

Design of a Position Control for a Cutting System of a Maize-Husking Machine

E. Bernabe, E. Romantchik, J.G. Cebada and N. Velázquez¹

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. There is at University of Chapingo a maize husking machine that generates damage to the leaves of 3.41% and 53.35% of wasted grain. The goal of the research was to develop a control system for a maize-husking machine's cutting blade positioning by entering the data of the desired position of cut in a graphical user interface control-system applying MATLAB and Arduino cards. The mechanism uses a linear actuator with a velocity of $2.15\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$. The control system was tested by applying five types of PID family controllers. The tests were performed with a reference distance of 5 cm to locate the mechanism. The most convenient controller was the PID with a stabilization time of 2.68s.

Keywords— Maize (*Zea mays* L.), control system, PID controllers.

I. INTRODUCCIÓN

EXISTE una industria de procesamiento de hojas de maíz que emplea estos productos para la producción de tamales; estas demandan hojas de calidad, con determinados requerimientos físicos, entre los que destacan el largo y ancho de cada una. 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 registran la producción de hojas de maíz [1]. 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 [2]. 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 [3] y de estas se encuentran más de 75 en México [4]. 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 Fig. 1 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; por ello la

importancia de sistemas de visión artificial como un evaluador con juicios estadísticos [5].



Figura 1. 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 [6]. El control automático se ha convertido en una parte importante e integral en los procesos industriales y agrícolas [7]. En la maquinaria para este propósito, la calidad de las hojas depende de la variedad de maíz y el método de corte [8]. Para esto se describe una máquina (Fig. 2), 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.

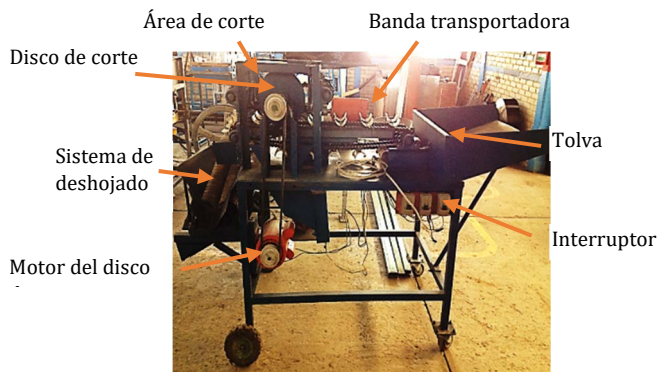


Figura 2. Deshojadora de mazorca para tamal.

El sistema de corte de las mazorcas consiste en un disco de corte de 250 mm con filo tipo navaja para cortar la mazorca de maíz y requiere un motor de 1.5 kW. Este sistema tiene el inconveniente de que, al colocar la mazorca en la banda transportadora manualmente, puede cortar el pedúnculo incompleto, donde las hojas no se separan del todo, o más de lo necesario llevándose con el grano 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% [8]. Estos valores indican que la máquina tiene deficiencias relacionadas con la geometría

E. Bernabe, University of Chapingo, al07101297@chapingo.mx
E. Romantchik, University of Chapingo, eugenio.romantchik@gmail.com
J. G. Cebada, University of Puebla Valley, guillermo.cebada@gmail.com
N. Velázquez, University of Chapingo, noe.velazquez@gmail.com

variable de las mazorcas. Para optimizar el proceso de corte de mazorcas, se describe una patente con la idea de ajustar el disco de corte de una máquina deshojadora de mazorcas para tamal mediante el procesamiento de imágenes (Fig. 3), para calcular la longitud de corte óptima ($lbco$) [9].

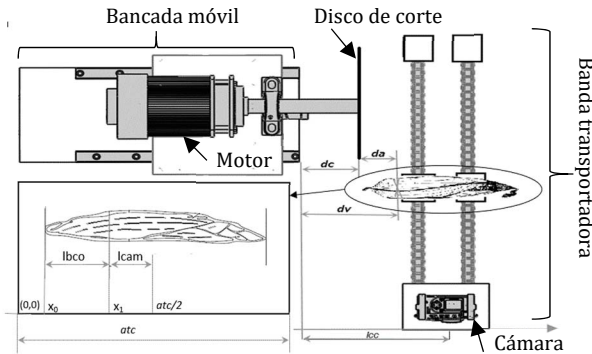


Figura 3. Vista superior del sistema de corte automático de una deshojadora de mazorcas.

Este método hace uso de este parámetro para calcular 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 obtiene la distancia x_1 . Con estos valores se aplica la ecuación (1), con lo que es posible determinar la distancia de corte de la mazorca al origen del dispositivo (dv), restando $lcam$ a la distancia preestablecida del origen al centro de la cámara (lcc) con la ecuación (2) y calcula la distancia de ajuste (da) del disco de corte con la ecuación (3). Este dispositivo está en desarrollo en la Universidad Autónoma Chapingo.

$$lcam = \frac{atc}{2} - x_1 \quad (1)$$

$$dv = lcc - lcam \quad (2)$$

$$da = dv - dc \quad (3)$$

El objetivo de esta investigación fue desarrollar y evaluar un sistema de control automático del disco de corte de una máquina deshojadora de mazorcas con visión artificial para minimizar el error de corte generado por el usuario de la maquinaria y la alta variabilidad de tamaños de una variedad de mazorcas. La evaluación se realizó mediante pruebas a una distancia de referencia con cinco tipos de controladores PID ingresando el valor de la posición óptima de corte de la mazorca manualmente mediante una interfaz gráfica de usuario en MATLAB.

II. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

A. Sistema mecánico

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 [10].

Este mecanismo está constituido por una bancada que se desliza sobre dos rieles de aluminio con la ayuda de cuatro chumaceras lineales. Las dimensiones del eje del disco se encuentran establecidas por lo que al diseñar el mecanismo de ajuste de la posición del disco de corte las limitaciones espaciales hacen que se considere sólo una chumacera (Fig. 4). Estos elementos se ubican sobre un mecanismo que se encargara de desplazarlos considerando una masa total $m=30$ kg en total.

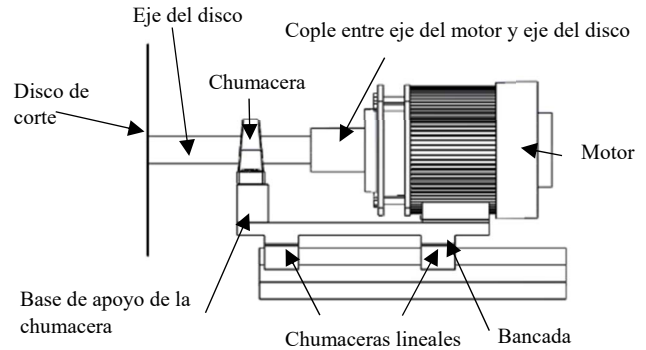


Figura 4. Componentes del mecanismo de ajuste de posición del disco de corte.

Los rodamientos usados son el modelo lineal SBR20UU. Se eligió el actuador lineal LD3, que puede ejercer horizontalmente una fuerza de empuje y jale $F=1200$ N máximo, con un desplazamiento de 6 in máximo. Cuenta con un sistema de retroalimentación basado en un encoder de tipo absoluto [11] que está incluido en la carcasa del modelo.

La cámara conecta con un procesador de imágenes. Esta recibe la imagen de la cámara, la segmenta y genera la parametrización de la imagen [12], estableciendo los parámetros geométricos. La tarjeta de adquisición de imágenes conecta a su vez con la 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 (dc).

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 Fig. 5 y se coloca en la deshojadora al inicio de la banda transportadora.

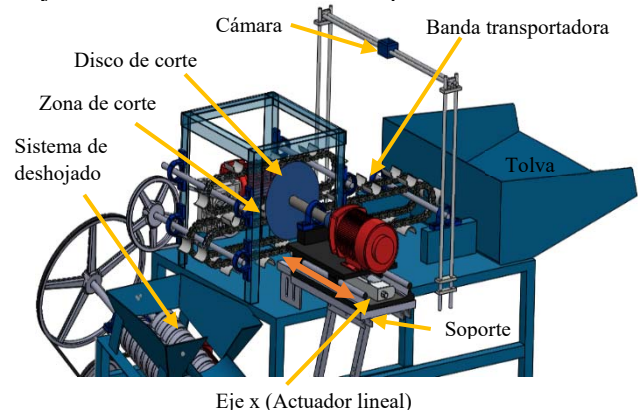


Figura 5. Sistema de corte con control de posición del disco de corte.

El sistema de visión artificial tiene como fuente de alimentación la computadora, la cual a su vez está 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.

B. Descripción del sistema en lazo cerrado

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 [13]. Esta tarjeta servirá además como una interfaz física entre la computadora y el actuador.

Para controlar el actuador lineal se requiere de un puente H para cambiar la dirección del giro del motor. Para este trabajo se utilizó el controlador de motores VNH5019 usando una fuente de alimentación externa de 20V a 2A [13].

El sistema de control desarrollado está constituido por tres partes (Fig. 6), 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), al emplear las ecuaciones (1-3) resulta el dato de la distancia deseada (q_d) 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 q_d ; 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.

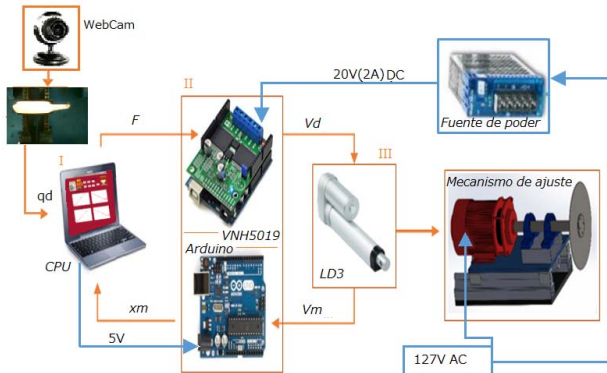


Figura 6. Lazo cerrado de control para el actuador del sistema.

C. Interfaz gráfica de usuario GUI

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

Como se observa en la Fig. 7 al iniciar la GUI se solicita la inicialización de tarjetas Arduino, para posteriormente ingresar

los datos correspondientes a las ganancias, tiempo, y distancia deseada. Hecho esto se selecciona un tipo de controlador y entra en el lazo de control hasta un tiempo final t_f , para graficar los datos generados. Al terminar el bucle finaliza el programa.

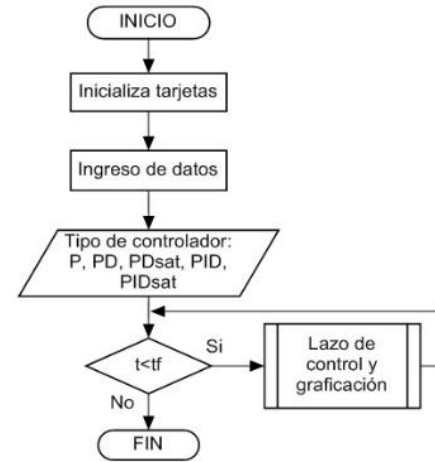


Figura 7. Diagrama de flujo de la interfaz gráfica de usuario

III. DESCRIPCIÓN MATEMÁTICA.

A. Modelo dinámico

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 Fig. 8. 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 $f(\dot{q}, F)$ es mínima por lo que se omite.

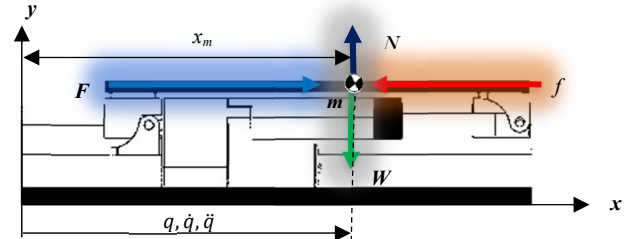


Figura 8. Posición del actuador respecto al eje x.

Mediante la aplicación de la segunda ley de Newton se establece la ecuación que rige el sistema [14], donde F es la fuerza ejercida por el actuador lineal.

$$F = m\ddot{q} \quad (4)$$

Para facilitar la manipulación de las ecuaciones de control y su posterior uso en lenguajes de programación se establecen las variables de estado [15], 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} :

$$X1 = \tilde{q} = q_d - q \quad (5)$$

$$\dot{X1} = \dot{\tilde{q}} = -\dot{q} \quad (6)$$

$$X2 = \dot{q} \quad (7)$$

$$\dot{X2} = \ddot{q} \quad (8)$$

Donde X_1 representa el error de posición y X_2 es la velocidad de ajuste del disco de corte. Sustituyendo la ecuación (8) en la ecuación (4) se tiene entonces un modelo de la forma:

$$\dot{X}_2 = m^{-1}F \quad (9)$$

B. Controladores PID

Los controladores de la familia PID son actores principales en el teatro de la automatización, llamados así por sus términos proporcional (P), integral (D) y/o derivativo (D). El controlador P produce una señal que es proporcional al error entre los valores real y deseado de la variable controlada (posición de disco de corte). Esto genera la compensación básica por control retroalimentado, produciéndose entonces 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 controlador 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 controlador 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 previsor resulte en una respuesta rápida.

Estos controladores son usados en el control de posición, que mueve el disco de corte 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 en un determinado tiempo de ejecución $t=4$ s [14].

$$\lim_{t \rightarrow 4s} q(t) = q_d \quad (10)$$

El controlador localiza la fuerza, que al aplicarse al sistema en una articulación sólo depende de esta articulación y no de las demás [16]; 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.

B.1 Proporcional P

Este tipo de controlador es el más sencillo que puede emplearse en el control del manipulador [16]. Su descripción matemática viene dada por:

$$F = K_p X_1 \quad (11)$$

Donde K_p es una matriz simétrica definida positiva y seleccionada por el diseñador, denominada ganancia de posición con dimensiones [N/cm].

B.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 término proporcional a la derivada de este. Su ecuación viene dada por:

$$F = K_p X_1 - K_v X_2 \quad (12)$$

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 [N*s/cm].

B.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 [17]. Su estructura se representa como:

$$F = K_p \tanh(X_1) - K_v \tanh(X_2) \quad (13)$$

B.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:

$$F = K_p X_1 + K_v X_2 + K_i \int X_1 \quad (14)$$

Donde las matrices K_p , K_v y K_i llamadas ganancias proporcional, derivativa e integral respectivamente, son simétricas y definidas positivas convenientemente elegidas cuyas unidades son K_p [N/cm], K_v [N*s/cm] y K_i [N/s*cm]. 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 [16].

B.5 Proporcional Integral Derivativo PID+ con acciones acotadas

Esta estructura es una consecuencia directa de aplicar el término Integral en el control Proporcional Derivativo PD+ con acciones acotadas [16], del siguiente modo:

$$F = K_p \tanh(X_1) + K_v \tanh(X_2) + K_i \int \tanh(X_1) \quad (15)$$

IV. DISEÑO EXPERIMENTAL

Para los controladores P, PD y PD con acciones acotadas se determinaron las ganancias K_p y K_v de manera convencional [17] y se ajustaron de manera manual probándose en una simulación aplicando la herramienta de MATLAB Simulink. Para el controlador PID y PID con acciones acotadas se determinaron las ganancias conforme al método Ziegler-Nichols basado en la curva de reacción del sistema y se ajustaron manualmente. Para realizar las pruebas del mecanismo se simuló el dato enviado por el sistema de visión artificial con las ecuaciones (1-3), y se ingresó en el sistema de control de posición del disco de corte manualmente mediante una interfaz gráfica asignándole la variable de distancia deseada q_d . El experimento evaluó cada controlador para determinar cuál es el más adecuado para el sistema de corte con control automático de posición de una deshojadora de mazorcas aplicando visión artificial. Para esto se realizaron pruebas del mecanismo de ajuste del disco de corte con la interfaz gráfica de usuario ingresando manualmente la distancia deseada a la que debería posicionarse. Esta distancia de prueba fue de 5 cm por considerarse la distancia de ajuste mayor en la que estará oscilando el mecanismo. Para esto se inició con el sistema en la posición cero, es decir con el actuador completamente retraído. Para cada controlador se llevó a cabo la prueba con las ganancias establecidas para cada una y se evaluó cada uno, respecto del error de posición.

V. RESULTADOS

A. Determinación de ganancias

Las ganancias K_p y K_v están determinadas por convencionalismo [13] como $K_p \leq 0.8(F_{\max})$ 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 [11]. De este modo se tiene que:

$$K_p = 960 \text{ N/cm} \quad (16)$$

$$K_v = 240 \text{ Ns/cm} \quad (17)$$

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

A.1 Proporcional P

El control P se sustituye en la ecuación (9) teniendo así:

$$\ddot{X}_2 = m^{-1}(K_p X_1) \quad (18)$$

Esta ecuación puede representarse en un diagrama de bloques en Simulink como se muestra en la Fig. 9 cuya ganancia K_p es ingresada junto con los demás parámetros de sistema. Al ejecutar esta simulación con una entrada de escalón para una distancia deseada $q_d = 5$ cm, se obtiene un resultado que se estabiliza en 1.44s. Esto indica que el valor de la ganancia es correcto.

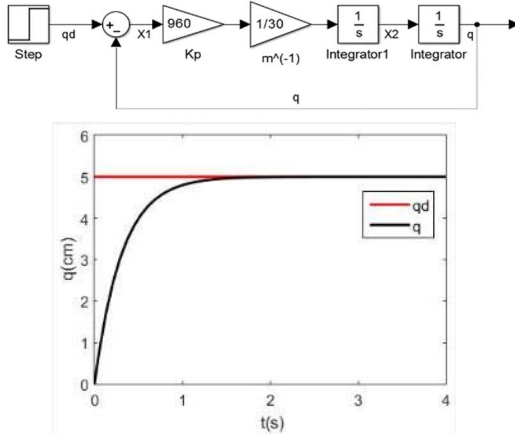


Figura 9. Control proporcional en Simulink.

A.2 Proporcional Derivativo PD

El control PD se sustituye en la ecuación (9) teniendo así:

$$\ddot{X}_2 = m^{-1}(K_p * X_1 - K_v * X_2) \quad (19)$$

Esta ecuación puede representarse en un diagrama de bloques en Simulink como se muestra en la Fig.10 cuya ganancia K_p y K_v son ingresados junto con los demás parámetros de sistema. Al ejecutar esta simulación con una entrada 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.

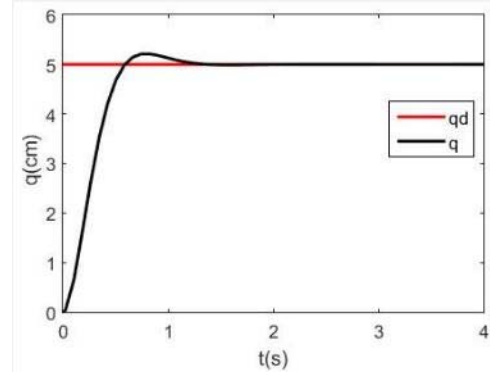
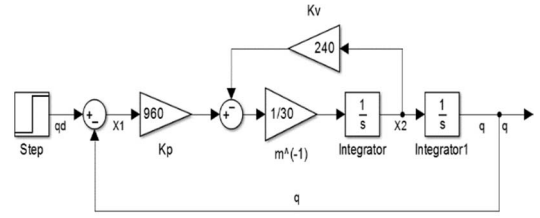


Figura 10. Control PD en Simulink.

A.3 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 [18].

En la Fig. 11 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 .

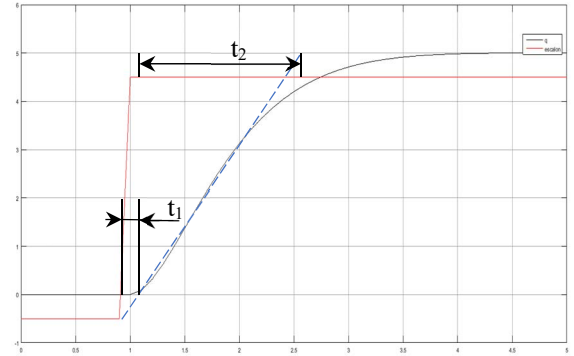


Figura 11. Respuesta del sistema a una entrada escalón.

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 $t_1 = 0.16$ s y $t_2 = 1.5$ s. Se tiene además que considerar las siguientes relaciones:

$$Ti = 2 t_1 \quad (20)$$

$$Td = 0.5 t_1 \quad (21)$$

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:

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} \quad (22)$$

$$K_v = K_p T_d \quad (23)$$

Con lo que las ganancias iniciales se proponían como en el inciso a) de la Tabla I. Al sustituir el controlador en la ecuación (9) se tiene que:

$$\ddot{X}2 = m^{-1}[K_p X1 + K_v \dot{X}1 + K_i \int_0^t X1(\sigma)d\sigma] \quad (24)$$

La ecuación (24) es fácilmente representada en Simulink como se observa en la Fig. 12 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 la Tabla I.

TABLA I
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.

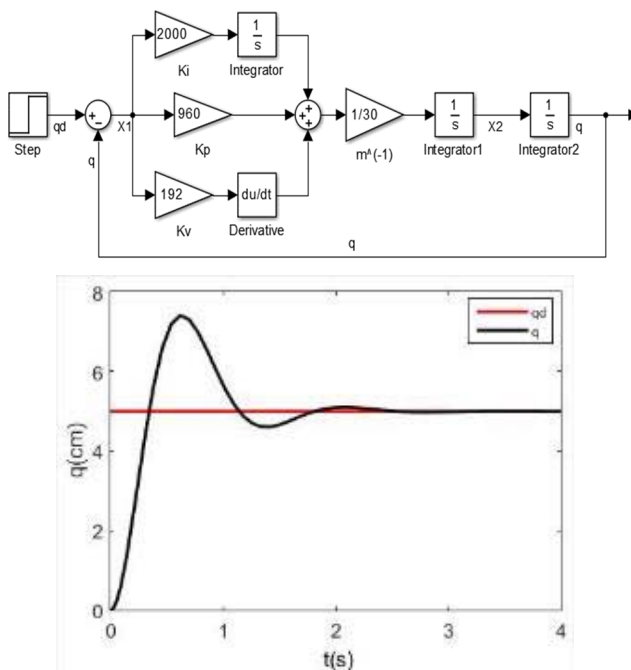


Figura 12. Control PID en Simulink

Se puede observar en la Tabla II que los tiempos en que se alcanza el error de posición de cero (t_0) es menor en el controlador PID, seguido del controlador P y PD, pero el tiempo de estabilización (t_e) con una tolerancia del 5% en su acotación

presenta como más rápido al control PD y después al controlador PID.

TABLA II
TIEMPOS DE ESTABILIZACIÓN DE CONTROLADORES EN SIMULINK

	P	PD	PID
	[s]		
t_0	1.44	0.61	0.39
t_e	1.44	0.89	1.38

B. Evaluación de controladores.

El sistema de control de posición 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 (Fig. 13).

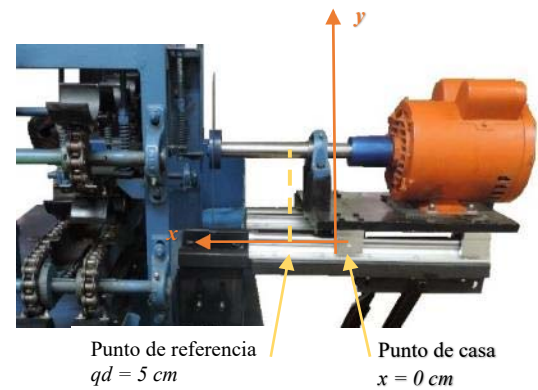


Figura 13. Punto de referencia.

En la Fig. 14 se nota que b) el error de posición es inversamente proporcional a la a) distancia recorrida, esto es porque cuando la distancia medida se acerca a la medida deseada, el error disminuye desde un error especificado hasta intentar alcanzar el cero.

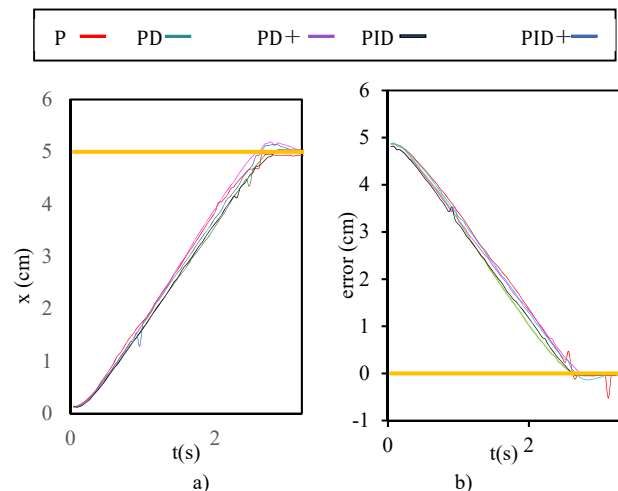


Figura 14. Gráficos de a) distancia medida y b) error de posición.

En un acercamiento al error de posición como se nota en la Fig. 15 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+. Sin embargo, al analizar los tiempos de estabilización en la Tabla III se tiene el tiempo en que se alcanza el error de posición cero (t_0) y el tiempo en que logra estabilizar el

mecanismo (te); 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.

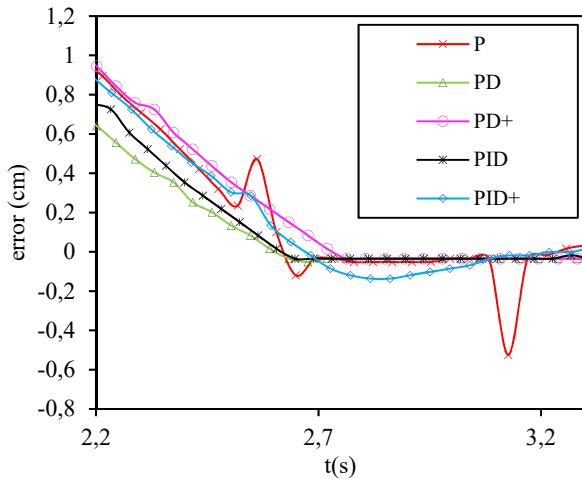


Figura 15. Comportamiento de distintos tipos de controladores en el sistema de ajuste del disco de corte.

TABLA III
TIEMPOS DE ESTABILIZACIÓN DE CONTROLADORES

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

De estas pruebas se observa que en general los cinco controladores son buenos, pues logran trabajar aproximadamente a la máxima velocidad del actuador y estabilizarse en no más de 2.81 s, pero considerando el menor tiempo se eligió el PID para trabajar en la máquina finalmente.

VI. CONCLUSIONES

Para el diseño de máquinas cortadoras y deshojadoras de mazorcas es necesario conocer las propiedades geométricas del fruto que forman los datos de entrada para la evaluación de los modelos matemáticos del análisis del sistema fruto-máquina. En base a la consideración de la longitud de corte óptima para deshojar una mazorca se diseñó un sistema de corte con control automático de la posición del disco de corte. Este sistema consta de 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 con ganancias $K_p=960$ N/cm, $K_v=192$ N*/s/cm y $K_i=200$ N/s*cm que tiene tiempo de estabilización de 2.68 s. Este tiempo de ajuste del mecanismo es fundamental en el diseño maquinas pues aumenta la eficiencia reduciendo el tiempo proceso entre cada elemento. En la máquina cortadora de mazorcas con control automático de posición del disco de corte con visión artificial brinda el tiempo máximo requerido para llevar a cabo el procesamiento de las imágenes de la mazorca y su transporte a la zona de corte.

APÉNDICE

Programa de funcionamiento del sistema de control de posición de una deshojadora de mazorcas.

```
%Inicia el motor del disco
b.digitalWrite(6,0);
%Procesamiento
while t<tf;
f=a.analogRead(8)*(4.8/1024);y(j)=f;%voltaje del encoder
xm=((15.24)*(f))/4.4043;%Ley del actuador
%LEY DE PIZARRA
Error=xdreal2-xm;%Calculo del error
%Velocidad.....Derivada del error
xp=(xm-xan)/h; xan=xm;
%Aplicacion de controlador
set(handles.fuerza,'String',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
%Activacion del motor de la banda
%Apaga los motores
close Pizarra2
```

REFERENCIAS

- [1] N. Long y Villareal, «Small product, big issues. Value constestation and cultural identities in cross-border commodity networks,» *Development and Change*, vol. 29, pp. 725-750, 1998.
- [2] A. King, «Diez años con el TLCAN: revisión de literatura y análisis de las respuestas de los agricultores de Sonora y Veracruz, México,» Informe especial del CIMMYT 07-01, México, 2007.
- [3] B. F. Benz, «Taxonomy and evolution of mexican maize,» University of Wisconsin, Madison, Winsconsin, 1986.
- [4] J. J. Sánchez G., C. W. Stuber y M. Goodman, «Isosymatic diversity in the races of maize od the Americas,» *Maydica*, vol. 45, pp. 185-203, 2000.
- [5] F. F. Hahn Schlam, P. Martínez Díaz y A. Reyes Amador, «Modelo teórico para predecir el lugar del corte y optimizar la extracción de la pulpa en coco,» *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, n° 4, pp. 13-17, 2012.
- [6] K. Ogata, *Ingeniería de control moderno*, Madrid: Pearson Educación, 2010, p. 904.
- [7] A. Barrientos , L. F. Peñin y C. Balaguer, «Fundamentos de robotica,» Madrid, Mc Graw Hill, 1997, pp. 11-16.
- [8] P. Cruz Meza, E. Romantchik Kriuchkova y F. F. Hahn Schlam, «Design, construction, and evaluation of a husking machine to permit the use of the husks as wrapping for tamales,» *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, vol. 2, pp. 69-74, 2010.
- [9] E. Romantchik K., E. Bernabe Lopez, P. Cruz Mesa, N. Velázquez López y J. G. Cebada Reyes, «EQUIPO Y METODO PARA CORTAR EL PENDUNCULO DE MAZORCAS Y DESHOJARLAS». México Patente MX345727B, 26 01 2017.
- [10] Baldor Electric Company, «Baldor,» 2016. [En línea]. Available: <http://www.baldor.com/>. [Ultimo acceso: 04 03 2016].

- [11] Pololu, «Product Data Sheet, Actuator LD3/LD3Q,» 23 3 2016. [En línea]. Available: <https://www.pololu.com>.
- [12] . N. Velázquez-López, Y. Sasaki, K. Nakano, J. M. Mejía-Muñoz y E. Romantchik K., «Detección de cenicilla en rosa usando procesamiento de imágenes por computadora,» *Revista Chapingo Serie Horticultura*, vol. 17, pp. 151-160, 2011.
- [13] J. G. Cebada Reyes, F. F. Hahn, A. Ruiz, E. Romantchik y A. Michua, «Design of a Position Control Based on Cuckoo Search Tuning for a Cutter Leaves Robot,» *IEEE Latin America Transactions*, vol. 14, n° 5, pp. 2085-2092, 2016.
- [14] P. Sánchez Sánchez, «Control cartesiano de robots manipuladores,» BUAP Mexico, FCE, 2004, pp. 11-16.
- [15] R. Kelly y V. Santibáñez, *Control automático e informática Industrial*, Ensenada México: Pearson Education, 2003.
- [16] R. Kelly y V. Santibáñez, *Control de movimiento de robots manipuladores*, Madrid: Pearson Educación, 2003, p. 344.
- [17] J. G. Cebada Reyes, «Diseño y construcción de un sistema de corte de hojas para la propagación in vitro,» UACH, Texcoco, 2016.
- [18] V. Mazzone, «Controladores PID,» 2010. [En línea]. Available: <http://iaci.unq.edu.ar>. [Último acceso: 2 1 2017].



Erubiel Bernabe López, Ml, recibió su grado de Maestro en Ingeniería por la Universidad Autónoma Chapingo. Sus áreas de interés son los sistemas de control automático, los sistemas de visión artificial y el diseño asistido por computadora.



Eugenio Romantchik Kriuchkova, PhD, profesor Investigador del Departamento de mecánica agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo. Recibió su grado como Doctor en Ciencias Técnicas por parte del Politécnico de Bielorrusia. Sus áreas de interés, Fuentes de energía en los sistemas biológicos, automatización y diseño de máquinas agrícolas.



José Guillermo Cebada Reyes, Dr., Profesor del Departamento de Mecatrónica de la Universidad del Valle de Puebla. Recibió su grado de Doctor en Ingeniería por parte de la Universidad Autónoma Chapingo. Sus áreas de interés, Robótica, Automatización de procesos, Electrónica aplicada en Biotecnología vegetal.



Noe Velázquez López, Dr., profesor investigador del Departamento de Ingeniería en Irrigación de la Universidad Autónoma Chapingo. Recibió el grado de Doctor en Ciencias por la Universidad de Agricultura de Tokio. Sus áreas de interés, sistemas de visión artificial y la robótica en la agricultura.