

## **Diseño y construcción de una desespadora mecánica de nopal**

QUINTERO-FERNÁNDEZ, Leoncio, RODRÍGUEZ-HERNÁNDEZ, Wenceslao, VELASCO-SILVA, Ulisses Rafael y FITZ-RODRÍGUEZ, Efrén

L. Quintero, W. Rodríguez, U. Velasco y E. Fitz

Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola, km 38.5 carretera México-Texcoco, Chapingo, Estado de México, C.P. 56230, México  
efitzr@taurus.chapingo.mx

F. Pérez, D. Sepúlveda, R. Salazar, D. Sepúlveda (eds.) Ciencias Matemáticas aplicadas a la Agronomía. Handbook T-I.- ©ECORFAN, Texcoco de Mora, México, 2017.

## Abstract

Nopal (*Opuntia ficus-indica*) is a vegetable consumed in Mexico and in many parts of the world. In the preparation of food, first, all the spines should be removed from the pads, usually done manually with a knife. Although there are some machines for this task in commercial settings, these ones do not remove all the spines from the pads. In this project, it is proposed to design a machine able to do this task more efficiently and capable of removing all spines from the pads. The prototype consists of conveyor belts, fixed and mobile rollers, straight slicer, and adjustable slicers that follow and adapt to the form of the nopal pads, cutting the edges and obtaining a completely clean nopal pad.

## 5 Introducción

El nopal (*Opuntia ficus-indica*) es una planta con más de 300 especies, oriundas del continente americano. Dada la gran diversidad de especies, México es considerado como uno de los lugares de origen. La importancia del nopal radica en su uso en la industria alimentaria, al consumirse como verdura y de igual manera se utiliza como forraje para ganado. En los últimos años la producción nacional de la verdura nopalito se ha incrementado, tan solo en el 2015 se produjeron 812 705 toneladas (SIAP, 2015). Una de las etapas en el proceso de producción, para poder llegar a consumirlo, es el la remoción de espinas (desespinado). Esta labor se realiza de manera manual con un cuchillo, la cual puede resultar riesgosa, y muy laboriosa cuando se tienen volúmenes de producción elevados. Actualmente existen máquinas desespadoras de nopal, sin embargo éstas solo remueven las espinas de las caras planas del nopal y el desespinado de las orillas del nopal se realiza manualmente, resultando en máquinas poco eficientes. En el presente trabajo se plantea diseñar y construir una maquina capaz de realizar el desespinado de manera rápida y segura de los nopales destinados para el consumo humano, contribuyendo así una mecanización del proceso de manera más completa. El prototipo propuesto, incluye un mecanismo tipo leva-seguidor que corta las espinas que tiene el nopal en las orillas, resultando en un desespinado total del nopal verdura.

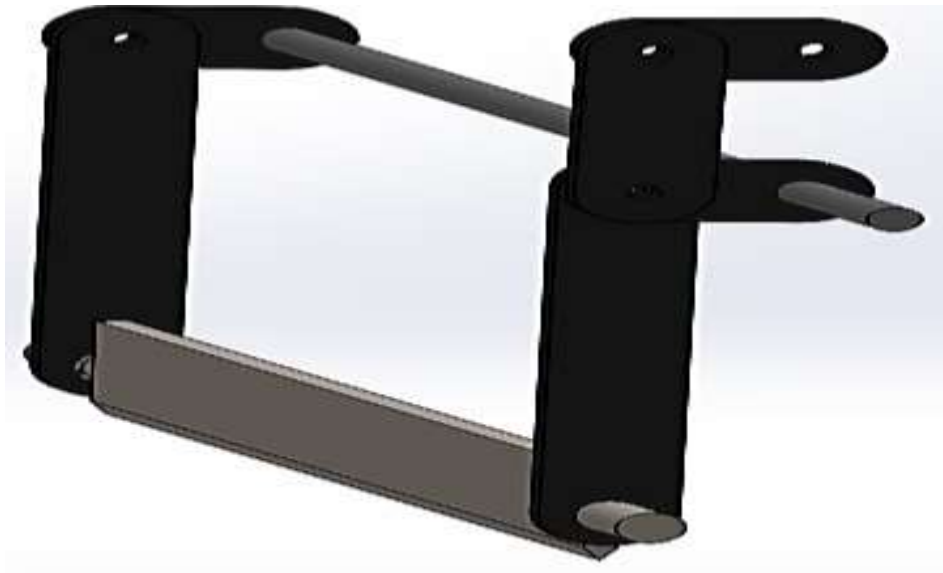
### 5.1 Materiales y métodos

Para el desarrollo del prototipo se implementó la metodología de diseño en ingeniería que incluye las siguientes etapas: 1) identificación de la necesidad y planteamiento del problema, 2) búsqueda de información, 3) planteamiento de posibles soluciones, 4) selección de la mejor solución, 5) diseño detallado y 6) construcción del prototipo. El prototipo consiste de tres mecanismos principales: 1) mecanismo de corte vertical 2) mecanismo desespador de caras planas y 3) mecanismo seguidor para cortes laterales, con los cuales se remueven las espinas de manera completa.

#### 5.1.1 Mecanismo de corte vertical

Este mecanismo consiste de dos eslabonamientos conectados en serie, accionados por un servomotor y que producen el movimiento vertical de la cuchilla, con la cual se corta el ápice y la base del nopal. Los mecanismos son dos lazos cerrados, donde el primero consiste en un mecanismo paralelogramo doble balancín (cuyo movimiento se restringe a 60°). En la segunda ramificación el eslabón balancín se conecta a la manivela del mecanismo con la finalidad de transmitir el movimiento. Se planteó una carrera de 1.5 cm para la corredera realizada en el menor tiempo posible (Figura 5).

**Figura 5** Mecanismo cortador vertical

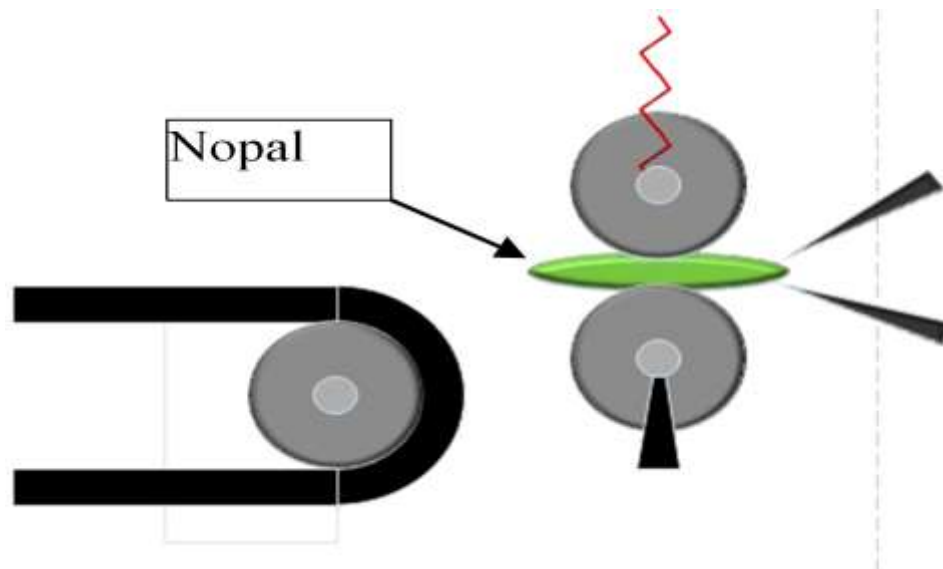


Para el análisis cinemático del mecanismo de corte vertical se implementaron las ecuaciones de movimiento de una manivela corredera como lo describe Norton (2012).

### 5.1.2 Mecanismo desespinator de caras planas

Este mecanismo funciona en conjunto con una banda transportadora, la cual suministra los nopales hacia un par de rodillos (Figura 5.1). El rodillo superior se eleva presionando el nopal con la finalidad de que no tenga un deslizamiento relativo, al entrar en contacto con las navajas inclinadas, las cuales cortan las espinas de las caras planas del nopal.

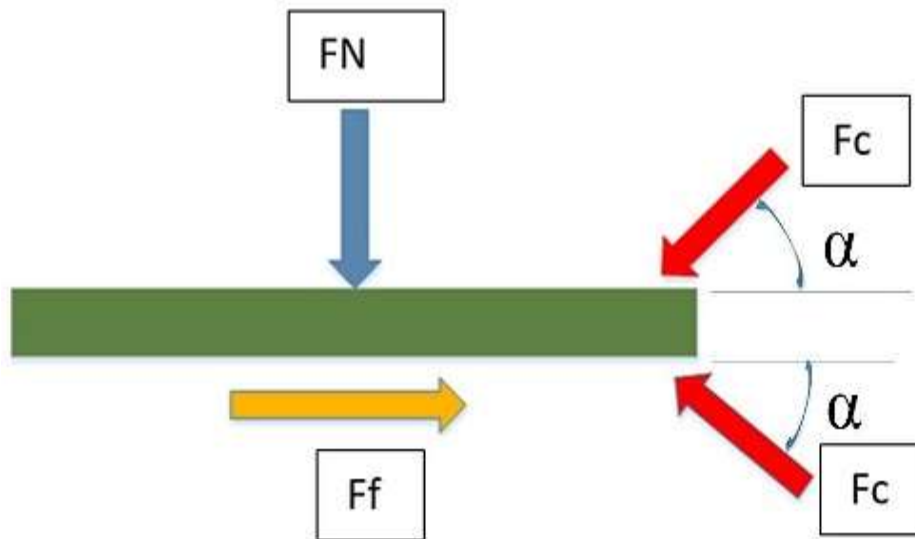
**Figura 5.1** Mecanismo desespinator de caras planas



### 5.1.3 Cálculo de rodillos compresores

Se aplicó el procedimiento de cálculo para determinar la constante de rigidez ( $K$ ) necesaria para evitar deslizamiento relativo, y asegurar que el nopal avanzara adecuadamente entre los rodillos.

**Figura 5.2** Diagrama de cuerpo libre del nopal



La longitud y número de espinas promedio (por cara) son de 22 cm y 55, respectivamente. Suponiendo que al cortar cada espina se rebana un área de corte de  $1\text{cm}^2$  y si se invierten  $0.14\text{ J}$  por cada  $\text{cm}^2$  de nopal, entonces la energía necesaria es:

$$W = E_c * n * A = 7.62\text{ J.}$$

$$\text{Si } W = F_c * L \rightarrow F_c = \frac{W}{L} \therefore F_c = \frac{7.62\text{ J}}{0.22\text{ m}} = 34.65\text{ N}$$

Formulando las ecuaciones a partir de la Figura 3 para la condición de no deslizamiento:

$$F_f \geq 2F_c * \cos(\alpha)$$

$$FN\mu \geq 2F_c * \cos(\alpha) \rightarrow FN \geq 2(34.65\text{ N})\cos(45^\circ)$$

$$FN \geq 49\text{ N}$$

Donde:

$W$  Trabajo (J)

$E$  Energía útil en el corte (J)

$A$  Área de corte ( $\text{cm}^2$ )

$E_c$  Energía específica ( $\text{J}/\text{cm}^2$ )

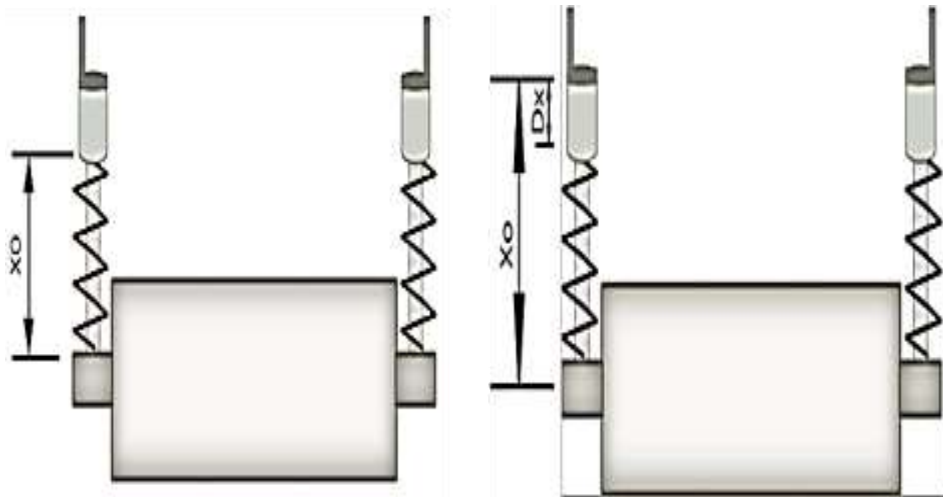
$F_c$  Fuerza cortante promedio (N)

$L$  Longitud promedio del nopal (cm)

$\alpha$  Ángulo de inclinación de las navajas

Datos:  $E = 0.79\text{ J}$      $A_c = 5.7\text{ cm}^2$      $E_c = 0.14\text{ J}/\text{cm}^2$

**Figura 5.3** Posiciones límites de los rodillos compresores

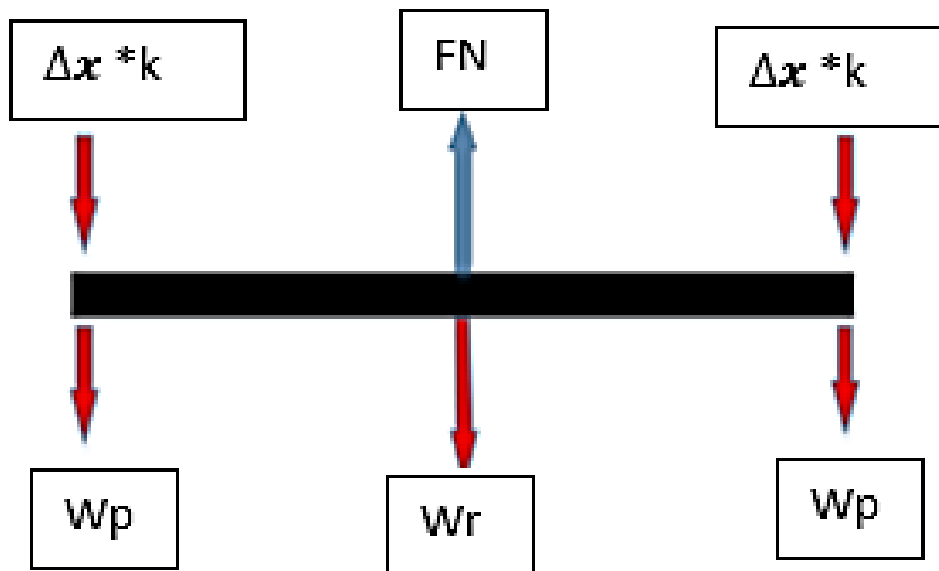


$X_0$  Distancia del resorte sin sufrir algún alargamiento.

$\Delta x$  Desplazamiento provocado por el nopal al entrar los rodillos.

$$\therefore \Delta x = 0.75 \text{ cm}$$

**Figura 5.4** Diagrama de cuerpo libre de un rodillo superior



$W_r$  = Peso del rodillo.

$W_p$  = Peso del pistón.

$\Delta x * K$  = Fuerza ejercida por el pistón.

$FN$  = Fuerza normal ejercida sobre el pistón.

A partir de la figura 1.6 se tiene:

$$FN = 2W_p + W_r + 2\Delta x * K$$

$FN = 50\text{N}$ , condición de no deslizamiento

$FN \leq 250$  (Fuerza crítica de compresión que soporta el nopal).

$$M_p = \pi(6.35 \times 10^{-3})^2(0.1\text{m}) \left( \frac{7300 \text{ kg}}{\text{m}^3} \right) = 0.0925 \text{ kg}$$

$$Mr = 1.18 \text{ kg}$$

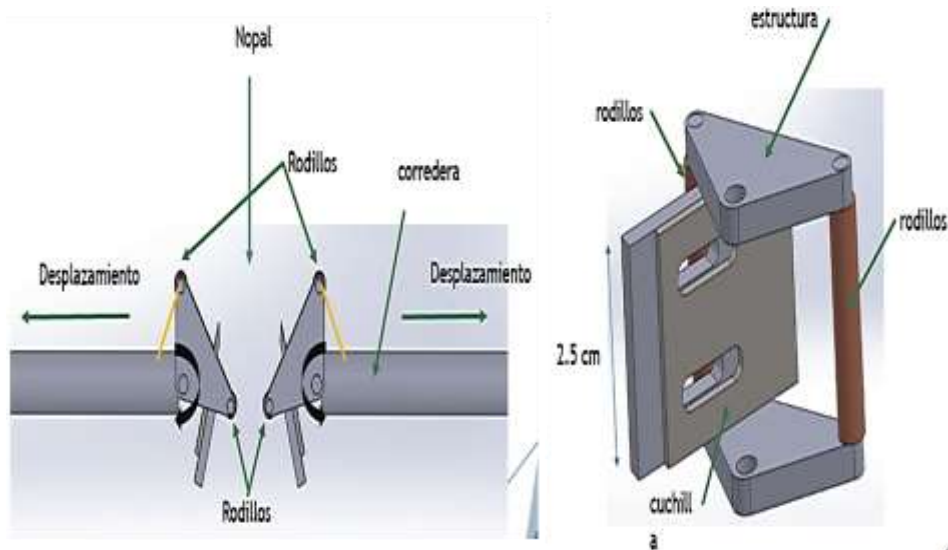
$$\Delta x = 7.5 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$K = 0.25 \text{ kg/mm}$$

### 5.1.4 Mecanismo seguidor para cortes laterales

Una vez que se han removido las espinas en las caras planas del nopal, este se hace pasar por un mecanismo seguidor. Este consta de una estructura que tiene acoplada una navaja que corta las espinas de las orillas. Unos rodillos que giran sobre un eje y dirigen toda la estructura para seguir una trayectoria en la forma del nopal. Este mecanismo se desplaza hacia lo ancho del nopal, ajustándose a las orillas por medio de unos resortes que mantienen al mecanismo ajustado a las orillas, cortando las orillas del nopal. Para el análisis de posición (trayectoria) de los cortadores laterales se determinó la trayectoria promedio de las orillas de un nopal, definida por puntos, con la cual se definió una expresión algébrica, en este caso su posición. De esta expresión se derivaron velocidad, aceleración y sacudimiento.

**Figura 5.5** Seguidores para cortes laterales



$$y = 0.0001x^3 - 0.0140x^2 + 1.2727x + 11.0917$$

$$\dot{y} = [0.0003v_x^2 t^2 - 0.028v_x t + 1.2727]v_x$$

$$\ddot{y} = [0.0006v_x t - 0.028]v_x^2$$

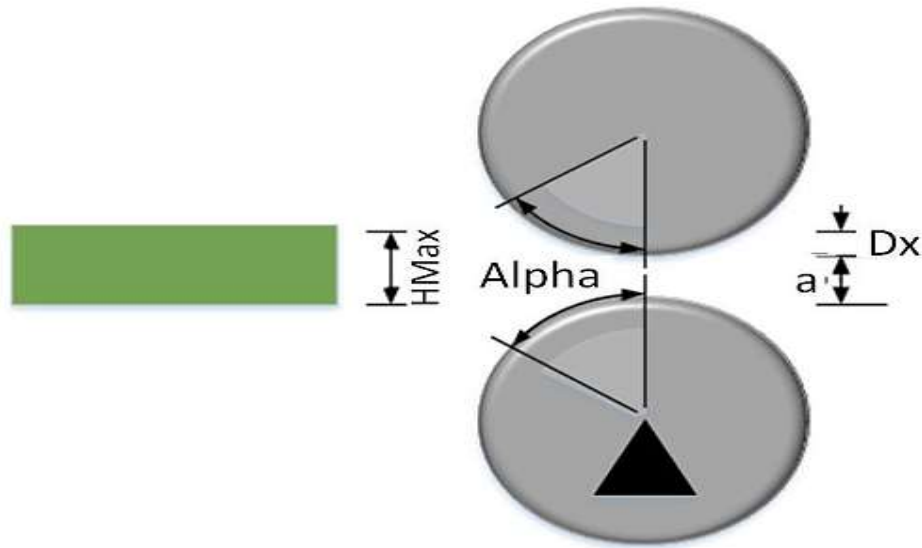
$$\ddot{\ddot{y}} = [0.0006]v_x^3$$

El traslado del nopal hacia cada uno de los mecanismos de limpieza lo realizan un par de bandas transportadoras que consta de ejes, cojinetes, cilindros, y un sistema de transmisión de bandas en V. Los sistemas de rodillos compresores y bandas transportadoras son accionados con un motor eléctrico.

### 5.1.5 Cálculo del diámetro de los rodillos

El cálculo del diámetro de los rodillos resulta de gran importancia, para lograr que el nopal pueda alimentarse al mecanismo cortador. Si el diámetro del rodillo es muy pequeño, el nopal no podrá empujar el cilindro superior hacia arriba, solo se patinara. De lo contrario si es muy grande, solo se estaría desperdiciando material de construcción.

**Figura 5.6** Interacción rodillo-nopal, para el cálculo del diámetro óptimo



$$\mu_2 = \tan(\theta)$$

Donde  $\theta$  = Angulo de talud del nopal en una superficie metálica.

Si  $\theta = 45^\circ \rightarrow \mu_2 = 1.0$  (Adimensional)

$$H_{prom} - a + d \cos(\theta^2) = d \quad H_{prom} - a = d(1 - \cos(\theta^2)) \quad d \geq 2.56 \text{ cm}$$

Por lo tanto se ha optado por usar un  $d = 2 \text{ in}$

### 5.1.6 Construcción del prototipo

El diseño y la construcción de la desespinaadora mecánica se llevó a cabo en las instalaciones de Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola de la UACH, haciendo uso del material literario, de los talleres y del apoyo del personal académico encargado de sus áreas de trabajo.

Para esta etapa se utilizaron materiales como ángulo de 2" x 2" y 1/8" (6 m), barra circular pulida de 1/2" (4 m), tubo de 2" (1.6m), chumaceras para eje de 1/2" (10 piezas), baleros para eje de 1/2" (6 piezas), plástico Lymatic de 2", tornillería, resortes (8 piezas), solera de 1" media pieza, solera de acero inoxidable de 1", moto-reductor de 1/15 hp y 50 rpm, servomotor TowerPro MG995, hule para bandas y bandas de transmisión tipo B.

### 5.2 Análisis y discusión de resultados

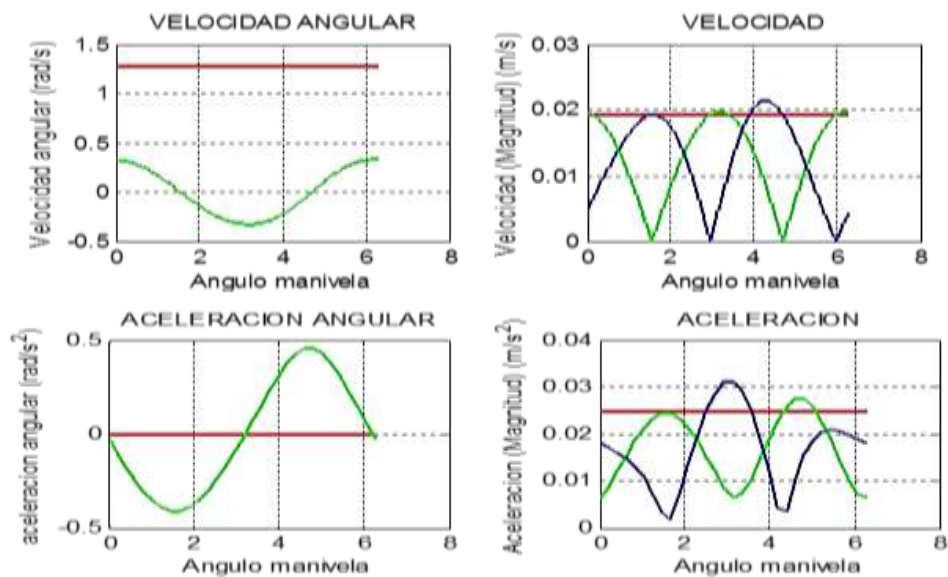
Se implementó un mecanismo de cuatro barras manivela corredera (M4BMC), dado que los ángulos de transmisión y el diseño de sus eslabones que realizan un recorrido de salida en un intervalo de tiempo entre 1 y 2 segundos, en consecuencia, el nopal es cortado de su punta y ápice en el momento exacto. El mecanismo mencionado es accionado por un servomotor, sin embargo, la parte del control de su recorrido se implementó en un microcontrolador ARDUINO, en el cual se programaron los tiempos del mecanismo. El análisis cinemático (Gráfico 5) del mecanismo de corte vertical, incluye las velocidades y aceleraciones de la manivela, el acoplador y de la corredera. Los algoritmos de análisis se implementaron en MATLAB®.

El sistema de rodillos analizados presento un comportamiento al esperado durante su diseño, aunque por otra parte las correderas que se construyeron en el prototipo necesitaban una lubricación más exigente. Por su parte el rodillo con solo la acción de su propio peso ejercía la presión requerida para que el nopal no perdiera la trayectoria deseada durante el avance.

El mecanismo seguidor de corte lateral se analizó como un mecanismo leva-seguidor, donde se aproximó la forma de la leva, a la forma del nopal. Del análisis cinemático de levas, la trayectoria que genera la leva (Figura 9a) es equivalente al desplazamiento del seguidor; que en este caso es la forma de la mitad de un nopal. El extremo izquierdo es la base del nopal y el extremo derecho representa el ápice.

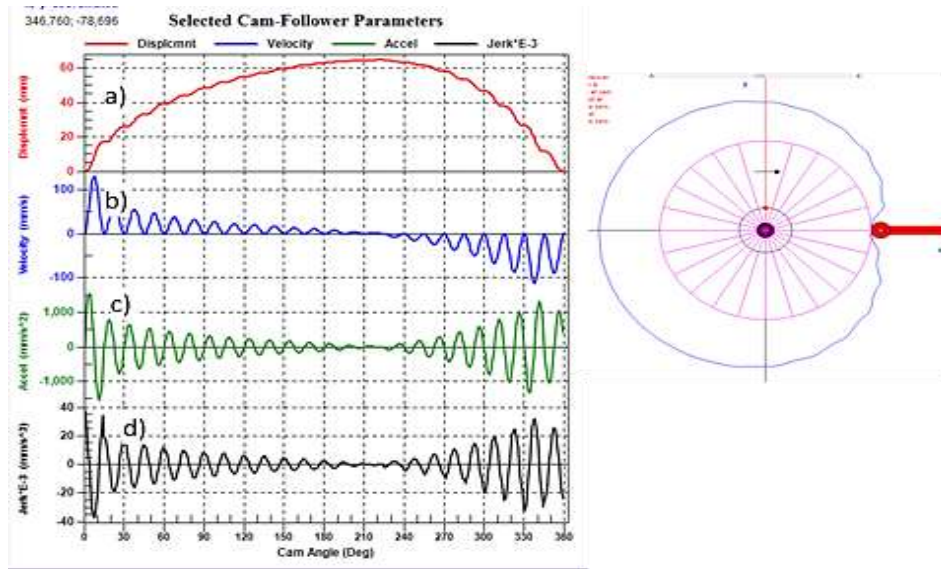
El resto del análisis cinemático incluye: la velocidad (Gráfico 5.1 a), la aceleración (Gráfico 5.1 b), y los sacudimientos (Figura 9d). Dado que las funciones utilizadas para aproximar la trayectoria del seguidor no son “suaves”, las de velocidad, aceleración y sacudimientos resultan en cambios bruscos. Sin embargo dado que en este análisis lo importante es la trayectoria del mecanismo seguidor cortador de orillas, se desprecia el efecto en el análisis de velocidad y aceleración. El análisis del mecanismo se realizó con el programa DYNACAM.

**Gráfico 5** Análisis del cinemático del mecanismo cortador vertical





**Gráfico 5.1** a) Análisis cinemático (posición, velocidad y aceleración y sacudimientos) y b) leva-seguidor que produce el movimiento de trayectoria del nopal

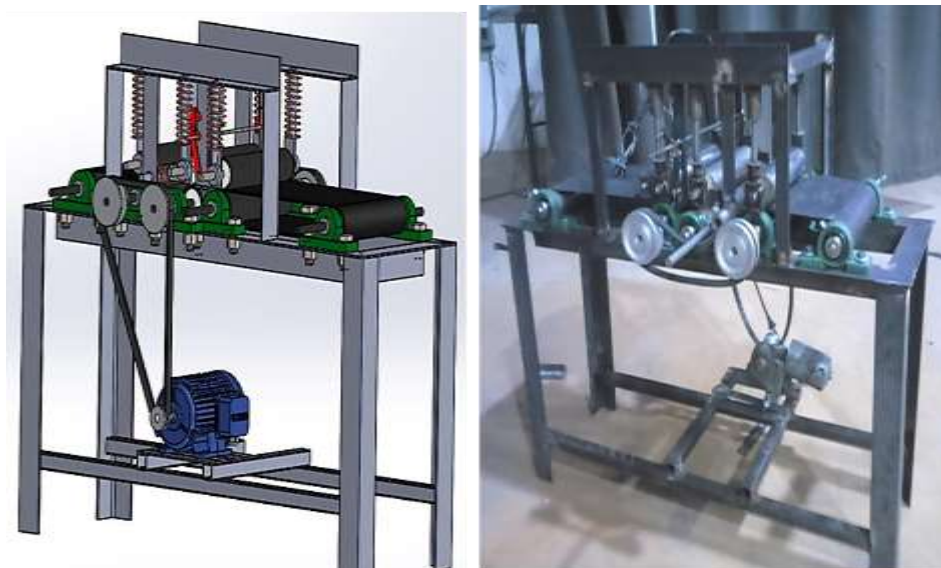


Una vez realizado el análisis cinemático de los componentes principales de la máquina se realizó la manufactura y ensamble de cada uno de sus componentes (Figura 10). El diseño completo de la desespinaadora mecánica realizado en este trabajo promete funcionar de manera eficiente y resolver el problema de manera eficaz. La manufactura de la maquina es un factor muy importante que radica en el buen funcionamiento de la misma.

### 5.3 Conclusiones

El prototipo de máquina limpiadora de nopal desarrollado propone hacer eficiente el proceso de desespinado de nopal y con una calidad de producto aceptable. El diseño del prototipo se realizó siguiendo la metodología de diseño en ingeniería, con el objetivo de resolver un problema de la sociedad.

**Figura 5.7.** a) Prototipo 3D de la desespinaadora mecánica y b) Construcción del prototipo



## 5.4 Referencias

Bustamante, P.B., Parra, B.J.E., y Sánchez, C.J.A., 2000, *Diseño de una máquina desespinaadora de nopal verdura*. México: Tesis de Licenciatura en Ingeniería Mecánica Agrícola, UACH.

López Santiago, J.L. 2006. *Rediseño, construcción y evaluación de una máquina desespinaadora de nopal (Opuntia spp.)*. México: Tesis de Licenciatura en Ingeniería Mecánica Agrícola, UACH.

Maki-Díaz, G., Peña-Valdivia, C.B., García-Nava, R. Arévalo-Galarza, M.L., Calderón-Zavala, G., y Anaya-Rosales, S. 2015. *Características físicas y químicas de nopal verdura (Opuntia ficus-indica) para exportación y consumo nacional*. México: Colegio de Postgraduados. Agrociencia 49:31-51

Norton L, Robert.2012. *Diseño de maquinaria. Síntesis y análisis de máquinas y mecanismo*. 5ta ed. Interamericana Mc Graw Hill. Delegación Álvaro Obregón, México D.F. 4-367.