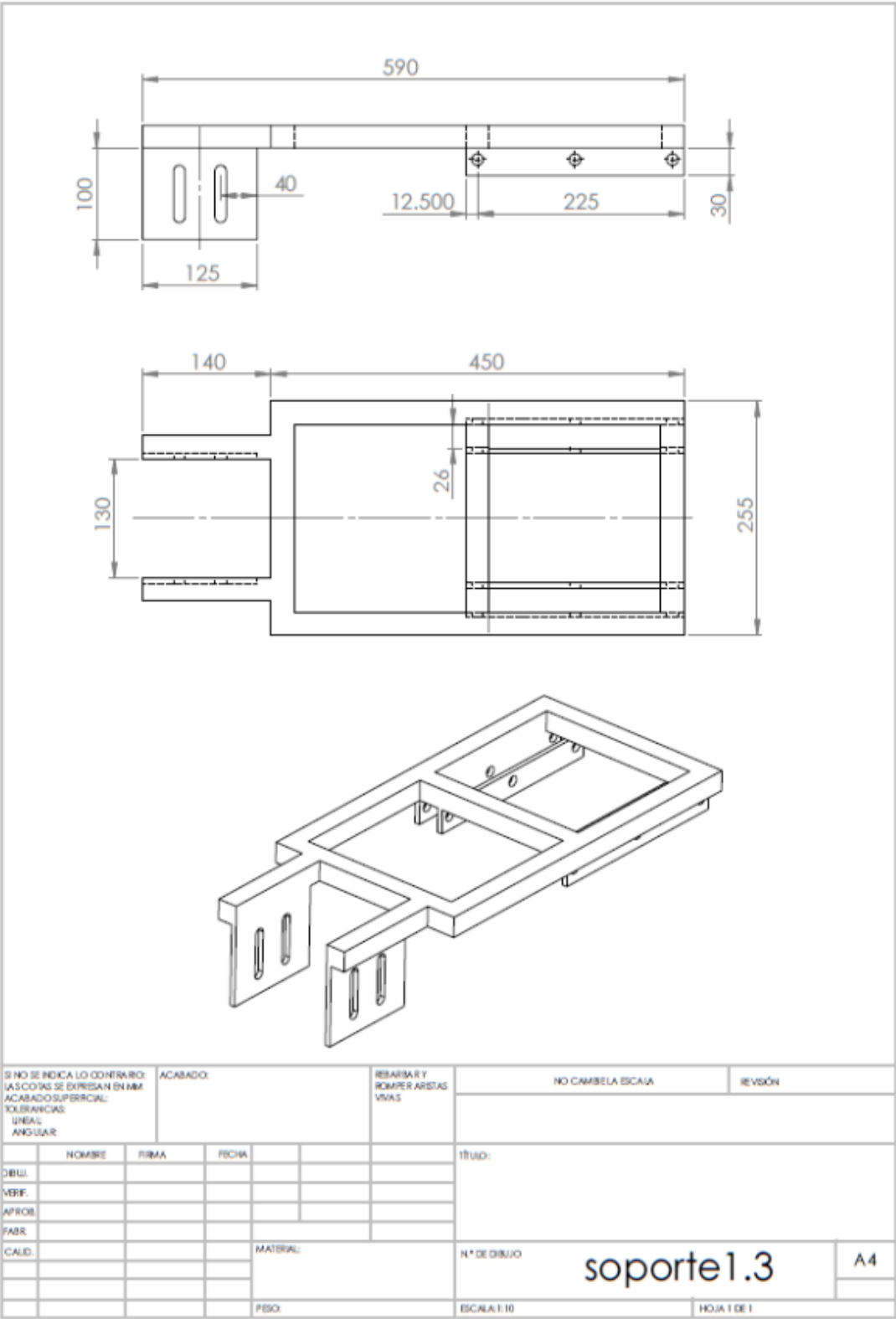
	lbco	lt	lbdm	dm	A	lbc
	(cm)		(mm)		(pixeles)	
Media	4.49	33.10	90.94	58.33	26967.00	204.89
Mediana	4.53	33.00	91.27	57.94	26731.00	201.00
Desviación estándar	1.26	3.42	20.62	5.79	3970.25	28.49
Varianza de la muestra	1.60	11.68	425.06	33.54	15762892.75	811.92
Mínimo	1.07	25.00	42.95	42.91	17054.00	143.00
Máximo	7.58	40.00	165.67	72.20	37312.00	290.00

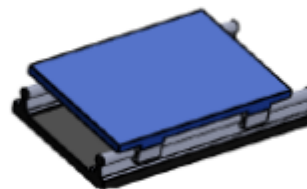
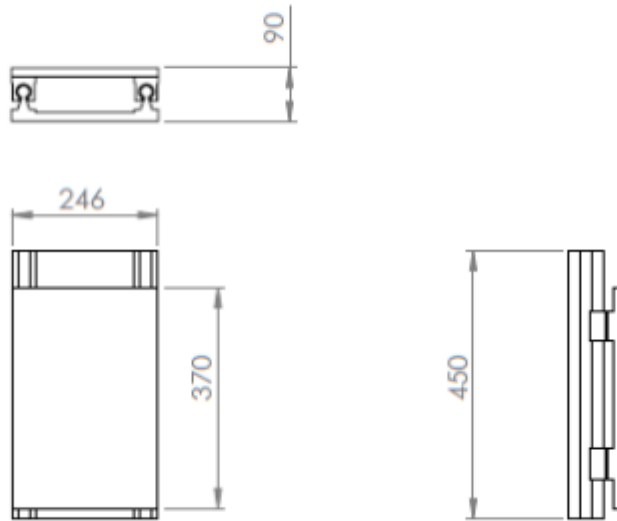
Apéndice C. Costos totales

Cantidad	Unidad	Concepto	Precio Unitario MXNM	Importe
1	Pieza	Fuente de alimentación regulable 30V 3.5 A	\$ 1,600.00	\$ 1,600.00
1	Pieza	Módulo Relevador De 5v De 2 Canales	\$ 80.00	\$ 80.00
1	Pieza	Actuador lineal 6 retro 12V 20:1	\$ 2,482.76	\$ 2,482.76
1	Pieza	Arduino MEGA 2560 Rev3	\$ 706.90	\$ 706.90
4	Pieza	Arduino UNO ATmega328	\$ 73.28	\$ 293.10
1	Pieza	Controlador motor DC VNH5019	\$ 672.41	\$ 672.41
2	Pieza	Montaje actuador lineal LD	\$ 293.10	\$ 586.20
1	Pieza	Cámara web PC-320425	\$ 120.00	\$ 120.00
1	pieza	Base para motor de 0.59 cm x 0.26 cm PTR de 1" y placa de 1/4"	\$ 1,850.00	\$ 1,850.00
900	mm	1061 TSB20MM Flecha Lineal con base 20mm	\$ 1.57	\$ 1,413.00
4	pieza	SSBR20MM Chumacera Lineal 20mm Abierta Frame Aluminio	\$ 370.00	\$ 1,480.00
1	pieza	NYLAMID 1/2"X24X24	\$ 1,751.37	\$ 1,751.37
1	m	Perfil tubular galvanizado rectangular de 1"	\$ 12.00	\$ 12.00
1	m	Perfil tubular galvanizado rectangular de 7/8"	\$ 10.00	\$ 10.00
10	piezas	Tuerca y arandelas para tornillos 3/8" de 2"	\$ 2.00	\$ 20.00
2	piezas	Tuercas y arandelas para tornillos 1/2" de 4"	\$ 3.00	\$ 6.00
16	piezas	Tuercas y arandelas para tornillos 1/8" de 1.5"	\$ 0.50	\$ 8.00
18	piezas	Tuercas y arandelas para tornillos 10mm de 1"	\$ 1.00	\$ 18.00
5	m	Varilla roscada 3/8"	\$ 15.00	\$ 75.00
2	piezas	Prensas en forma de C de 3"	\$ 45.00	\$ 90.00
1	pieza	Unión para eje de motor 5/16" a 1" Acero 1014 Cold Roll con opresores	\$ 700.00	\$ 700.00
0.25	m	Eje para disco roscado de 1" con cajones para cuñas	\$ 400.00	\$ 100.00
			Subtotal	\$14,074.74
			IVA 16.00%	\$ 2,251.96
			Total	\$16,326.70

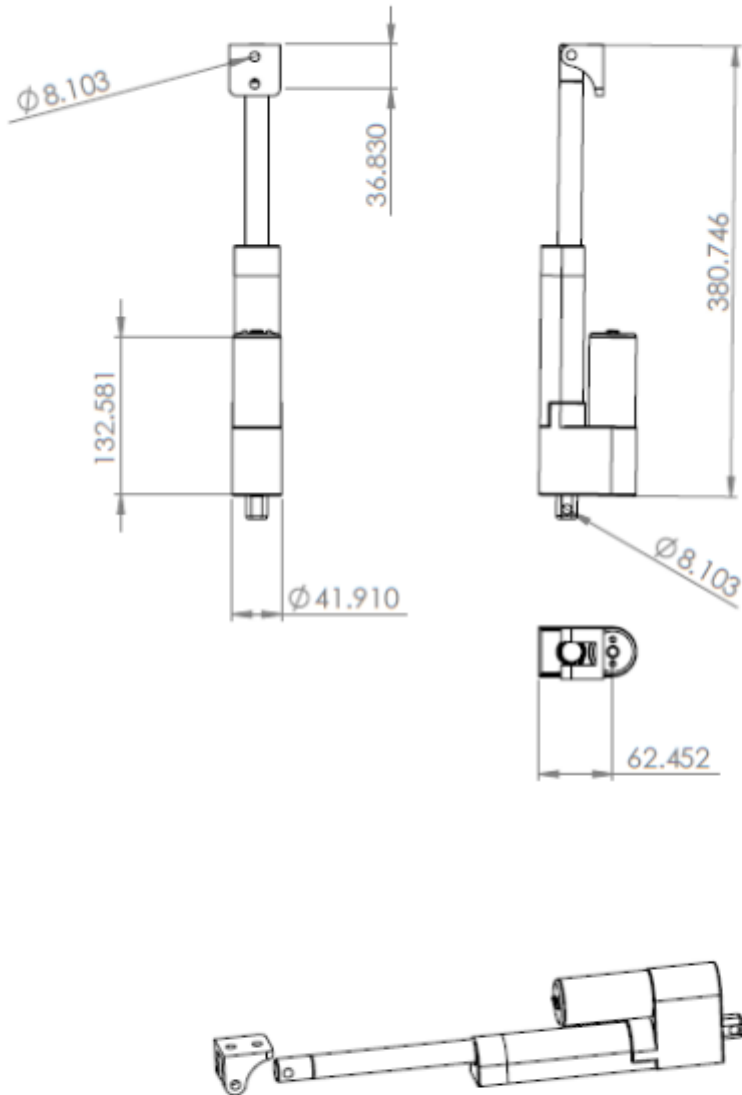
Costos al 31 de diciembre de 2016

Apéndice D. Plano

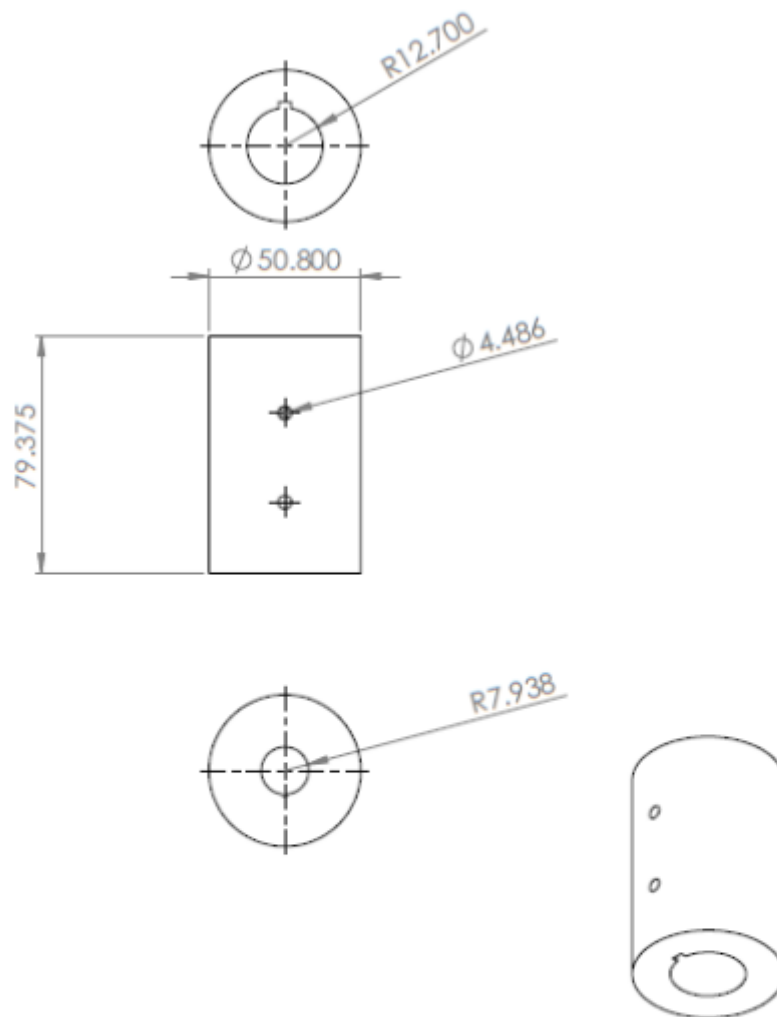




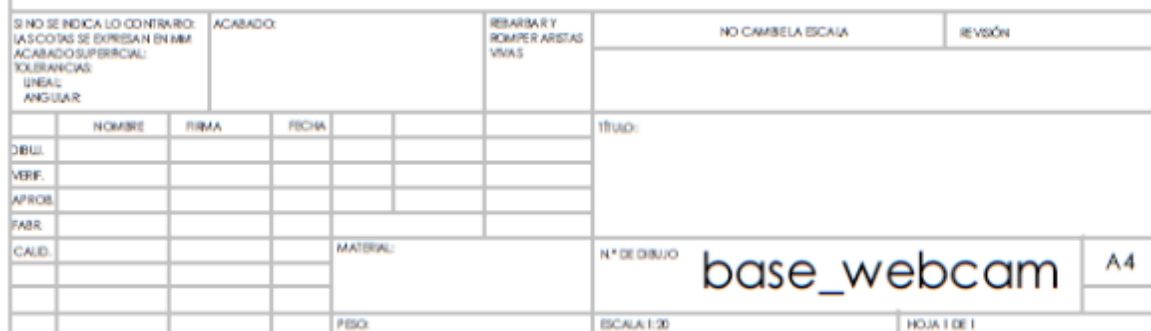
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL ANGULAR				ACABADO:		REBARBOS Y ROMPER ARISTAS VIVAS		NO CAMBIA LA ESCALA		REVISIÓN	
NOMBRE				FIRMA		FECHA		TÍTULO:			
DIBUJ.											
VERIF.											
APROB.											
FABR.											
CALD.						MATERIAL:		N.º DE DIBUJO			
								bancada			
								A4			
						PESO:		ESCALA: 1:80			
								HOJA 1 DE 1			

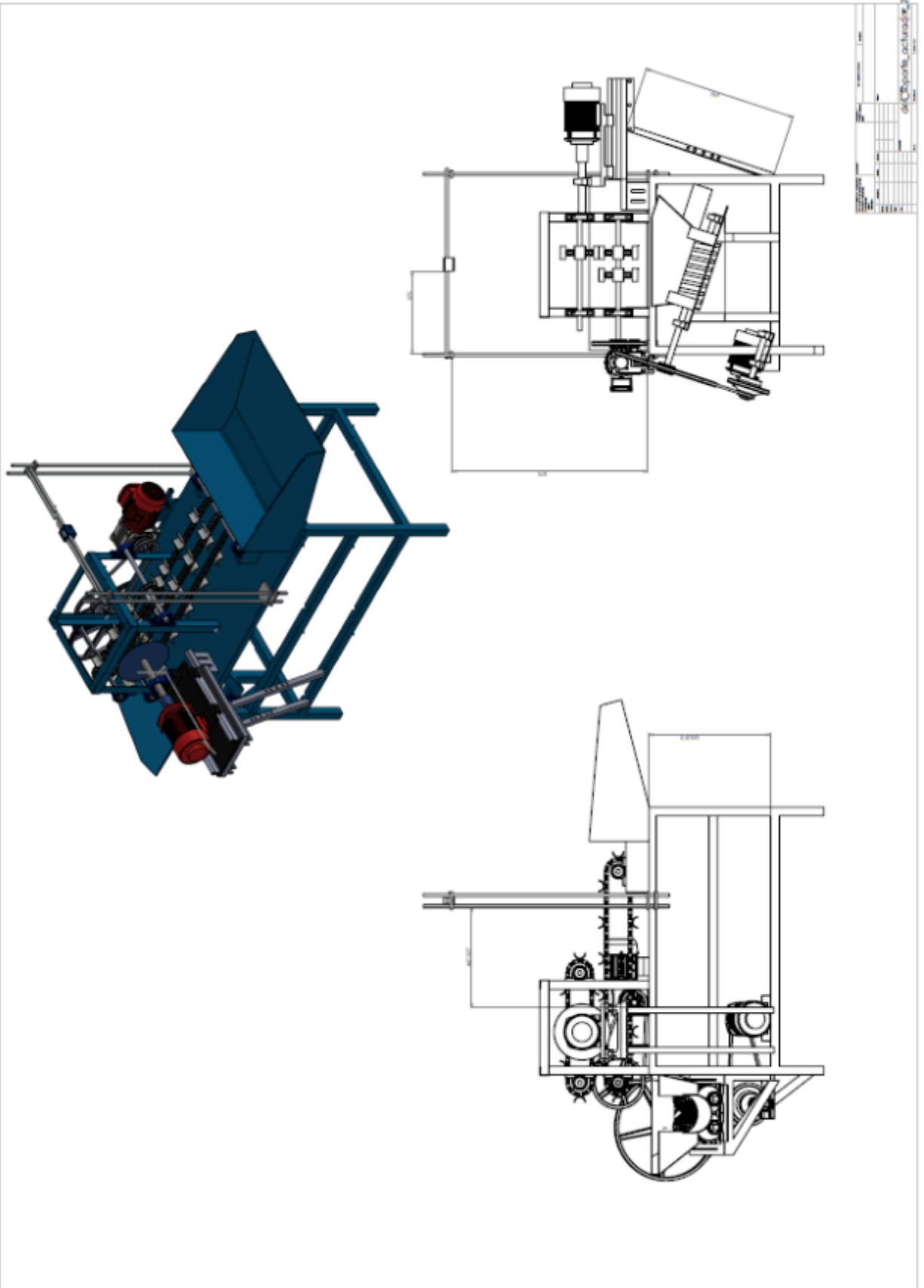


SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:				ACABADO:		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		NO CAMBIA LA ESCALA		REVISIÓN	
NOMBRE				FIRMA		FECHA		TÍTULO:			
DISEÑADOR											
VERIFICADOR											
APROBADOR											
FABRICADOR											
CALIDAD						MATERIAL:		N° DE DIBUJO			
								DISE1			
								A4			
						PESO:		ESCALA: 1:5			
								HOJA 1 DE 1			



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL ANGULAR				ACABADO:		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VINAS		NO CAMBIA ESCALA		REVISIÓN	
NOMBRE				FIRMA		FECHA		TÍTULO:			
DISEÑ.											
VERIF.											
APROB.											
FABR.											
CALD.						MATERIAL:		N.º DE DISEÑO			
								reduccion			
								A4			
						PESO:		ESCALA 1:2			
								HOJA 1 DE 1			





Apéndice E. Códigos

1. Código en C con OpenCV.

```
//Este programa calcula el A, dm, lt, dbc y lbco de una mazorca//Por Erubiel Bernabe
Lopez
#include "opencv2/highgui/highgui.hpp"
#include "opencv2/imgproc/imgproc.hpp"
#include <iostream>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <math.h>
using namespace cv;
using namespace std;
Mat src; Mat src_gray; Mat dilated; Mat eroded; Mat dst; Mat dst0; int thresh = 202; int
max_thresh = 255;
RNG rng(12345);
int keyboard; //input from keyboard
//Constantes del sistema de vision
//Distancia focal de la camara web PC-320425
double df=0.00725; //m
//Tamaño de pixel, considerando la resolucion de 640 pix.
double tp=0.0000075; //m
//Distancia del plano a la camara
double z=0.620; //m
//longitud del centro de la camara al cero de la maquina
double lcc=0.235; //m
/// Function header
void thresh_callback(int, void* );
/** @function main */
int main( int argc, char** argv )
{
    VideoCapture capture(1); /// Cargar video
    while ((char)keyboard != 'q' && (char)keyboard != 27)
    {
        //read the current frame
        if (!capture.read(src)) {
            if (!capture.read(src)) {
                if (!capture.read(src)) {
                    if (!capture.read(src)) {
                        cerr << "Unable to read next frame." << endl;
                        cerr << "Exiting..." << endl;
                        exit(EXIT_FAILURE);
                    }
                }
            }
        }
        /// Convierte la imagen a HSV y extrae el rango especificado
        cvtColor( src, dst0, CV_BGR2HSV );
        inRange(dst0, Scalar(0,0,20), Scalar(255,118,255), dst);
        //Se elimina Ruido
        cv::dilate(dst,dilated,cv::Mat());
        cv::erode(dilated,eroded,cv::Mat());
        /// Create Window
        char* source_window = "Source";
        namedWindow( source_window, CV_WINDOW_AUTOSIZE );
        imshow( source_window, src ); imshow("Imagen dilatada y erosionada",eroded);
        //Crea la barra ajustable de treshold
        createTrackbar( " Threshold:", "Source", &thresh, max_thresh, thresh_callback );
        thresh_callback( 0, 0 );
        keyboard = waitKey(30); }
        waitKey(0);
        return(0);
    }
}
/** @function thresh_callback */
```

```

void thresh_callback(int, void* )
{
    Mat threshold_output;
    vector<vector<Point> > contours;
    vector<Vec4i> hierarchy;
    /// Detecta contornos
    threshold( eroded, threshold_output, thresh, 255, THRESH_BINARY );
    /// Encuentra contornos
    findContours( threshold_output, contours, hierarchy, CV_RETR_TREE,
CV_CHAIN_APPROX_SIMPLE, Point(0, 0) );
    /// Encuentra los rectangulos rotados para cada contorno
    vector<RotatedRect> minRect( contours.size() );
    for( int i = 0; i < contours.size(); i++ )
        {minRect[i] = minAreaRect( Mat(contours[i]) );}
    /// Dibuja contornos + rectangulos rotados
    Mat drawing = Mat::zeros( threshold_output.size(), CV_8UC3 );
    for( int i = 0; i < contours.size(); i++ )
        {
            Scalar color = Scalar( rng.uniform(4, 255), rng.uniform(0,255),
rng.uniform(0,255) );
            /// contour
            drawContours( drawing, contours, i, color, 1, 8, vector<Vec4i>(), 0, Point() );
            /// rotated rectangle
            Point2f rect_points[4]; minRect[i].points( rect_points );
            ///largo y ancho
            double largo= cv::norm(rect_points[1]-rect_points[2]);
            double ancho = cv::norm(rect_points[0]-rect_points[1]);
            ///dibuja cuando la mazorca pasa por el centro
            if (abs(largo)>400){
                if (abs(ancho)>80){
                    for( int j = 0; j < 4; j++ )
                        {line( drawing, rect_points[j], rect_points[(j+1)%4], color, 1, 8 );}
                    ///loclizcion de lbdm
                    Point pini(rect_points[1].x+10,rect_points[1].y+10);
                    circle(drawing, pini, 2, Scalar(0,255,0), -1);
                    ///localizacion del centroide
                    Moments m = moments(eroded, true);
                    double largoc=m.m10/m.m00;
                    double anchoc= m.m01/m.m00;
                    Point centro(largoc,anchoc);
                    circle(drawing, centro, 5, Scalar(128,0,0), -1);
                    ///Distancia de la base al centroide
                    double anchol=(rect_points[1].y+rect_points[0].y)*0.5;
                    double DBCl=(rect_points[0].x+rect_points[1].x)*0.5;
                    double DBC=largoc-DBCl;
                    Point base(DBCl,anchol);
                    circle(drawing, base, 5, Scalar(128,0,0), -1);
                    line( drawing, base, centro, color, 1, 8 );
                    ///Calcula el area
                    double TotalNumberOfPixels = src.rows * src.cols;
                    double area=countNonZero(eroded);
                    ///Transformacion de pixeles a coordenadas expaciales
                    double D=z;
                    double lt_real=((tp*D*largo)/df)*100;
                    double dm_real=((tp*D*ancho)/df)*1000;
                    double dbc_real=(tp*D*DBC)/df;
                    ///Calculo de lbco//lbdo=b+X1*dm+X2*lt+X3*A+X4*DBC
                    // double lbco=-54.33+0.77*dm_real+0.05*lt_real+0.00*area+0.44*DBC;
                    double lbco=-22.88538+0.3379*DBC;
                    ///imprime largo y ancho, DBC, Area
                    cout<<"lt: " <<lt_real<<" cm" <<endl;
                    cout<<"dm: " <<dm_real<<" mm" <<endl;
                    cout<<"dbc: " <<dbc_real<<" pixeles" <<endl;
                }
            }
        }
}

```

```

        cout<<"A:    "<<area<<" pixeles"<<endl;
        cout<<"lbco:"<<lbco<<" mm"<<endl;
        cout<<"        "<<endl;
    }    }    }
    /// Show in a window
    namedWindow( "Contours", CV_WINDOW_AUTOSIZE );
    imshow( "Contours", drawing );
}

```

2. Código en MATLAB de procesamiento visual.

```

function iniciar_Callback(hObject, eventdata, handles)
global vid valor1 valor2 valor3 df tp z tef nf lcc;
global A h kp kv xdreal veloci ki xc yc;
veloci=str2double(get(handles.velocidad,'String'));%velocidad
h=str2double(get(handles.muestreo,'String'));%muestreo
kp=str2double(get(handles.gananciakp,'String'));%ganancia
kv=str2double(get(handles.gananciakv,'String')); %ganancia
ki=str2double(get(handles.gananciaki,'String')); %ganancia
df=str2double(get(handles.df,'string'));
tp=str2double(get(handles.tp,'string'));
z=str2double(get(handles.z,'string'));
nf=str2double(get(handles.nf,'string'));
lcc=str2double(get(handles.lcc,'string'));
imqhwinfo('winvideo')
vid=videoinput('winvideo',1);
set(vid, 'FramesPerTrigger', Inf);
set(vid, 'ReturnedColorspace', 'rgb')
vid.FrameGrabInterval = 1;
%start the video aquisition here
start(vid)
% Set a loop that stop after 100 frames of aquisition
while(vid.FramesAcquired<=nf)
    % Get the snapshot of the current frame
    data = getsnapshot(vid);
    [n,m,f]=size(data);
    planeR=data( :, :,1);
    planeG=data( :, :,2);
    planeB=data( :, :,3);

    %totalgam=inv(planeT);
    RRED=im2double(planeR);
    RGREEN=im2double(planeG);
    RBLUE=im2double(planeB);
    planeT=(RGREEN*valor2)+(RRED*valor1)-(RBLUE*valor3);
    GAMMA=im2uint8(planeT);
    % ALGORITMO DE A. Bhargav Anand 2010 PARA COLORES
    %Use a median filter to filter out noise
    diff_im = imsubtract(GAMMA, rgb2gray(data));
    diff_im = medfilt2(diff_im, [3 3]);
    % Convert the resulting grayscale image into a binary image.
    diff_im = im2bw(diff_im,0.18);
    % Remove all those pixels less than 100px
    diff_im = bwareaopen(diff_im,100);
    % Label all the connected components in the image.
    bw = bwlabel(diff_im, 8);

```

```

% Here we do the image blob analysis.
% We get a set of properties for each labeled region.
stats = regionprops(bw, 'BoundingBox', 'Centroid');
% Display the image
axes (handles.axes1);
imshow(data)
axes (handles.axes2);
imshow(diff_im)
hold on
k=1;
%This is a loop to bound the red objects in a rectangular box.
for object = 1:length(stats)
    bb = stats(object).BoundingBox;
    bc = stats(object).Centroid;
    rectangle('Position',bb,'EdgeColor','b','LineWidth',2)
    plot(bc(1),bc(2), '-m+')
a=text(bc(1)+15,bc(2), strcat('X: ', num2str(round(bc(1)))), '      Y: ',
num2str(round(bc(2)))));
set(a, 'FontName', 'Arial', 'FontWeight', 'bold', 'FontSize', 12, 'Color',
'yellow');
%Localizacion de las variables de trabajo
    lt_pix=bb(3);%píxeles
    dm_pix=bb(4);%píxeles
    dbc_pix=bc(1)-bb(1);%píxeles
%Transformacion de píxeles a coordenadas espaciales
    D=z;
    lt_real=(tp*D*lt_pix)/df;
    set(handles.lt,'String',lt_real);
    dm_real=(tp*D*dm_pix)/df;
    set(handles.dm,'String',dm_real);
    dbc_real=(tp*D*dbc_pix)/df;
    set(handles.dbc,'String',dbc_real);
    cx=(tp*D*bb(1))/df; %distancia del eje x al punto 1 del rect
    rows2=(tp*D*(162/2))/df;%ancho de trabajo de la camara
    dbc=(dbc_pix*640)/162;
    lbco_real=(-22.88538+0.3379*dbc)/1000;%valormodificado para 162
pixels
    set(handles.lbco,'String',lbco_real);
%Transformacion a coordenadas de trabajo
    lcam=rows2-cx-lbco_real;
    xdreal=(lcc-lcam)*100
    set(handles.xd,'String',xdreal);
    k=k+1;
%tiempo de ajuste
    A=25;
end
hold off
end
% Stop the video acquisition.
stop(vid);
warndlg('listo');
% Flush all the image data stored in the memory buffer.
flushdata(vid);

```

3. Código en MATLAB de control de pizarra.

```
function varargout = Pizarra2_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
    global a A h kp kv xdreal2 b
    j=0;M1A=2;M1B=4;f=0;D=A/h;t=0;xan=0;tic;
    %Inicia el motor del disco
    b.digitalWrite(6,0);
    %Procesamiento
    while j<D;
        j=j+1;t=t+h;
        handles.ejex(j)=t;
        f=a.analogRead(8)*(4.8/1024);y(j)=f;%voltaje del encoder
        xm=((15.24)*(f))/4.4043;%Ley del actuador
        dis(j)=xm;
        %LEY DE PIZARRA2
        Error=xdreal2-xm;
        Errorgraf(j)=Error;
        %Velocidad.....Derivada del error
        xp=(xm-xan)/h;    xan=xm;
        %Aplicacion de controlador PD
        F=kp*Error-kv*xp;
        set(handles.fuerza,'String',F);
        tau(j)=F;
        %sentido del motor
        if F==0
            a.digitalWrite(M1A,0);
            a.digitalWrite(M1B,0);
        elseif F<0
            a.digitalWrite(M1A,1);
            a.digitalWrite(M1B,0);
        else
            a.digitalWrite(M1A,0);
            a.digitalWrite(M1B,1);
        end
        %MAPEO DE VOLTAJES ESTIMADOS Y REALES
        vpmw=(abs(F))*(255/1200);
        voltajeRel=uint8(vpmw);
        analogWrite(a,9,voltajeRel);
        axes(handles.axes2);
        plot(handles.ejex,tau,'r','LineWidth',2);grid on;
        axes(handles.axes3);
        plot(handles.ejex>Errorgraf,'g-','LineWidth',2);grid on;
        axes(handles.axes1);
        plot(handles.ejex,y,'b','LineWidth',2);grid on;
        axes(handles.axes5);
        plot(handles.ejex,dis,'c','LineWidth',2);grid on;
    end
    tiempo = toc;
    fprintf('El proceso ha tardado %d segundos', tiempo);
    %Activacion del motor de la banda
    b.digitalWrite(7,0);pause(30)
    %Apaga los motores
    b.digitalWrite(7,1);b.digitalWrite(6,1);
    Proceso_completo
    close Pizarra2
    varargout{1} = handles.output;
```