

## DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA PARA MOLER AGAVE COCIDO

Caballero Caballero Magdaleno<sup>1</sup>, Silva Santos Luis<sup>1</sup>, López Hernández Isai<sup>2</sup>, José José Armando<sup>2</sup>, Cortés Martínez Carlos I<sup>2</sup>.

Montes Bernabé J. Luis<sup>2</sup>, García Méndez Rey F<sup>2</sup>.

Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional

Unidad Oaxaca del Instituto Politécnico Nacional

Hornos No. 1003, Santa Cruz Xoxocotlán, C. P. 71230 Oaxaca, México.

Tel. y fax: (951) 51 70610 y (951) 51 71199

[mcaballero@ipn.mx](mailto:mcaballero@ipn.mx), [luis63ss@yahoo.com.mx](mailto:luis63ss@yahoo.com.mx), [isai\\_lh@yahoo.com.mx](mailto:isai_lh@yahoo.com.mx), [jozoyno@hotmail.com](mailto:jozoyno@hotmail.com), [solemia7@hotmail.com](mailto:solemia7@hotmail.com),  
[jlmberna66@yahoo.com.mx](mailto:jlmberna66@yahoo.com.mx), [reyklel@hotmail.com](mailto:reyklel@hotmail.com)

### RESUMEN

Este trabajo presenta el diseño y construcción de una máquina experimental para extraer jugos de agave cocido *Angustifolia Haw.* La máquina inicia su operación con el accionamiento de un tren laminador de tres rodillos radialmente dentados y colocados en forma de triángulo, con un separador colocado entre los rodillos inferiores para recibir la materia prima horizontalmente. Debido a que los rodillos inferiores giran en sentido de las manecillas del reloj y el rodillo superior en sentido contrario, la materia prima es recibida en un extremo y los desechos colectados en la parte posterior. La potencia se genera empleando un motor eléctrico de 2.23 kW (3 hp) acoplado con dos bandas a un reductor de velocidad mecánico, y con la ayuda de una cadena transmite la fuerza motriz y la velocidad requerida hacia un sistema de tres engranes. En las pruebas de evaluación se obtuvo un rendimiento de 54 kg/h.

### ABSTRACT

This paper presents the design and construction of an experimental machine to extract juice from baked *Angustifolia Haw* agave. The machine begins the operation with the action of a rolling mill with three radially toothed rollers, set in the form of a triangle, with a separator placed within the lower rollers to receive the raw material horizontally. Due to the fact that the lower rollers spin in a clockwise direction and the upper roller in an anticlockwise direction, the raw material enters at one end and the waste is collected at the back. A 2.23 kW (3 hp) electric motor generates the power and is coupled by two belts to a speed reduction mechanism, and with the aid of a chain, transmits the force of the motor and the required velocity to a system of three gears. In evaluative tests a performance of 54 kg/h was obtained.

### NOMENCLATURA

Y-Z	Plano Y-Z
Z-X	Plano Z-X
$d$	Diámetro del eje, mm
$\emptyset$	Diámetro externo de los discos de corte, mm
$\theta$	Diámetro de la sección del eje para el montaje de discos, mm
$\pi$	Constante, adimensional
$x, y$ y $z$	Ejes cartesianos
$i$	Subíndice (1, 2, ... n)
$W_i$	Carga transmitida
$F^r$	Fuerza radial
$F^t$	Fuerza tangencial
$T$	Momento de torsión
$R_{AY}$ y $R_{CY}$	Reacciones
$M_{A..E}$	Momentos flexionantes
$T_{MAX}$	Esfuerzo cortante máximo

<sup>1</sup> Investigador del CIIDIR IPN Unidad Oaxaca.

<sup>2</sup> Estudiante de la Maestría en Conservación y Aprovechamiento de Recursos Naturales del CIIDIR IPN Unidad Oaxaca.

## INTRODUCCIÓN

México es uno de los países productores de agave entre los que se encuentra el *Agave angustifolia* Haw que se utiliza para elaborar el mezcal. El Estado de Oaxaca es el mayor productor de agave mezcalero con una superficie sembrada de 16 185 hectáreas [1]. Los productores de agave del Estado de Oaxaca han utilizado procesos tradicionales para elaborar el mezcal, pero debido al incremento de la competencia entre los mismos productores, se han visto en la necesidad de tecnificar sus procesos y diversificar el aprovechamiento de sus productos [2].

Un producto que se puede obtener a partir de los jugos del agave es el jarabe o miel de agave, el cual es un edulcorante con características especiales que aportan ciertos beneficios a la salud. Para determinar el potencial del *Agave angustifolia* Haw y poder elaborar jarabe de agave, se requiere obtener jugo de agave en estado cocido y posteriormente analizar sus propiedades. Por ello, el objetivo de este trabajo se enfocó a aplicar una metodología para diseñar y construir un prototipo de molino experimental para obtener jugo de agave en estado cocido.

## DESARROLLO

La metodología que se empleó en el proceso de diseño, fue propuesta por Yousef Haik, el cual concibe un diseño a partir de una lista de exigencias y una estructura de funciones que describan al equipo [3]. Las etapas fueron:

1. Planteamiento del problema. Extraer por un lado la mayor cantidad de jugo del agave en estado cocido y obtener por otra parte el bagazo o desecho.
2. Investigación de mercado. Se realizó una búsqueda en el mercado sobre algún equipo que resolviera satisfactoriamente el problema planteado y no se encontró ningún equipo tipo experimental para extraer jugo de *Agave angustifolia* Haw.
3. Consideraciones de desempeño: Los atributos se clasificaron en: i) Primarios: que cumplen con la función principal de la máquina. ii) Secundarios: que se enfocan a la relación hombre-máquina. iii) Terciarios: que le agregan un valor atractivo a la máquina pero no son necesarios para su funcionamiento. En la tabla 1, se presentan los atributos para el caso de estudio.

Tabla 1. Atributos

PRIMARIOS	SECUNDARIOS	TERCIARIOS
♦ Obtener jugo del agave cocido	♦ Seguridad del operador	♦ Producción intermedia
♦ No contaminar el producto	♦ Operación sencilla	♦ Bajo consumo de energía eléctrica
	♦ Fácil mantenimiento	♦ Utilizar elementos de máquina disponibles en el mercado
	♦ Utilizar energía eléctrica	♦ Condiciones de instalación mínimas
	♦ Separar el jugo del desecho o bagazo	♦ Colores atractivos al usuario

Después de identificar los atributos, se construyó el árbol de objetivos, con la finalidad de analizar y desplegar los parámetros de diseño, a través de una representación esquemática, como se muestra en la figura 1.

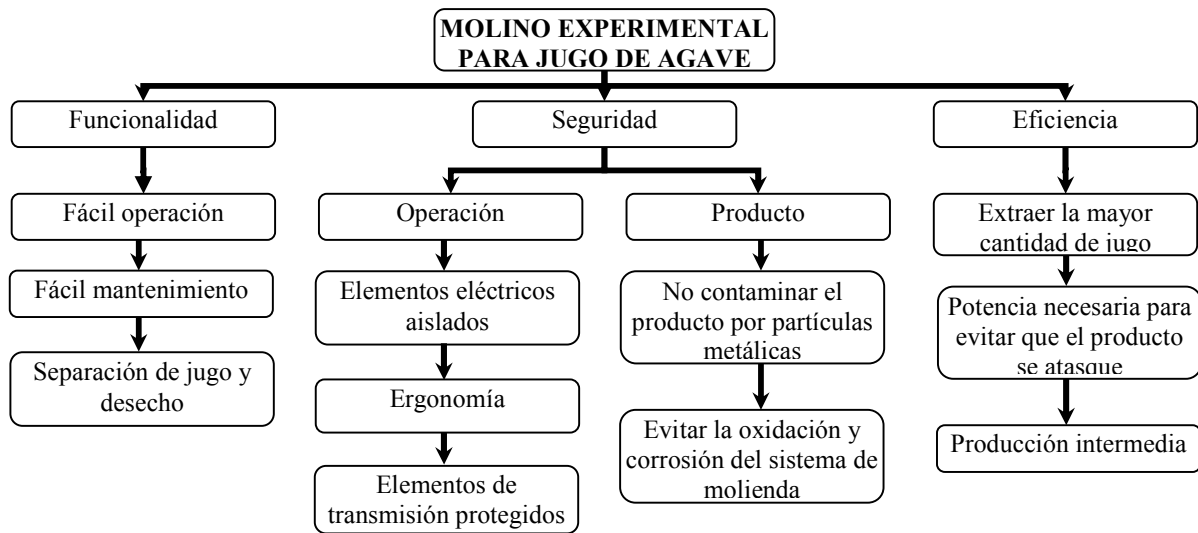
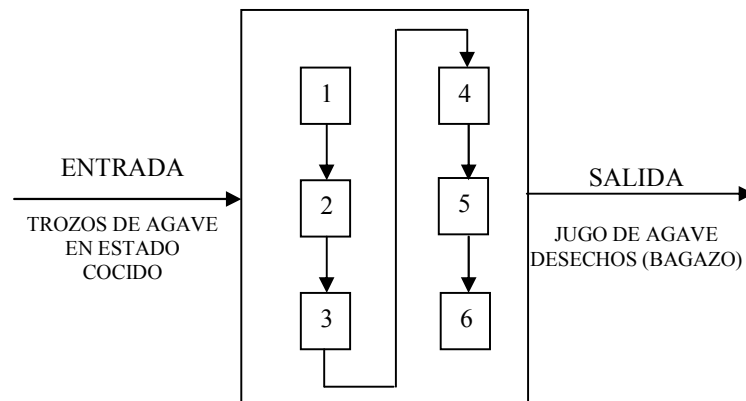


Fig. 1 Árbol de objetivos.

4. Análisis de funciones: Se utilizó un diagrama, el cual se representa como un cuadro que muestra las entradas y salidas del sistema, describiendo el problema y dividiéndolo en funciones, de manera que se disminuyan los niveles de complejidad y sea más fácil de diseñar, como se indica en la figura 2



- |  |   |
|--|---|
| 1. Entrada o alimentación del agave cocido.      | 4. Transporte de jugos.                     |
| 2. Transporte hacia el sistema de molienda.      | 5. Transporte de desechos.                  |
| 3. Obtención de jugos en el sistema de molienda. | 6. Separación de jugos y desecho (bagazos). |

Fig. 2 Análisis de funciones.

5. Carta morfológica: Cada función se puede lograr de diferentes formas, una herramienta importante que puede ser útil es un catálogo de diseño o carta morfológica para su selección. En la tabla 2, se presenta la carta morfológica de los sistemas que intervienen en el funcionamiento de la máquina y se proponen diferentes soluciones para cada función.

**Tabla 2. Carta morfológica**

SOLUCIONES FUNCIONES	Solución 1	Solución 2
	Encendido y apagado	
Alimentación		
Molienda		
Salida del producto		
Transmisión		

Después de plantear la carta morfológica, se evaluó cada solución en base a su factibilidad, disponibilidad de materiales, costo y asimilación por parte del usuario. Posteriormente se generaron diferentes diseños conceptuales a partir de las soluciones propuestas para cada función. Estos diseños conceptuales fueron evaluados para seleccionar el más adecuado.

6.-Análisis y selección: Para evaluar los conceptos generados, se utilizó la herramienta de la casa de calidad, como primer paso se analizaron los atributos y especificaciones en un sistema ideal, tabla 3. Posteriormente se evaluaron las casas de calidad de cada uno de los conceptos y los resultados se compararon con el diseño ideal y se seleccionó el diseño óptimo cuyo resultado fue más cercano al ideal.

**Tabla 3. Casa de calidad ideal.**

ESPECIFICACIONES ATRIBUTOS	Calificación del diseñador	Movimientos del operador < 5	Producción < 15 Kg/h	Ruido < 20 Db	Consumo de energía eléctrica	Dimensiones de la máquina	Tiempo de molienda	Potencia del motor	Precio < 25 000	Calidad de los materiales	SUMA	PRODUCTO
	Fácil de operar	10	9				9					18
Seguro para el usuario	12	3		9		3				9	24	288
Producto higiénico	13									9	9	117
Fácil mantenimiento	7					9			3	3	15	105
Fácil instalación	6					9					9	54
Poco ruido	4		1	9				3		1	14	56
Baja emisiones de contaminantes	9		1	9	3		1				14	126
Funcionalidad	14	3	9	1	1	3	3	9	3	9	41	574
Eficiencia energética	8		9		9		1	3	1	9	32	256
Ergonomía	10	9		3		9			3		24	240
Costo de la máquina accesible	7		3		3	3		3	9	3	24	168
<b>Total</b>	<b>100</b>											<b>2164</b>

Puntuación asignada: 1. No cumple; 3. Medianamente cumple; 9. Si cumple.

7. Análisis técnico. Después de realizar la evaluación, se seleccionó el diseño de la figura 3:

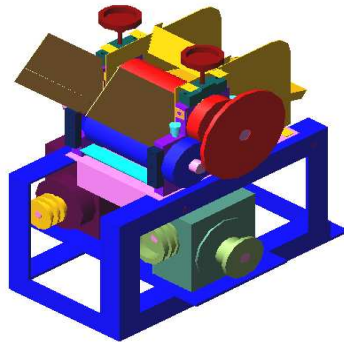


Fig. 3 Diseño conceptual del equipo.

La potencia del motor se determinó a través de una serie de pruebas y dado lo extenso del trabajo, la exposición se va a enfocar a la parte crítica de la máquina que es el sistema de molienda; para ello se realizó un análisis técnico sobre el diseño a detalle del eje del rodillo que se localiza en la parte superior, ya que éste se encarga de recibir y transmitir la potencia al sistema de engranes, además de estar sometido a la fuerza de compresión provocada por la extracción de jugos del agave cocido. En la figura 4, se representa el diagrama de cuerpo libre de las fuerzas que intervienen en el sistema. Los elementos 2, 3 y 4 corresponden a los engranes y el elemento 5 a la catarina. La fuerza generada por la transmisión sobre el elemento 5 se representa como  $F_T$ , las fuerzas generadas en los engranes son: la fuerza

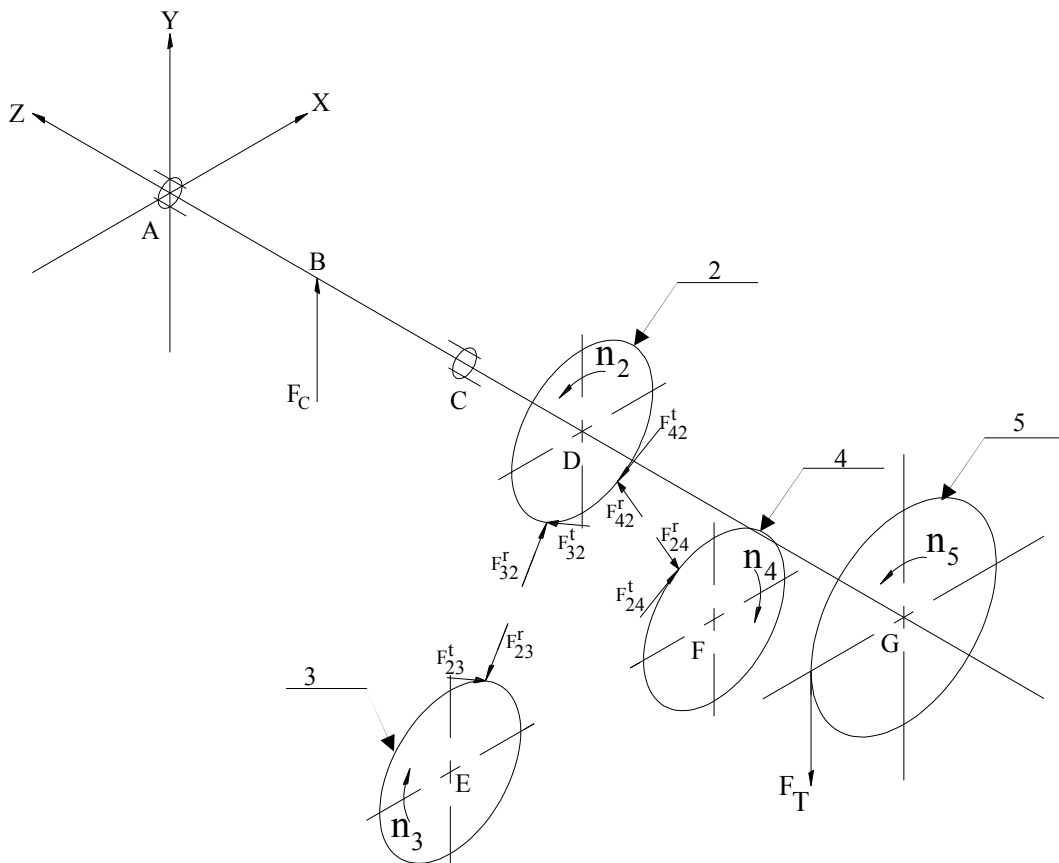


Fig. 4 Diagrama de cuerpo libre de las fuerzas que actúan en el sistema.

tangencial  $F^t$  y la fuerza radial  $F^r$ . La fuerza de compresión que ejerce el agave cocido para extraer el jugo se representa como  $F_c$ . La fuerza de compresión fue obtenida experimentalmente [4] y se relacionó con la cantidad de material que entra al sistema de molienda. El diseño del eje se inició con el cálculo de las fuerza en el sistema de engranes 2, 3, 4 y 5, para calcular la carga transmitida en los engranes se utilizó la ecuación 1, en donde se relaciona la potencia del motor existente  $H = 2.23 \text{ kW}$ , diámetro del engrane  $d = 0.11 \text{ m}$  y una velocidad  $n = 5.7 \text{ rpm}$ .

$$W_t = \frac{60(10)^3 H}{\pi d n} \quad \text{Ecuación. 1.}$$

Una vez calculadas las fuerzas: tangencial  $F^t$ , radial  $F^r$  y de transmisión  $F_T$ , en los elementos 2, 3, 4 y 5, se realizó la sumatoria sobre los ejes Y y Z y se trasladaron las fuerzas resultantes al centro del eje, como se muestra en la figura 5. Para posteriormente calcular las reacciones en los puntos A y C, aplicando las ecuaciones de equilibrio en el plano ZY.

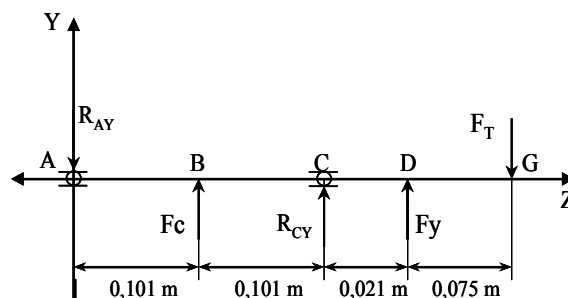


Fig. 5 Diagrama para el cálculo de reacciones.

En seguida se calcularon los momentos flexionantes para cada uno de los puntos en donde actúan las fuerzas, como se indica en la figura 6.

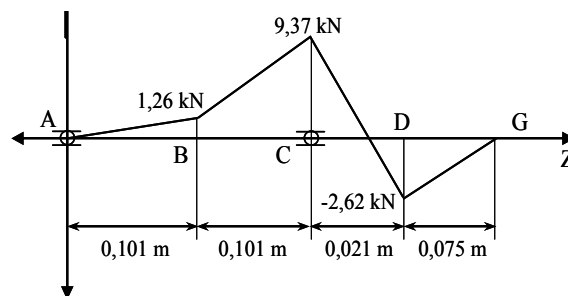


Fig. 6 Diagrama de momentos flexionantes.

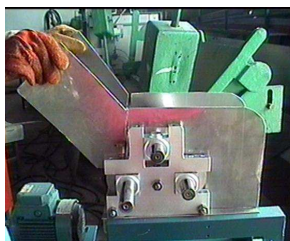
Finalmente se realizó el análisis para determinar el diámetro del eje, utilizando la teoría del esfuerzo cortante máximo [5], empleando la ecuación 2.

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

El diámetro resultante de acuerdo a la ecuación 2 es  $d = 0.071 \text{ m}$  (2.83 pulg).

8. Construcción del prototipo y descripción de sus sistemas: El molino prototipo experimental se dividió en los siguientes sistemas:

- a) Alimentación. El agave cocido se fraccionó en trozos de 0.1 m x 0.02 m, enseguida se depositaron en una tolva para dirigirlos al sistema de molienda. La tolva se construyó de acero inoxidable T 304 y se colocó a un ángulo de inclinación de 45° respecto al sistema de molienda, figura 7.



**Fig. 7 Tolva de alimentación.**

- b) Molienda. El sistema de extracción de jugos, está compuesto por un sistema laminador de tres rodillos, cada uno con un diámetro de 0.1 m y una longitud de 0.160 m, un rayado radial de 54 hilos y su eje de transmisión. Para el maquinado de estos rodillos se utilizaron barras de acero inoxidable T 304. Para ajustar la distancia vertical entre el rodillo superior y los inferiores, se colocó un resorte de compresión entre el bastidor y los rodamientos del eje del rodillo superior, posteriormente se colocó otro resorte de compresión entre la parte superior de los rodamientos y una base que se acopla al bastidor. En el centro de la base se coloca un tornillo y un volante para ejercer presión sobre los resortes y poder ajustar la distancia vertical entre los rodillos, figura 8.



**Fig. 8 Ajuste vertical.**

- c) Salida de productos. El bagazo se colectó en una base de lámina de acero inoxidable tipo T 304 que se colocó justo a la mitad del rodillo inferior con un ángulo de inclinación de 15° respecto al sistema de molienda. El jugo de agave cayó directamente a una tolva de lámina de acero inoxidable tipo T 304 que se posicionó debajo del sistema de molienda con un ángulo de inclinación de 10°, el jugo se trasladó sobre el contenedor y se dirigió hacia un orificio para caer sobre el depósito de almacenamiento, figura 9.



**Fig. 9 Salida del jugo de agave.**

- d) Generación y transmisión de potencia. La potencia del sistema se generó por medio de un motor eléctrico con las siguientes características: potencia 2.23 kW (3 hp), frecuencia 60 Hz y 1675 rpm. Para disminuir la velocidad se utilizó un variador de frecuencia y un reductor de velocidad mecánico obteniendo una velocidad de 5.8 rpm. Para transmitir la potencia del motor eléctrico al reductor de velocidad se utilizaron 2 bandas No. II A31 V80 y se utilizó una cadena de paso 5/8 y No. 50 para transmitir el movimiento del reductor de velocidad mecánico hacia una catarina de 40 dientes que se encuentra unida al eje del rodillo superior, figura 10.

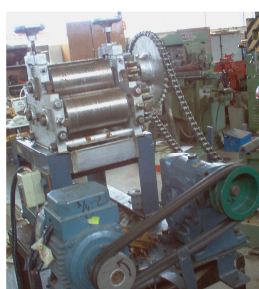


Fig. 10 Sistema de transmisión.

## RESULTADOS

Después de construido el prototipo de molino experimental, se realizaron algunas pruebas para evaluar el funcionamiento del equipo y la calidad del producto obtenido. Los resultados se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Evaluación del molino.

Características	Resultados
Cantidad de agave cocido	54 kg
Tiempo de molienda	1 h
rpm de los rodillos	5.8 rpm
Observaciones	Se ajustó el rodillo superior comprimiendo el resorte 6 mm

Fuente: Datos experimentales.

En la tabla 5, se presentan las características evaluadas del jugo de agave obtenido con el prototipo molino.

Tabla 5. Evaluación del jugo.

Características	Resultados
Volumen de jugo obtenido	36 L
Potencial de hidrógeno	4.66
Grados Brix	32.9

Fuente: Datos de pruebas experimentales.

## CONCLUSIONES

Empleando las etapas del proceso de diseño propuesto por Haik, se alcanzó el objetivo de diseñar y construir un prototipo molino experimental para obtener jugo de agave en estado cocido. Para la construcción del equipo se utilizaron materiales de calidad, en los rodillos y tolvas se utilizó acero inoxidable T304 con la finalidad de evitar la contaminación del producto. Se utilizaron elementos mecánicos que se encuentran disponibles en el mercado como: engranes, bandas, poleas, cadenas, rodamientos simples (bujes), resortes y reductor de velocidad mecánico.



Los resultados de las pruebas experimentales, muestran que el rendimiento del equipo es de 54 Kg/h de agave cocido. En lo referente a la calidad del producto final se puede concluir que el jugo del *Agave angustifolia* Haw, que se obtuvo por medio del prototipo molino experimental, reúne las condiciones para elaborar jarabe de agave.

Por otra parte, como se mencionó en el apartado de desarrollo, en el mercado no existe un equipo similar para realizar pruebas experimentales, lo que constituye en sí una ventaja. También debe mencionarse que en el estado de Oaxaca se está iniciando la fabricación de jarabe de agave, que en otros estados están avanzados pero utilizando como materia prima la especie *Tequilana Weber*, cuyas características son distintas a la especie *Angustifolia haw*, para la cual fue diseñado este prototipo único en su género, lo que significa un avance sobre la tecnología existente.

#### REFERENCIAS

- [1] SAGARPA. (2007). Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Obtenida el 12 de agosto de 2007, de <http://www.siap.gob.mx/>
- [2] Silva, S. L., Y Caballero, C. M (2001). Informe técnico del proceso de fabricación del mezcal de Oaxaca. México: IPN-CIIDIR Oaxaca.
- [3] Haik, Y. (2003). *Engineering Design Process*. E.U.A.: Thomson.
- [4] Pozos, O. J. (2001). Determinación de las propiedades físico – mecánicas del agave angustifolia haw (espadín azul), utilizado en la fabricación de mezcal. Tesis de maestría. México: ESIME-IPN.
- [5] Shigley, J. E. (2002). *Diseño en ingeniería mecánica*. E.U.A.: Mc Graw Hill.