

SISTEMA OPTO-ELECTRÓNICO PARA LA IDENTIFICACIÓN DE FRUTOS DE CAFÉ POR ESTADOS DE MADURACIÓN

Paula Jimena Ramos-Giraldo*; Juan Rodrigo Sanz-Uribe*; Jorge Hernán Estrada-Estrada**

RESUMEN

RAMOS G., P.J.; SANZ U., J.R.; ESTRADA E., J.H. Sistema opto-electrónico para la identificación de frutos de café por estados de maduración. Cenicafé 62(1) 87-99:2011.

Para obtener mejor calidad en la materia prima de café cosechada, antes del proceso de beneficio, se remueven los frutos de café que ocasionan mala calidad de la bebida. Actualmente, se utiliza clasificación por densidad para separar los frutos e impurezas que son menos densos que el agua, como frutos secos, vanos, afectados severamente por la broca o provenientes de árboles con enfermedades, hojas y trozos de rama; los frutos inmaduros, causantes de mala calidad en taza a partir de un contenido de 2,5% en la masa cosechada, no son retirados de esta manera, por lo que la separación de éstos se realiza en la zaranda después del proceso de despulpado. Esta clasificación por tamaño separa gran cantidad de granos inmaduros, frutos secos y trozos de pulpa, pero tiene el problema que envía granos grandes con aquellos de mala calidad, y frutos inmaduros pequeños con los granos de buena calidad. Con el fin de separar los frutos de café en cinco estados de madurez inmaduro, pintón, maduro, sobremaduro y seco, se desarrolló un sistema electrónico análogo para el reconocimiento de los frutos de café y un algoritmo de identificación de estados de maduración, basado en tres niveles de voltaje, como señal de salida de tres diferentes fotorresistencias cubiertas con pintura acrílica roja, verde y azul. En condiciones controladas el sistema muestra una diferenciación total de los cinco estados de madurez.

Palabras clave: Clasificación, inmaduro, pintón, maduro, sobremaduro, seco.

ABSTRACT

In order to obtain the best raw matter, coffee fruits that give bad quality are removed before the wet processing. Currently, density methods are used to remove fruits and impurities lighter than water, such as dry fruits, vane fruits, fruits bored by insects, fruits coming from unhealthy plants, leaves and parts of branches. However, immature fruits, which also affect the beverage quality, are not removed by density because they are denser than water. Immature fruits are separated by size in screens, once the fruit outer skin is removed in pulping machines, although size classification has the disadvantage that some big and healthy beans are included within the rejected material, and some immature fruits keep into the process main flow. In this research work an electronic device was developed to identify coffee fruits in five different maturation stages: immature, undermature, mature, overmature and dry fruits. The algorithm within the electronic device worked giving three states at the output voltage of three different photo resistances coated with red, green and blue varnishes. Under controlled conditions, the system achieved a total differentiation among the five maturation stages.

Keywords: Otoelectronic, sorting machina, coffee beans, maduration stages.

* Investigador Científico I e Investigador Científico II, respectivamente. Ingeniería Agrícola. Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Manizales, Caldas, Colombia.

**Docente Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Universidad Nacional de Colombia sede Manizales.

La calidad en taza del café se encuentra directamente ligada al tipo de materia prima que se procese en el beneficiadero. Marín *et al.* (2) reportan calificaciones en taza para diferentes estados de desarrollo de los frutos de café, siendo mejor calificada para frutos maduros, inferior para sobremaduros y deteriorada para frutos pintones y verdes.

Son muchas las características físicas que logran diferenciar un fruto de café por su estado de madurez, a lo largo de las 32 semanas de desarrollo, entre ellas se encuentra la masa y el tamaño (4), la firmeza polar y ecuatorial, la fuerza de remoción y un cambio notorio de color para *Coffea arabica* L., variedad Colombia de fruto rojo (2).

Garantizar homogeneidad de la materia prima en el beneficio depende tanto del proceso de recolección como de los procesos de clasificación que se dispongan antes y después del despulpado. Con respecto a la recolección, la amplia oferta de frutos a lo largo del año hace que esta labor sea selectiva, pues los recolectores deben cosechar solo frutos maduros y evitar la recolección de frutos verdes, de tal forma que éstos no superen el 2,5% de frutos en la masa cosechada, para asegurar la calidad de la bebida (3); esta estricta selectividad hace que la recolección represente el 40% de los costos totales de producción de café, de una finca cafetera en Colombia.

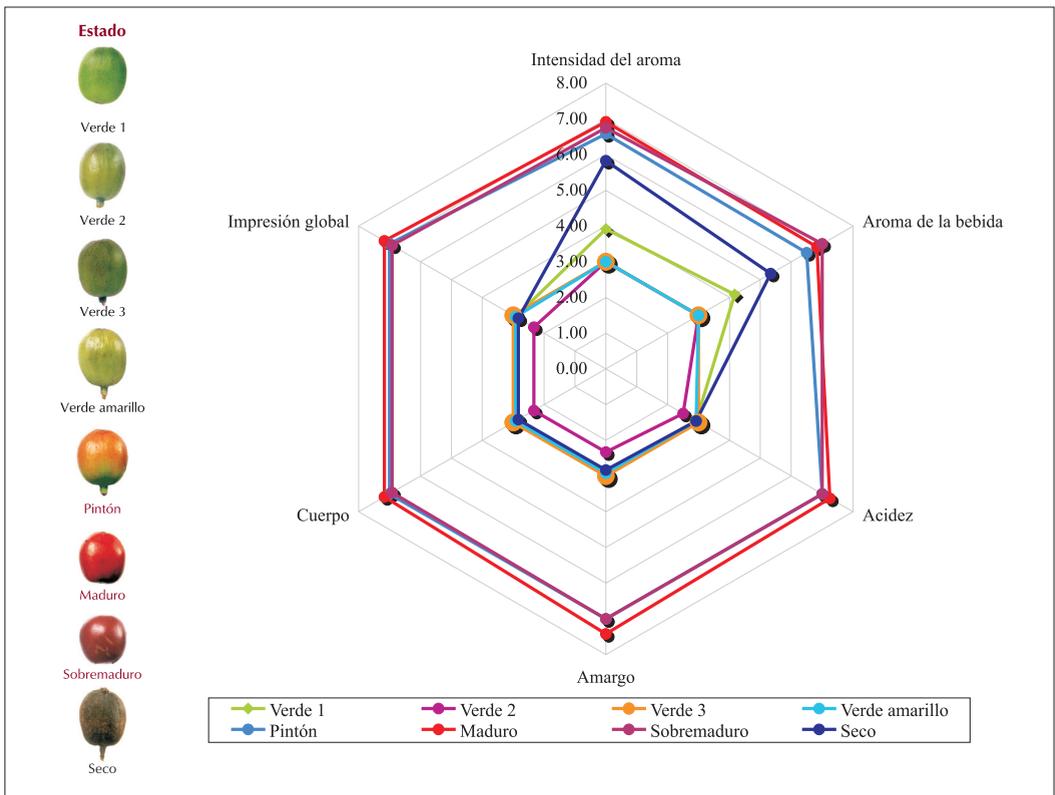


Figura 1. Calificación de taza para los diferentes estados de madurez del fruto de café (2).

En la búsqueda de disminuir este porcentaje y hacer más eficiente la labor de recolección, en la Disciplina de Ingeniería Agrícola de Cenicafe se han desarrollado dispositivos y tecnologías para asistir la cosecha manual de café, para semi-mecanizarla con equipos motorizados y portátiles, y para mecanizarla con máquinas de mayor tamaño que desprenden masivamente frutos de café; sin embargo, el factor más determinante en las tecnologías mencionadas es el aumento del contenido de frutos inmaduros en la masa cosechada, por encima del umbral (2,5%) aceptado para mantener la calidad en taza de la bebida.

Actualmente, los procesos de clasificación implementados en una finca cafetera, buscan disminuir el efecto de frutos indeseados en la materia prima, diferenciando de los frutos deseados aquellos indeseados, como por ejemplo, frutos vanos, secos y atacados por broca, los cuales pueden ser retirados mediante clasificación hidráulica, y frutos pintones y verdes pueden ser clasificados por tamaño en zaranda o por su firmeza, en una clasificadora de verdes. No obstante, estas clasificaciones binarias consideran dos clases, los frutos deseados y los frutos indeseados, sin tener en cuenta las posibles particularidades presentes en cada estado de desarrollo de los frutos de café. Un factor que claramente diferencia un estado de madurez de otro, es el color, a través de éste se determina a simple vista si el fruto es inmaduro, pintón, maduro, sobremaduro o seco.

Sin embargo, el color no es una característica de un objeto, es una apreciación subjetiva humana, que se genera en respuesta a la estimulación del ojo por la energía luminosa de ciertas longitudes de onda. El color se explica como un fenómeno físico de la luz, que corresponde a una energía electromagnética en el rango de 400 a 700 nm (Figura 2). Cuando la luz blanca, que comprende todo el

rango del color, incide sobre un cuerpo, éste refleja tan solo algunos valores de energía electromagnética.

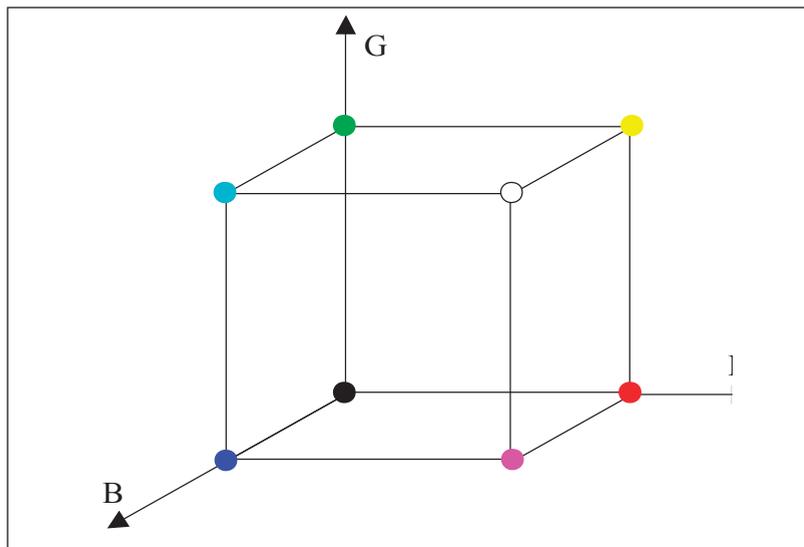
A pesar de ser una percepción subjetiva, se ha estandarizado la medición del color a través de diferentes representaciones, como RGB (Red, Green, Blue), YUV (Luminancia y crominancia), CMYK (Cian, Magenta, Yellow y Black) y HSV (Hue, Saturation y Value), de acuerdo con González y Woods (1). Una de las representaciones comúnmente utilizada es la RGB, con ella se recrea la medición fisiológica humana del color, imitando la percepción de la componente roja, verde y azul, de las células llamadas conos en el ojo humano. Cualquier color en la naturaleza puede ser representado por medio de tres componentes de color (Tabla 1) (Figura 2); el valor de cada componente varía dependiendo del sistema numérico usado y la fuente de iluminación sobre el objeto observado.

En este artículo se describe el diseño y la construcción de un dispositivo electrónico

Tabla 1. Representación de colores con componentes RGB.

Color	Componente		
	R	G	B
Negro	255	255	255
Rojo	255	0	0
Verde	0	255	0
Azul	0		255
Cian	0	255	255
Magenta	255	0	255
Amarillo	255	255	0
Blanco	255	255	255

Figura 2.
Cubo de
representación
RGB. González y
Woods (1).



que logra diferenciar el color sobre los frutos de café e interpretarlos con relación a su estado de madurez. Con el fin de tener un dispositivo que sea económico para el caficultor, fueron utilizados sensores sencillos para medir intensidad lumínica (fotoresistencias) y filtros de color rojo, verde y azul. Dichos sensores, son resistores fotodependientes, LDR, cuya resistencia varía de acuerdo con la intensidad de luz que logre entrar en el dispositivo, el tiempo de respuesta es lento y presentan inercia a las variaciones, pues el estado actual depende el estado anterior. Los sensores fotosensibles responden a todo el espectro de luz visible, por esta razón es necesario disponer de filtros de color sobre cada uno de ellos para medir una o varias componentes de color.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se realizó en el laboratorio de Ingeniería Agrícola de Cenicafé, ubicado en Manizales (Caldas) a una altitud de 1.310 m, con un promedio de temperatura de 20,6°C y humedad relativa de 75%.

La investigación se desarrolló en tres fases: I. Diseño del dispositivo, II. Construcción del dispositivo, III. Caracterización de frutos de café con el dispositivo desarrollado

Fase I. Diseño del dispositivo

El dispositivo electrónico desarrollado consta de dos partes fundamentales. La primera consiste en un sistema de medición de color conformado por sensores fotosensibles (fotoresistencias), filtros de color RGB y una fuente de iluminación controlada. La segunda consta de un sistema de interpretación de las señales entregadas por el sistema de medición de color, la cual recibe el nombre de sistema tricanal, por procesar tres componentes de color RGB.

Medición del color. El sistema de medición de color tuvo como requerimiento de diseño medir el color sobre un fruto de café en un barrido de 360° sobre la línea de ecuador del fruto (Figura 3). Para esto se diseñaron dos coronas de iluminación y un anillo de

sensores dispuesto entre las coronas, como se observa en la Figura 3.

El sistema de iluminación conformado por una corona superior y otra corona inferior, constó de 48 LED's (*Light Emitting Diode*) de luz blanca, con un punto de convergencia de luz a $\pm 60^\circ$ de cada corona, este ángulo de inclinación se calculó conforme al foco del sistema de medición, que se relaciona con la ubicación entre coronas del anillo de sensores fotosensibles y filtros de color RGB.

Como fuente de luz se seleccionó el LED, por sus grandes ventajas sobre lámparas comunes, su bajo requerimiento de energía, su mantenimiento casi nulo y una vida útil aproximada de 100.000 horas. Cada corona de iluminación contó con un regulador de corriente, el cual garantizó una adecuada intensidad luminosa de 180 mcd (milicandelas) para cada LED, y 20 mA de corriente para circular por cada uno de los LEDs. Además, debido al ángulo de radiación del tipo de LED usado, 30° y 60° , se garantizó el punto de convergencia de la luz o foco del sistema de medición de color. El sistema de iluminación diseñado requirió de 960 mA

para su correcto funcionamiento y generó alrededor de 8.640 mcd en total.

El fruto pudo observarse con un barrido de 360° , cuando éste se encontraba dentro del área de influencia del foco, de esta manera se garantizó que su color fuera adquirido por los sensores fotosensibles y los filtros de color dispuestos en cada sensor.

Cada sensor dispuesto en el anillo estuvo acompañado de pintura acrílica roja, verde o azul, que filtra algunas componentes de color y deja pasar otras. Tal como se observa en la Figura 4, un sensor fotosensible pintado con pintura acrílica de color verde, sólo responde a las componentes roja y azul que atraviesen la pintura, la componente verde se refleja en la misma y no llega al sensor. En el anillo de sensores se dispusieron 24 fotoresistencias, pintadas de forma intercalada en las tres componentes de color, los sensores pintados con una misma componente de color hicieron parte de un solo circuito electrónico en el sistema general. La respuesta de los sensores es directamente proporcional a la luz recibida y su variación a la luz es resistiva. Estos sensores se conocen como resistencias LDR

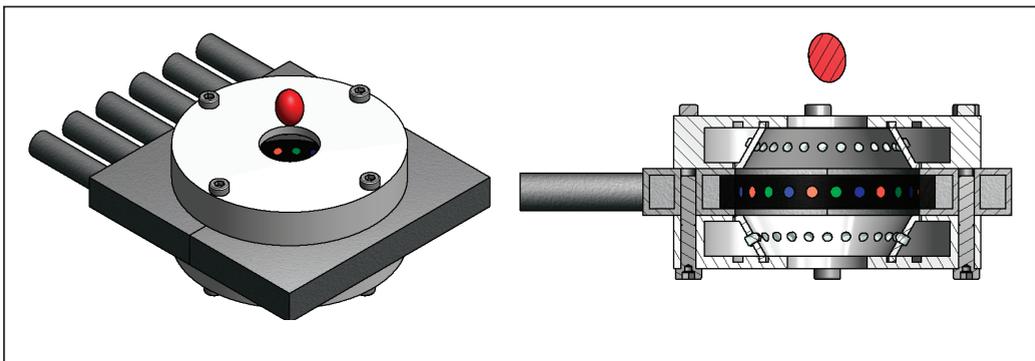
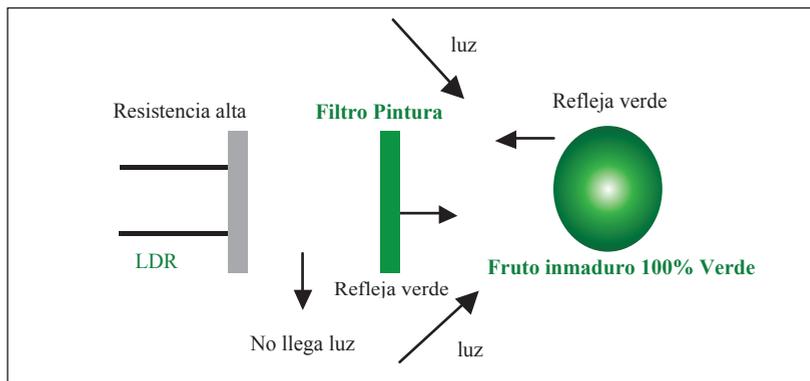


Figura 3. Medición del color. Coronas de iluminación, anillo de sensores y fruto.

Figura 4.
Sistema sensor filtro
de color con pintura
acrílica.



(*Light Dependent Resistor*) y se caracterizan por su disminución de resistencia a medida que aumenta la luz que incide sobre ellas y por la inercia a las variaciones de la intensidad luminosa. En este estudio con el uso del filtro se buscó evitar que la luz correspondiente a la longitud de onda del filtro pasara al sensor, de esta manera si el color de la pintura acrílica era verde, el filtro rechazaría las componentes correspondientes a este color, y no llegaría la luz al sensor, por lo que su resistencia aumentaría.

Sistema de interpretación de señales RGB (Sistema tricanal). Este sistema se encargó de traducir la señal resistiva entregada por los sensores, en cada una de las componentes de color RGB, con el fin de procesarlos y obtener señales confiables del fenómeno físico (color).

La señal resistiva de cada componente de color se convirtió en señal de voltaje, con el fin de transferirla a otros sistemas para procesarla. Posteriormente, se amplificó y se extrajo información espuria por medio de un filtro. Este proceso se realizó con el fin de acondicionar la señal para tener de forma depurada la información de color sobre la superficie del fruto.

El sistema tricanal entregó tres señales de voltaje, correspondientes a las componentes de color RGB de los frutos, además entregó una señal de presencia, que indicaba si había o no un objeto en el punto de convergencia o foco. Los subsistemas que conformaron el sistema tricanal fueron:

Adquisición: La resistencia entregada por los sensores es variable y depende del color observado por el sistema, la naturaleza resistiva de la información imposibilita la transmisión de la misma a otros subsistemas, por esto al momento de adquirirla debe convertirse en una señal eléctrica de voltaje o corriente, y así poder transmitirla para su procesamiento. Para lo anterior se diseñó una fuente de corriente constante, la cual circuló a través de la resistencia entregada por los sensores y generó una señal de voltaje proporcional al color observado por el sistema (Figura 5).

Amplificación: La señal de voltaje obtenida en el sistema de la Figura 6, es del orden de milivoltios y con el fin de tenerla en el orden de voltios para interpretarla con la información de color, se amplificó por medio de un sistema basado en amplificadores operacionales comunes.

Filtrado de la señal: Al amplificar la señal de voltaje, el sistema aumenta la sensibilidad a los cambios externos de iluminación y a impurezas dentro del sistema de medición, por esta razón se diseñó un sistema de filtrado, donde sólo la información relevante de color estuvo a la salida del sistema optoelectrónico diseñado, mientras que las señales espurias fueron filtradas por el sistema a través de un amplificador antilogarítmico, el cual tuvo una ganancia en función del voltaje de entrada al mismo. El amplificador antilogarítmico es un circuito no lineal y el voltaje de salida es proporcional al exponente del voltaje de entrada. El esquema de este sistema se observa en la Figura 7. Este filtrado fue proporcional a la magnitud de la señal, es decir, para señales pequeñas que indican

ausencia de color, el filtrado no permitió que pasara la señal, y para señales grandes que indican presencia del color, el filtrado las dejó pasar. Un ejemplo del funcionamiento de este amplificador usado como filtro puede observarse en la Figura 8.

El proceso descrito se llevó a cabo para obtener las señales de voltaje correspondientes a los colores rojo, verde y azul, es decir, tres sistemas como los descritos anteriormente para cada canal (Figura 9).

Además, existe una señal llamada presencia, que se forma por la suma de las señales de voltaje después de ser amplificadas; esta señal indica si existe o no presencia de un objeto dentro del sistema optoelectrónico. Para

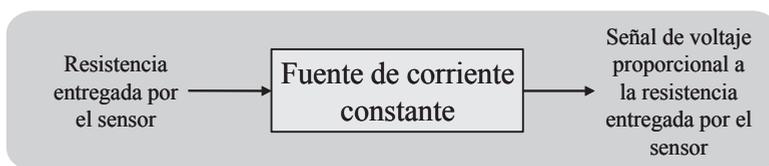


Figura 5. Fuente de corriente constante. Conversión de resistencia a voltaje del sensor.

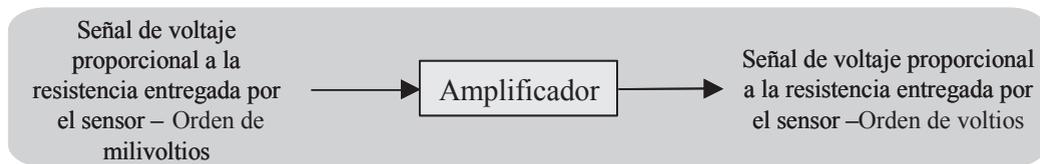


Figura 6. Amplificador de señal.

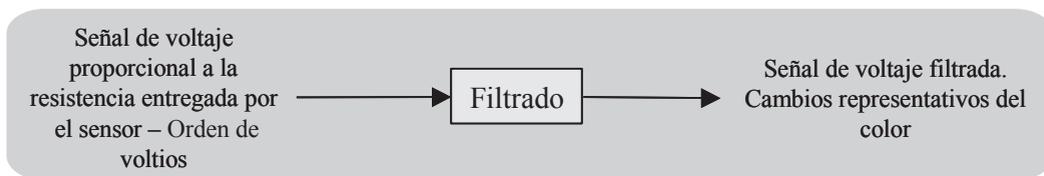


Figura 7. Amplificador antilogarítmico – Filtrado de señal.

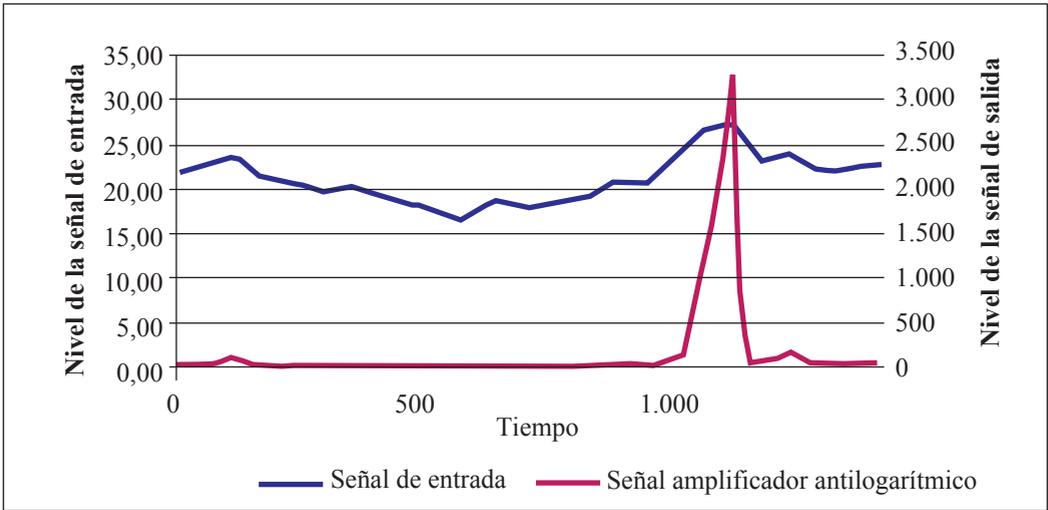


Figura 8. Funcionamiento del amplificador antilogarítmico como filtro de la señal.

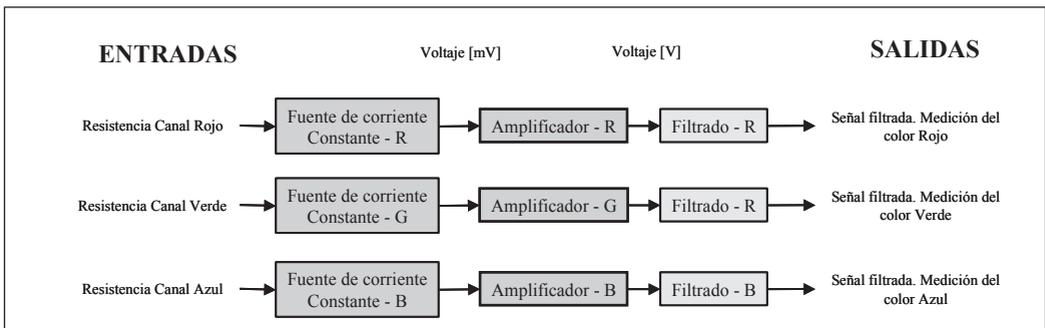


Figura 9. Medición de color por medio de señales de voltaje en las componentes RGB.

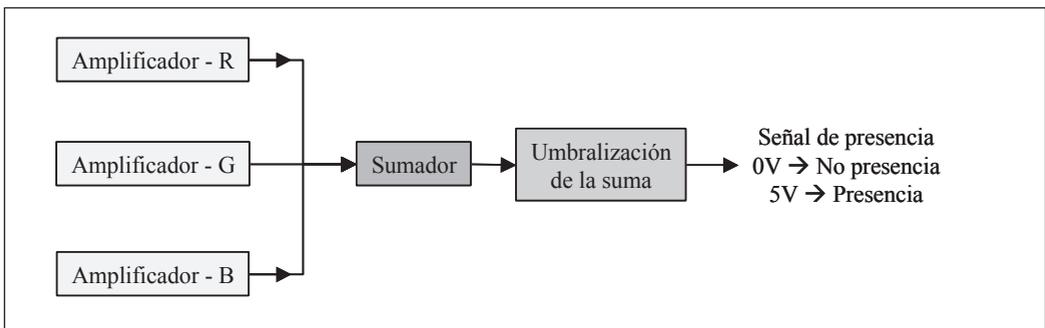


Figura 10. Circuito que genera la señal de presencia de un objeto dentro del sistema optoelectrónico.

obtener esta señal se utilizó el amplificador operacional en modo sumador, la salida de este sistema estuvo dada por una combinación lineal de cada una de señales de voltaje amplificadas y fue umbralizada de tal forma que si la suma superaba un valor de la señal de presencia tomaba el valor de 5V, de lo contrario, esta señal permaneció en 0V.

Fase II. Construcción del dispositivo

El sistema de medición de color se construyó con el sistema tricanal (Figura 11).

Fase III. Caracterización de frutos de café con el dispositivo desarrollado

Como fase final del desarrollo se realizó una caracterización con 15 frutos de café, tres para

cada estado de maduración y se determinaron los valores de voltajes característicos para cada estado de madurez, en cada canal de color y la relación entre ellos para determinar la maduración.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las señales (voltaje en el tiempo) resultantes del diseño del analizador se presentan en la Figura 12, donde se observa la señal típica después de ser amplificada (Figura 12a) y filtrada (Figura 12b). La señal que contiene la información depurada del color sobre un fruto es la señal filtrada, ésta es utilizada para realizar la caracterización del color sobre los frutos y buscar una relación con su estado de madurez.



Figura 11. Sistema de medición del color completamente construido.

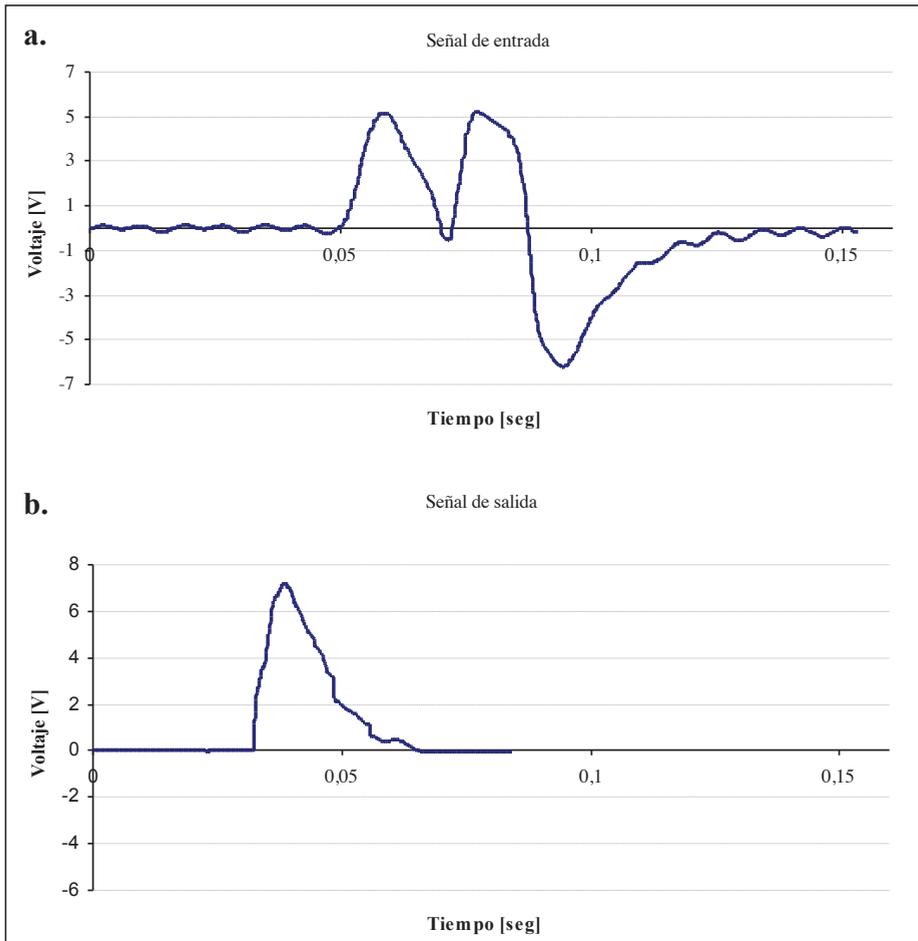


Figura 12. Señales eléctricas en presencia de frutos de café. **a.** Amplificada; **b.** Filtrada.

Para probar el sistema optoelectrónico se usaron tres frutos de café por estado de maduración, es decir, tres frutos inmaduros, tres pintones, tres maduros, tres sobremaduros y tres secos, teniendo un total de 15 frutos analizados por medio del sistema optoelectrónico. Los frutos se introdujeron en el visor por medio de punzón y se dejaron dentro de él, aproximadamente durante un segundo. Las señales obtenidas estuvieron en el rango de 0V a 5V; sin embargo, la señal de voltaje no fue repetible para cada estado de maduración, aunque el rango de

variación se mantuvo entre estados. Por esta razón, fue necesario definir niveles de voltaje bajo, medio y alto, para encontrar la variación de cada estado de maduración. Los tres niveles definidos fueron:

Nivel bajo (0) $\rightarrow 0V \leq$ Voltaje señal filtrada $< 1V$

Nivel medio (1) $\rightarrow 1V \leq$ Voltaje señal filtrada $< 3V$

Nivel alto(2) $\rightarrow 3V \leq$ Voltaje señal filtrada $\leq 5V$

En la Tabla 2 se observa el comportamiento de los niveles para cada estado de maduración.

Tabla 2. Respuesta del sistema tricanal por niveles.

Canal señal filtrada	Maduración				
	Inmaduro	Pintón	Maduro	Sobremaduro	Seco
Rojo	Bajo	Medio-Alto	Alto	Medio	Bajo
Verde	Alto	Medio	Bajo	Bajo	Bajo
Azul	Medio	Bajo	Medio	Medio	Medio

Bajo: 0 - 1 Voltios; Medio: 1 - 3 Voltios; Alto: 3 - 5 Voltios

De acuerdo con los resultados mostrados en la Figura 13, el canal rojo presentó valores altos de voltaje para los estados de madurez maduro y pintón, valores medios para los sobremaduros y pintones, y valores bajos de voltaje para los inmaduros y secos. Un efecto similar se observó en el canal verde, donde los valores altos de voltaje se mostraron en los frutos inmaduros, los valores medios en los pintones, y valores bajos en los maduros, sobremaduros y secos. Para el canal azul no hubo valores altos de voltaje, solo medios y bajos.

Al observar el comportamiento de los estados de madurez con relación a la combinación de niveles de voltaje de los tres canales, rojo, verde y azul, se tienen 27 posibles combinaciones, de las cuales solamente seis indican estado de madurez inmaduro, pintón, maduro, sobremaduro y seco (Tabla 3). De esta forma, cada estado de madurez mostró una combinación de niveles que no se repite, por esto el sistema identificó estados de maduración añadiéndole un sistema comparador. En las Figura 13, 14 y 15 puede observarse el comportamiento de los estados de madurez respecto al nivel de color medido por el analizar óptico.

Debido a que el canal azul no entrega una diferenciación por estados de madurez, solo pudo programarse el sistema optoelectrónico con los canales rojo y verde, debido a que

Tabla 3. Combinación de niveles de voltaje para los diferentes canales de color y su relación con el estado de madurez

Estado detectado	Canal		
	Rojo	Verde	Azul
--	0	0	0
Seco	0	0	1
--	0	0	2
--	0	1	0
--	0	1	1
--	0	1	2
--	0	2	0
Inmaduro	0	2	1
--	0	2	2
--	1	0	0
Sobremaduro	1	0	1
--	1	0	2
Pintón	1	1	0
--	1	1	1
--	1	1	2
--	1	2	0
--	1	2	1
--	1	2	2
--	2	0	0
Maduro	2	0	1
--	2	0	2
Pintón	2	1	0
--	2	1	1
--	2	1	2
--	2	2	0
--	2	2	1
--	2	2	2

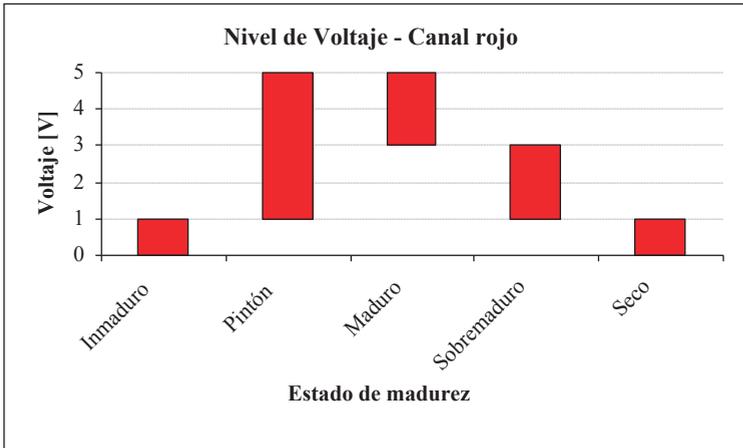


Figura 13. Niveles de voltaje para cada estado de madurez. Canal rojo.

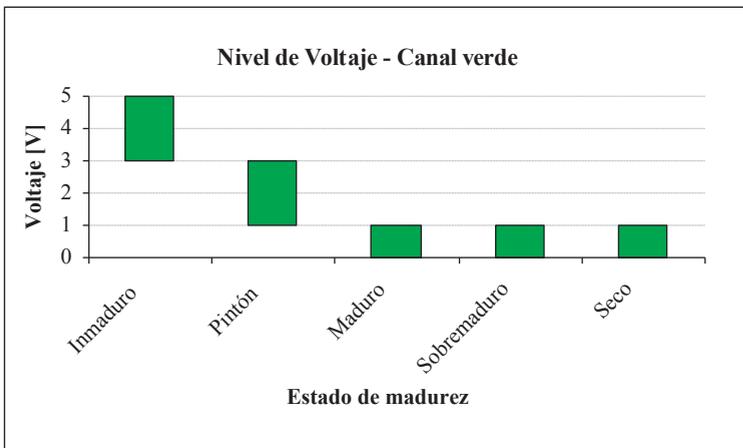


Figura 14. Niveles de voltaje para cada estado de madurez. Canal verde.

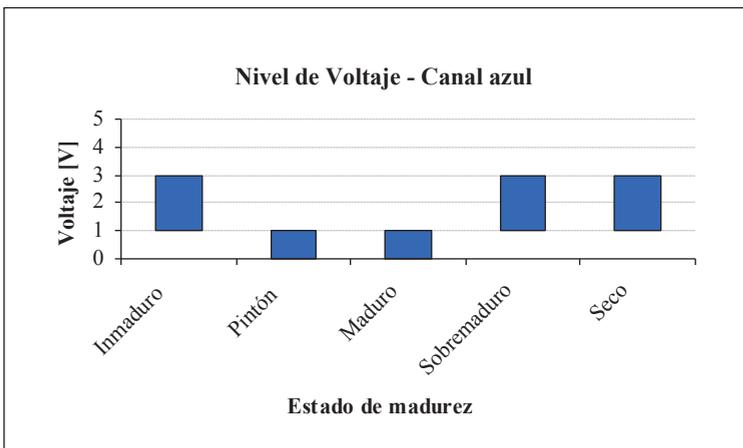


Figura 15. Niveles de voltaje para cada estado de madurez. Canal azul.

con sus combinaciones fue suficiente para identificar el estado de maduración. Esto genera un sistema más sencillo, en términos prácticos y económicos.

Los posibles errores del sistema se encuentran relacionados con la perturbación de la luz ambiente, los módulos de generación de corriente constante, la amplificación y el filtrado de la señales. Por lo tanto, debe garantizarse que el fruto de café se encuentre ubicado en el foco del sistema de medición del color, de lo contrario la información puede ser interpretada de forma errónea.

Fue necesario un control de iluminación por medios físicos y electrónicos y control sobre los brillos de los frutos, debido a que el sistema es muy sensible a los cambios de luz ambiente, lo que produce inconsistencias en la lectura RGB.

El dispositivo electrónico logra identificar cinco estados de madurez, por medio de un sistema de sensores, un sistema de electrónica análoga y un análisis realizado a la información obtenida, con la que se logra determinar los parámetros de funcionamiento del dispositivo, para posteriores identificaciones. De acuerdo con estos resultados, es posible desarrollar un sistema automático que detecte el color sobre un fruto y determine el estado de madurez, buscando identificar, clasificar y separar los frutos de café por estados de madurez, y garantizar calidad de la materia prima, independiente de la oferta de frutos en el árbol y la técnica de recolección a utilizar.

Es posible generar otros diseños para un sistema que cumpla esta función; la descrita en este artículo demuestra factibilidad en el diseño y potencial para un dispositivo económico y confiable.

Los hallazgos demuestran que es factible generar transformaciones tecnológicas frente al uso de equipos o dispositivos propios desarrollados para la caficultura colombiana a bajo costo y con aplicaciones en finca.

Como proyecciones se podría implementar un sistema experto que pueda realizar análisis de los frutos de café en tiempo real. Además, para lograr esta identificación en línea se requiere un sistema de alimentación de frutos, uno a uno, que se encargue disponer cada fruto en frente del sistema de identificación en forma ordenada. Posterior al análisis individual de cada fruto se podría disponer un sistema de separación neumática cuyo objetivo sería separar los frutos por estados de maduración.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a la empresa Aristizábal Arango y Compañía, por el apoyo económico para el desarrollo de este experimento; al ingeniero Julián Andrés Cardona Duque por la colaboración en la realización de los dibujos.

LITERATURA CITADA

1. GONZÁLEZ, R.C.; WOODS, R.E. Digital image processing. 3 ed. New Jersey (Estados Unidos), Pearson : Prentice Hall, 2008. 954 p.
2. MARÍN L., S.M.; ARCILA P., J.; MONTOYA R., E.C.; OLIVEROS T., C.E. Escala de maduración para los frutos del cafeto (*Coffea arabica* L). Avances Técnicos Cenicafé No. 315:1-8. 2003.
3. PUERTA Q., G.I. Influencia de los granos de café cosechados verdes, en la calidad física y organoléptica de la bebida. Revista Cenicafé 51(2):136-150. 2000.
4. SALAZAR G., M.R.; CHAVES C., B.; RIAÑO H., N.M.; ARCILA P., J.; JARAMILLO R., A. Crecimiento del fruto de café *Coffea arabica* var. Colombia. Revista Cenicafé 45(2):41-50. 1994.