

# Diseño, Simulación y Emulación de una Planta Productora de Panela

Flavio Guaman, Edison Guaman, Ing. Hugo Villavicencio  
Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación (FIEC)  
Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL)  
Campus Gustavo Galindo, Km 30.5 vía Perimetral  
Apartado 09-01-5863. Guayaquil, Ecuador  
fguaman@fiec.espol.edu.ec, eguaman@fiec.espol.edu.ec, hugovilla33@hotmail.com

## Resumen

*En los últimos años se ha visto un desarrollo vertiginoso de la tecnología, así como una penetración de la misma en muchas de las actividades humanas. Esto ha permitido que procesos, que antes eran realizados por hombres de una manera deficiente, sean ahora ejecutados en forma automática por una combinación de dispositivos electrónicos, eléctricos y mecánicos, dando como resultado un mejoramiento significativo de su eficiencia. En el campo agro-industrial, existe un proceso que ha sido muy poco influenciado por esta tendencia: el proceso de producción de panela. En el presente artículo se indica en que forma se está realizando actualmente dicho proceso y se describe una propuesta de automatización del mismo, en base a un dispositivo electrónico muy utilizado actualmente: el microcontrolador conjuntamente con el computador. Además se indican las características básicas de los elementos que deben ser utilizados para implementar el sistema, tales como sensores, alarmas, válvulas y bomba, así como las diversas consideraciones que deben tenerse en cuenta para su buen funcionamiento.*

**Palabras Clave:** Panela, automatización, microcontrolador.

## Abstract

*In the last years it has been seen a vertiginous development of technology, as well as an infiltration of it in many human activities. This has allowed procedures that before were made by men in a deficient way, to be now executed automatically by the combination of electronic, electrical and mechanical devices; giving as result a significant improvement of procedure's efficiency. Within the agro-industrial field, there exists a process that has not been much influenced by this tendency: the process of production of panela. The following article describes which ways it is currently being made and describes an automatization proposal; being based on the so employed electronic devices: the microcontroller jointly with the computer. Moreover, it specifies the basic characteristics of the elements that are going to be used to implement the system, such as sensors, alarms, valves and pump, in addition to various considerations that should be taken into account for a high-quality performance.*

**Key Words:** Panela, automation, microcontroller

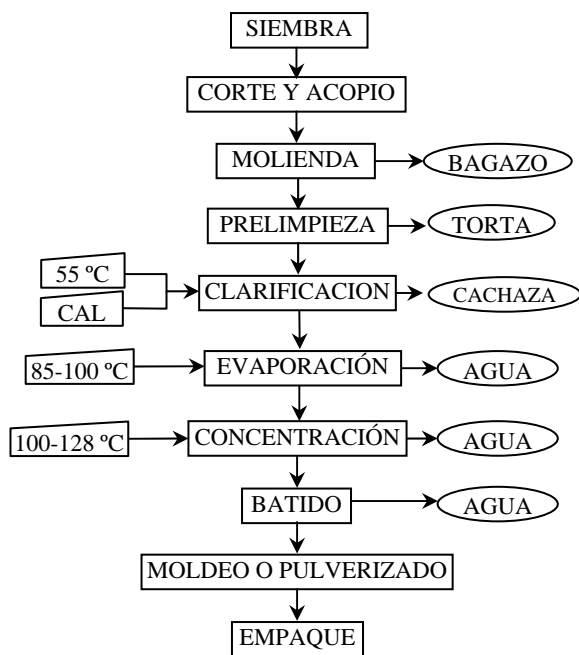
## 1. Introducción

La panela se obtiene de la evaporación del jugo de caña. Sus principales componentes nutricionales son: Los azúcares (sacarosa, glucosa y fructosa), las vitaminas (A, algunas del complejo B, C, D y E), y los minerales (potasio, calcio, fósforo, magnesio, hierro, cobre, zinc y manganeso, entre otros).

Entre los carbohidratos, el azúcar sacarosa es el principal constituyente de la panela, con un contenido que varía entre 75 y 85% del peso seco. Por su parte, los azúcares reductores (glucosa y fructosa entre 6 y 15%), poseen una disponibilidad de uso inmediato para el organismo, lo cual representa una gran ventaja energética, estos son fácilmente metabolizados por el cuerpo, transformándose en energía necesaria requerida por el mismo [1].

## 2. Proceso Tradicional de Producción de Panela

El proceso de obtención de Panela se divide en varias etapas que van desde la siembra de la caña de azúcar hasta el empaque del producto final.



**Figura 1. Proceso de producción de panela**

Las etapas en las cuales podría mejorarse el proceso de producción van desde la molienda hasta la concentración, por lo cual serán detalladas a continuación.

## 2.1. Molienda

También conocida como extracción, se lleva a cabo en molinos denominados trapiches, con una capacidad que varía desde media tonelada/hora en los de tracción animal hasta siete o más toneladas en los más avanzados. En esta operación se obtienen dos productos: el jugo crudo y el bagazo húmedo. El nivel de extracción y la concentración de sólidos solubles de los jugos afectan directamente el rendimiento en la producción. El porcentaje de extracción (peso del jugo\*100/peso de la caña) depende de las condiciones de operación del molino y tiene efectos marcados sobre la calidad y cantidad de jugo que se obtiene.

**Tabla 1. Componentes del jugo de caña [1]**

Componentes		Cantidad %	
Azúcares	Sacarosa		70 – 88
	Glucosa	75-92	2 – 4
	Fructuosa		2 – 4
Sales			3.0 – 4.5
Ácidos Orgánicos Libres	Carboxílicos	1.5-5.5	1.1-3.0
	Aminoácidos		0.5-2.5
Comp. orgánicos menores	Proteínas		0.5 – 0.6
	Almidón		0.001 – 0.05
	Gomas		0.3 – 0.6
	Cera, grasas, fosfatidos		0.05 – 0.15
	Otros		3.0 – 5.0

El Bagazo o remanente de los tallos de la caña de azúcar después de extraerse el jugo es utilizado para, mediante su combustión en las hornillas, calentar las pailas de clarificación, evaporación y concentración. En los trapiches tradicionales se requiere someterlo a un proceso de secado natural previo, hasta conseguir una humedad de menos del 30%. El tiempo de secado depende de algunos factores como son: dimensiones del arrume, condiciones climáticas del sitio, humedad con la que sale el bagazo del molino y características de construcción de la bagacera.

## 2.2. Prelimpieza

Consiste en eliminar por medios físicos y a temperatura ambiente el material grueso con el que sale el jugo de caña del molino. Este material consiste principalmente en tierra, partículas de bagazo y cera, para su separación se usa un pozuelo, las mallas y los sistemas de prelimpieza. Cualquiera de estos equipos de prelimpieza requieren para su buen funcionamiento un adecuado mantenimiento y limpieza, mínimo cada 6 h, con el fin de evitar la fermentación de los jugos y como consecuencia un aumento de la acidez de los mismos, y de los azúcares reductores. Se recomienda utilizar en su construcción acero inoxidable, material resistente a la corrosión y fácil de limpiar.

Los prelimpiadores usan la diferencia de densidad de las partículas como principio para su separación. Deben estar cubiertos para evitar la caída de impurezas mayores, como hojas las cuales dificultan el buen funcionamiento del equipo y durante la molienda las impurezas que flotan se deben retirar varias veces al día, este material puede pasarse nuevamente por el molino, con el fin de recuperar parte del jugo retenido. La diferencia entre la altura del nivel del jugo y la altura total debe ser mayor a 15cm para evitar su saturación rápida y el desborde de las impurezas.

## 2.3. Clarificación

Tiene como fin eliminar los sólidos en suspensión, las sustancias coloidales y algunos compuestos colorantes presentes en los jugos durante la producción de panela mediante la aglomeración de dichas partículas.

Terminada la prelimpieza se pasa el jugo directamente a la paila clarificadora a una temperatura cercana a la del ambiente para iniciar su calentamiento hasta 50 o 55 °C. El calentamiento del jugo acelera su velocidad de movimiento, lo que permite la coagulación o formación de partículas de mayor tamaño y densidad. Estas partículas son más fácilmente removibles por medios físicos.

Las impurezas que flotan, denominadas cachaza, se retiran manualmente con un remellon (o cuchareta) y se depositan en unos recipientes llamados cachaceras.

Sin embargo, hay algunas impurezas de tamaño bastante pequeño que no se pueden retirar por el método tradicional de limpieza, siendo necesario filtrar los jugos con el fin de disminuir su turbiedad a través de lonas o mallas de acero inoxidable con 140 a 180 orificios por pulgada lineal.

El grado de acidez de los jugos es uno de los factores importantes de controlar en el proceso de elaboración de la panela, se debe trabajar con un pH que evite el desdoblamiento de la sacarosa, pero que a la vez no destruya los azúcares reductores presentes, pues esto da origen a compuestos que oscurecen la panela. Cuando el manejo agronomico no ha sido el óptimo y el pH inicial es inferior a 5.2 se recurre al encalamiento de los jugos con el propósito de ajustar el pH a las condiciones ideales. Un exceso de cal es perjudicial pues cuando se encala a pH superiores a 6,0 se presenta un marcado oscurecimiento de la panela.

El encalado se debe hacer en forma de lechada de cal, es decir una suspensión de cal apagada en agua o en el mismo jugo en concentraciones de 12-15 grados Baumé (100 a 150 gramos de cal por litro de agua). El agregar cal en frío presenta el inconveniente de formar una cachaza menos densa e incrementar el tiempo de separación del jugo en la cachacera por la poca diferencia de densidades del jugo y la cachaza. En las fábricas tradicionales esta adición de cal se realiza confiando únicamente en la experiencia del trabajador asignado a esta tarea, sin una medición del pH.

La calidad de la cal es un factor importante a tener en cuenta en el proceso de producción de panela pues si la cal no es grado alimenticio, su adición aporta impurezas al producto final. La calidad de la cal se determina por análisis de laboratorio. Si se observa un incremento gradual del pH del jugo alcalinizado y el asentamiento de materiales lodosos, es indicio de que se está usando cal de mala calidad, sobrecalcinada o muerta, cuyas partículas se hidratan muy lentamente.

## 2.4. Evaporación

En esta fase se suministra calor al jugo y se continúa extrayendo las impurezas. El calor suministrado es aprovechado básicamente en el cambio de fase del agua (de líquido a vapor), se elimina cerca del 90% del agua presente, durante esta etapa los jugos permanecen a la temperatura de ebullición del agua.

## 2.5. Concentración

Esta fase consiste en elevar el contenido de azúcar en el jugo de 20% a 90%. La manera como se lleve a cabo este proceso incide directamente en la textura final de la panela. Cuando el pH del jugo es bajo, se favorece la formación de azúcares reductores (glucosa y fructuosa) que modifican la consistencia final del

producto y pueden llegar a impedir su cristalización. La inversión de la sacarosa es función de la temperatura, el pH y el tiempo de residencia de los jugos en la hornilla. A partir de los 100 °C la inversión se acelera notablemente, por lo que se debe procurar mantener los jugos el menor tiempo posible en esta etapa y a un pH cercano a 5,8 para evitar el aumento de los reductores.

El “Punto” de panela, dependiendo de la altura sobre el nivel del mar, se obtiene entre 118 – 122 °C, la cual corresponde a un porcentaje de sólidos solubles entre 88-94 °Brix, para panela en bloque y 125-128 °C la cual corresponde a un porcentaje de sólidos solubles entre 96-98 °Brix para panela granulada.

En las fábricas tradicionales, se utilizan métodos empíricos para determinar el punto de la panela, entre los cuales tenemos:

- Observar cuando la miel no corre sobre el agitador (remellón).
- Al batir la miel con el remellón, en el aire forma una bomba.
- Se toma un poco de miel con la uña y se lleva a la boca para ver si se cristaliza,
- Se forma una bola, luego se bota al suelo y si suena al chocar, está a punto

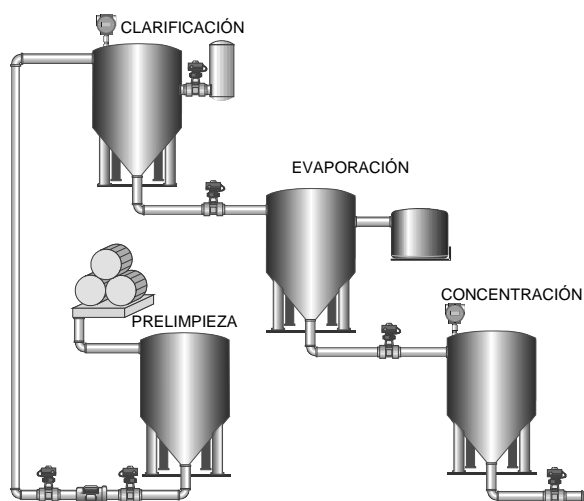
La velocidad de respuesta de los aparatos que determinen el punto de la panela debe ser alta, porque los cambios de las características ocurren rápidamente en las mieles en su punto final y éstas se pueden caramelizar fácilmente y en caso contrario se dificultará la solidificación. La temperatura de ebullición de las mieles se relaciona con la presión atmosférica del lugar, del Brix y de la pureza de las mieles, nos da una lectura rápida del punto de panela.

El paso de la miel de una tina a otra se realiza mediante el llenado y vaciado continuo de cucharas grandes.

## 3. Sistema propuesto

Al observar detenidamente el proceso tradicional de producción de panela, podemos encontrar los siguientes inconvenientes principales:

- Existe pérdida de tiempo en el momento de pasar la miel de una etapa a otra.
- La adición de la cal se realiza sin una adecuada medición del pH, confiando únicamente en la experiencia de los trabajadores.
- La temperatura no siempre es la óptima en cada una de las etapas.
- En la etapa de concentración, la determinación del punto ideal para retirar las mieles es realizado utilizando métodos empíricos, los cuales no garantizan el punto óptimo.



**Figura 2. Representación de la fábrica propuesta**

Estos inconvenientes producen pérdidas tanto en cantidad como en calidad del producto, lo cual se traduce en una pérdida económica.

Por estas razones, proponemos un sistema para mejorar este proceso utilizando dispositivos que la tecnología actual nos ofrece.

En la fábrica propuesta, los tanques de cada etapa deberán colocarse de manera adyacente, y descendente, de tal manera que las mieles puedan fluir de un tanque a otro por gravedad. El tanque más alto deberá ser el de clarificación, hacia el cual el jugo será llevado mediante el bombeo desde el tanque de prelimpieza. A partir de éste, el resto de tanques estarán comunicados por tubería que tendrán válvulas para controlar el paso del jugo.

El sistema funciona de la siguiente manera:

- 1.- Al encenderlo, sensorará el estado del proceso y si el tanque de prelimpieza está vacío (que sería el caso normal) sonará una alarma para indicar que se necesita encender el trapiche.
- 2.- Una vez que el usuario presione el botón de encendido del trapiche, se empezará a llenar el tanque de prelimpieza. Luego, cuando se llene el tanque de prelimpieza, se emitirá la alarma para apagar el trapiche.
- 3.- Cuando el jugo de caña haya permanecido el tiempo suficiente en la etapa de prelimpieza y si la etapa de clarificación está vacía, se encenderá la bomba y se empezará a llenar clarificación. La bomba permanecerá encendida hasta que se llene el tanque de clarificación o hasta que se vacíe el tanque de prelimpieza.
- 4.- En caso de que el tanque de prelimpieza se haya vaciado completamente, se emitirá la alarma para el encendido del trapiche.
- 5.- Cuando en la etapa de clarificación se llega a la temperatura ideal, se empezará la adición gradual

de cal hasta llegar al pH óptimo; una vez alcanzado este valor, si la etapa de evaporación está vacía, se abrirá la válvula para pasar el jugo al proceso de evaporación. Una vez vacía clarificación y si existe jugo en prelimpieza, se encenderá la bomba.

- 6.- En la parte superior del tanque de evaporación, el jugo será filtrado para retirar la cachaza. Se mantendrá el jugo en evaporación por un tiempo dado, luego del cual, si la etapa de concentración está vacía, se abrirá la válvula para pasar a concentración. Una vez vacía evaporación y si existe jugo en clarificación, se encenderá la válvula para volver a llenar el tanque de evaporación.
- 7.- Una vez en la etapa de concentración el usuario deberá realizar la medición de la concentración del jugo utilizando un brixómetro manual. Una vez que se alcance el valor óptimo se deberá presionar un botón para iniciar el vaciado de la miel y así empezar con el batido. Una vez vacía concentración y si existe jugo en evaporación, se encenderá la válvula para volver a llenar evaporación.
- 8.- Se repite el proceso en forma cíclica desde el paso 2. El paso 1 sólo se ejecuta la primera vez que se enciende el sistema.

El control de la temperatura no ha sido considerado, puesto que ello depende del tamaño y la ubicación de la fábrica. Pero este sistema cuenta con sensores de temperatura, gracias a los cuales si en algún momento se llegase a sobrepasar la temperatura óptima de alguna de las etapas, se encenderá la alarma correspondiente a cada etapa.

### 3.1. Elementos del sistema

Los elementos básicos del sistema son válvulas y bomba, que deberán ser escogidas de acuerdo al tamaño de los tanques, los sensores, el microcontrolador y el computador.

**Tabla 2. Tipos de sensores aconsejados**

Parámetro	Sensor
Nivel	Sensor ultrasonico
Temperatura	Sensor TC1047A
pH	Electrodo de Ag/AgCl
Concentración	Refractómetro manual

El microcontrolador estará encargado de:

- \* Recibir las señales analógicas provenientes de los diferentes sensores y las entradas digitales.
- \* Procesar las señales recibidas para realizar el control del proceso (encender o apagar la bomba, válvulas, alarmas) a través de las diversas salidas que posee.
- \* Transmitir las señales recibidas al computador para que a su vez sean procesadas por el mismo.

- \* Recibir y procesar las órdenes provenientes del computador para actuar sobre los elementos del sistema.

Todas estas operaciones serán realizadas en forma automática y continua por parte del microcontrolador, independientemente de que esté o no conectado al computador.

Cuando se escoja los sensores a utilizarse para implementar el sistema, se debe analizar que interfase es la adecuada para que puedan interactuar correctamente con el microcontrolador.

El computador es una herramienta adicional, pero no imprescindible, en el cual hemos desarrollado un programa que emula el sistema propuesto para el proceso de producción de panela mostrando una pantalla similar a la observada en la figura 1. La finalidad principal del programa es brindar información más detallada de las diferentes variables del proceso en curso y alertar en caso de que exista alguna anomalía o falla de los elementos. Los fallos que pueden ser detectados por el software serán:

- \* Temperatura fuera del rango.
- \* Mal funcionamiento en sensores de nivel.
- \* Mal funcionamiento en sensor de pH.
- \* Mal funcionamiento de la bomba.
- \* Mal funcionamiento de las válvulas.

Las características principales del programa serán:

- \* Si el trapiche está encendido presentará una animación indicándolo.
- \* En el momento en que se encienda un elemento, sea válvula o bomba, el programa presentará dicho elemento en un color verde.
- \* Si existe sospecha de mal funcionamiento en alguna bomba o válvula, el programa presentará dicho elemento en un color rojo y además un mensaje intermitente indicando que existe un posible daño.
- \* Si la temperatura en alguna etapa no es la óptima, se presentará un aviso de este hecho, especificando la etapa en la cual se presente dicho fallo.
- \* En caso de mal funcionamiento en un sensor de nivel o pH se presentará un texto, el cual detallará el o los posibles elementos que se encuentren en mal estado.

Pero además el computador podrá realizar un control sobre el sistema al presionar el icono que realiza el cambio entre el modo manual y automático; este modo de uso se ha implementado con la finalidad de poder

realizar una limpieza de los diversos elementos al final de la jornada de trabajo.

Con la finalidad de probar los algoritmos que se han implementado tanto en el microcontrolador, como en el computador, se ha construido un panel en el cual se simulan tanto las entradas como las salidas que se tendría en una fábrica real.

**Tabla 3. Elementos simulados en el panel**

Elemento	Simulador
Sensores Analógicos	Nivel
	Temperatura
	pH
Salidas	Válvulas
	Bomba
	Alarmas
	Potenciómetro
	Indicadores visuales (leds)



**Figura 3. Panel de simulación de la fábrica propuesta**

## Agradecimiento

Los autores agradecen a la empresa SAGU, la cual nos ha brindado las facilidades para realizar el presente trabajo.

## Referencias

- [1] La Panela: un producto vital. Última actualización 13 de Abril del 2006. Disponible en <http://www.quassab.com/Es/LaPanela/Default.asp>
- [2] Chen JCP., "Manual de Azúcar de caña". México, Edit. Limusa, 1991. 1200 pp.