



## Diseño y construcción de un prototipo automatizado para la torrefacción de café

Ingenieros: Wilson Gamboa Contreras, Sandra Benítez Muñoz, Fredy Rueda Gualdrón, Néstor Acuña, Enrique Blanco Olarte, Alonso Retamoso, Fredy Rincón Osorio.

Grupo de Investigación y Desarrollo Tecnológico de UNISANGIL, IDENTUS, Fundación Universitaria de San Gil UNISANGIL [innovacionydesarrollo@unisangil.edu.co](mailto:innovacionydesarrollo@unisangil.edu.co)

### Resumen

En este artículo se presentan los resultados obtenidos del proyecto "Diseño y construcción de un prototipo para el control de temperatura y humedad en el proceso de torrefacción del café" que tuvo por objetivo mejorar el proceso empírico de tostado de las pequeñas y medianas empresas tostadoras de la región, adaptando e innovando en tecnología aplicada y optimizar procesos productivos. Con la implementación del sistema de control en la torrefactora construida, se obtuvo un mejoramiento en el proceso pues se logró mayor control de las variables que intervienen en éste, con lo que se garantizó y estandarizó la calidad del producto.

**Palabras clave:** automatización de torrefacción, café tostado, tostador cilíndrico, variables organolépticas.



### 1. INTRODUCCIÓN

La torrefacción es una de las etapas más importantes en el proceso industrial del café. Ésta consiste en tostar los granos para que estos puedan desarrollar y liberar sus diferentes aromas en unos cuantos minutos del tostado. En este proceso, uno de los sistemas más comunes es el que se efectúa en un tostador cilíndrico que gira por un tiempo determinado hasta que el grano llega a su punto de tostadura. Cada clase de grano tiene un tipo de tostado óptimo, cuyas variables como el porcentaje de humedad, el tiempo y la temperatura, alteran el sabor final del grano.

En Colombia, y especialmente en esta región, la mayoría de las empresas tostadoras cuentan con un proceso de selección del nivel de tostado del café aún empírico. Es decir, estas empresas no poseen un control automático sobre las variables temperatura, humedad y tiempo, fundamentales en la calidad del café tostado. El método usado para determinar el "punto" de tostado es tan rudimentario que necesita directamente de la pericia, cuidado y experiencia de un operario para maniobrar la máquina, tomar múltiples muestras para juzgar el punto ideal y así, concluir el proceso de torrefacción. Esta operación es únicamente sensorial y no implica ningún tipo de ayuda tecnológica para dar tal apreciación.

Además de lo anterior, el costo de tostadoras semiautomáticas en el mercado internacional es alto. Por tanto, no es viable para pequeñas y medianas empresas la adquisición de equipos de alta tecnología, colocándolas en un puesto competitivamente inferior, respecto a las grandes multinacionales dueñas del 70% del mercado del café tostado y productos derivados de éste. Esta situación es el problema fundamental, el cual se abordó diseñando una máquina automática que reemplace la determinación empírica y subjetiva del nivel de tostado del grado del café, garantizando que se cumpla a cabalidad con los estándares de calidad requeridos y permitidos por las entidades reguladoras como el ICONTEC. Con la implementación del sistema de control en la torrefactora construida, se obtuvo un mejoramiento en el proceso por el mayor control de las variables que intervienen en dicho proceso. Con esto se garantiza y estandariza la calidad del producto.



Este proyecto fue financiado por COLCIENCIAS y seis empresas beneficiarias productoras de café tostado de la región: éstas son: Productos Colosal, Industria de Alimentos la Fragancia Ltda., JORDAVILA S.A., Café y Chocolate Flor, FICAS Ltda. y Chocolate San Rafael, en la convocatoria de Proyectos de Investigación, Desarrollo Tecnológico e Innovación, modalidades de Cofinanciación y Crédito año 2004.

## 2 DESCRIPCIÓN TÉCNICA

### A. Antecedentes

El café fue tostado por primera vez mediante un proceso que consistía en tostar el grano verde en el sartén sobre brasas de carbón. A final del siglo pasado se inventó un nuevo proceso en el cual los granos eran centrifugados en una cámara de aire caliente. Este sistema perdura hoy día.

Por muchos años, el café ha sido el motor de desarrollo cultural, social y económico de Colombia, siendo el primer producto del sector agropecuario y, prácticamente, el primer generador de riqueza y empleo en la zona cafetera, con casi 900 mil hectáreas cultivadas en café, de las cuales el 90% son predios menores de 5 hectáreas que se encuentran en poder de pequeños productores, distribuidos en 600 municipios cafeteros localizados en 15 departamentos de la geografía nacional [1].

Con el descenso en la producción y en los precios del grano (caída del pacto mundial del café), el caficultor colombiano optó por fortalecer su negocio y pasar de la recolección, beneficio, secado y clasificación, al proceso industrial de torrefacción y molienda, procesos que requerían enormes inversiones de dinero en nuevas tecnologías y sólo asequibles para las grandes empresas, imposibilitando a medianas y pequeñas productoras a participar en la oferta de café de alta calidad.

## B. Torrefacción

En este proceso, uno de los sistemas más comunes es el que se efectúa en un tostador cilíndrico, que rota sin parar para que los granos, en movimiento continuo, sean torrefactos uniformemente. Cada clase de grano tiene un tiempo y tipo de tostado óptimos, cuyas variables como el porcentaje de humedad, el tiempo y la temperatura de tostado alteran el sabor final del grano.

La composición química de los granos cambia durante el proceso de tostado: el agua se disipa en el grano y una serie de reacciones químicas convierte los azúcares y almidones en aceites, los cuales otorgan al café gran parte de su aroma y sabor. Al ser tostado, el grano aumenta su tamaño al doble y el acaramelamiento del azúcar cambia el color de verde a marrón.

El color y aspecto del grano tostado dependen del tiempo de exposición a altas temperaturas. Mientras más largo sea el tiempo de tostado, más oscuro será el grano. Por lo general, el grano se tuesta durante 10 a 20 minutos, a temperaturas oscilantes entre 180°C y 250°C. La variación de estas condiciones influyen en la preparación de una buena taza de café, así como en la determinación de qué características serán realizadas y cuáles serán variadas. Si el tostado es breve, los aceites no saldrán hasta la superficie y el café tendrá un sabor como de nuez y poco cuerpo.

Los granos tostados oscuros contienen menos acidez y cafeína que los granos más claros, aunque también menor período de conservación, debido a la cantidad de aceites en la superficie. En los tostados más oscuros predomina el sabor ahumado, penetrante y quemado, ocultando el verdadero sabor del grano. Los granos tostados claros tienen un sabor más intenso, más altos en acidez que los tostados más oscuros, por lo cual las cualidades del grano se mantienen. Los tostados más claros se hacen con granos de más alta calidad, pues en este caso se expone el sabor real del grano. Existen varios niveles de tostado, cada uno con características propias, que responden a diferentes gustos o usos específicos. [2].

## C. Transformación del café

La tostadura del café es una fase vital dentro de su cadena de elaboración. Un buen tueste influye más en la calidad de una taza de café, que la bondad de la mezcla escogida. El proceso de tostar los granos del café verde consiste en someterlos a una alta temperatura durante un tiempo limitado. En este intervalo, el café pierde peso en una proporción del 15% al 20%, debido en gran parte a la evaporación de agua y en menor parte a la pirólisis de algunos componentes activos.

El grano aumenta de volumen entre 100 y 130% de su grano verde en función del tiempo de tueste. Su color amarillo verdoso se transforma en un marrón, más o menos oscuro en función del grado de tueste escogido.

La composición química del grano (azúcares, grasas, proteínas, sustancias nitrogenadas no proteicas y ácidos del grano) sufre una importante transformación, de forma cuantitativa y cualitativa, como consecuencia de las altas temperaturas del proceso. Lo anterior se puede observar de manera resumida en la figura 1.



Fig. 1. Proceso de torrefacción de café

### D. Variables básicas del tueste

Las variables básicas que afectan el proceso de torrefacción son: temperatura, humedad y tiempo. La figura 2 muestra el comportamiento del grano de café ante variaciones de temperatura. [3]

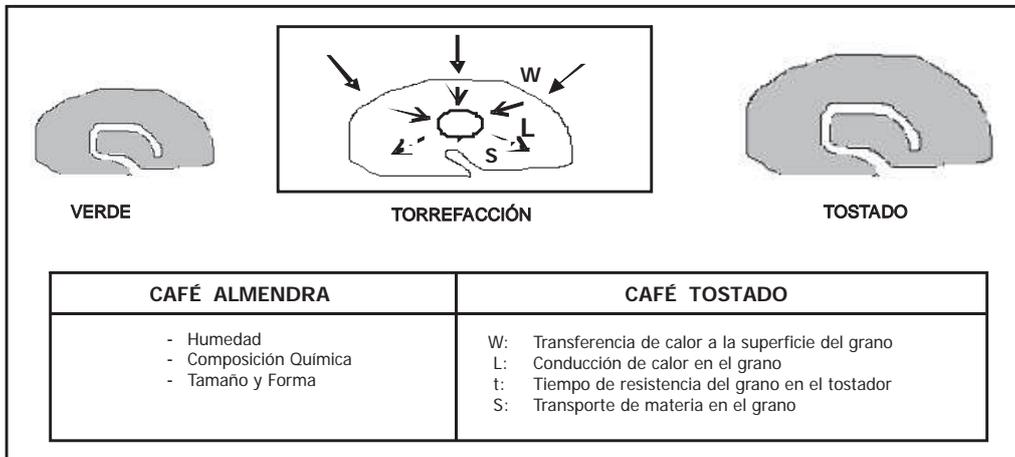


Fig. 2. Variables que afectan el proceso de torrefacción

**Temperatura.** Depende del tipo de máquina de tostar, del tiempo de tueste y de la intensidad del color final requerido. En una primera fase, el café pierde humedad. Esta parte del proceso es la fase que influye menos en el gusto final. En una segunda fase, se origina la expansión del grano de café y empieza la creación de los gases. La tercera fase es la más lenta, pues es la que confiere básicamente el sabor final al producto [4]. Un descuido en la elevación de temperatura del proceso aumenta la velocidad de tostado provocando un cambio en las propiedades organolépticas del grano. De igual manera, al disminuir la temperatura aumenta considerablemente el tiempo de calentamiento del grano, produciendo un efecto de cocción, sin llegar a un grado de tostadura.

**Humedad.** Se entiende como contenido de humedad de un grano el valor expresado en porcentaje (en base húmeda) de la masa del agua en relación con la masa total. La masa total es la suma del agua y de los sólidos constituyentes. Esta variable es la más influyente dentro del proceso. Según las características del café, al ingresar el grano a la tolva de la tostadora, la cantidad de humedad del grano oscila alrededor del 12% y después del proceso de tostado puede variar de acuerdo al tostador entre un 2% y un 5%, según la Norma ICONTEC 3534 donde se dan las recomendaciones físico-químicas para café tostado y tostado molido para la venta [5] [6].

Durante el tostado cada uno de los granos cede su calor al aire que lo rodea. al inicio, la humedad de la superficie del grano se transfiere fácilmente al aire. A medida que transcurre el tostado se inicia una migración de agua desde el interior al exterior para sustituir la humedad perdida en la superficie (difusión). El aumento de la temperatura origina un aumento de la presión de vapor de agua, el cual es eliminado por medio de extractores.

## 3 RESULTADOS

Teniendo en cuenta los parámetros de entrada y salida del sistema en función de las variables (tiempo, temperatura, humedad) que se manejan durante el proceso de tostado de café, se determinaron los siguientes métodos: continuos, de muestreos y estadísticos (figura 3).

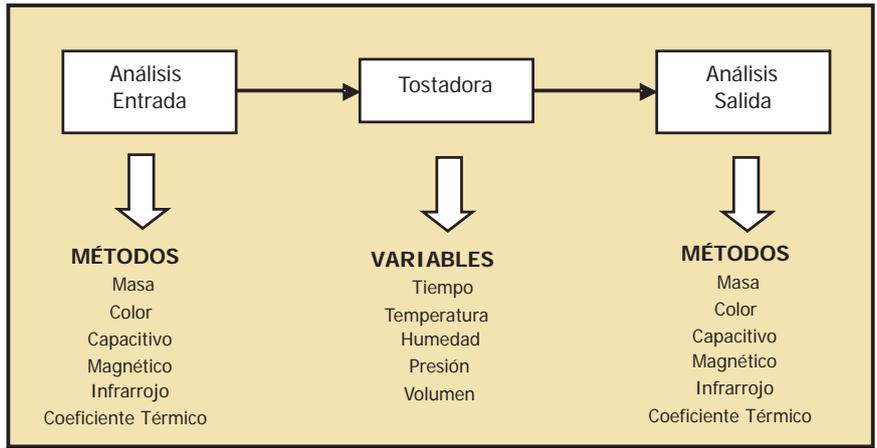


Fig. 3. Parámetros de entrada y salida del sistema en el proceso de tostado de café.

Se estableció el Método Estadístico teniendo en cuenta los parámetros de entrada (temperatura, humedad, tiempo) para alimentar el sistema de control en el PLC. Este método relaciona el tiempo y el muestreo para determinar la humedad, o el tiempo del catado, con el fin de garantizar una estandarización en cuanto a la precisión y toma de datos.

En este proyecto, el análisis y verificación de la humedad final del grano se realizó con los equipos Quantik MH-302 y OHAUS MB45. Los datos arrojados, producto del análisis, alimentaron el algoritmo del sistema de control del prototipo y las recetas implementadas.

### A. Características del diseño mecánico del prototipo

El diseño del prototipo involucra las características de un sistema de tambor, teniendo en cuenta las etapas fundamentales del proceso de torrefacción (figura 4), adicionando un control digital, con un cuadro de mando con amplia información del proceso, automático, siguiendo un programa seleccionado (receta) y con la posibilidad de intervención manual.

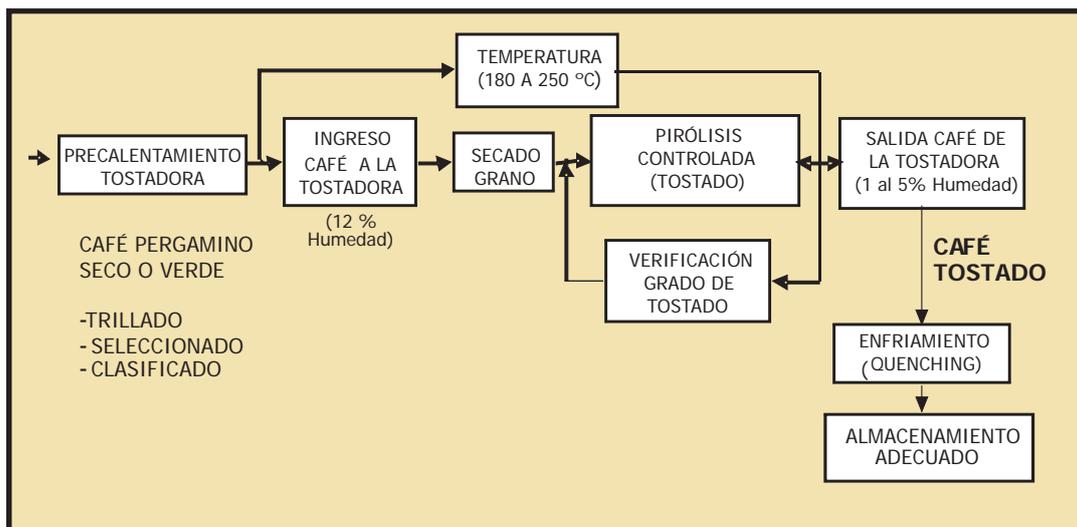


Fig. 4. Diagrama de bloques del proceso de torrefacción, sistema tambor.

El sistema cuenta con una aplicación software para la toma y análisis de muestras de las variables porcentaje de humedad, temperatura y tiempo de tostado del café. De tal forma, brinda datos para registrar reportes de producción, estadísticas y manejo administrativo del proceso desde un computador.

El proceso completo tiene una duración aprox. de 12 a 25 minutos. La cantidad de aire caliente se mantiene constante o varía según las características de la tostadora, escalonando su temperatura durante todo el proceso. Este aire es relativamente seco, con un contenido de agua de los gases de escape de 18 grs/m<sup>3</sup> (gramos por metro cúbico). Con este sistema se consigue una gran uniformidad del tueste del grano, tanto en el núcleo como en la superficie, debido al reparto uniforme del aire caliente en toda la masa de café que está girando dentro del tambor.

Las características del diseño mecánico de la máquina tostadora de café fueron:

Capacidad: 20 Kilos (7 Kilos / Bache)  
 Diámetro del Tambor: 0.38 m  
 Altura: 1.70m (soporte más tambor)  
 Volumen del tambor: 0.05 m<sup>3</sup>  
 Ventilador: Centrífugo de aleta plana inclinada hacia atrás

Para el diseño de la máquina tostadora de café se escogió acero inoxidable AISI 304 calibre 18 por ser austenítico. Éste es utilizado especialmente en la industria de alimentos e intercambiadores de calor. En la figura 5 se presenta el diseño mecánico del equipo.

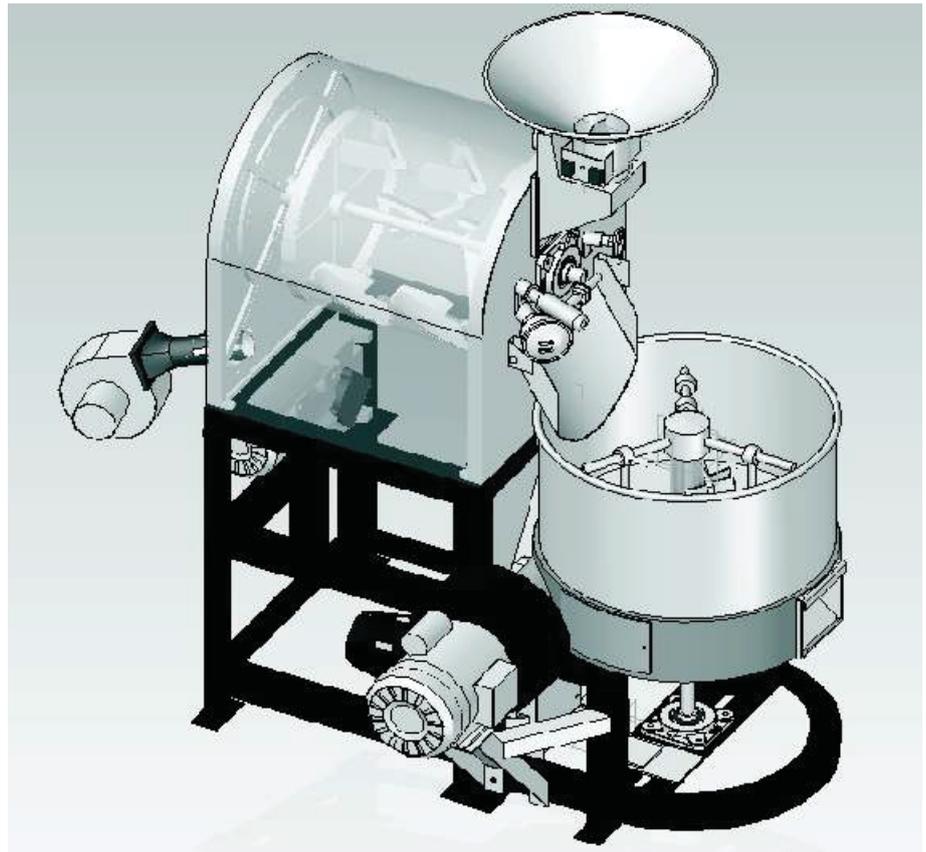


Fig. 5. Diseño mecánico de la torrefactora

### B. Características del diseño automático del prototipo.

Las variables de control del prototipo son temperatura, humedad, tiempo y color, esenciales para encontrar el punto óptimo del tueste. Esto se logró implementando la instrumentación electrónica adecuada para adquisición, tratamiento y procesamiento de las señales del proceso. Las señales de control producidas le indican al sistema el tipo de acción a realizar (escalamiento de temperatura, apertura de compuertas para el cargue y descargue de café, manejo del ciclón, terminación del ciclo de tostado, etc.). De esta manera se logra uniformidad en cada tipo de tostado seleccionado.

Los elementos fundamentales para la adquisición y procesamiento de las señales para el control de variables en la tostadora de café se muestran en el diagrama de bloques de la figura 6. El Software Step 7 Micro Win constituye el entorno de manejo, desarrollo, edición y programación del PLC Simatic S7-200 CPU224 XP siemens, con el cual se implementó las aplicaciones de control para la máquina de torrefacción.

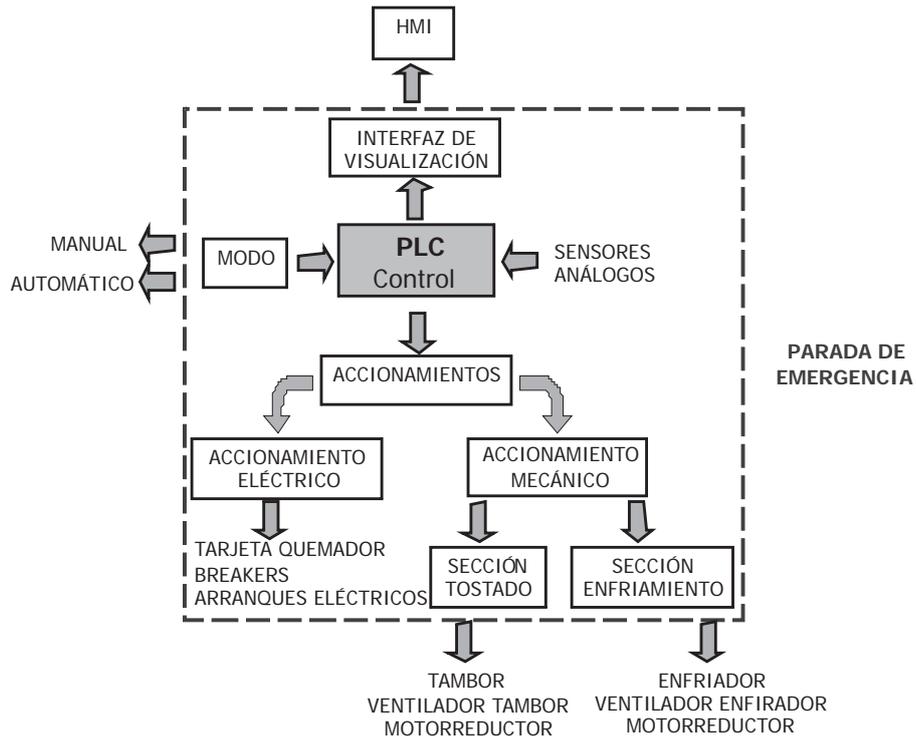


Fig. 6. Diagrama de bloques del prototipo de control

Debido a la disposición física de la máquina y a la necesidad de establecer de manera sencilla una interfase para la comunicación hombre-máquina, se dispuso en la máquina tostadora de café un panel de operador. Panel del Operador (Panel Táctil SIMATIC TP-177 micro) en el cual la parte automática cumple la función de visualización de todas las variables que intervienen en el proceso. En la parte manual, el operario puede maniobrar la máquina con los pulsadores virtuales que se configuraron en la pantalla. En las figuras 7 se muestra el panel de control de la torrefactora (Panel Táctil SIMATIC TP-177 micro) y en la figura 8 aparece la ventana de control con las condiciones iniciales del equipo (selección del café resultante).

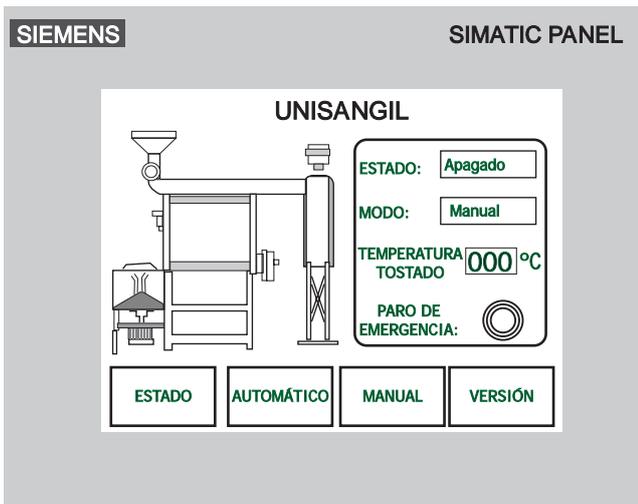


Fig. 7. Panel de control de la torrefactora (Panel Táctil SIMATIC TP-177 micro)

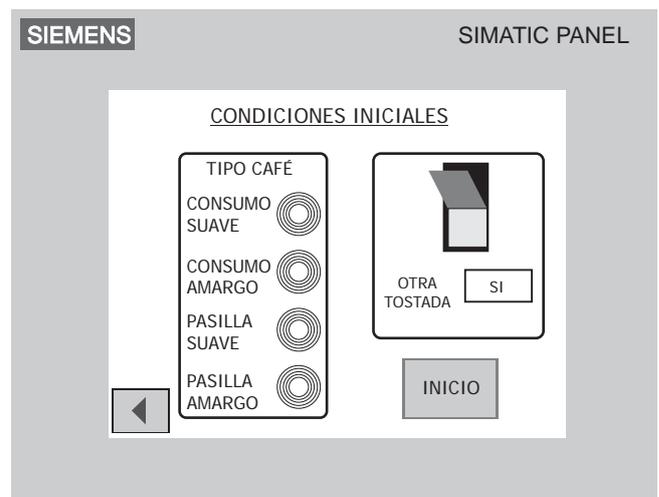


Fig. 8 Programación de condiciones iniciales del equipo.

### C. Software de mando y control

El programa de mando fue diseñado empleando el lenguaje de programación STEP7 Micro/WIN32, propio para la programación de los PLC's S7200 de SIEMENS. La aplicación desarrollada obedece a la filosofía de la programación estructurada mediante el uso de un bloque principal, subrutinas, rutinas de interrupción temporizadas y una base de datos. Las subrutinas realizan tareas específicas relacionadas con estados operativos de la máquina. Las subrutinas de interrupción temporizadas se utilizan para hacer el muestreo de valores analógicos correspondientes a las temperaturas. La base de datos contiene la información que utiliza el programa de mando y los valores reales de las variables de proceso como temperaturas, tiempos y valores intermedios, producto de operaciones realizadas en los demás bloques de programa. La programación se realizó con base a los diagramas obtenidos en la aplicación de la metodología Gemma y el Grafset de nivel superior.

#### 4. CONCLUSIONES

El sistema de control y los componentes electromecánicos implementados en el prototipo construido en este proyecto, son replicables y/o escalables a cualquier torrefactora convencional. En especial, a las que poseen las empresas beneficiarias que son de gran volumen. En ella, están plasmados conocimientos en termodinámica, instrumentación electrónica, automatización, control de proceso y diseño mecánico, buscando como objetivo final un producto altamente competitivo y de excelente calidad.

El mayor valor agregado del equipo fue la implementación de una interfase entre la máquina y un computador personal, con el fin de obtener datos de las variables y características generales del proceso como herramienta estadística y administrativa de producción.

Con la implementación del sistema de control en la torrefactora construida, se obtuvo un mejoramiento en el proceso por el mayor control de las variables que intervienen en dicho proceso. Con esto se garantiza y estandariza la calidad del producto.



#### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] FEDERACAFE, Encuesta Nacional Cafetera 1993/1997. Oficina de Estadística y Proyectos Básicos Cafeteros.
- [2] Perfil Cadena Café. Ministerio de Comercio Exterior, Colombia. Dirección de Competitividad. Página Web: Mincomex.gov.co.
- [3] ROLDÁN, L.; GONZÁLES, F.; SALAZAR, S. "La Cadena de Café en Colombia". Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. Observatorio Agrocadenas Colombia. Bogotá, Colombia. Diciembre 2002, Actualización: Abril 2003.
- [4] Memorias Curso "Organice su Propia Tienda de Café". Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, Santafé de Bogotá, D.C. Departamento de Mercado Interno, División de Comercialización. Séptima Versión. Octubre de 2000.
- [5] Norma Técnica Colombiana NTC 3534. Café tostado y molido, pág. 2, Requisitos fisicoquímicos para café tostado y molido. Colombia: ICONTEC, 1998-10-28.
- [6] Norma Técnica Colombiana NTC 2442. Café tostado en grano tostado y molido. Determinación del grado de tostación. Colombia: ICONTEC, 2004-02-25.
- [7] Norma Técnica Colombiana NTC 2558. Café tostado y molido. Determinación del contenido de humedad. Método por determinación de la pérdida en masa a 103°C (Método de Rutina). Colombia: ICONTEC, 2000-10-25.