

DESARROLLO DE UN SEPARADOR DE OBJETOS DUROS¹ EN EL CAFÉ A PARTIR DE LAS VIBRACIONES PRODUCIDAS EN PLACAS DELGADAS

DEVELOPMENT OF A SEPARATOR IN THE COFFEE HARD OBJECTS FROM THE VIBRATIONS PRODUCED IN THIN PLATES

Diego Agudelo Gómez²; Carlos Eugenio Oliveros Tascón³; Jorge Hernán Estrada Estrada⁴; Fernando Álvarez Mejía⁵ y Juan Rodrigo Sanz Uribe⁶

Resumen. En Cenicafé se diseñaron y construyeron prototipos electromecánicos denominados PESELOD (pescador electrónico de objetos duros) para la protección de las máquinas despulpadoras. Este nuevo módulo, localizado antes de la despulpadora, está conformado por un alimentador, un cuerpo vibrante (placa delgada o cono metálico), una compuerta, un recipiente para los objetos duros desalojados y un circuito para la detección y separación automática del objeto duro. Su principio de funcionamiento se basa en la diferencia de los parámetros de amplitud y frecuencia de las vibraciones producidas en el impacto del café y de los objetos duros contra el cuerpo vibrante. Se realizó el análisis histórico en los espectros de las aceleraciones que se indujeron teniendo en cuenta variaciones del material, espesor y apoyo. En la caracterización se encontraron mejores características de separación para placas de 2,5 mm de espesor, simplemente soportada y de material acerado. Los prototipos presentaron eficacias superiores al 80% y rendimientos entre 300 y 2.000 kg h⁻¹ de café en cereza. De igual manera se realizaron variaciones tendientes a mejorar su operabilidad, relacionada con la limpieza de las placas para lo cual se construyó otro prototipo cuyo cuerpo vibrante lo constituía un cono acerado.

Palabras claves: Objetos duros, placas, vibraciones, procesamiento de señales, FFT.

Abstract. Electromechanical experimental models of an electronic separator of hard objects, denominated PESELOD (pescador electrónico de objetos duros, Spanish) were designed and constructed in Cenicafé to protect the coffee processing machines. The module, located before the pulping machine, includes a feeder, a vibrant body (thin plate or metallic cone), a gate, a hard objects container and a circuit for both hard objects detection and automatic separation. Its principle of operation is based on the difference of amplitude and frequency of the vibrations produced by impact of coffee fruits and hard objects against a vibrant body. The historical analysis was made in the spectrums of the accelerations that were induced on different materials, thicknesses and boundary conditions. The device worked better with steel plates, 2.5 mm thick, simply supported. The model presented effectiveness greater than 80% and yields between 300 and 2.000 kg h⁻¹ of coffee fruits. To improve their operability related to dirty plates, another model was constructed with a truncated cone vibrant body.

Key words: Hard stones, plates, vibrations, signal processing, FFT.

Para la protección de los recursos naturales, cada día se exige más la reducción del uso de agua en las operaciones agroindustriales, lo que conlleva a optimizar la utilización del líquido por parte de los caficultores en el proceso de beneficio del café y así cuidar el medio ambiente. Como resultado de lo anterior, en Cenicafé se desarrolló la tecnología para beneficio ecológico del café, BECOLSUB, en la cual se utiliza el agua estrictamente necesaria para

procesar los frutos de café por vía húmeda (Roa *et al.*, 1999). Sin embargo, una de las dificultades para adoptar el despulpado sin agua, que hace parte de esta tecnología, corresponde a la presencia en el café recolectado de objetos duros, como piedras, puntillas y otros, los cuales dañan las máquinas despulpadoras y generan pérdidas económicas y de calidad apreciables.

¹ **Objetos Duros:** Objetos con mayor resistencia a la deformación bajo cargas de compresión y/o de cizallamiento que frutos de café, generalmente piedras ígneas con resistencia a compresión superior a 50 MPa, dureza MOHS superior a 3 y densidad superior a 2,5 g cm³.

² Investigador Asociado. Centro Nacional de Investigaciones de Café, CENICAFE, Sede Planalto, km. 4 vía Chinchiná, Caldas, Colombia. <diego.agudelo@cafedecolombia.com.co>

³ Investigador Principal. Centro Nacional de Investigaciones de Café, CENICAFE, Sede Planalto, km. 4 vía Chinchiná, Caldas, Colombia. <carlos.oliveros@cafedecolombia.com.co>

⁴ Profesor Asociado. Universidad Nacional de Colombia. Sede Manizales. Facultad de Ingeniería. A.A. 127, Colombia. <Jhestrada@unal.edu.co>

⁵ Profesor Titular. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Facultad de Ciencias Agropecuarias. A.A. 1779, Medellín, Colombia. <falvarez@unalmed.edu.co>

⁶ Investigador Científico II. Centro Nacional de Investigaciones de Café, CENICAFE, Sede Planalto, km. 4 vía Chinchiná, Caldas, Colombia. <juanr.sanz@cafedecolombia.com.co>

Recibido: Agosto 8 de 2008; Aceptado: Diciembre 16 de 2008.

Rev.Fac.Nal.Agr.Medellín. 61(2): 4686-4700. 2008

La separación de estos objetos en agua es muy sencilla, sin embargo, la utilización de un dispositivo eficaz requeriría de grandes volúmenes de agua que estropearían la labor ecológica que realiza el Becolsub. Para mejorar el proceso y seguir siendo ecológico, es de gran importancia entonces desarrollar dispositivos no hidráulicos que permitan separar eficazmente los objetos duros presentes en el café, antes de llegar a las despulpadoras.

Este trabajo tuvo como propósito desarrollar una tecnología para separar objetos duros basada en la diferencia en los patrones de vibración generados por los frutos de café y los objetos duros al impactar una placa metálica delgada. Para tal fin, fue necesario analizar las señales producidas por los dos tipos de objetos y construir modelos experimentales, que fueron resultado de varios ciclos de diseño que se llevaron a cabo para mejorar y optimizar su funcionamiento. El modelo separador PESELOD (Pescador Electrónico de Objetos Duros) desarrollado se constituye en una propuesta desde el lado electrónico para resolver la dificultad de la presencia de objetos duros en la masa cosechada.

MATERIALES Y MÉTODOS

Las pruebas de los modelos experimentales construidos se llevaron a cabo en el beneficiadero experimental de CENICAFÉ, ubicado en el Municipio de Chinchiná departamento de Caldas, Colombia.

Para alcanzar los objetivos de esta investigación, el trabajo se desarrolló en diferentes etapas. La primera se relacionó con la exploración del principio de funcionamiento, posteriormente se realizaron de manera simultánea prototipos mecánicos, simulación y diseño de circuitos electrónicos para la detección de objetos duros, rediseñando cada uno según las observaciones. Finalmente, se construyó un modelo experimental con las características más sobresalientes, para ser evaluado.

Evaluación del principio. Al caer los frutos y los objetos duros contra una placa delgada se produce vibración con diferentes parámetros de amplitud y frecuencia. Al separar las características particulares para cada uno de los objetos, permiten identificar la presencia de uno u otro, inclusive cuando los choques se presentan en lapsos de tiempo en el orden de los milisegundos. Estas vibraciones pueden

ser medidas por diferentes medios y separadas como excitaciones y respuestas en función del tiempo, las cuales a su vez pueden ser representadas como función de la frecuencia, a través de la transformada de Fourier, conocido como análisis espectral. Los resultados del análisis espectral de una señal pueden ser interpretados como el conjunto de componentes de frecuencia que contiene también la frecuencia natural de la placa.

Para el procesamiento de los datos se usó el software comercial Matlab® realizando un programa basado en la función FFT (*Fast Fourier Transformation*), la cual se presenta en la ecuación (1), para señales discretas (Doebelin, 1990; Tyrrell, 1993; Cyril, 1996; Agudelo, 2000).

$$F(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)e^{-jonT} \quad (1)$$

Para medir las vibraciones se instalaron acelerómetros de referencias ADXL105 y ADXL 150 unidos a placas metálicas. La adquisición de señales se realizó con el sistema DAQBOOK/100 (National Instruments) haciendo uso de uno o dos de sus canales análogos configurados en un rango de $\Delta 5$ voltios y frecuencias de muestreo entre 10 y 25 kHz.

En esta primera etapa se hallaron los primeros parámetros para separar las vibraciones producidas por frutos de café y vibraciones producidas por impactos de objetos duros.

Diseño mecánico del prototipo. Etapa I. Cada frecuencia natural de la placa está dada por la ecuación (2).

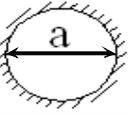
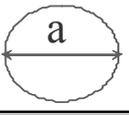
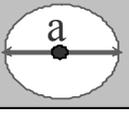
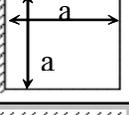
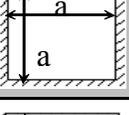
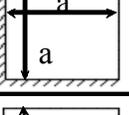
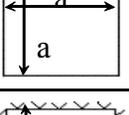
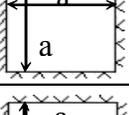
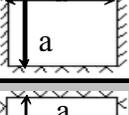
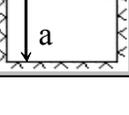
$$\omega_n = \beta \sqrt{\frac{E h^2}{\rho a^4 (1 - \nu^2)}} \quad (2)$$

Donde a es el lado de una placa cuadrada, β es una constante que depende de la forma de la placa, las condiciones de apoyo y del modo de vibración (como se observa en la Tabla 1), h es el espesor, E es el módulo de elasticidad, ν la relación de Poisson y ρ la densidad del material de que está hecha la lámina (Cyril, 1996).

En ensayos preliminares se observó que las formas de placas cuadradas con dos lados simplemente soportados y dos empotrados, al igual que la circular empotrada en el centro (resaltadas en la Tabla 1) presentan las mejores características para la detección de objetos duros, debido a la separación en las vibraciones generadas entre los modos de vibración bajos y altos.

Estos conceptos hacen posible el diseño experimental de la placa. Se construyó un prototipo que operaba manualmente y se realizaron ensayos con alturas de caída de los objetos duros entre 5 y 14 cm; con placas con espesores de 0,5, 1,5 y 2,5 mm y pruebas relacionadas con el aislamiento y soporte de la placa. Se discriminaron también para seis diferentes pesos de objetos duros.

Tabla 1. Valores de β para diferentes formas, condiciones de frontera y modos de vibración (Cyril, 1996).

Diagrama	Condición de bordes y forma	Valor de β para el modo							
		1	2	3	4	5	6	7	8
	Empotrada en el borde	11,84	24,61	40,41	46,14	103,12			
	Libre	6,09	10,53	14,19	23,8	40,88	44,68	61,38	69,44
	Empotrada en el centro	4,35	24,26	70,39	138,85				
	Un borde empotrado Tres libres	1,01	2,47	6,2	7,94	9,01			
	Bordes empotrados	10,4	21,21	31,29	38,04	38,22	47,73		
	Dos bordes empotrados Dos libres	2,01	6,96	7,74	18,89	18,25			
	Libre	4,07	5,94	6,91	10,39	17,8	18,85		
	Un borde empotrado Tres simplemente soportados	6,83	14,94	16,95	24,89	28,99	32,71		
	Dos bordes empotrados Dos simplemente soportados	8,37	15,82	20,03	27,34	29,54	37,31		
	Bordes simplemente soportados	5,7	14,26	22,82	28,52	37,08	48,49		

Etapa II. Se construyó un modelo PESELOD I (Figura 1) en acrílico al cual se le agregó un alimentador de frutos que consistía en un motor de máquina de coser y con un eje cuadrado girando a 460 rpm en la parte inferior de la tolva. El dosificador ordenaba los frutos en forma de cortina delgada, dejándolos caer sobre la placa desde una altura de 5 cm. El ángulo aproximado de choque contra la placa fue de 90°.

A partir del primer modelo se construyó el modelo PESELOD II (Figura 1) de mayor capacidad al cual se le agregó un sistema de limpieza de regadera de agua a presión y además se hicieron ensayos para limpiar la placa utilizando un ventilador. El ángulo de choque contra la placa fue de 45°.

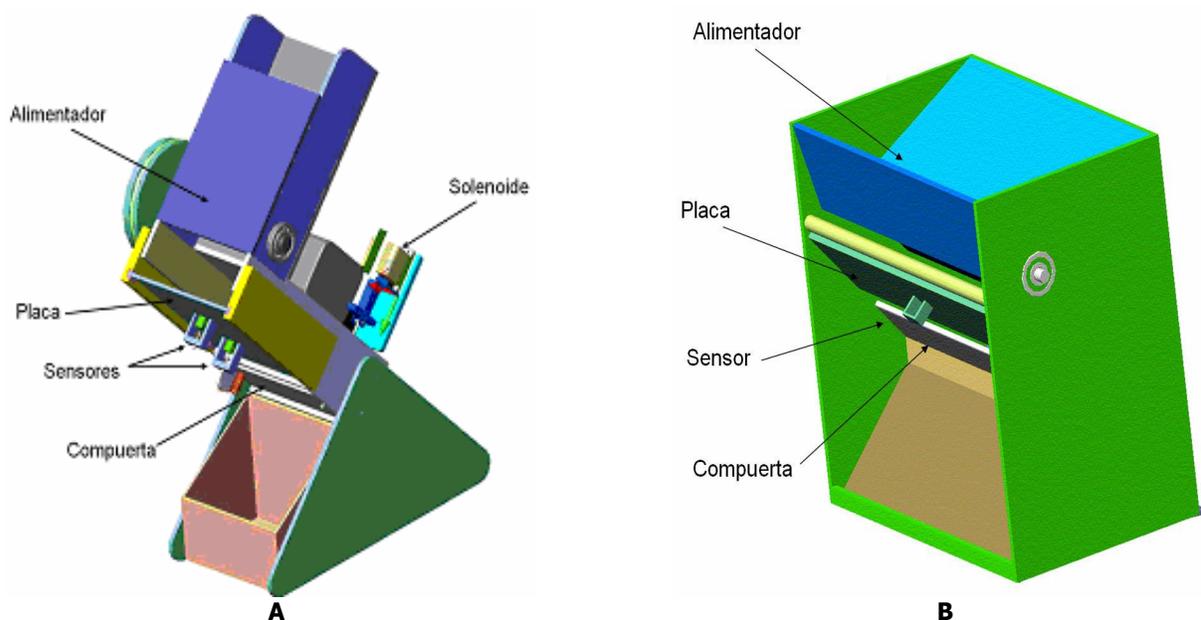


Figura 1. Partes de los prototipos de un separador de objetos duros diseñados para la protección de despulpadoras de café (modelo virtual). A. PESELOD I y B. PESELOD II

Etapa III. Basado en las experiencias anteriores se construyó el modelo PESELOD III (Figura 2) en el que se cambió el alimentador por un tornillo sinfín, la placa fue reemplazada por un cono truncado hecho en lámina de acero calibre 18 y abierto en sus dos extremos, además se le agregó en la superficie interna del tronco de cono una banda de caucho que raspa la suciedad con el giro. Se reemplazó la compuerta por una tipo columpio.

Para la detección simulada del objeto duro se procesaron las señales de vibración para cada uno de los diferentes cambios realizados en cuanto a las condiciones de operación. Posteriormente se encontraron los parámetros (Figura 3) que se creen pueden servir para detectar el objeto duro, escribiendo programas para la detección del objeto duro. Esto es posible hacerlo visualizando históricamente.

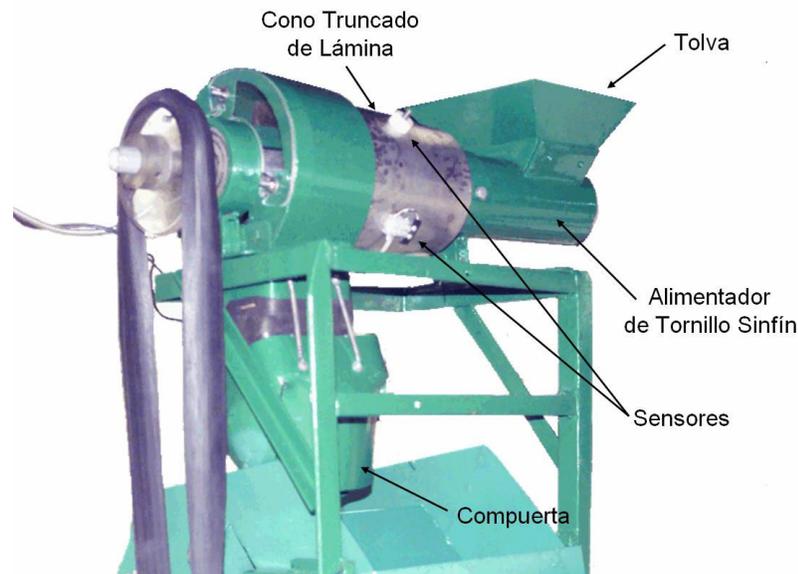


Figura 2. Partes del prototipo del separador de objetos duros PESELOD III, diseñado para la protección de despulpadoras de café.

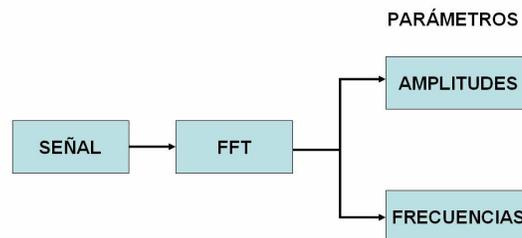


Figura 3. Esquema para el análisis de la señal emitida por un objeto duro.

Una vez obtenida la estrategia de detección a través de la simulación, se requiere implementar circuitos electrónicos con el fin de ser utilizados en pruebas de campo y verificar su buen comportamiento ante la presencia de "ruidos" en el ambiente de operación (Robert, Frederick y Batista, 1998). Debido a que el tiempo de observación no se puede fijar y el impacto de los objetos duros puede ocurrir en cualquier momento del continuo del tiempo, resultó más conveniente realizar las pruebas en tiempo real.

Según las características resultantes de la simulación de la detección, se diseñaron y montaron tres circuitos electrónicos. Principalmente funcionando como filtros pasa-altos en un concepto global. Cada uno de los modelos fue sometido a evaluación en

conjunto con su circuito electrónico para la detección. Se mezclaban de manera aleatoria objetos duros en la masa (5 a 30 kg) de café. Posteriormente se observaron cuantos de estos eran detectados y desalojados para determinar sus eficacias.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para los primeros ensayos se observó que los objetos duros, incluyendo los de masa menor que el café, generan vibraciones de más alta frecuencia que las producidas por los frutos de café al chocar contra la placa, como lo muestra el espectrograma de la Figura 4. En lo correspondiente a simulación de la detección se apreciarán los cambios realizados a

la placa y a los circuitos con el fin de separar la brecha entre las bajas frecuencias (Δf_1) y las altas frecuencias (Δf_2).

En los modelos I y II (Figura 1) se realizaron las siguientes observaciones:

Bloqueo de la compuerta en el momento de cerrarse debido a palos o granos de café que se introducen en los bordes. Esto hace que se bloquee completamente el sistema y sea necesario retirar todo este café para continuar.

La placa se ve afectada por material diferente al café como hojas, café despulpado, pulpa, palos y tierra que al adherirse impiden el choque directo de los objetos duros contra esta.

A medida que se aumenta el rendimiento de la máquina, aumenta el número de granos desalojados en cada disparo de la compuerta.

El sistema limpiador con agua no tuvo un buen comportamiento debido a que no es un sistema continuo de limpieza. Los periodos de limpieza varían mucho dependiendo del estado de humedad con el cual el café llega del campo, la capa de agua presente en la placa se comporta como adhesivo y los consumos de agua son altos, lo cual va en contra de la no utilización de agua para separar los objetos duros.

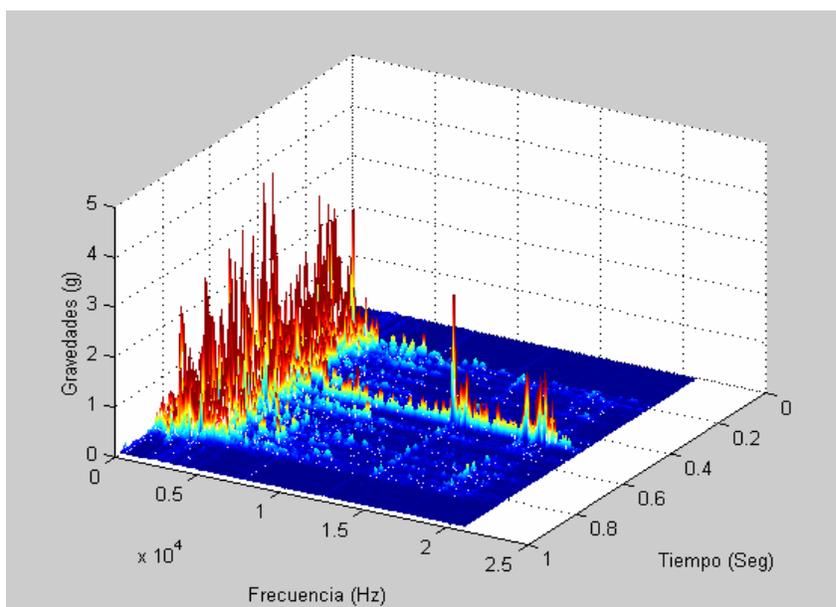


Figura 4. Espectrograma evolutivo producido por café y un objeto duro.

Para el caso anterior se observó que las placas constituyen elementos estáticos y por tal condición las partículas que se adhieren a ella no se remueven con gran facilidad y tienden a acumularse más con el tiempo. La limpieza de la placa es una condición esencial para obtener un contacto directo entre los objetos duros y esta, lo cual aumenta las probabilidades de detectarlos. Por esto se buscó cambiar la placa por otro elemento de acero, pero suministrándole movimiento con el fin de evitar la acumulación de cuerpos extraños.

Teniendo en cuenta lo anterior se diseñó el modelo PESELOD III (Figura 2) cuyo funcionamiento se describe a continuación:

- El café se introduce sobre una tolva, a continuación se conduce a través de un tornillo sinfín, que cumple la función de regular la cantidad de café que fluye.
- El café cae a un cono truncado y abierto en ambos extremos (diámetros 13,6 y 16,2 cm; altura

18 cm), construido en lámina acerada calibre 16, el cual gira solidario al tornillo sinfín. El cono internamente está sostenido por tres radios y en sus paredes se encuentran seis láminas distribuidas a lo largo para obstaculizar el libre deslizamiento del café y producir rebote en este. En la parte externa del cono se encuentra un sensor de aceleración que convierte las vibraciones producidas por los impactos internos producidos tanto por el café como por los objetos duros.

- En los extremos están dos láminas de caucho que rozan contra la cara interna del cono y cumplen la función de barredores de cualquier grano, mugre y demás elementos que pueden quedarse pegados allí.

- Cuando un objeto duro es detectado por el circuito electrónico, actúa una solenoide (electroimán) sobre una compuerta y se desvía el recorrido del café hacia un cono, como se aprecia en la Figura 5.

Es de agregar que el sensor gira adherido al cono y fue necesario diseñar un sistema de escobillas para transmitir la señal al circuito de detección.

Se ha tenido en cuenta para el prototipo PESELOD III, su robustez y funcionalidad para una finca cafetera construyéndolo en materiales resistentes y de mayor durabilidad que los anteriores.

Como antes se mencionó, dependiendo de las características de la placa delgada, los objetos duros al chocar excitan frecuencias naturales diferentes, que básicamente componen el espectro medido. Por tanto, el poder de discriminación entre objetos duros y granos de café puede aumentarse o ser disminuido cambiando la configuración, material, dimensiones y demás propiedades de la placa delgada. Otro factor importante en la capacidad de resolución del sistema, lo condiciona la sensibilidad del sensor, pues, a un mayor valor de este, mayor gama de frecuencias puede ser medidos; sin embargo, con mayor facilidad se satura el sistema. Al disminuir la sensibilidad se empeora el espectro, y disminuyen rápidamente los valores de amplitud medida; esto es, disminuye notoriamente el poder de discriminación del sistema.

Comparación de la vibración en diferentes localizaciones del sensor de aceleración.

Debido a que las características de vibración en una placa se presentan de manera compleja, principalmente en cuanto a los modos generados, por la suma o cancelación de amplitudes en las frecuencias excitadas; se colocaron dos sensores de aceleración localizados en diferentes puntos de la placa para verificar cual es el efecto de capturar las vibraciones de la placa en un punto en particular. Se realizó la comparación de las señales producidas por un mismo impacto en el centro de la placa (Posición 1) y en uno de los extremos (Posición 2). Los resultados (Figura 6) no mostraron diferencias significativas.

Comparación de la vibración para diferentes calibres de placa.

Se realizaron pruebas para tres placas de acero de iguales dimensiones y de calibres de 0,5 mm, 1,5 mm y 2,5 mm buscando una mejor diferenciación de los objetos duros.

Se espera que, a medida que aumenta el calibre, aumenta el orden de las frecuencias generadas, pero disminuyen las amplitudes. Por esto es necesario, y dependiendo de las características de los sensores de aceleración, encontrar un punto óptimo de funcionamiento.

En la Figura 7 se observa que al aumentar el grosor de la placa, tienen mayor diferencia las vibraciones producidas por el café para el mismo objeto duro. En la placa de 0,5 mm, no se distingue el objeto duro; en la placa de 1,5 mm, debido a que el sistema está saturado, tampoco es posible diferenciarlo; finalmente, para una placa de 2,5 mm, la amplitud producida por el objeto duro es por lo menos el doble de las máximas amplitudes producidas por el café que disminuyeron en magnitud hasta 3 g. De esto se concluye que una placa de más calibre permite mejor separación utilizando el parámetro de la amplitud.

Para las mismas señales anteriores se realizó el análisis histórico del espectro de Fourier, mostrado en la Figura 8 y se observa que al aumentar el calibre de la placa, la potencia de las vibraciones generadas por los impactos de objetos duros presenta mayor amplitud en comparación con las vibraciones generadas por los granos de café. En la placa de 0,5 mm no se distingue el objeto duro; en

la placa de 1,5 mm los objetos duros se diferencian por producir vibraciones superiores a los 10 kHz pero de amplitud similar a las bajas frecuencias del café; y en la placa de 2,5 mm las frecuencias generadas

por el objeto duro son superiores a los 12 kHz, mejorando además su amplitud en una relación mucho mayor que las producidas por los granos de café.



Figura 5. Prototipo del separador de objetos duros PESELOD III instalado al módulo para el beneficio de café BECOLSUB 300.

Por lo anterior se concluye que al aumentar el calibre de la placa, los parámetros de amplitud y frecuencia sirven para separar los objetos duros.

Vibraciones generadas en un cono. Para el prototipo PESELOD III se presenta una vibración de

muy baja frecuencia de 120 rpm la cual corresponde a la velocidad de giro del cono. Los objetos duros que chocan internamente, generan frecuencias a partir de 2 kHz (Figura 9).

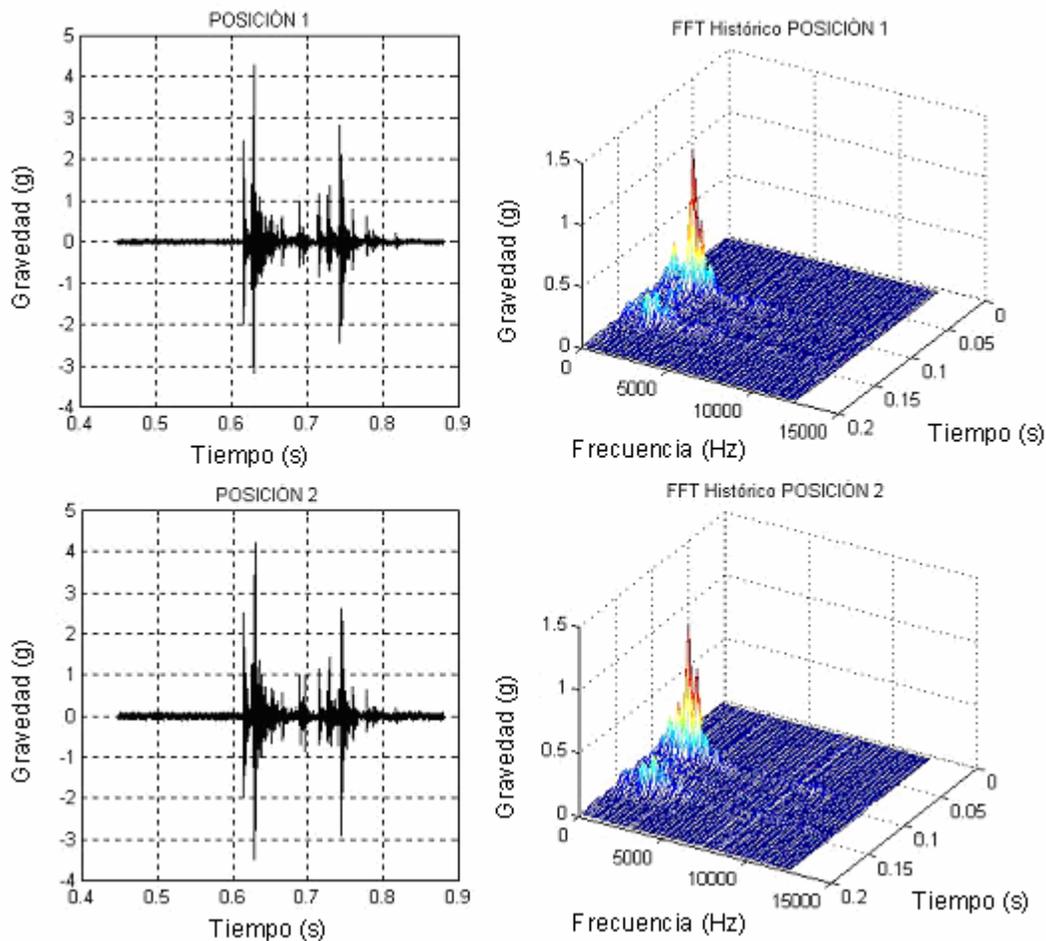


Figura 6 Comparación en el dominio del tiempo y de la frecuencia, de las vibraciones para un mismo impacto de un objeto duro en la posición 1 (centro) y posición 2 (extremo) del sensor de aceleración en la placa en el prototipo PESELOD III diseñado para la protección de despulpadoras de café.

Detección de un objeto duro. En la Figura 10 se aprecia el resultado de procesar una señal de aceleración utilizando un filtro Butterworth pasa-alto con frecuencia de corte de 12 kHz. En la detección se utiliza un umbral n ajustado experimentalmente.

Utilización de un sistema no lineal para la detección. Con el propósito de disminuir el aporte

de la potencia generada por las vibraciones del café se utilizó un comparador de nivel directamente a la salida del sensor de aceleración (Figura 11A). De éste se obtiene una señal cuadrada (Figura 11B) en los intervalos que son superiores al nivel calibrado. Al promediar la señal cuadrada se obtiene un pico (Figura 11C) que corresponde al impacto del objeto duro.

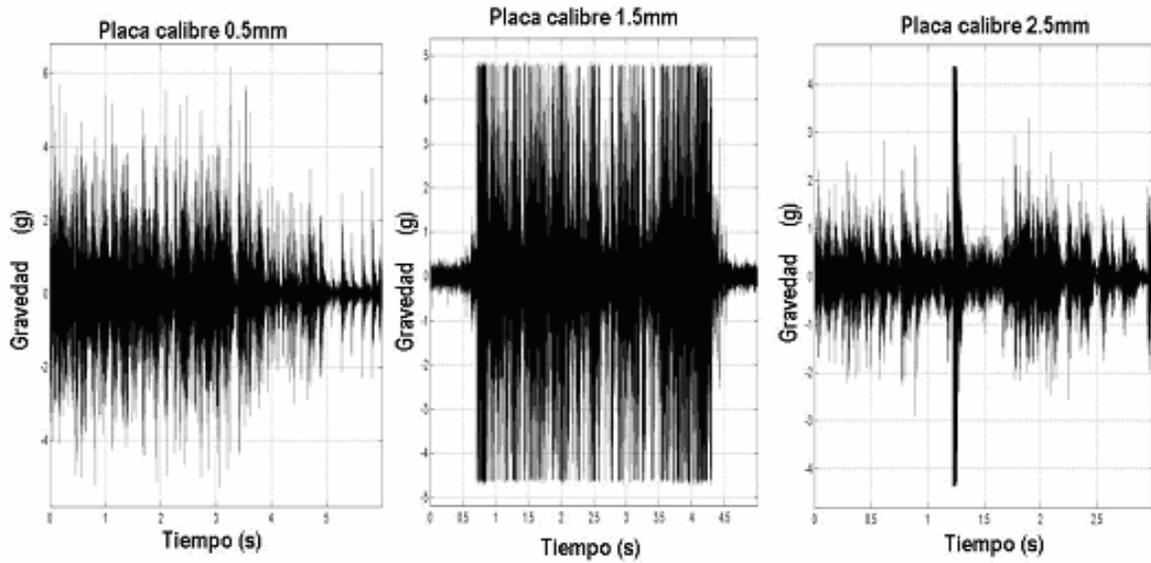


Figura 7. Comparación de la amplitud de aceleración en el dominio del tiempo generada por el impacto del fruto y un objeto duro para tres placas aceradas de calibres 0,5 mm, 1,5 mm y 2,5 mm en el prototipo PESELOD III diseñado para la protección de despulpadoras de café.

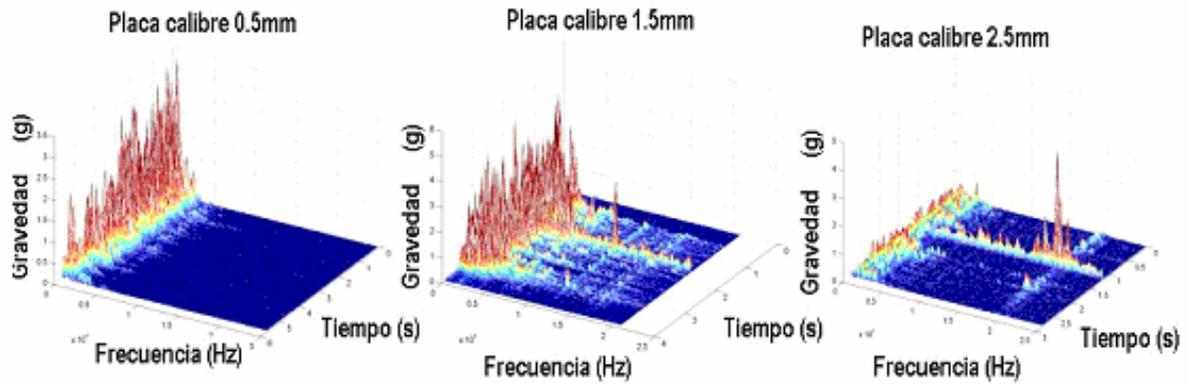


Figura 8. Comparación de los espectros de frecuencia del registro histórico de las amplitudes de las aceleraciones generadas por los impactos del fruto y un objeto duro para tres placas aceradas de calibres 0,5 mm, 1,5 mm y 2,5 mm, en el prototipo PESELOD III diseñado para la protección de despulpadoras de café.

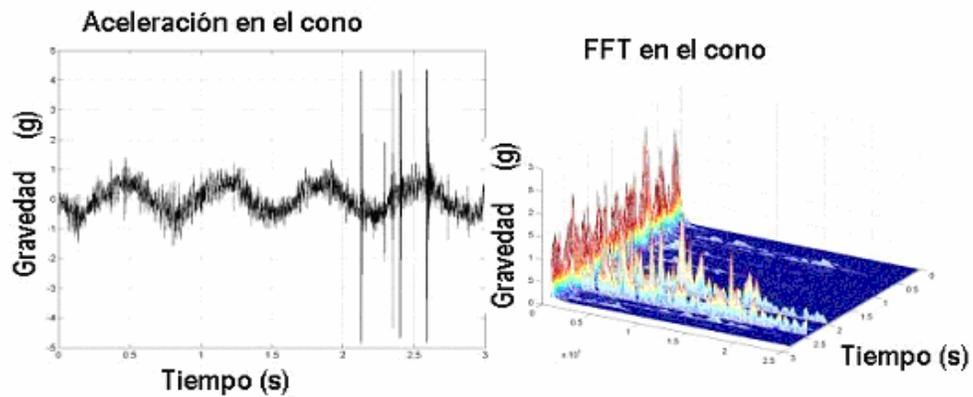


Figura 9. Señal de aceleración y FFT histórico para las vibraciones del cono, con el impacto de un objeto duro en el prototipo PESELOD III diseñado para la protección de despulpadoras de café.

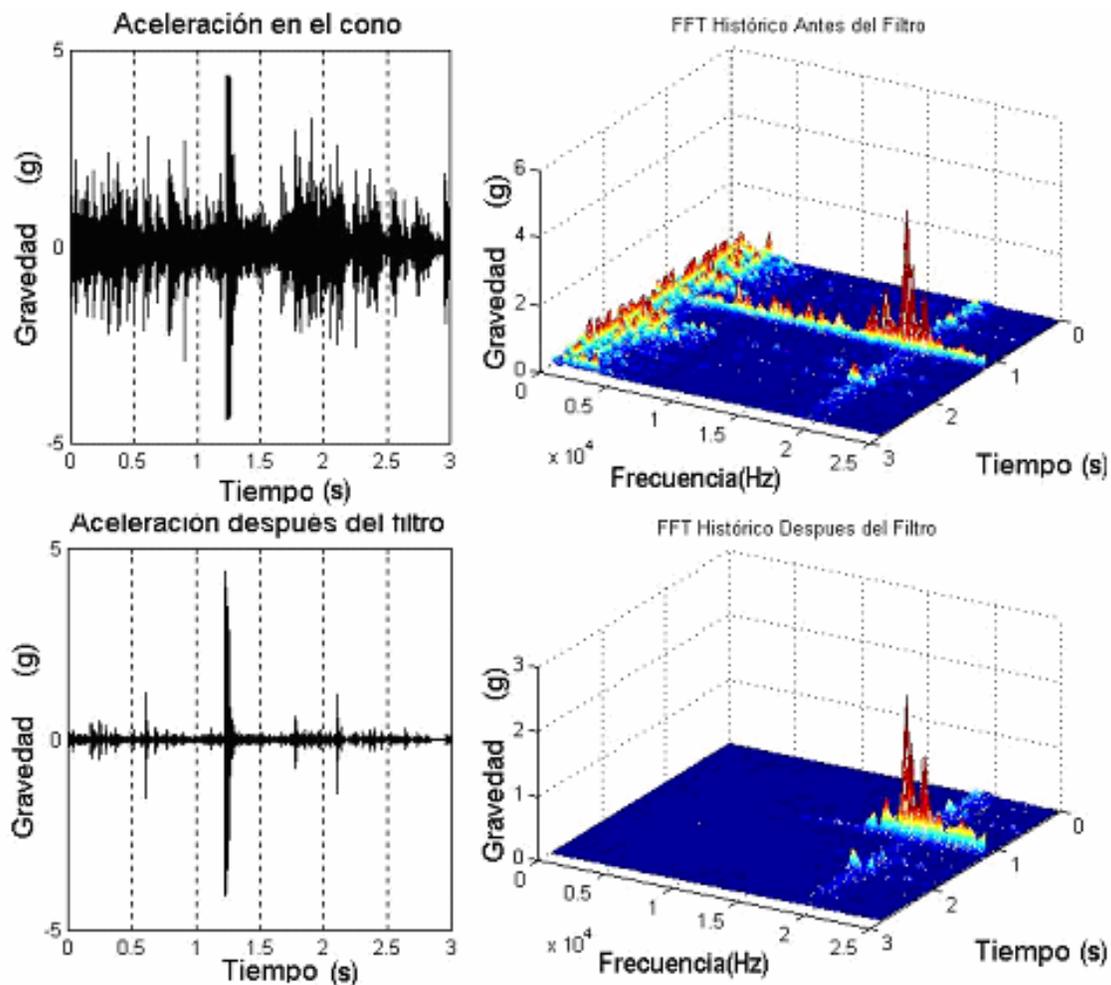


Figura 10. Simulación de la detección de un objeto duro, utilizando un filtro Butterworth pasa-altos con frecuencia de corte de 12 KHz en el prototipo PESELOD III diseñado para la protección de despulpadoras de café.

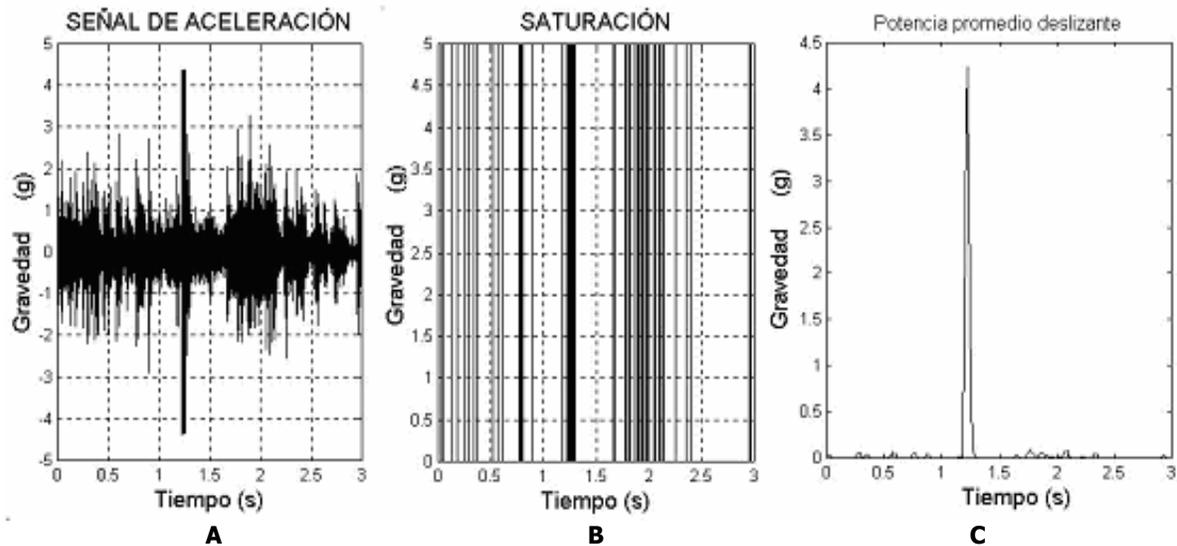


Figura 11. Esquemas de detección de objetos duros por el prototipo PESELOD III instalado en una despulpadora de café, utilizando un sistema no lineal.

Circuitos electrónicos para la detección

Etapa I. Está compuesto por dos sensores de aceleración, uno de $50 g_n$ (gravidades, $1 g_n = 9,8 m s^{-2}$) y otro de $5 g_n$ cuyas señales son acondicionadas. Las señales del sensor de $5 g_n$ pasan a través de un filtro pasa-bajos de 5 kHz, las señales del sensor pasa-alto pasa a un filtro pasa-alto de 10 kHz. Ambas son llevadas a unos comparadores que permiten ajustar experimentalmente con P1 y P2 los umbrales $n1$ y $n2$, en los límites óptimos para detectar los objetos duros (Figura 12).

Etapa II. Se simplifica el circuito anterior dejando únicamente el circuito pasa-alto correspondiente al sensor de $5 g_n$ y se le adiciona una nueva etapa, utilizando el circuito integrado AD637 para calcular el valor RMS, el cual está directamente relacionado con la potencia de la señal, esto con el fin de suavizar la señal y reducir la magnitud del ruido.

Etapa III. Este circuito (Figura 13) tiene los umbrales $n1$ y $n2$ para ser ajustados con P1 y P2. El primero de ello para saturar las señales de alta frecuencia mayores al umbral y el segundo, para disparar el circuito de detección con cierta sensibilidad que es ajustada experimentalmente.

Para el modelo PESELOD I, la placa de acero calibre 16 presentó las mejores condiciones de funcionamiento y el sistema completo fue sometido a prueba del siguiente modo. Se mezcló una sola piedra, escogida de forma aleatoria, junto con 2 kg de café. Se verificó entonces el desalajo de este objeto duro. Realizadas 200 repeticiones falló 10 veces en la detección, esto corresponde a una efectividad del 95%. Es de anotar que la principal causa de no-detección se produce al caer el objeto duro sobre otra cosa diferente a la placa. El promedio de granos desalojados junto con el objeto duro fue de 32. Por otro lado se obtuvo un rendimiento del aparato de aproximadamente de $460 kg h^{-1}$ de café, al tener la velocidad del eje del alimentador en 450 rpm.

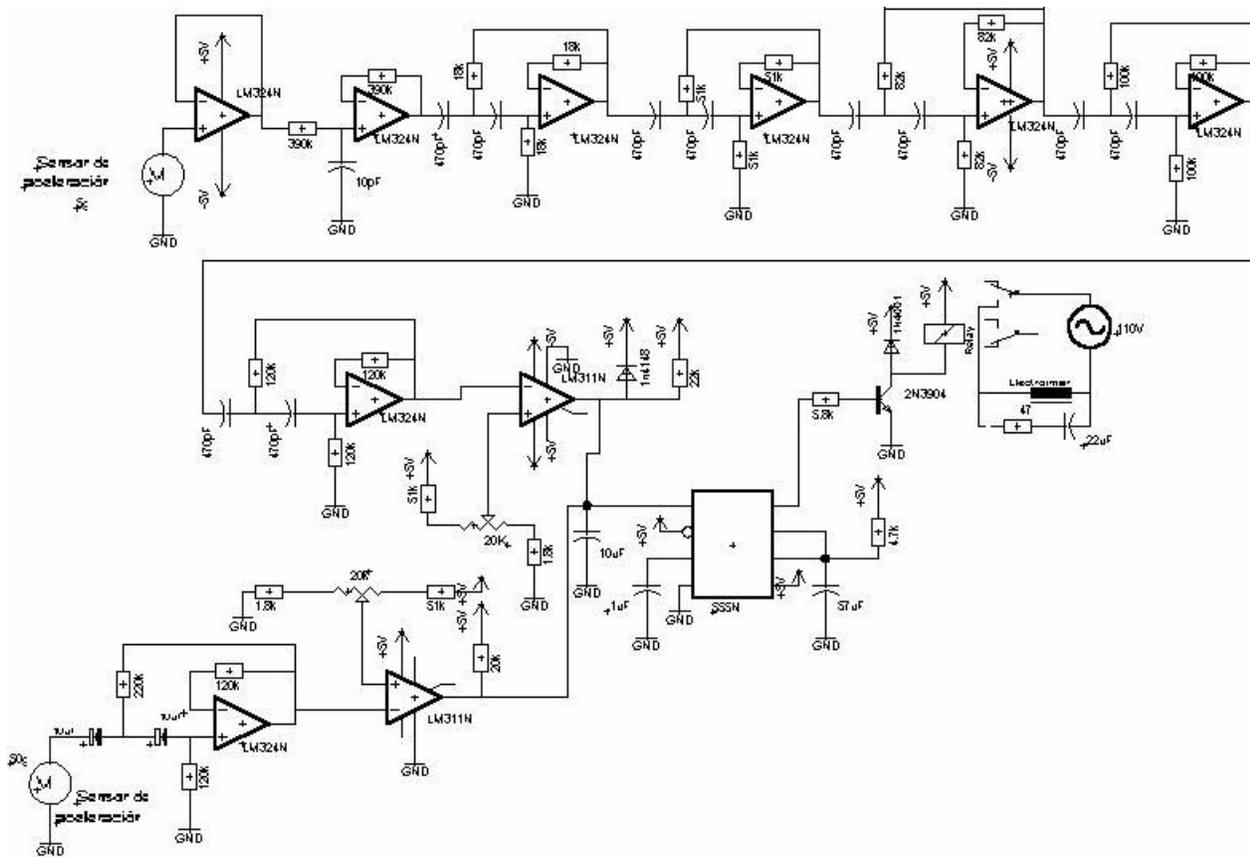


Figura 12. Circuito para la detección con filtro Butterworth pasa-altos y etapa para el control de la separación del objeto duro en el prototipo PESELOD III, diseñado para la protección de despulpadoras de café.

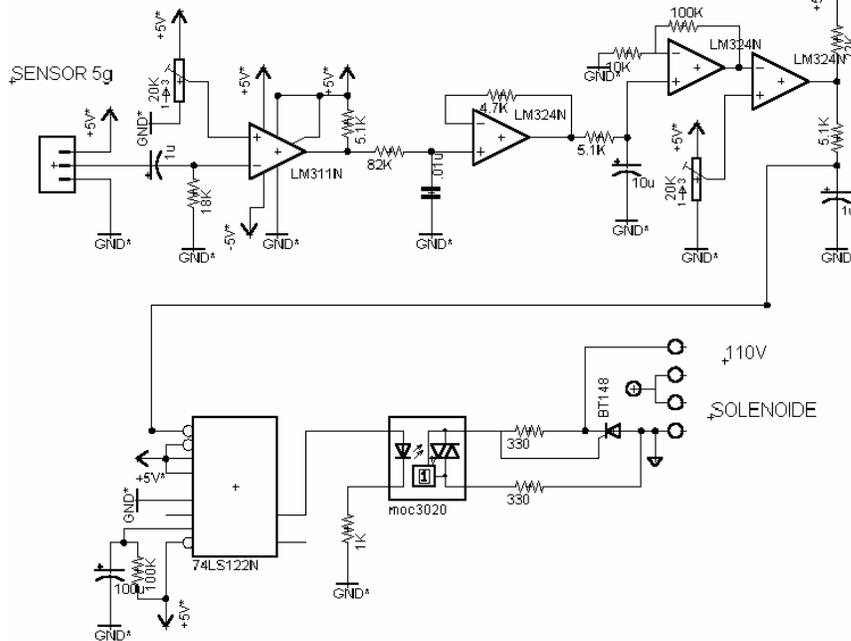


Figura 13. Circuito para la detección con saturación y etapa para el control de la separación del objeto duro en el prototipo PESELOD III, diseñado para la protección de despulpadoras de café.

El modelo PESELOD II fue instalado en el beneficiadero experimental de CENICAFE y se sometió a pruebas haciendo pasar a través de éste y en repetidas ocasiones 30 kg de café cereza con las condiciones normales de llegada del campo, sin ningún proceso de clasificación y sin tener en cuenta la variedad o tiempo de cosechado. A este se le mezclaba una cantidad aproximada de cinco (5) objetos duros (piedras) de diferentes tamaños. La

Tabla 2 muestra que la efectividad resultante fue del 90,6%, presentándose un 8,9% del total de disparos que fueron falsos. También el 4,3% de los objetos duros fueron detectados pero no desalojados, esto último explicado en una apertura lenta de la compuerta para esos casos.

Este prototipo podía ajustar su rendimiento entre 300 y 2.000 kg h⁻¹ de café cereza.

Tabla 2. Comportamiento del prototipo PESELOD II en la detección de objetos duros presentes en una despulpadora de café.

Número de objetos duros	Numero total de disparos	Numero total de desalojos	Falsos disparos
438	457	397	41
Objetos duros que pasaron	Efectividad	Café procesado	
41	90,6%	Aprox 2600 kg	

Por las condiciones de construcción del prototipo PESELOD III, el cono no se encuentra bien aislado de las vibraciones provenientes del resto del BECOLSUB y se dificulta el procedimiento de calibración de la detección. Otra fuente de gran ruido lo constituyó el generado por los limpiadores internos del prototipo en su rozamiento con la cara interna del cono. Para una de las pruebas se utilizaba 10 kg de café mezclados con cinco (5) objetos duros. Con 115 objetos duros, 105 ubicados en el recipiente para tal fin, lo que da como resultando una efectividad del 91,3%, mientras que solamente dos frutos fueron encontrados acompañando la masa separada (dos falsos positivos).

Todos los prototipos fueron sensibles a pequeños cambios en la posición de la placa o elementos unidos a ellos. También la efectividad se veía afectada por las condiciones del café.

Se recomienda para próximas investigaciones, realizar estudios físicos de vibraciones en placas para diseñar de forma más precisa las características que permitan una mejor detección, además de estudiar otros parámetros además de amplitudes y frecuencias generadas para aumentar la efectividad y estabilidad en las detecciones.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos al personal del taller y beneficiadero de la disciplina de Ingeniería Agrícola de Cenicafé, por su colaboración en la construcción y montaje del prototipo desarrollado, así como en la realización de las pruebas experimentales, también, al doctor Gonzalo Roa M., y demás personal técnico de la disciplina de Ingeniería Agrícola por todos sus aportes.

BIBLIOGRAFIA

Agudelo, D. 2000. Desarrollo de un sistema para la protección de la despulpadora de café contra objetos duros. Trabajo de grado de Ingeniero Electrónico. Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Universidad Nacional de Colombia. Manizales. 90 p.

Cyril, M.H. 1996. Shock and Vibration Handbook. 4a edition. McGraw-Hill. 1456 p.

Doebelin, E.O. 1990. Measurement system: Applications and design. 4 ed. McGrawGill. 960 p.

Rintala, K., J. Paarma, M. Sissala, I. Valkonen and P. Kokko. 1992. Patente US5082118. In: Device for separating hard objects, such as stones, from a stream of wood. <http://www.freepatentsonline.com/4955484.html>; consulta: abril 2007.

Roa, M.G., T.C.E. Oliveros, G.J. Alvarez, G.C.A. Ramírez, U.J.R. Sanz, A.M.T. Dávila y H.J.R. Alvarez. 1996. Beneficio ecológico del café, una opción rentable. Cenicafé, Chinchiná. 83 p.

Robert, F.C. F.D. Frederick, y R. Batista. 1998. Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales. 5 ed. Prentice Hall, Mexico. 518 p.

Tyrrell, W.T. 1993. Theory of vibrations with applications. 4 ed. Prentice Hall, New Jersey. 546 p.