

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA SECCIONADORA DE AGAVE VERDE

Magdaleno Caballero Caballero ¹, Luis Silva Santos ¹, Armando José José ², Isaí López Hernández ², Carlos I. Cortes Martínez ², José L. Montes Bernabé ², Rey F. García Méndez ².

Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Oaxaca. Instituto Politécnico Nacional, Hornos 1003, C.P. 71230 Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, México.
Teléfono y Fax: (01 951) 5170610 y 5170400 Ext: 82740
mcaballero@ipn.mx, luis63ss@yahoo.com.mx, jozoyno@hotmail.com, isai_lh@yahoo.com.mx, solemia7@hotmail.com, jlmberna66@yahoo.com.mx, reyklel@hotmail.com

RESUMEN

Este trabajo muestra el desarrollo del diseño y construcción de una máquina seccionadora de agave en verde de la variedad angustifolia Haw; poniendo especial énfasis en el sistema de corte, el cual está basado en el principio de corte por impacto con martillos articulados. De igual manera se empleó el principio de trabajo y energía para calcular la potencia requerida por el sistema. La potencia calculada fue de 5.3 Hp. Para la transmisión de potencia se calculó un eje de 29.50 mm y se analizaron dos geometrías para la herramienta de corte, seleccionando y diseñando la que cumplió con los parámetros de centros de masa. Las pruebas determinaron que la máquina tiene una capacidad de 1500 kg /hr. También se describen de manera general otros elementos complementarios de la máquina.

ABSTRACT

This study presents the development of the design and construction of a sectioning machine for fresh agave of the angustifolia Haw variety, placing special emphasis on the cutting system, which is based on the principal of impact cutting with articulated hammers. The work-energy principle was employed to calculate the power required by the system, and the calculated power was 5.3 Hp. For power transmission, a 29.50 mm axis was calculated and used and two cutting tool geometries were analyzed, and the one that met the center of mass parameters was selected and designed. Tests determined that the machine has a capacity of 1500 kg/hr. Other complementary elements of the machine are also generally described in this paper.

NOMENCLATURA

ϕ	Diámetro de Polea
n	Velocidad en rpm
ω	Velocidad angular
P	Potencia
d_{tra}	Distancia que describe en su trayectoria el centro de masa del martillo
F	Fuerza
v	Velocidad
T	Trabajo
n_{mar}	Número de martillos
M	Momentos
R	Reacciones
d	Diámetro

INTRODUCCIÓN

El Estado de Oaxaca, ubicado al sureste de México, es el principal productor de agave y mezcal. El proceso artesanal para la elaboración del mezcal consta de cinco fases: horneado, seccionado, molienda, fermentación y destilación; en este proceso se emplean 12.7 kg de agave para producir un litro de mezcal [1]. La fase de horneado, con una capacidad de 3000 a 4000 kg de agave, se lleva a cabo en dos tiempos; 72 horas para el horneado y 48 horas más para la extracción, dando un total de 120 horas. En la figura 1, se observa la preparación de la piña para el horneado, los productores parten las piñas de dos a cuatro secciones, por lo cual las piezas de las piñas no presentan una cocción homogénea.



Figura 1. Preparación del agave para la fase de cocción

Estudios relacionados a la elaboración de mezcal, demostraron que es posible obtener la misma cantidad de producto empleando tan solo 7.2 kg de agave mediante un proceso tecnificado [2]. En este proceso se realizan las siguientes fases: seccionado, horneado, molienda, fermentación y destilación. La característica de este proceso es que el seccionado de la materia prima se realiza antes de la fase de horneado con la finalidad de que la cocción sea más homogénea.

Por lo tanto, el objetivo de este trabajo fue diseñar y construir una máquina seccionadora de agave en verde para preparar la materia prima para la fase de horneado.

DESARROLLO

Después de identificar la problemática, se procedió con la investigación bibliográfica; así como un trabajo conjunto con los productores para determinar las necesidades y capacidades a lograr de la máquina. Posteriormente se plantearon las especificaciones de funcionamiento del equipo. Enseguida se propusieron diferentes soluciones que cumplieron con las especificaciones de diseño, para finalmente evaluar y seleccionar el diseño conceptual.

El diseño seleccionado consta de los siguientes sistemas: seccionador de agave; alimentación y descarga; transmisión de potencia y bastidor. El diseño a detalle se enfocó al sistema seccionador, que es uno de los puntos críticos para el funcionamiento del equipo.

A continuación se describen los cálculos que se hicieron para obtener la potencia que requiere el sistema, la geometría y dimensiones de la herramienta de corte, diámetro del eje principal o eje de transmisión de potencia y finalmente obtener el arreglo del sistema seccionador.

Análisis cinemático del sistema seccionador de agave.

Para este desarrollo se utilizó la teoría del movimiento general. Por experimentación y experiencia se estableció que la velocidad angular del sistema ω_2 se deduce del arreglo de poleas para la transmisión de potencia de las siguientes dimensiones:

Diámetro de Polea Motriz (ϕ_2) = 127 mm

Diámetro de Polea Accionada (ϕ_3) = 254 mm

RPM de polea motriz (n_2) = 1730 rpm

Para determinar la velocidad de la polea accionada se utilizó la siguiente ecuación:

$$n_2\phi_2 = n_3\phi_3 \quad (1)$$

Se despeja de la ecuación anterior a n_3 , con lo cual se obtuvo:

$$n_3 = 865 \text{ rpm} \quad (2)$$

Sustituyendo datos en la ecuación 1, se determinó la velocidad angular del eje del sistema de desgarre molienda:

$$\omega_3 = 90.583 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \quad (3)$$

Cálculo de potencia de subconjunto seccionado-desgarre.

Para determinar la potencia que requiere el sistema, se utiliza la siguiente expresión:

$$P_{TC} = \frac{F_{TC} \cdot v_c}{745.7} \quad (4)$$

En donde:

P_{TC} = Potencia requerida en Hp

F_{TC} = Fuerza total de corte en N

v_c = Velocidad de corte en m/s

Pozos [3], en las pruebas de laboratorio determinó la energía necesaria para romper la estructura del *Agave angustifolia* Haw, llevando a cabo las pruebas en dos tipos de probetas, con orientaciones paralelas y transversales de las fibras con respecto a la herramienta de corte. Obtuvo resultados de 4.755 J y 10.920 J en corte paralelo y transversal respectivamente. Se utilizó el valor de 10.920 J, porque es la orientación crítica de las fibras que puede presentar en el seccionado del agave. Siendo este el punto de partida para el desarrollo del cálculo de la potencia del subconjunto de molienda.

Para calcular la fuerza de corte se utilizó la siguiente ecuación:

$$F_C = \frac{T}{d_{tra}} = [N] \quad (5)$$

Donde:

d_{tra} = Distancia que describe en su trayectoria el centro de masa del martillo

$d_{tra} = 0.404 \text{ m}$

$T = 10.920 \text{ J}$

Por lo tanto la fuerza de corte se obtuvo fue de:

$$F_C = 27.029 \text{ N} \quad (6)$$

En el sistema de molienda-desgarre trabajan simultáneamente 8 martillos por lo que se procedió a calcular la fuerza total de corte F_{TC} .

$$F_{TC} = F_C \times n_{mar} = [N] \quad (7)$$

$$F_{TC} = 27.029N \times 8 = 216.232N \quad (8)$$

Conocido el valor de la velocidad angular = 90.583 rad/s y el radio = 0.202 m, se pudo obtener la velocidad lineal.

$$v = (90.583)(0.202) = 18.298 \frac{m}{s} \quad (9)$$

Con los datos de fuerza y velocidad, se determinó la potencia que requiere el sistema para el seccionado del agave en verde, de los valores de la ecuación 8 y 9 sustituidos en la ecuación 10, se obtuvo el valor de la potencia.

$$P_{TC} = \frac{F_{TC} \cdot v_C}{745.7} = 5.307 Hp \quad (10)$$

Diseño de eje principal

El diseño del arreglo del sistema seccionador, está compuesto del eje principal o de transmisión de potencia; cinco discos los cuales se utilizan como separador y como soporte del espárrago y las herramientas de corte. En la figura 2, se muestra la configuración del sistema seccionador.

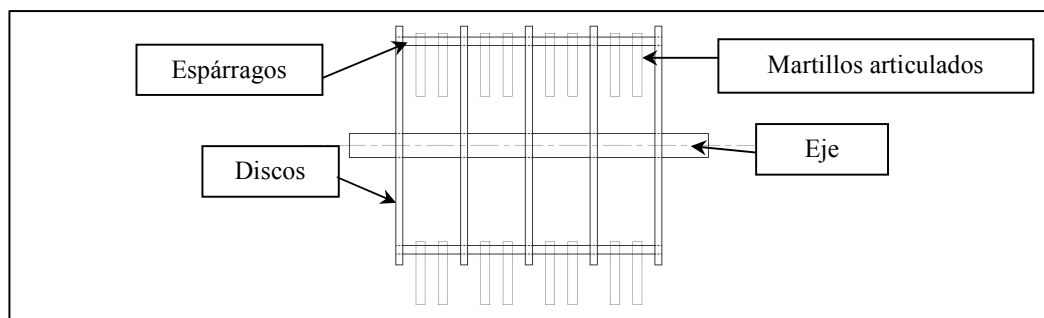


Figura 2. Configuración del sistema seccionador de agave en verde.

El análisis parte del elemento llamado espárrago, con una carga uniformemente repartida. Se identificó como un sistema estáticamente indeterminado debido a que cuenta con cinco apoyos, por lo cual se utilizó la ecuación de los tres momentos, mostrado en la ecuación 11, la distancia entre apoyos es de 56.66 mm.

$$M_{(n-1)}l_n + 2M_n[l_n + l_{(n+1)}] + M_{(n+1)}l_{(n+1)} = -6 \left[\frac{A_n a_n}{l_n} + \frac{A_{(n+1)} b_{(n+1)}}{l_n} \right] \quad (11)$$

Como primer paso se dibujó el diagrama de cuerpo libre del espárrago, mostrado en la figura 3.

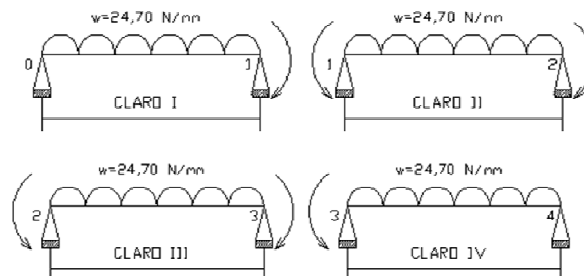


Figura 3. Diagrama de cuerpo libre del espárrago.

Desarrollando la ecuación 11 para el caso anterior, se obtuvieron los momentos flectores que actúan en el eje principal: $M_1=8494.460$ N-mm; $M_2=5670.052$ N-mm; $M_3=8494.460$ N-mm. En la figura 4, se muestran las reacciones que actúan sobre el eje principal para encontrar las fuerzas cortantes y momentos flexionantes.

$$w=24,70 \text{ N/mm}$$

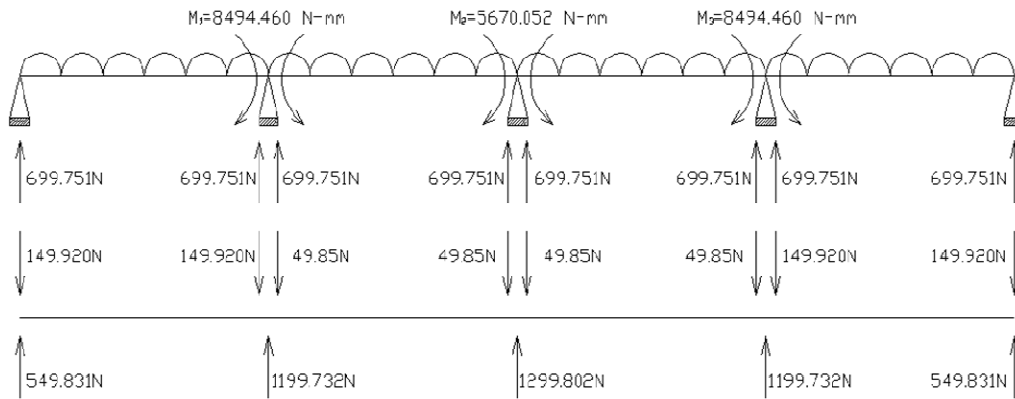


Figura 4. Diagrama de momentos y fuerzas

La figura 5, muestra las reacciones que se transportan al eje principal a través de los discos que están montados en el eje actuando como cargas distribuidas de la siguiente forma.

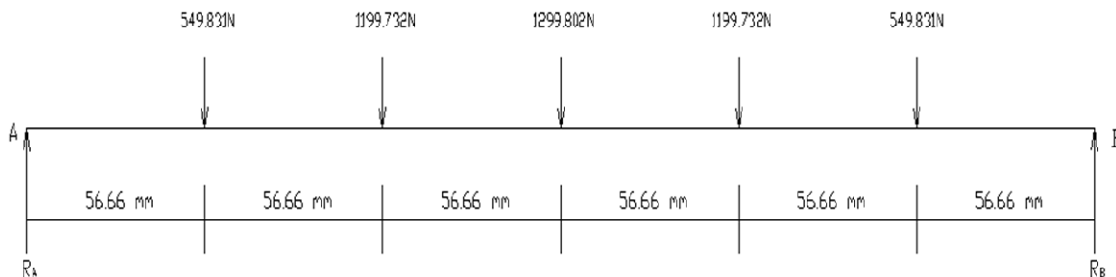


Figura 5. Diagrama de cuerpo libre

Haciendo el cálculo estático, se obtuvieron:

$$R_A = 2399.464 \text{ N} \quad (12)$$

$$R_B = 2399.464 \text{ N} \quad (13)$$

$$M_{\max} = 277577.226 \text{ N-mm} \quad (14)$$

Cálculo del diámetro del eje principal

Material propuesto: Acero AISI 4140.

Factor de seguridad: 2

Potencia requerida: 5.307Hp

Velocidad del motor: 1730 rpm

Velocidad del eje: 865 rpm

Cálculo por cargas estáticas

Aplicando la teoría del esfuerzo cortante máximo y sustituyendo valores se obtuvo:

$$d = \left[\left(\frac{32n}{\pi S_y} \right) (M^2 + T^2)^{1/2} \right]^{1/3} \quad (15)$$

$$d = \left[\left(\frac{32(2)}{\pi(95000)} \right) \left((2458.853)^2 + (386.521)^2 \right)^{1/2} \right]^{1/3} \quad (16)$$

$$d = 0.81117 \text{plg} = 20.604 \text{mm} \quad (17)$$

Cálculo por energía de la distorsión

$$d = \left[\frac{16n}{\pi S_y} (4M^2 + 3T^2)^{1/2} \right]^{1/3} \quad (18)$$

Sustituyendo datos tenemos:

$$d = \left[\frac{16(2)}{\pi(95000)} \left(4(2458.853)^2 + 3(386.521)^2 \right)^{1/2} \right]^{1/3} \quad (19)$$

$$d = 0.81035 \text{plg} = 20.583 \text{mm} \quad (20)$$

Cálculo por cargas dinámicas

Conociendo que el acero utilizado es un acero AISI 4140 con resistencia última a la tensión de 110 kpsi y utilizando la ecuación del *esfuerzo cortante máximo* por medio de fatiga mostrado en la ecuación 21, sustituyendo datos se obtuvo:

$$d = \left\{ \frac{32n}{\pi} \left[\left(\frac{T}{S_y} \right)^2 + \left(\frac{M}{S_e} \right)^2 \right]^{1/2} \right\}^{1/3} \quad (21)$$

$$d = \left\{ \frac{32(2)}{\pi} \left[\left(\frac{386.521}{95000} \right)^2 + \left(\frac{2458.853}{32038.0663} \right)^2 \right]^{1/2} \right\}^{1/3} \quad (22)$$

$$d = 1.161 \text{plg} = 29.494 \text{mm} \quad (23)$$

Geometría de la herramienta de corte

Para realizar la selección de la herramienta de corte se hicieron dos propuestas de solución, de las cuales se hizo el cálculo del centro de masa. Para obtener la masa de las secciones se utilizó la ecuación $m = \rho V$. Debido a que el material trabaja en contacto con humedad por lo tanto se debe de utilizar acero inoxidable con una densidad de $\rho = 7920 \text{kg/m}^3$.

Desarrollando los cálculos de centros de masa, obtuvieron los siguientes resultados:

Propuesta 1. Esta cuchilla tiene un ángulo de filo es de 37° . Con una altura del filo de 20 mm. El centro de masa del elemento con respecto al centro de rotación es de 38.01 mm.

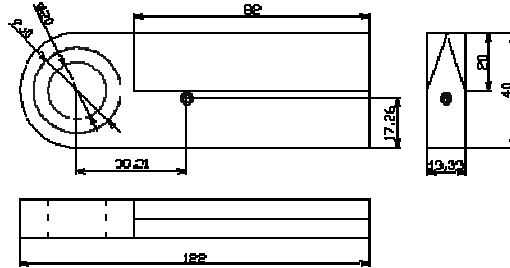


Figura 6. Dimensiones de la propuesta 1

$$\bar{x} = \frac{16.123922}{0.42193633} = 38.2141108mm \quad (24)$$

$$\bar{y} = \frac{-1.15427136}{0.42193633} = -2.73565296mm \quad (25)$$

Propuesta 2. Este elemento tiene un ángulo de corte de 31° , con una altura de 15 mm y con dos superficies planas de 2.5 mm para el impacto del agave. Su centro de masa se localiza a 37.87 mm del centro de rotación.

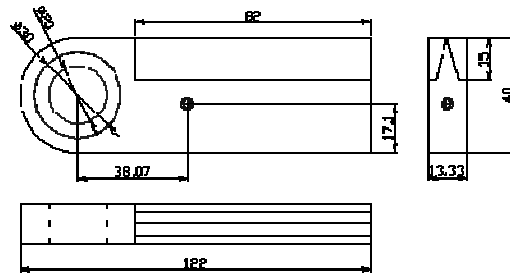


Figura 7. Dimensiones de la propuesta 3

$$\bar{x} = \frac{15.9585254}{0.41922491} = 38.066739mm \quad (26)$$

$$\bar{y} = \frac{-1.21745646}{0.41922491} = -2.90406515mm \quad (27)$$

RESULTADOS

Centro de masa

De acuerdo a los cálculos realizados de las propuestas que se generaron, se hizo la selección del concepto adecuado para el seccionado, obteniendo las siguientes dimensiones. Esta selección se hizo de acuerdo a la funcionalidad y al proceso de maquinado.

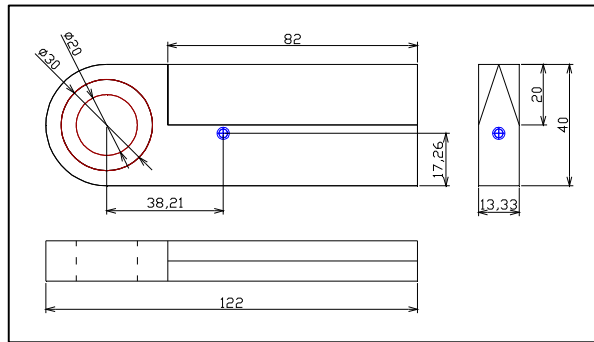


Figura 8. Herramienta de corte

Potencia

Se hizo el cálculo de la potencia para el seccionamiento, con los parámetros de energía de corte, obtenido por Pozos [3]. La potencia requerida para hacer el seccionado de agave en verde es de 5.307 Hp, pero en el mercado no existe esta capacidad en motores eléctricos trifásicos, por lo cual se eligió un motor de 7.5 Hp.

Eje

Con los cálculos realizados se obtuvo el diámetro del eje principal igual a 29.4941 mm.

Geometría de la herramienta

La geometría de la herramienta de corte se muestra en la figura 9, la cual tiene un buje de bronce para disminuir el desgaste. Se utilizó acero inoxidable de acuerdo a la norma de procesamiento de alimentos.

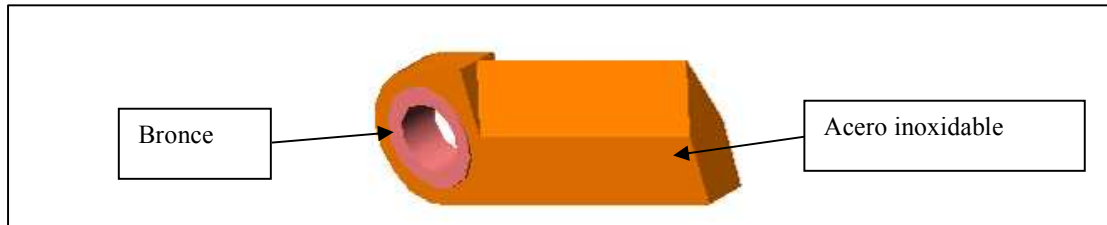


Figura 9. Geometría de la herramienta de corte.

Arreglo del sistema seccionador

El arreglo del sistema seccionador de agave, consta de 32 herramientas de corte montados en grupos de 8 sobre un perno, los cuales a su vez, están apoyados en 5 discos, como se observa en la figura 10.

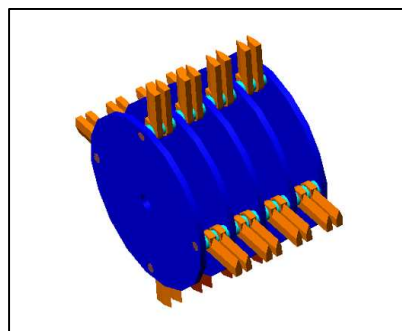
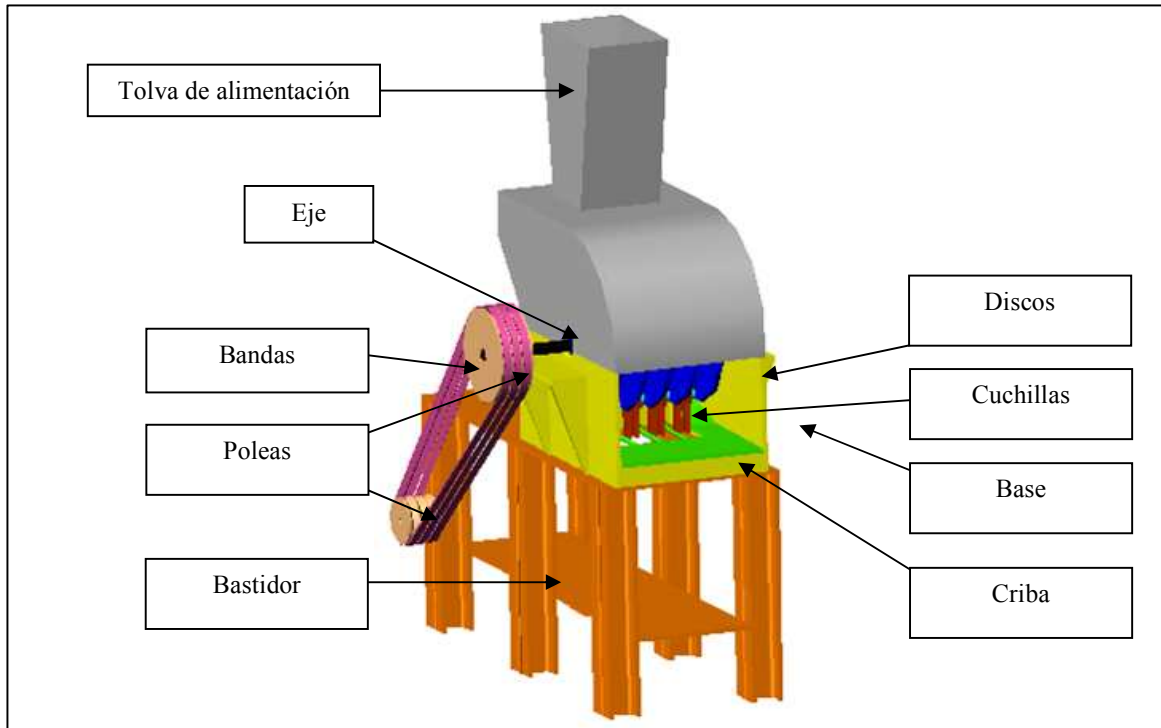


Figura 10. Sistema seccionador de agave en verde

Partes de la máquina seccionadora de agave en verde



CONCLUSIONES

En este trabajo se muestra el diseño del sistema seccionador de agave en verde, siendo la parte principal de la máquina, se construyó la máquina seccionadora de agave, esto se logró en base a los datos obtenidos de la caracterización físico-mecánicas; así como también a los cálculos de las dimensiones del eje, a la geometría de la herramienta de corte y a los discos que son parte del sistema estructural de la seccionadora. Dando solución con esto a las necesidades del productor.

REFERENCIAS

- [1] Plan rector del sistema producto maguey-mezcal. Diagnóstico del sistema producto maguey-mezcal. Oaxaca, México. 2004
- [2] S. S. Luis, C. C. Magdaleno. Desarrollo de tecnologías adecuadas para el proceso de producción del mezcal en el Estado de Oaxaca. Premio a la investigación en el IPN 2004
- [3] P. O. Joel. Determinación de las propiedades físico-mecánicas de agave angustifolia haw (espadín azul), utilizado en la fabricación del mezcal. esime-ipn-sepi junio 2002.