

Integración de la mecatrónica al desarrollo de la agricultura de precisión aplicada al control mecánico de maleza

DAVID SANTIAGO SOGAMOSO GONZÁLEZ ⁽¹⁾,
ING. JORGE ALEXANDER APONTE RODRÍGUEZ. MSc. ⁽²⁾,
ING. LEONARDO ENRIQUE SOLAQUE GUZMÁN. PhD. ⁽³⁾

(1) u1801837@unimilitar.edu.co

(2) jorge.aponte@unimilitar.edu.co

(3) jorge.aponte@unimilitar.edu.co

Facultad de Ingeniería Mecatrónica
Universidad Militar Nueva Granada
Bogotá, Colombia

Integración de la mecatrónica al desarrollo de la agricultura de precisión aplicada al control mecánico de maleza

RESUMEN

Palabras clave:

***Control de maleza;
agricultura de precisión;
cultivos orgánicos;
mecatrónica***

Este artículo describe el método mecánico de control de maleza, aplicado a la agricultura de precisión en cultivos orgánicos. El control de maleza es uno de los procesos con mayor importancia en la producción agrícola, debido a los costos de inversión. En razón a lo anterior, el agricultor ha decidido implementar sustancias químicas como método de control, degenerando el medio ambiente y alterando el cultivo. En el actual artículo se presentarán algunos mecanismos para el control de maleza en integración con la ingeniería mecatrónica, asimismo se mostrarán los avances del actual desarrollo que lleva a cabo el grupo Gidam de la Universidad Militar Nueva Granada.

I. INTRODUCCIÓN

En la última década se ha incrementado la demanda mundial de productos orgánicos, aumentando la necesidad de crear granjas orgánicas y sostenibles, en las cuales no se contemple el uso de plaguicidas y herbicidas para el control de maleza. Esto conlleva a implementar en la agricultura moderna, procesos tecnificados que permitan mejorar la productividad y competitividad del cultivo, con la objetivo de controlar la propagación de la maleza presente en los campos de siembra, para lograrlo se integran tecnologías como visión de máquina, sistemas de posicionamiento global (GPS), sensores y sistemas de información.

El control de maleza se presenta como uno de los procesos de mayor importancia en la producción agrícola, debido a que esta compite con las plantas por los nutrientes y humedad que el suelo provee, generando así el deterioro del cultivo [1]. Para el control de plantas silvestres, se emplean diferentes estrategias, las cuales implican el uso de herramientas mecánicas, fertilizantes químicos y agentes biológicos, que permiten limitare su aparición por un periodo de tiempo.

Las técnicas utilizadas para garantizar el apropiado crecimiento de los cultivos, han desencadenado en muchas ocasiones, consecuencias tanto al medio ambiente como a la salud, debido al uso excesivo de fertilizantes y asimismo, al laboreo constante del suelo con maquinaria [2] [3]. Evaluando los aspectos mencionados se ha motivado la realización de estudios que han sido documentados, entorno a la innovación agrícola y a la implementación de sistemas de precisión mecánica, las cuales permiten efectuar un control de maleza más eficiente sin perturbar a las plantas y el medio biológico en el cual se desarrollan, puesto que cuentan con diferentes micro organismos los cuales favorecen el ciclo biológico de desarrollo del cultivo.

El presente artículo expone algunos de los actuales desarrollos tecnológicos enfocados en el control automático de maleza. Con base en la descripción de cuatro prototipos se analizan las ventajas de la integración de la mecatrónica en el área agrícola.

Este documento se organiza de la siguiente manera: la sección I desarrolla la introducción. La sección II define el control mecánico de maleza. En la sección III se relaciona la agricultura de precisión junto al control mecánico. La sección IV, expone algunos prototipos mecatrónicos desarrollados con el objetivo de implementar el método de control mecánico de maleza, para que finalmente en la Sección V, se realicen las conclusiones referentes a la integración de la Mecatrónica y la agricultura de precisión para el control de maleza en los cultivos.

II. CONTROL MECÁNICO DE MALEZA

Causas como el impacto ambiental y las enfermedades que aquejan a la salud humana, han contribuido al aumento de cultivos orgánicos, incentivando el desarrollo e innovación en métodos que fomenten el control mecánico de maleza [2]. Hoy en día, varias naciones han optado por desarrollar e implementar planes de conservación natural y reducción del uso de herbicidas y plaguicidas impulsando la agricultura orgánica y de precisión [4].

El constante estudio sobre el crecimiento y desarrollo de plantas no deseadas en los cultivos, ha permitido identificar dos aspectos importantes en el desarrollo de un cultivo: el tiempo y el espacio. Estas variables permiten al agricultor prever la época y periodo de desarrollo de la maleza, asimismo dimensionar el alcance de las herramientas tecnológicas, reduciendo los costos de inversión y la contaminación del medio ambiente [1]. De acuerdo con lo anterior, el éxito del control mecánico se debe en gran medida al conocimiento que posee el agricultor sobre el terreno a cultivar e igualmente a la correcta manipulación de las diferentes herramientas de corte.

El control mecánico presenta una gran demanda a nivel mundial, debido a las restricciones aplicadas por los gobiernos y asimismo por la necesidad de aportar una solución más eficiente para el control de maleza [5].

Dichas soluciones se presentan en el uso de máquinas de labranza que afectan de diferente forma el desarrollo de la maleza, puesto que usualmente las herramientas efectúan un desraizado, corte y posterior reincorporación de los desechos al suelo,

perturbando la supervivencia y competitividad de esta frente al cultivo. Del mismo modo, la intervención mecánica en el suelo promueve la germinación de especies, ya que modifica y moldea la estructura del terreno, permitiendo la circulación del aire y agua, las cuales favorecen al desarrollo del cultivo [6].

III. AGRICULTURA DE PRECISIÓN ENFOCADA A EL CONTROL DE MALEZA

La necesidad de implementar agricultura de precisión en cultivos orgánicos, ha impulsado investigaciones sobre la integración de sistemas mecatrónicos en el control de maleza, dando como resultado, varios estudios que implementan métodos de control mecánico, integrando tecnologías como la visión de máquina para el reconocimiento, clasificación y posterior remoción de maleza [7].

La integración de los sistemas mecánicos y automatizados disminuye la dependencia al uso de herbicidas y plaguicidas, mejorando la sostenibilidad del cultivo y reduciendo el impacto ambiental que estos generan. Estos procesos incorporan tres componentes básicos: sistemas que permiten medir las propiedades físicas y biológicas del cultivo, capacidad de decisión y procesamiento de información para determinar el campo de acción del mecanismo y actuadores que permitan llevar a cabo el laboreo y control de maleza, acorde a la información adquirida en los módulos anteriores [1].

Con la perspectiva de diseñar sistemas automáticos para preparación de la tierra, sembrado y cosecha, se plantean como requerimientos a los modernos sistemas de control mecatrónico, integración de sistemas de navegación y guía, visión de máquina para la detección y clasificación de maleza, actuadores de precisión y mapeo del cultivo, desarrollos que han sido abordados desde la disciplina de la mecatrónica.

IV. PROTOTIPOS MECATRÓNICOS PARA EL CONTROL DE MALEZA

A. Sistema para el control de maleza entre filas utilizando visión de máquina.

La implementación de visión de máquina en la agricultura, permite trabajar en tiempo real otor-

gando al mecanismo la capacidad de identificar y clasificar las especies de maleza que se encuentran en el cultivo [1].

El departamento de biología e ingeniería agrícola de la Universidad de California, llevó a cabo en el 2012 una investigación del uso de imágenes hiperespectrales para la identificación de dos especies de maleza predominantes en un cultivo de tomate [7]. Este sistema fue acoplado a un actuador de propulsión a chorro el cual a través de micro-dosificación aplicaba aceite orgánico a alta temperatura, logrando con exactitud el control del 90% de las especies de maleza.

El sistema de imágenes hiperespectral implementó un algoritmo bayesiano para la clasificación de plantas, el cual discriminó con éxito el 95,9% de las especies vegetales presentes en el cultivo. Además fue montado con una recámara cerrada, en donde una lámina envolvía la zona de captura de la imagen, evitando la interferencia de la luz del ambiente en el reconocimiento y clasificación de la maleza.

El sistema de micro-dosificación se diseñó a partir de tubos de acero inoxidable y bronce, capaces de aplicar el aceite en un área de aproximadamente 0,64 cm de ancho por 1,27 cm de largo, a una temperatura de 160°C.

Todo esto teniendo en cuenta que la velocidad de desplazamiento del prototipo, estaba limitada por el procesamiento de las imágenes hiperespectrales.

Fig. 1. Sistema de dosificación de aceite e imágenes hiperespectrales anclado al transporte de campo [7].



La investigación arrojó como resultado, en primera instancia que el sistema de visión de máquina

implementado, identificó y mapeó la mayoría de las malezas presentes en el cultivo. Además de un tratamiento de malezas con aceite caliente que tardó 15 días en evidenciar su supresión, mientras que aquellas que sobrevivían presentaban una reducción en su masa vegetal; los residuos resultantes de la maleza se reincorporaban al cultivo como biomasa. El cultivo de tomate solo presentó un daño significativo del 2,4% por el aceite aplicado a la maleza.

B. Sistema de control Co-robótico de maleza entre hileras

La Universidad de Sevilla en conjunto con la Universidad de California, llevaron a cabo en el 2014 el estudio y desarrollo de un sistema automatizado para el control de maleza, el cual labora entre las filas del cultivo [8].

Por medio de dos azadas hidráulicas como herramientas de corte y un sensor odométrico para la detección exacta de maleza, se logró mitigar la especie no deseada, reduciendo en un 57,5% la mano de obra.

El término Co-robot implica que el diseño debe incluir la relación Humano-Máquina, lo cual involucra un trabajo conjunto incidiendo en el bajo costo de producción del mecanismo y asimismo en su fácil manipulación. Teniendo en cuenta este concepto, el usuario es el encargado de efectuar la tarea de visión de máquina, mientras que el mecanismo será el encargado de efectuar la labor de desmalezado.

Este prototipo fue elaborado con la finalidad de favorecer al agricultor en la labor de control de maleza, evitando trastornos músculo-esqueléticos producidos por los largos periodos de trabajo en el cultivo.

El mecanismo funciona en dos fases, la primera fase denominada "Aprendizaje", en el que el mecanismo debe hacer un recorrido por el cultivo, guardando como registros las posiciones de la maleza presente entre las hileras. Estos datos son proporcionados por el sensor odométrico, calculando la distancia entre las plantas del cultivo para sincronizar los actuadores de la fase siguiente.

La segunda fase denominada de "Operación", inicia con el evento de apertura y cierre de las azadas,

controladas automáticamente con base en la información registrada por el odómetro.

Fig. 2. Co-robot automático para el corte mecánico de maleza [8].

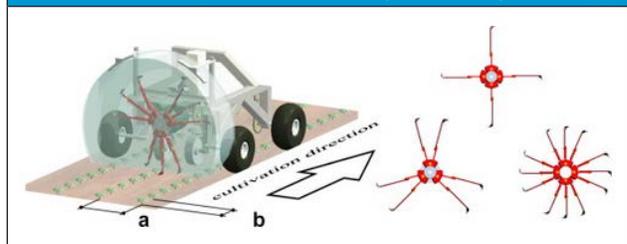


La apertura y cierre de las azadas está determinada por cilindros hidráulicos de doble efecto con carrera de 0,3m, los cuales son accionados por válvulas de control electro-hidráulico enlazadas a un panel de herramientas, permitiendo al usuario actualizar el registro de posición de la herramienta de corte, garantizando la precisión y reducción del error de posicionamiento.

C. Sistema mecatrónico de escarda rotacional para el control de maleza entre filas

El sistema mostrado en Fig. 3, posee una herramienta de corte que puede integrar 3 brazos o más, los cuales son portadores de los efectores finales para el corte de la maleza. La herramienta implementada como efector final es la escarda, permitiendo al prototipo cortar las raíces de la maleza y adicionalmente cubrirlas con tierra. La herramienta gira alrededor de un eje y está dispuesto directamente sobre las filas del cultivo [9].

Fig. 3. Diseño virtual del prototipo mecánico de escarda con diferentes configuraciones de herramientas. A) Distancia entre las filas del cultivo. B) distancia entre las plantas. Adaptado de [9].



El principio de funcionamiento del sistema se da a través de la rotación de la herramienta de corte, la cual se sintoniza a la velocidad de avance del

prototipo, con la finalidad de garantizar precisión en el corte de la maleza, ubicada entre las filas del cultivo. Para lograrlo se estiman las distancias entre las plantas, para que la herramienta de corte rotacional pueda integrar más brazos como se observa en la figura 3, las cuales están situadas en diferentes ángulos con el objetivo de trabajar en distintos campos de siembra.

Para escoger la herramienta de corte adecuada, el autor plantea conocer como parámetros iniciales el tamaño de las plantas, la distancia entre ellas, las etapas de crecimiento de la maleza y el área de deshierbe que tendrá la escarda para realizar el corte. Definidos estos parámetros, se procede a calcular adecuadamente la cantidad de brazos que integrará la herramienta y el ángulo de acción de cada uno de los efectores finales, asimismo se determina la velocidad de giro de la escarda rotacional y la trayectoria del sistema.

El prototipo demostró resultados satisfactorios para el control de maleza, sin importar las irregularidades que se presentaban en el terreno y los surcos. Es importante resaltar el conocimiento previo que se debe poseer sobre el cultivo y el área agrícola, con la finalidad de ajustar las distintas herramientas mecánicas de corte.

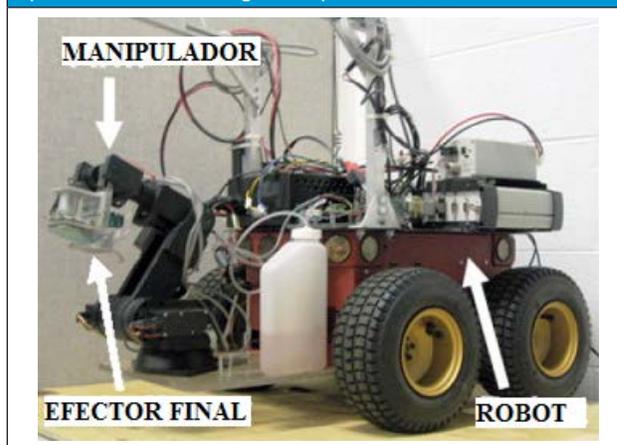
D. Robot con efector final de precisión para el control de maleza

El Robot de campo Fig. 4, fue diseñado para cumplir con el objetivo de remover la maleza de forma precisa y eficiente, además se encuentra equipado de un ordenador para el procesamiento de imágenes adquiridas a través de una cámara por medio de visión de máquina. Asimismo el mecanismo cuenta con un brazo de 5 grados de libertad, el cual posee como efector final una sierra para el corte del tallo de la maleza y dos bombas de micro-dosificación para la aplicación directa de una sustancia química sobre la superficie de corte, quemando los residuos restantes de la maleza [10].

El mecanismo diseñado, fue equipado con una plataforma móvil con cuatro ruedas direccionales para el desplazamiento del sistema a través del cultivo. Este integra en su parte posterior un mani-

pulador con 5 grados de libertad dotado con servomotores permitiendo la rotación de cada una de las articulaciones. La longitud máxima del brazo es de 50 cm y permite levantar un peso de 150 gramos aproximadamente. Para el correcto funcionamiento del manipulador los autores implementaron métodos de cinemática inversa, con base en el punto de origen del brazo robótico.

Fig. 4 . Robot de campo equipado con manipulador de 5 grados de libertad y efector de micro-dosificación de aplicación directa. Imagen adaptada de [10].



El manipulador se compone de un efector final diseñado especialmente para el corte continuo de los tallos de las malas hierbas y posterior aplicación de un químico afectando el tejido vascular, inhibiendo el desarrollo de esta especie dentro del cultivo. El 90,9% de las malezas tratadas a través del control propuesto, mostraron síntomas al sexto día luego de la aplicación del químico, llegados los 10 días la población había sido erradicada.

V. ANÁLISIS DE LOS PROTOTIPOS

En el capítulo anterior fueron presentados algunos desarrollos de sistemas mecatrónicos, diseñados para controlar la maleza. Cada uno de estos prototipos integró diferentes estrategias tecnológicas, permitiendo mejorar los procesos de supervisión agrícola y la sostenibilidad en el cultivo, sin afectar el desarrollo de este. Estos desarrollos fueron producto de estudios realizados por grupos de investigación, ninguno de los prototipos mencionados se encuentran disponibles para su comercialización.

De acuerdo con lo anterior, se destacan las ventajas y desventajas de cada uno de los mecanismos. En primera instancia se resalta el requerimiento de implementar los cultivos por hileras. Este parámetro fue esencial para el diseño de los 4 prototipos, permitiendo efectuar la labor de remoción de maleza de forma eficiente, facilitando la intervención de los mecanismos para el control de plagas entre las plantas agrícolas sin deteriorar su crecimiento.

Solo uno de los prototipos mencionados presentó en su resultado un daño del 2,4% al cultivo, debido a la aplicación de aceite orgánico sobre la maleza. Si bien el enfoque de la agricultura de precisión y orgánica, es el de no incluir dentro de los procesos de control el uso de químicos sobre el suelo y el cultivo, debido a que se puede generar cambios en las propiedades químicas, físicas y biológicas del medio agrícola. Tanto las plantas como el suelo son susceptibles a cambios térmicos e hídricos, lo cual desequilibra sus procesos biológicos, generando el detrimento del medio ambiente. En razón a lo expuesto, es crucial abolir cualquier uso de químicos o medios térmicos, los cuales afecten el área a cultivar, independientemente que estos sean aplicados sobre el área de interés.

Con base en lo anterior el Robot de campo, el cual posee un efector final de tipo químico, permitiría el control de las malas hierbas, pero a largo plazo, estas podrían presentar modificaciones en su estructura genética, volviéndose más resistentes a los químicos.

Cabe resaltar que la maleza es controlable mas no eliminable, es decir que sin importar el método utilizado para su control esta vuelve a surgir en el cultivo. El robot de campo además posee un efector final de tipo mecánico con una herramienta de corte capaz de cortar el tallo de la maleza, su integración a un manipulador de 5 grados de libertad permite alcanzar zonas de difícil acceso y a su vez no tiene la necesidad de penetrar el suelo, haciendo de este diseño un sistema útil en la agricultura orgánica.

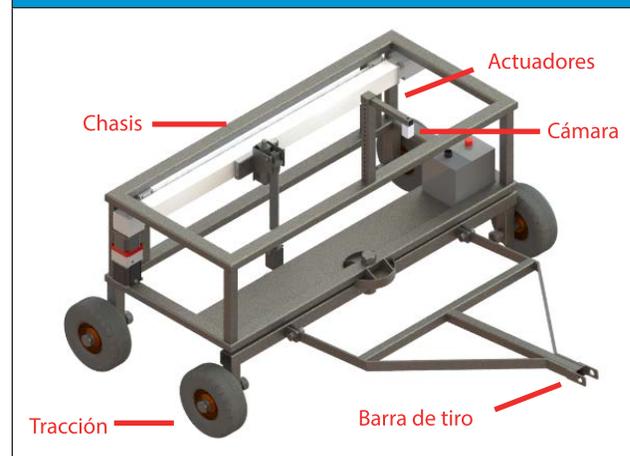
Los mecanismos en mención integraron tecnologías para la detección de maleza, tales como visión de máquina y sensores, obteniendo resultados satisfacto-

rios en el control de malas hierbas, lo cual demuestra que la implementación de tecnologías de reconocimiento permite mejorar los procesos de remoción, disminuir costos en mano de obra agrícola y ofrecer mayor precisión en la selección de especies vegetales.

VI. PROTOTIPO MECÁNICO PARA EL CONTROL DE MALEZA UMNG IMP ING 1718

El prototipo mecánico propuesto a través de diseño asistido por CAD mostrado en Fig. 5 cuenta con un chasis estructurado a partir de perfiles en acero laminado en caliente (H.R) de bajo contenido de carbono, con alta soldabilidad y ductilidad, bajo normas AISI/SAE 1020. Cuenta con dimensiones de 1250 mm de ancho permitiendo al mecanismo cubrir un área de 3 hileras de cultivo de hortalizas, 600 mm largo y 350 mm de alto otorgando un espacio suficiente para la disposición de los distintos elementos electrónicos.

Fig. 5. Prototipo mecánico para el control de maleza Gidam UMNG



El sistema cuenta con una plataforma móvil de 4 ruedas; 2 fijas y 2 direccionales permitiendo que el mecanismo modifique su ángulo de giro en la misma dirección del tractor. Además cuenta con una barra de tiro, permitiendo la conexión entre el prototipo y el tractor.

El prototipo integra distintos actuadores electromecánicos, permitiendo el desplazamiento horizontal y vertical de la herramienta de corte. Para lograr la posición con respecto al eje horizontal se acopla

un actuador lineal, el cual permite cargas dinámicas de 200 kg a velocidades de 5 m/s, además se integrará un tren de ejes planetarios que básicamente tiene como objetivo reducir la velocidad del motor ω con base en la relación del tren de engranaje, incrementando el torque de salida, para finalmente impulsar cargas pesadas.

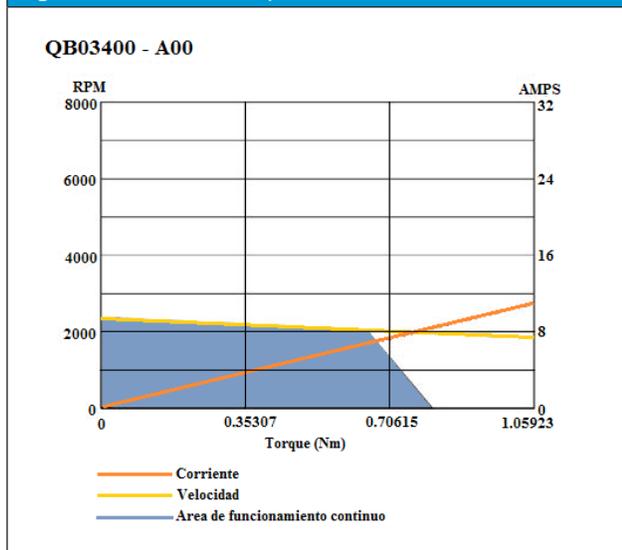
El tren de ejes planetarios acopla un servomotor Nema 34 con velocidad angular sin carga de 2367 rpm. En razón a lo expuesto y con base en las especificaciones técnicas de fábrica del motor se calcularán la potencia de transmisión y el torque de salida T_g con las ecuaciones 1 y 2.

$$P = T\omega \tag{1}$$

$$T_g = m_G T_p \tag{2}$$

En donde T_p es el torque de entrada dado por el servomotor Nema 34. Los datos para realizar el cálculo son adquiridos con base en el ciclo de operación del motor mostrado en Fig.6.

Fig. 6. Gráfica de desempeño Servomotor NEMA 34



Los resultados obtenidos teóricamente de acuerdo con las especificaciones de los dispositivos son mostrados en la Tabla 1.

A partir de los resultados obtenidos en la Tabla 1, se apreció que todas las relaciones $[m_G]$ son admisibles para el funcionamiento del actuador WM80Z, el cual requiere que la velocidad máxima de entrada sea 855 [rpm].

TABLA I. VELOCIDAD Y TORQUE DE SALIDA A DIFERENTES RELACIONES DE ENGRANES

ESPECIFICACIONES NEMA 34			
Voltaje [V]	Corriente 40% [Amp]	Velocidad ω [rad/s]	Torque T_p [Nm]
24	7	247.86933168	0.6777
CÁLCULOS TORQUE Y VELOCIDAD			
Relación m_G	Torque T_g [Nm]	Velocidad ω_g [rad/s]	Velocidad [rpm]
3:1	2,9628515	82,62310	788,9928
4:1	3,9504687	61,96732	591,7446
5:1	4,9380859	49,57386	473,3956
7:1	6,9133203	35,40990	338,1397
10:1	9,8761719	24,78693	236,6978

El posicionamiento y avance vertical de la herramienta de corte estará dado por un actuador eléctrico lineal de alto rendimiento. Este sistema posee un tornillo de potencia o avance, el cual convierte el movimiento rotatorio en movimiento lineal; es capaz de elevar y mover cargas muy grandes, lo cual hace que el sistema posea ventajas mecánicas.

El actuador integra un "Husillo de Bola"; estos utilizan un tren de cojinetes de bolas en la tuerca, con la finalidad de crear un contacto aproximado de rodamiento con las cuerdas del tornillo, disminuyendo el coeficiente de fricción del elemento, obteniendo una eficiencia y capacidad de carga alta. Este actuador tendrá acoplado un servomotor Nema 17 el cual permite determinar la velocidad de corte de la herramienta. Con base en la gráfica de rendimiento del servomotor Fig. 7 se seleccionaron las especificaciones técnicas óptimas para el punto de operación eficiente del motor.

El eje del motor integra como herramienta de corte una sierra de copa, esta herramienta de forma anular genera un orificio de corte en el suelo, ya que posee un borde dentado.

La Fig. 8 muestra finalmente el mecanismo de corte propuesto para integrar al prototipo.

Fig. 7. Gráfica de desempeño Servomotor NEMA 34

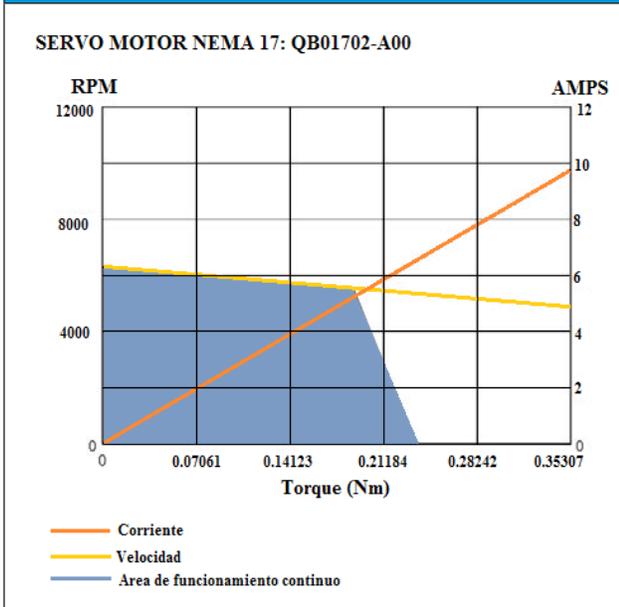


Fig. 8. Mecanismo de corte prototipo para el control de maleza



Con base en las especificaciones técnicas de los distintos elementos que componen el sistema de corte del prototipo, se calcula la velocidad de corte a partir de la ecuación 3, la cual indica la velocidad superficial en el diámetro. Este valor es necesario para determinar los datos de corte verdaderos a la profundidad de corte.

$$V_c = \frac{\pi * D * \eta}{1000} \quad (3)$$

Después de calcular la velocidad de corte, se procede a calcular el avance de los dientes de la Sierra de copa con la ecuación 4, teniendo en cuenta la velocidad de avance respecto a la carga dinámica del actuador lineal, la velocidad de rotación del motor Nema 17 y el número de dientes de la copa sierra como herramienta de corte.

$$f_z = \frac{V_f}{\eta * z} \quad (4)$$

Conociendo el avance por filo de cada uno de los dientes obtenidos de la ecuación 4, se procede a calcular la sección de corte S_c [mm²] de cada uno de los dientes de la copa sierra; permitiendo calcular la fuerza y potencia de corte requerida por el sistema diseñado para el prototipo. Para determinar dicho valor, se usará la ecuación 5, teniendo en cuenta el espesor a_w y anchura a_c de corte del diente de la herramienta.

$$S_c = a_w * a_c \quad (5)$$

La fuerza de corte F_c se calcula a partir de la ecuación 6, en razón de la sección de corte S_c y la energía específica p_s para penetrar el suelo, para ello se tendrá en cuenta los valores de la Tabla 2 [11].

$$F_c = p_s * S_c \quad (6)$$

TABLA II. ENERGÍA ESPECÍFICA PARA LABORES AGRÍCOLAS A DIFERENTES TIPOS DE SUELO [11].

Tipo de suelo	Energía específica [N/mm ²]
Suelos Livianos	0.0205947 – 0.0411894
Suelos Francos	0.0343245 – 0.0617841
Suelos Arcillosos	0.0549192 – 0.0987

De acuerdo con los cálculos obtenidos de la fuerza de corte F_c se procede a calcular la potencia de corte P_c del sistema en función de la velocidad de corte V_c , y el torque T requerido por el motor Nema 17 para penetrar el suelo, a partir de la potencia P_c y la velocidad de rotación N . Para ello se hace uso de las ecuaciones 7 y 8.

$$P_c = F_c * V_c \quad (7)$$

$$T = \frac{P_c}{N} \quad (8)$$

En la Tabla 3 se muestran los resultados obtenidos a partir de cálculos teóricos, teniendo en cuenta

las especificaciones de cada uno de los dispositivos acoplados para el mecanismo de corte. El valor de V_c para la herramienta de corte será de 881.217 m/min.

TABLA III. FUERZA Y TORQUE NECESARIOS PARA PENETRAR DIFERENTES TIPOS DE SUELO.

$V_f \left[\frac{mm}{min} \right]$	$f_z \left[\frac{mm}{fillo} \right]$	$S_c [mm^2]$	$F_c [N]$	$P_c [W]$	$F [Nm]$
Suelo Liviano 0.0411894 [N/mm²]					
3600	0,022	0,057	0,002	0,034	0,00006
Suelo Franco 0.0617841 [N/mm²]					
3600	0,022	0,057	0,002	0,051	0,00008
Suelo Arcilloso 0.0987 [N/mm²]					
3600	0,022	0,057	0,002	0,082	0,00014

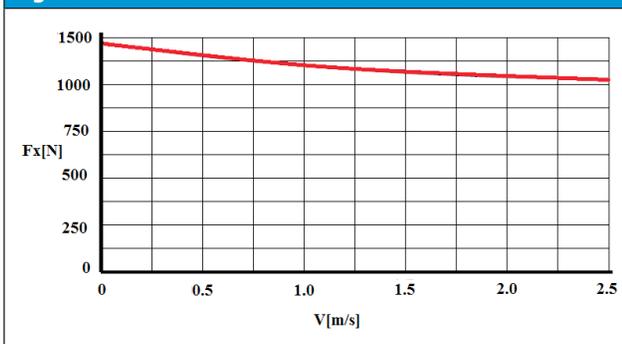
Finalmente se calcula la fuerza F_x que actúa sobre el actuador lineal, teniendo en cuenta el peso kg de cada uno de los componentes que hacen parte del mecanismo de corte, para ello se utiliza la ecuación 11 de fuerza de avance para un sistema de cadena.

$$F_x = m * g * \mu \tag{9}$$

Donde g es la gravedad debido a la posición del actuador, μ es un factor específico de fricción con valor de 0,1 y m es el peso total del sistema de corte el cual corresponde aproximadamente a 3.04 kg.

La fuerza de avance F_x obtenida es de valor 2.97136 [N] y la carga a trasladar por el actuador corresponde a un valor de 29.7136[N]. La Fig. 9 muestra la relación de fuerza F_x en función de la velocidad para un actuador tipo WM80Z, permitiendo inferir que se conseguirá mayor velocidad a menor fuerza aplicada.

Fig. 9. Fuerza en función de la velocidad - WM80Z



El prototipo además cuenta con un módulo de adquisición para el tratamiento de imágenes sobre

el cultivo. El sistema consiste en una cámara de 8 megapíxeles, conectada a una laptop con procesador de 2.50 GHz y 6GB de RAM. El tratamiento de datos se hace mediante algoritmos de filtrado de imágenes, umbral óptimo para segmentación, etiquetado y descriptor de área.

El objetivo es lograr un método de referencia para el desarrollo de un sistema de detección de maleza en tiempo real a través de la clasificación binaria permitiendo separar el suelo y las plantas, cuando es detectada la vegetación presente en el cultivo. El algoritmo implementado de detección plantas dada la componente verde de la imagen fuente, permite eliminar aquellos elementos considerados como basura o suciedad, limpiando la imagen, a través de filtros contra el ruido "Sal y pimienta" y preservando los bordes, lo cual implica que la información relevante de la imagen se conserva y tiende a producir regiones de intensidad constante, eliminando aquellos objetos pequeños presentes en la imagen.

De acuerdo a lo anterior la información de la imagen se reduce, lo cual permite al algoritmo centrarse solo en la vegetación presente en el cultivo. Finalmente el algoritmo calcula el área de medición de cada objeto presente en el cultivo, en este caso la vegetación. Con estos valores se establece un umbral de diferencia entre las plantas silvestres y las del cultivo mostrado en la Fig. 10, siendo este un criterio de discriminación entorno al tamaño de la vegetación.

Fig. 10. Detección de maleza a través del algoritmo implementado.



Este algoritmo de detección de maleza se evaluó mediante fotos tomadas perpendicularmente en las líneas del cultivo, evitando posibles disturbios en la

iluminación del cultivo de hortalizas, en la dependencia del Campus de la Universidad Militar Nueva Granada en Cajicá, Colombia.

VI. CONCLUSIONES

De acuerdo con el análisis realizado a los prototipos, se debe tener en cuenta que en los métodos de control, un conocimiento previo del cultivo, el terreno y las especies de maleza que predominan en el área, es necesario con el objetivo de seleccionar las herramientas más eficientes para su control. Asimismo la importancia de mitigar el uso de herbicidas e innovar los métodos mecánicos ya existentes para el trabajo agrícola.

Además, la inclusión de sistemas de visión de máquina y sensores permiten dar precisión en las labores a efectuar ofreciendo un tratamiento selectivo de la maleza, esto con el fin de optimizar recursos, asimismo el de ofrecer una información más exacta de las condiciones físicas, químicas y biológicas del área agrícola.

Se seleccionó el método mecánico para el diseño del prototipo, debido a que el proyecto inicialmente busca promover la agricultura orgánica y de precisión, bajo este requerimiento no se desea incluir controles químicos debido a que afectan el medio ambiente y el desarrollo del cultivo. Además el método mecánico muestra ventajas sobre los distintos métodos cuando es implementado adecuadamente.

Como trabajo futuro se procederá a la construcción del mecanismo para el control de maleza, integrando el módulo de visión de máquina al prototipo, se incluirá una tabla con las coordenadas, de las posiciones de la maleza presente en cultivo, con el fin de verificar el funcionamiento y posicionamiento de los actuadores propuestos para el mecanismo, finalmente se procederá a implementar el prototipo en tiempo real en los cultivos de hortalizas en el campus de la Universidad Militar Nueva Granada en Cajicá.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Militar Nueva Granada por el apoyo al presente trabajo, que hace parte del proyecto de investigación IMP ING 1718 titulado Diseño de un sistema para la preparación del suelo de forma automatizada para cultivos orgánicos dirigido a pequeños agricultores.

REFERENCIAS

- [1] D. Slaughter, D. Giles y D. Downey, «Autonomous robotic weed control systems: A review,» *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 61, nº 1, pp. 63-78, 2008.
- [2] E. Pannacci y F. Tei, «Effects of mechanical and chemical methods on weed control, weed seed rain and crop yield in maize, sunflower and soyabean,» *Crop Protection*, vol. 64, nº 0, pp. 51-59, 2014.
- [3] R. Annett, H. R. Habibi y A. Hontela, «Impact of glyphosate and integrated weed management,» *Weed Technology*, vol. 27, nº 1, pp. 1-11, 2013.
- [4] K. Harker y J. O'Donovan, «Recent weed control, weed management, and integrated weed management,» *Weed Technology*, vol. 27, nº 1, pp. 1-11, 2013.
- [5] B. Melander, B. Lattanzi y E. Pannacci, «Intelligent versus non-intelligent mechanical intra-row weed control in transplanted onion and cabbage,» *Crop Protection*, vol. 72, nº 0, pp. 1-8, 2015.
- [6] A. Lundkvist y T. Verwijst, «Weed Biology and Weed Management in Organic Farming,» *Research in Organic Farming - INTECH*, 2011.
- [7] Y. Zhang, E. S. Staab, D. C. Slaughter, D. K. Giles y D. Downey, «Automated weed control in organic row crops using hyperspectral species identification and thermal micro-dosing,» *Crop Protection*, vol. 41, nº 0, pp. 96-105, 2012.
- [8] M. Pérez-Ruiz, D. C. Slaughter, F. A. Fathallah, C. J. Gliever y B. J. Miller, «Co-robotic intra-row weed control system,» *Biosystems Engineering*, vol. 126, pp. 45-55, 2014.
- [9] Z. Gobor, P. S. Lammers y M. Martinov, «Development of a mechatronic intra-row weeding system with rotational hoeing tools: Theoretical approach and simulation,» *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 98, pp. 166-174, 2013.
- [10] H. Y. Jeon y L. F. Tian, «Direct application end effector for a precise weed control robot,» *Biosystems Engineering*, vol. 104, nº 4, pp. 458-464, 2009.
- [11] Universidad Nacional de Colombia, «Maquinaria y Mecanización Agrícola,» [En línea]. Available: http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/medellin/3007073/und_1/html/conceptos_meca.html. [Último acceso: 18 09 2015].