

Development of a Prototype for Characterization of Foamed Asphalt using Raspberry Pi

Javier Soto Vargas, PhD, Sandra Campagnoli, Ing, Enrique Estupiñan, M.Sc., and Dairo Puentes, Ing
Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Colombia,
{javier.soto, sandra.campagnoli, enrique.estupinan, dairo.puentes}@escuelaing.edu.co

Abstract- This document presents the software development of a data capture and recording system for the characterization of foamed asphalt in laboratory tests. The system was developed using a reduced board computer, specifically the Raspberry Pi 2 Model B. The software prototype includes a graphical interface that allows the management and interaction with the user in charge of carrying out the tests. The system allows generating calibration files for various distance sensors; it also includes the data capture system for the tests and the graphical data visualization system for further analysis.

Keywords— Foamed asphalt, Raspberry Pi, expansion ratio, half-life, distance sensors, MonoDevelop.

Resumen- Este documento presenta el desarrollo de un software para un sistema de captura y registro de datos en ensayos de caracterización de espumas de asfaltos. El sistema fue desarrollado usando un computador de placa reducida, específicamente la tarjeta Raspberry Pi 2 Modelo B. El prototipo de software incluye una interfaz gráfica que permite la gestión e interacción con el usuario encargado de realizar los ensayos, y permite generar archivos de calibración para diversos sensores de distancia. Adicionalmente, incluye los sistemas de captura de datos para los ensayos y de visualización gráfica de datos para su posterior análisis.

Palabras clave— Espumas de asfalto, Raspberry Pi, relación de expansión, vida media, sensores de distancia, MonoDevelop.

I. INTRODUCCIÓN

Una espuma asfáltica es un material formado básicamente por vapor de agua y cemento asfáltico a alta temperatura; el vapor de agua contribuye a generar burbujas que se expanden hasta alcanzar la superficie del material. En la medida en que la espuma se enfría el tamaño de las burbujas formadas se hace menor, debido, entre otros factores a la disminución de la temperatura que aumenta la viscosidad del cemento asfáltico, y a la disminución del vapor de agua en la espuma.

Existen diversos parámetros para caracterizar la espuma de asfalto, entre ellos se tiene el índice de espumado (Foam Index), el cual corresponde al área bajo la curva de colapso [1], también se tiene la distribución del tamaño de las burbujas (Bubble Size Distribution - BSD) [2]. Otros parámetros usados para caracterizar la espuma son el volumen máximo que alcanza durante la expansión y el tiempo que le toma a la muestra expandirse y colapsar.

Para caracterizar las espumas de asfalto, normalmente se emplean dos parámetros: la Relación de Expansión máxima



Fig. 1. Método de la varilla graduada para medir curvas de colapso en asfalto espumado.

(ER - por sus siglas en inglés), que es la razón entre el volumen máximo de la espuma y el volumen del cemento asfáltico sin el agua o el vapor de agua, este parámetro se suele dar en términos de altura, ya que el diámetro del recipiente donde se realizan las descargas es constante. El otro parámetro es la vida media (HL - por sus siglas en inglés) que corresponde al tiempo transcurrido entre el momento en que la espuma alcanza el máximo volumen y el instante en que ha colapsado hasta la mitad del volumen máximo [3].

En las pruebas de laboratorio (ver Fig. 1) los parámetros ER y HL son estimados usando una varilla graduada y un cronómetro que los hace sensibles a la subjetividad del operario que realiza las medidas. Mediante técnicas de visión artificial se quiere estimar la distribución en el tiempo de las burbujas, así como los parámetros ER y HL de una espuma asfáltica, midiendo la altura de la espuma constantemente a

medida que se va formando y luego colapsando, mejorando así su caracterización.

En la ingeniería de pavimentos en la última década, la aplicación de los asfaltos espumados para el reciclaje de pavimentos y para la fabricación de mezclas asfálticas tibias ha presentado un crecimiento notable. Así lo muestran las estadísticas de las asociaciones de pavimentos asfálticos de Estados Unidos de América (NAPA) [4] y de Europa (EAPA) [5]. Un buen desempeño de los materiales resultantes donde se aplican las espumas de asfalto, es claramente dependiente, entre otros factores, de la calidad de las mismas, por lo que se hace necesaria su caracterización con parámetros adicionales como, por ejemplo, la curva de colapso que complementa la relación de expansión (ER) y la vida media (HL), tradicionalmente usados para este propósito. Recientemente, se ha trabajado con medidores de distancia laser para obtener la curva de colapso de una espuma de asfalto [6], sin embargo, esta herramienta no se ha aplicado durante el proceso de producción de la espuma, por lo que se consideró de utilidad implementar un sistema, como el que se presenta en este estudio, con el que de manera sincrónica sea posible determinar todo el proceso de formación y colapso de la espuma de asfalto.

El presente documento describe principalmente el sistema software desarrollado que permitirá generar un registro digital de la curva de colapso del asfalto espumado durante todo el ensayo. Esto consiste en la descarga del asfalto, el incremento de altura de la espuma y el decaimiento de la misma hasta su estabilización final. Esta pretende ser una técnica de medida no invasiva, que permita a los ingenieros especializados adquirir de manera precisa, no solamente parámetros como ER y HL, sino también la curva de colapso y así caracterizar las espumas de los asfaltos según su criterio y experiencia. El prototipo de software fue probado en diversas pruebas de escritorio, así como en el laboratorio con sensores infrarrojos y ultrasónicos.

II. ENSAYOS SOBRE ESPUMAS DE ASFALTO

Las técnicas de ensayo para determinar los parámetros de las espumas asfálticas usadas actualmente son simples y requieren poco entrenamiento por parte de los operarios. Sin embargo, tienen un alto componente subjetivo, son poco precisas y requieren de la participación y coordinación en dos tareas diferentes, observar la muestra y registrar el tiempo transcurrido en un cronómetro. Adicionalmente permiten encontrar solamente dos puntos de la curva de colapso, estos son la máxima expansión de la espuma y la vida media. Estos dos puntos de la curva, caracterizan muy regularmente el asfalto espumado. Una mejora en esta medida estaría dada por el uso de un sistema que permitiera obtener más puntos en la curva.

La representación gráfica de la variación de la ER en el tiempo, se conoce como la curva de colapso o curva de decaimiento de la espuma. Diferentes modelos de comportamiento de las espumas de asfalto en el tiempo, se

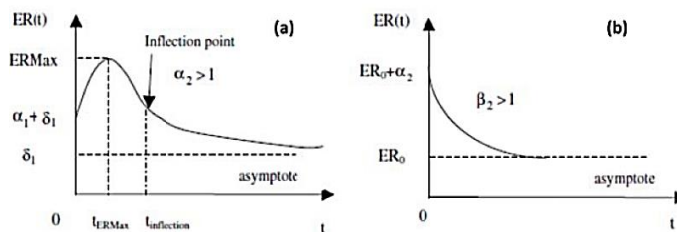


Fig. 2. Curvas típicas de colapso de las espumas, (a) función potencial y (b) función exponencial [1].

encuentran en la literatura técnica; algunos de los modelos propuestos siguen una función exponencial, otros se aproximan a una función de tipo potencial [7]. La Fig. 2 (a) presenta una curva típica de colapso de las espumas de asfalto, en esta se ve el momento posterior a la descarga, donde la espuma crece hasta un punto máximo y posteriormente decrece hasta llegar a un valor estable.

Para mejorar la caracterización del asfalto espumado, en [8] se han propuesto algunos parámetros como: (1) Velocidad de colapso de la espuma, que consiste en aproximar la curva con una Función exponencial decreciente, (2) distribución del tamaño de las burbujas en la muestra, que consiste en estimar la distribución del tamaño de las burbujas y su comportamiento en la medida en que la muestra se enfría, y (3) medición de la viscosidad de la muestra.

Diversos grupos han trabajado para establecer las mejores técnicas para estimar estos parámetros, en alguno de ellos se realiza una evaluación de técnicas que van desde el ultrasonido pasando por cámaras e incluyendo el láser [9], en cuyo trabajo se ratifican problemas básicos de la medida de ultrasonido, por la localización de la muestra en un balde que causa rebotes en la señal generado detecciones erróneas en la altura. En cuanto a la detección de burbujas por medio de la cámara se presentan resultados prometedores, de la misma manera con el uso del láser para estimar la altura.

III. SISTEMA DE PROCESAMIENTO DE IMÁGENES PARA EVALUAR ALTURA Y DISTRIBUCIÓN DE BURBUJAS

En el marco del proyecto, que trata sobre la exploración de métodos de caracterización de espumas de asfalto, se están trabajando diferentes métodos, uno de ellos utiliza procesamiento de imágenes para determinar la altura de la espuma y la distribución de burbujas en la superficie. Este método se discutirá brevemente en esta sección, para más detalles consulte la referencia [10].

A. Estimación de la Altura de la Espuma

Para la estimación de altura se realizan tres etapas consecutivamente: calibración, toma de imágenes y estimación de la altura. El proceso de calibración de la cámara permite establecer las matrices de transformación de la imagen que se utiliza en cada cuadro de video (Fig. 3). Este se usa para estimar la distancia focal, punto principal, inclinación y el tamaño de pixel.

Antes del comienzo del ensayo, se realiza el montaje de la cámara, estableciendo la distancia del suelo y ajustando la posición para que el sensor de la cámara este paralelo a la superficie del suelo. Se realiza una toma para determinar la circunferencia en el borde superior y en el inferior (Fig. 3).

Para realizar la toma de las imágenes se utilizó una cámara con resolución 1280x720 pixeles y capaz de tomar 24 cuadros por segundo, ubicada en un trípode a una altura de 0.80 m del recipiente en el cual se vierte la mezcla asfáltica y enfocando el centro del mismo, no se usa ninguna iluminación adicional a la del laboratorio ni tampoco luz estructurada.

Para el cálculo de la altura, el método usado asume que el plano en el que se encuentra el dispositivo de captura es paralelo a la circunferencia del balde y teniendo en cuenta que a cualquier distancia que se encuentre la espuma dentro del balde, el diámetro de este es constante, entonces lo que cambia es la relación entre el diámetro del balde medido en pixeles (D_{pix}) y el diámetro medido en centímetros (D_{cm}), y se establece la relación:

$$P2cm = \frac{D_{pixeles}}{D_{cm}}$$

Experimentalmente se encontró que la relación entre la altura del asfalto y la relación puede ser aproximada linealmente de la siguiente manera:

$$h = m * P2cm + b$$

$$m = \frac{h_{max}}{P2cm_{h_{max}} - P2cm_{h_{fondo}}}$$

$$b = h_{max} * P2cm_{h_{max}} * m$$

Donde h es la altura de la espuma respecto al fondo del balde; $P2cm$ es la relación de pixeles y centímetros a cualquier altura; h_{max} es la altura del balde; $P2cm_{h_{max}}$: es la relación de pixeles y centímetros a la altura del balde; $P2cm_{h_{fondo}}$ es la relación de pixeles y centímetros en el fondo del balde.

De esta manera al encontrar los diámetros de la espuma en cualquier instante de tiempo, se puede establecer la altura a la que se encontraba. Para encontrar los diámetros se transforma la imagen a escala de grises y luego se realiza la extracción de bordes para finalmente realizar la segmentación mediante el método de crecimiento de regiones, con un elemento estructurante circular.

A partir de los datos de altura obtenidos se estiman la expansión máxima que es equivalente a la altura máxima y el tiempo de vida media que se encuentra cuando ocurre la mitad de la expansión máxima.

En la Fig. 4 se ilustran los resultados obtenidos y la aproximación de una función exponencial a los datos encontrados para un ensayo de asfalto con temperatura 140 °C y un contenido de agua de 2.5%.

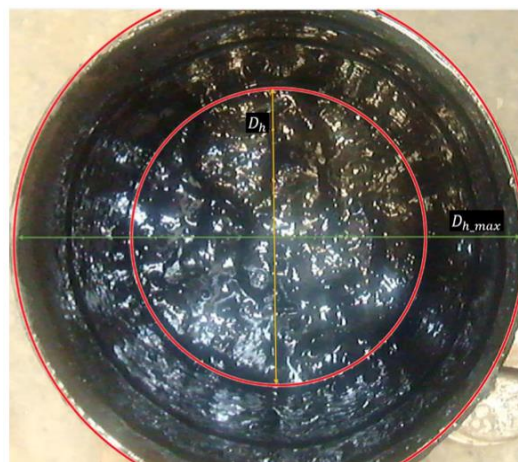


Fig. 3. Definición de diámetros de fondo y del borde superior del balde.

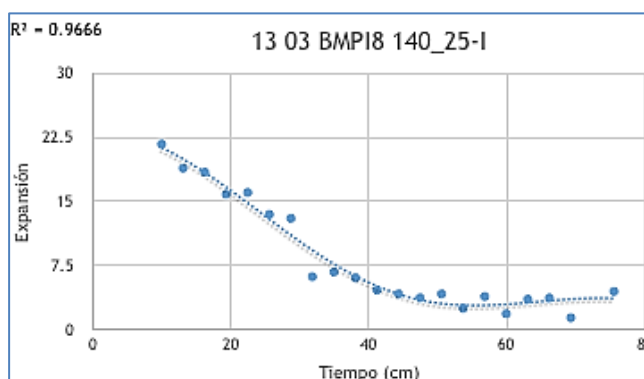


Fig. 4. Estimación de Altura.

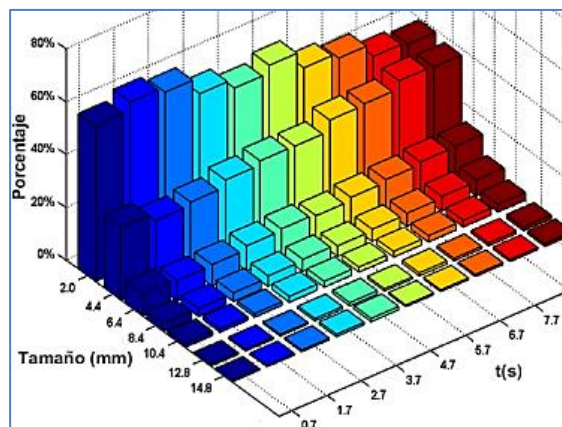


Fig. 5. Evolución de las Burbujas

B. Estimación de Burbujas en la Superficie la Espuma

Como método de clasificación de las burbujas de acuerdo a su tamaño se usa una técnica de conteo de frecuencia de aparición del rango de tamaños especificados (2 a 20 cm), eliminando conteos inferiores a 100 [10].

Para obtener esta información de una imagen se requiere realizar distintos pasos: (1) transformación de la imagen de RGB, a una imagen en escala de grises. (2) Adaptación de histograma que permite que las partes oscuras se vean más claras y las que están muy blancas, se oscurezcan un poco. (3) Binarización de la imagen de manera que solo existan dos valores, negro “0” y blanco “255”, en toda la imagen. (4) Extracción de los bordes usando una mezcla de realce de borde con filtrado convencionales *Canny* y el procedimiento conocido como erosión. (5) Englobar en un rectángulo los círculos encontrados de manera que se obtenga: el diámetro, la excentricidad y el área de cada burbuja encontrada.

Se eliminan las áreas que están dentro del rango de pixeles que se consideran error, en este caso es un rectángulo de 10x10 pixeles. Las burbujas se categorizan y luego se realiza una gráfica de la evolución de la distribución de las burbujas, como se muestra en la Fig. 5.

Finalmente se calcula las curvas acumuladas del porcentaje de estimación de cada tamaño de burbujas obteniendo un estimado de qué condiciones generan las burbujas más pequeñas como se muestra en la Fig. 6. La referencia [10] presenta detalles adicionales del sistema orientado al procesamiento de imágenes.

IV. ARQUITECTURA DE HARDWARE

Para el desarrollo del prototipo que se presenta en este documento, teniendo en cuenta las limitaciones de presupuesto con el que se contaba para inversión en el hardware, se utilizó una tarjeta Raspberry Pi 2 Modelo B, que es un computador de placa reducida relativamente económico (alrededor de \$ 40 USD), con capacidad suficiente para la ejecución de un sistema operativo, que para este caso se utilizó el Raspbian-Jessi, que es una distribución libre del sistema operativo GNU/Linux, basado en el proyecto Debian [11].

Esta tarjeta cuenta con un microprocesador Broadcom ARM7 de 4 núcleos a 900 MHz, y una GPU Broadcom VideoCore IV a 250 MHz. Como características relevantes para el presente diseño, la tarjeta cuenta con capacidad de memoria RAM de 1 GB, 4 puertos USB, puerto de red Ethernet, puerto de comunicación serial SPI y un conector para entradas y salidas digitales (GPIO) de 40 pines.

Debido a que la tarjeta no cuenta con entradas análogas, se utilizó un conversor análogo-digital (ADC) de referencia MCP3008, el cual tiene una resolución de 10-bits y cuenta con interfaz de comunicación SPI. La Fig. 7 presenta un diagrama de bloques general del prototipo implementado.

A. Sensores para pruebas del prototipo

A pesar de que el diseño del sistema está basado principalmente en el desarrollo de la aplicación software, que permita caracterizar las espumas de asfalto sin importar el sensor de distancia utilizado, se realizaron diversas pruebas exploratorias en laboratorio con diversos tipos de sensores, principalmente ultrasónicos e infrarrojos, los cuales se describirán brevemente a continuación. Vale la pena

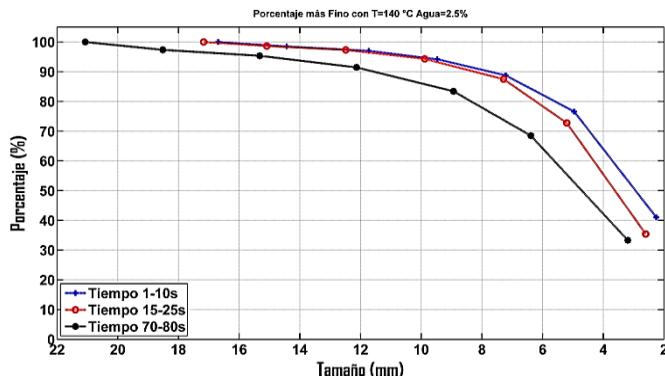


Fig. 6. Porcentaje de Burbujas más Fina.

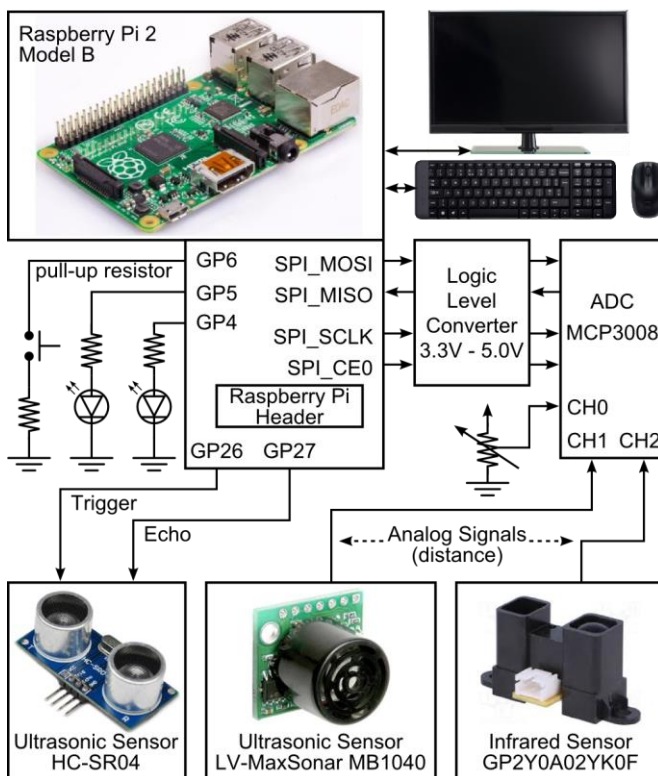


Fig. 7. Diagrama de bloques general del sistema. Sensores utilizados para pruebas

mencionar que el prototipo también incluye un potenciómetro que permite emular manualmente el comportamiento de un sensor de distancia análogo.

1) *Sensor de ultrasonido HC-SR04*: Es un sensor que puede sentir y transmitir la distancia a un objeto. Tienen dos transductores, básicamente, un altavoz y un micrófono. Ofrece detección sin contacto (remoto) con precisión y lecturas estables en un formato fácil de usar. El funcionamiento no se ve afectado por la luz solar o el material negro como telémetros ópticos (aunque acústicamente materiales suaves como telas pueden ser difíciles de detectar) [12].

2) *El sensor de ultrasonido MB1040 LV-MaxSona,-EZ4:* Es el sensor de ancho de haz más estrecho ofrecido por MaxBotix. Este sensor es también el menos sensible a los objetos laterales ofrecidos en la línea de sensores LV-MaxSonar-EZ. Este sensor es una buena opción cuando sólo los objetos más grandes necesitan ser detectados. El sensor tiene salida serial, por señal PWM y analógica, siendo esta última la utilizada en la implementación del prototipo [13].

3) *Sensor Infrarrojo GP2Y0A02YK0F:* Este sensor permite realizar mediciones de distancia, está compuesto por una combinación integrada de PSD (position sensitive detector), IRED (infrared emitting diode) y un circuito de procesamiento de señales. La variedad de la reflectividad del objeto, la temperatura ambiental y la duración de funcionamiento no se influyen fácilmente a la detección de la distancia debido a que adopta el método de triangulación. Este dispositivo emite un voltaje análogo correspondiente a la distancia de detección. Por lo que este sensor también puede utilizarse como sensor de proximidad [14].

V. DISEÑO SOFTWARE DEL PROTOTIPO

El prototipo de software fue desarrollado en dos etapas. El primer prototipo del sistema fue implementado en Python, mientras que el segundo prototipo, del que se trata principalmente en este documento, fue desarrollado usando el proyecto de código abierto MONO, que es un grupo de herramientas libres, basadas en GNU/Linux y compatibles con el *framework* de Windows .NET.

A. Antecedentes del desarrollo software – Primer Prototipo

Como se mencionó anteriormente, el primer prototipo fue desarrollado completamente en Python. El sistema tenía conectado un sensor infrarrojo con un rango de 15 a 100 cm. El sensor infrarrojo apunta a una sección del recipiente donde se realiza la descarga (ver Fig. 8). El sistema en su etapa inicial, estuvo compuesto de tres subsistemas: el sistema de calibración, el de registro de valores, y el de procesamiento y presentación de resultados.

El sistema de calibración se realiza previamente a los ensayos, y consiste como su nombre lo indica, en preparar al sistema para transformar los valores analógicos arrojados por el sensor, en un valor que indique la distancia de la espuma con respecto al sensor. Para esta calibración, se realizó el promedio de 500 capturas de valores por cada medida (15 a 100 cm), dando como resultado un archivo de calibración que será usado en las etapas siguientes.

El sistema de registro (o captura) de valores, consiste en el almacenamiento de las medidas de distancia y tiempo durante un ensayo. En este sistema por cada valor almacenado, se toma el promedio de cinco capturas, tomando la marca de tiempo en la tercera de ellas. El resultado final es la captura de aproximadamente 20 muestras por segundo, y la generación de un archivo que incluye los datos de distancia y tiempo de muestra.



Fig. 8. Montaje del sensor infrarrojo en ensayo de asfalto espumado.

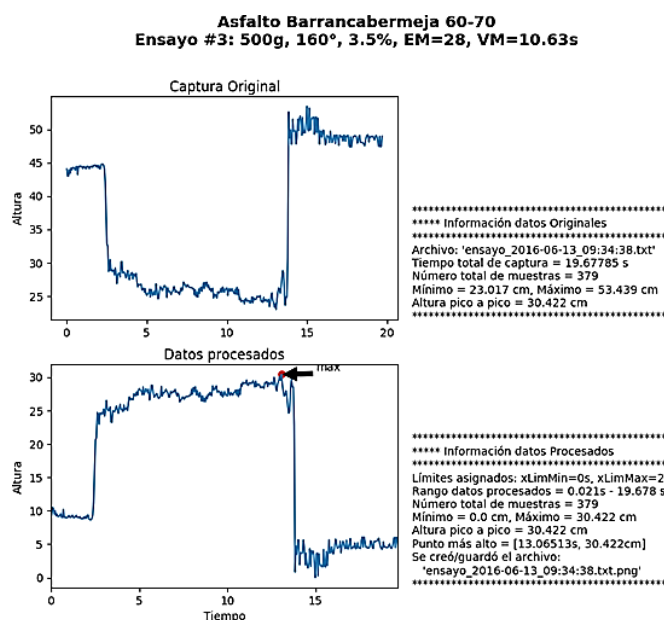


Fig. 9. Generación de graficas de resultados basados en la captura original y datos procesados.

Finalmente el sistema de procesamiento y presentación de resultados, lee los datos obtenidos en el proceso de captura, y hace un tratamiento que consiste en invertir los datos, para que la gráfica se vea ascendente (de manera similar al ascenso de la espuma). Esta primera versión presenta una gráfica con el total de los valores capturados, y una gráfica con secciones limitadas, donde se establecen los datos de interés, adicionalmente presenta el punto máximo, y otros datos que dan alguna información para el análisis posterior (ver Fig. 9).

B. Consideraciones Generales – Prototipo

El primer prototipo descrito en la sección anterior, tenía el inconveniente de que debía ser ejecutado por consola, y adicionalmente para la sección de datos procesados, debían realizarse ajustes manuales con criterios especiales relacionados a los datos leídos por los sensores, lo que dificulta su gestión por los operarios que normalmente llevan a cabo los ensayos. Por lo tanto, basados en esa primera experiencia, se rediseñó el sistema para que fuera más amigable y de fácil control por parte de los usuarios.

Para acelerar el proceso de diseño, parte del desarrollo fue realizado en un computador de escritorio con sistema operativo Ubuntu, y las pruebas funcionales de lectura de sensores se desarrollaron directamente sobre la tarjeta Raspberry Pi. El prototipo presentado a lo largo de este documento fue desarrollado para la misma tarjeta Raspberry Pi del primer prototipo, pero usando el lenguaje de programación C# sobre el proyecto MONO como marco de trabajo. Adicionalmente se utilizó la herramienta *MonoDevelop* como entorno integrado de desarrollo para la generación de una aplicación de escritorio intuitiva, potente y fácilmente gestionable por cualquier usuario con conocimientos de este tipo de ensayos. La Fig. 10 presenta una fotografía del prototipo implementado.

En la Fig. 11 y Fig. 12 se presenta una vista general de la máquina en la que se produce la espuma de asfalto, junto con el mecanismo propuesto que incluye los sensores de prueba del sistema.

VI. SISTEMA DE CALIBRACIÓN

El sistema de calibración tiene como objetivo principal la generación de archivos de calibración. Estos archivos serán usados durante un ensayo, para transformar el valor leído por el sensor, en un dato relacionado con la distancia medida. La razón principal de la necesidad de dicho archivo de calibración, es que algunos de los sensores usados en el prototipo no proveen directamente valores de distancia, algunos son sensores análogos que proveen un valor de voltaje (típicamente entre 0 y 5 V) que es directa o indirectamente proporcional a la distancia medida, adicionalmente la relación entre los valores de distancia contra voltaje no es lineal.

El archivo de calibración se creará una sola vez por cada tipo de sensor que se desee trabajar en el sistema. Vale la pena destacar que es necesario implementar un controlador en software, mediante un objeto específicamente desarrollado para este propósito, que a su vez está estructurado mediante una interfaz en el diseño de software. El formato del archivo creado corresponde a un listado de datos separados por un carácter especial (;), que contiene el valor de voltaje esperado por cada valor de distancia dentro del rango configurado.

En la Fig. 13 se puede ver una captura de pantalla del panel de Calibración. A continuación se describen las cuatro

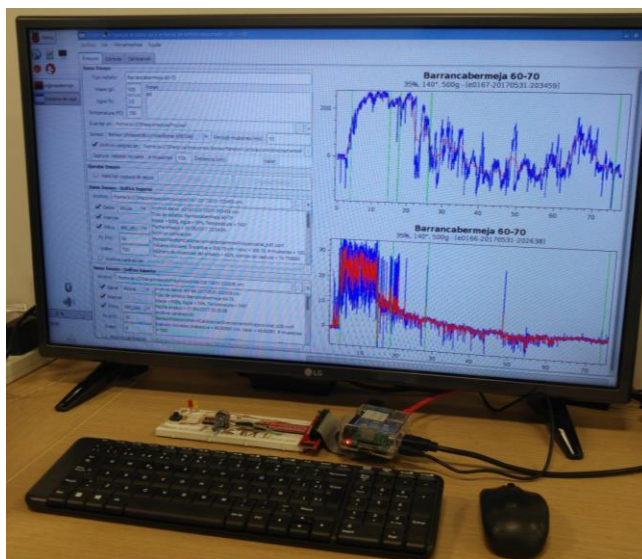


Fig. 10. Prototipo de hardware y software del sistema de desarrollo con computador de placa reducida (tarjeta Raspberry Pi) para caracterización de espumas de asfalto.



Fig. 11. Vista general de la máquina de ensayos de asfalto con el prototipo físico con sensores del sistema de caracterización de ensayos.



Fig. 12. Vista de perfil y de los sensores del sistema, apuntando al sitio de descarga del asfalto, dentro del balde.

secciones básicas presentadas en este panel con sus respectivas características.

A. Configuración

El panel de configuración permite establecer las configuraciones generales para la generación del archivo de calibración, por lo que incluye controles que permiten seleccionar o ejecutar las siguientes acciones:

- Selección del sensor para el cual se va a generar el archivo de calibración.
- Selección del número de muestras a tomar por cada valor de distancia. El sistema calculará el promedio de las muestras tomadas con el fin de obtener un valor más preciso.
- Período de muestreo en milisegundos. Este parámetro debe tener en cuenta el tiempo de respuesta del sensor indicado por el fabricante.
- El sistema solicitará al usuario ubicar el sensor a una distancia determinada a partir del campo *Valor inicial* configurado, a partir de allí tomará una muestra según el valor de *Incremento*, y así sucesivamente hasta llegar al *Valor final*. Todas las medidas están dadas en centímetros.
- Dependiendo de las características eléctricas del sensor, la distribución de valores puede ser *directamente proporcional* o *indirectamente proporcional*.
- Lugar donde se almacenará el archivo de calibración que se creará. Hay dos opciones (botones adjuntos) que permiten modificar este campo, una permite buscar o modificar la carpeta donde se almacenará el archivo, y la otra permite crear un directorio nuevo.
- El sistema mostrará todos los datos de un archivo de calibración, así mismo muestra cuando alguno de los datos es incorrecto o no esperado (carácter *), según si la configuración establecida fue directa o indirectamente proporcional al momento de su creación.

B. Generar archivo de calibración

Esta sección presenta dos botones para controlar la generación del archivo de calibración. Uno de ellos es el control *Iniciar/Parar*, el cual como su nombre lo indica controla en inicio y fin de la generación del archivo de calibración. El otro es el botón *Registrar*; para lo cual el sistema solicitará ubicar el sensor a una distancia determinada y presionar este botón para iniciar la captura de datos.

C. Prueba de Funcionamiento

Esta sección permite realizar pruebas preliminares al sensor por medio de botón *Leer Sensor*, para establecer si la lectura es coherente, teniendo en cuenta el manual de funcionamiento del sensor. De manera similar está el botón *Leer Sensor (datos configuración)*, el cual permite realizar la misma acción pero teniendo en cuenta los datos de configuración, es decir que calcula el promedio del número

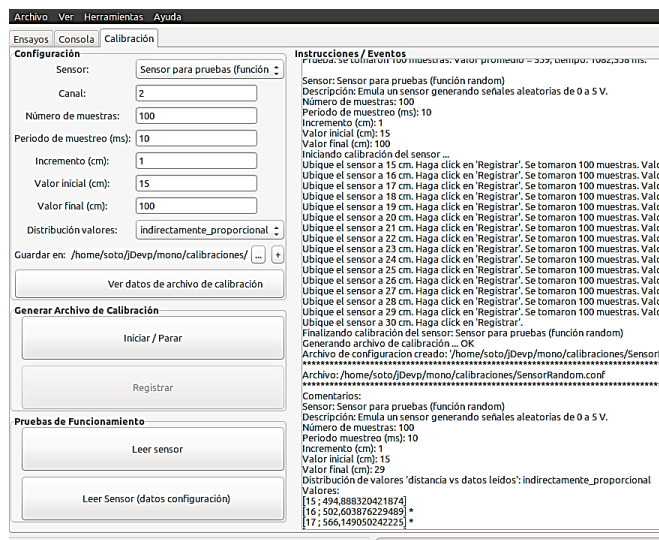


Fig. 13 Captura de pantalla del panel de calibración

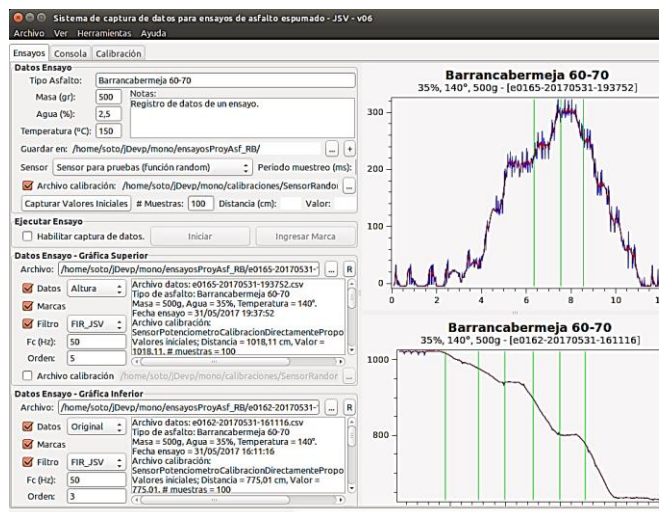


Fig. 14 Captura de pantalla del panel de captura y visualización de ensayos.

establecido de muestras, teniendo en cuenta el periodo de muestreo definido.

VII. SISTEMA DE CAPTURA Y VISUALIZACIÓN DE ENSAYOS

La Fig. 14 muestra una captura de pantalla del *Panel de Ensayos*. Este panel tiene varias secciones, una de ellas relacionada con la configuración de datos del ensayo y del sensor, otro relacionado con la ejecución del ensayo, y las demás relacionadas con la visualización de datos del último ensayo o ensayos anteriores. Estas secciones o funcionalidades se describen a continuación.

A. Datos de Ensayos

En la Fig. 15 se muestra el detalle de la sección *Datos Ensayo*, correspondiente al registro de datos y a la medición de distancia inicial, antes de la descarga.

En esta sección se ingresan valores de texto relacionados con la identificación de la muestra y parámetros del ensayo. Los campos que se muestran en esta sección son: Tipo Asfalto, Masa (g), Agua (%), Temperatura (°C) y notas según detalles específicos que quieran ser registrados en el momento del ensayo. Adicionalmente permite seleccionar o crear el directorio donde serán almacenados los resultados de los ensayos.

Esta sección también permite seleccionar el sensor que será usado para capturar los datos del ensayo, además de seleccionar el periodo de muestreo en milisegundos, el archivo de calibración del sensor (ya que puede haber más de uno), y por último, hay que tener en cuenta que se debe ejecutar la acción relacionada con el botón *Capturar Valores Iniciales* al menos una vez, para que se registre la distancia del fondo del balde en vacío antes de las descargas, la cual será la referencia para el cálculo de las alturas para construir las curvas de colapso correspondientes.

B. Ejecución de un Ensayo

Posterior a la configuración de los datos del ensayo y los detalles relacionados al sensor, en la sección denominada *Ejecutar Ensayo* (Fig. 16) se debe habilitar la casilla *Habilitar captura de datos*, la cual deshabilita todas las demás secciones de la interfaz gráfica, dejando al usuario únicamente las opciones de iniciar o detener un ensayo (botón *Iniciar*), y de ingresar marcas durante un ensayo (botón *Ingresar Marca*). Esta última opción, está estrechamente relacionada con la forma como se hacen actualmente los ensayos, es decir haciendo el registro manual de tiempos y marcas (o eventos), tales como cuando se registra la altura máxima o la vida media, según el criterio y la experiencia del operario que ejecuta el ensayo.

Cuando se inicia la ejecución del ensayo, según los parámetros configurados previamente, el sistema crea dinámicamente una lista de valores que contiene el tiempo, el dato leído por el sensor (convertido a distancia según el archivo de calibración) y las marcas que el operario ingrese manualmente, estas últimas basadas en los eventos relevantes al ensayo, tales como: inicio de la descarga, fin de descarga, altura máxima de la espuma, vida media, estabilización del asfalto y otras si las hubiere.

Cuando se considere oportuno, el operario detiene la captura de datos del ensayo, en ese momento el sistema espera la confirmación del usuario para generar los archivos relacionados, permitiendo modificar las notas asociadas al ensayo y el texto relacionado a las marcas (Fig. 17). El sistema genera dos archivos:

- Archivo XML “eXXXX-YYYYMMDD-HHmms.xml” con los datos de contexto y configuración del ensayo, la mayoría corresponde a los presentados en la sección *Datos de Ensayo*. Se incluye el archivo de calibración del sensor que será usado para la representación gráfica de los ensayos.

Fig. 15 Configuración de datos de un ensayo y distancia inicial.

Fig. 16. Controles para ejecución de ensayos.

Fig. 17. Ventana de confirmación para generación de archivos del ensayo.

- Archivo CSV “eXXXX-YYYYMMDD-HHmms.csv”, archivo de texto separado por punto y coma (;) que almacena en tres columnas los datos de tiempo, lectura directa del sensor (distancia) y las marcas realizadas por el usuario.

Donde XXXX corresponde a un número consecutivo que se incrementa cada vez que se generan archivos de nuevos ensayos. YYYYMMDD-HHmms corresponde al año, mes, día, horas minutos y segundos registrados por la Raspberry que realiza el ensayo.

C. Visualización de Ensayos

En el *Panel de Ensayos* previamente presentado (Fig. 14), se presentan secciones para configuración y visualización de dos gráficas (superior e inferior), en una de ellas (gráfica superior) se presentará siempre el último ensayo recién ejecutado de manera automática.

En la Fig. 18 se presenta el detalle de las opciones para el usuario relacionadas con las dos secciones disponibles para presentar gráficas, uno de ellos es el recuadro “*Datos Ensayo – Grafica Superior*”, y adicionalmente uno similar para la

gráfica inferior. El usuario tiene la opción de seleccionar el archivo XML del ensayo que desee visualizar. Una vez seleccionado el archivo, el usuario puede modificar dinámicamente opciones de visualización, de esta manera puede habilitar o deshabilitar la visualización de los *Datos*, en cuyo caso puede elegir si visualiza la variable *Original* (e.g. valores de voltaje), en *Distancia* (i.e. distancia del sensor al asfalto espumado), o en *Altura* (i.e. similar al de distancia, pero teniendo como referencia el fondo del balde vacío).

Adicionalmente puede habilitar o deshabilitar la visualización de *Marcas* y de la señal filtrada (opción *Filtro*). En este último puede seleccionar el tipo de filtro que desee (*IIR*, *FIR*), la frecuencia de corte $F_c(\text{Hz})$, y el *Orden* del filtro. También puede seleccionar el archivo de calibración, en caso de que no sea el mismo que utilizó en el momento del ensayo. También se presenta un recuadro de texto, donde se muestra toda la información del ensayo registrado, es decir, los datos genéricos configurados en la sección *Datos ensayo*, fecha y hora del ensayo, archivo de calibración usado, tiempo relativo entre marcas y otros.

La Fig. 18 presenta como ejemplo las opciones de configuración establecidas para la visualización de datos presentados en la Fig. 19. En el eje de coordenadas X tenemos el tiempo del ensayo en segundos, y en el eje de coordenadas Y tenemos centímetros. Note que la gráfica superior presenta los datos originales en *Distancia* (azul) desde el sensor al fondo del balde, así como la señal filtrada (rojo, filtro FIR, orden 10) y las marcas (líneas verticales -verde). Mientras que la gráfica inferior presenta las marcas y la señal filtrada (Filtro FIR, orden 50) en *Altura*, razón por la cual se presenta de forma invertida y con un rango de valores diferente en su coordenada Y, que en este caso tiene como punto de referencia el valor 0 (fondo del balde). Esta señal fue leída durante la ejecución del prototipo en un disparo real de asfalto espumado con un sensor de ultrasónico HC-SR04.

El sistema permite la exportación de las imágenes mostradas en las gráficas en formato PNG.

Para la generación de un archivo relacionado con un ensayo, es importante verificar el funcionamiento de los sensores, así como el previo alistamiento de la máquina de asfalto espumado.

VIII. CONCLUSIONES

Se diseñó e implementó una herramienta de software sobre el computador de placa reducida Raspberry Pi 2 Modelo B, que tiene la capacidad de registrar ensayos orientados a caracterizar espumas asfálticas, tema que es de interés para las ramas de la Ingeniería que tengan relación con asfaltos usados en pavimentos, pero también podría servir para la caracterización de espumas de otros tipos de materiales opacos. El sistema provee la funcionalidad de crear archivos de calibración para sensores cuya salida sea un nivel de voltaje analógico que represente la distancia medida a un objeto. Adicionalmente el sistema tiene la capacidad para configurar, ejecutar y visualizar ensayos de laboratorio sobre espumas de

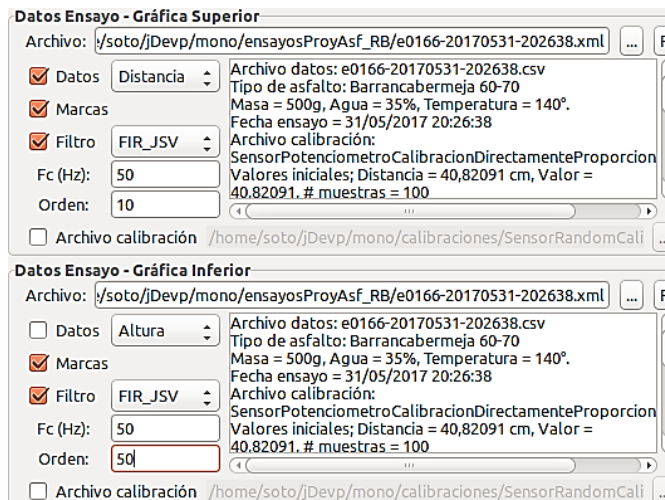


Fig. 18. Opciones de configuración para las gráficas.

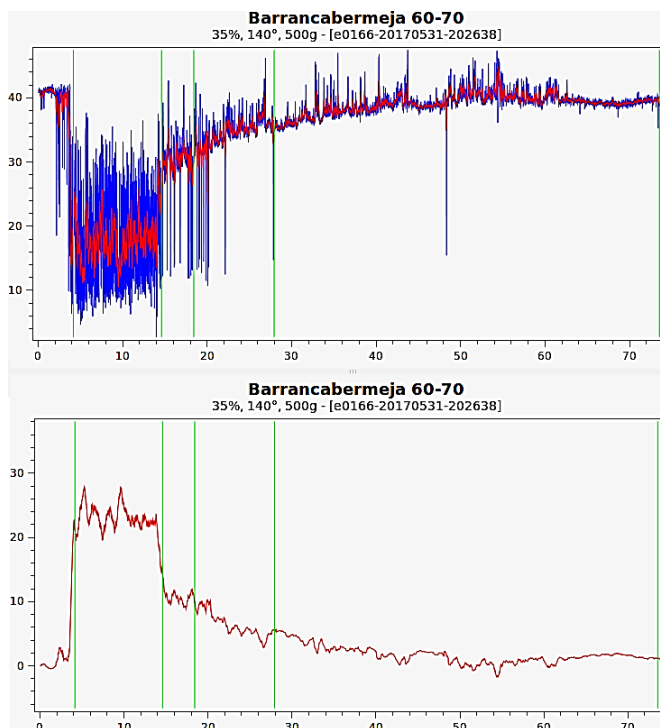


Fig. 19. Gráficas de una muestra realizada en laboratorio con sensor de ultrasonido HC-SR04. Arriba la señal original, la señal filtrada (filtro FIR, orden 10) y cinco marcas. Abajo la misma señal pero en altura y filtrada (filtro FIR, orden 50) y las marcas.

asfalto fabricadas en plantas de laboratorio, como la que se tiene en los laboratorios de Suelos y Pavimentos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

El sistema software para la caracterización de asfaltos espumados, en su etapa inicial, demuestra unos resultados satisfactorios, pero no definitivos. Las pruebas de escritorio realizadas presentan los resultados esperados, pero en el momento de hacer pruebas en la máquina, la lectura de los sensores no era muy precisa.

El sistema implementado presenta gráficas ilustrativas de cada ensayo, cuya forma es en algunos casos acorde con el comportamiento de la espuma, sin embargo algunos valores numéricos son dudosos. Se cree que existen diversos problemas que afectan la lectura de los sensores utilizados, por ejemplo la forma de dispersión del asfalto presentada por la boquilla de la máquina, o por invasiones espontáneas por parte del personal al campo de visión del sensor y por las características mismas de los sensores, los cuales podrían haber afectado las muestras. Hay que tener en cuenta que se utilizaron sensores de bajo coste orientadas a otro tipo de aplicaciones, típicamente de robótica móvil.

Otro problema puede estar relacionado con el comportamiento de los sensores con respecto a la espuma de asfalto: color de fondo, reflexión de luz, así como la luz ambiente, sombras en el momento del ensayo, dispersión y ecos de las señales de ultrasonido. Adicionalmente, uno de los problemas principales consiste en la suciedad acumulada a lo largo de la jornada de ensayos, debido principalmente a la expulsión de partículas propias del asfalto con la maquinaria usada. A pesar de que se contaba con una carcasa que protegía contra salpicaduras directas, las partículas que quedaban flotando en el ambiente se adhieren a los sensores, provocando medidas erróneas conforme se realizan ensayos y daños irreversibles, dada la naturaleza del material (bitumen).

Como trabajo futuro se recomienda adquirir sensores industriales robustos, con las características técnicas acordes al escenario en el que trabajarán. Estos deben soportar lavados con líquidos disolventes como gasolina o thinner, que tienen la capacidad de remover las partículas de asfalto que se adhieran a los dispositivos. Estos sensores suelen ser costosos, por lo que hay que tener en cuenta que la inversión puede ser significativa. Finalmente, desde el punto de vista de software, habría que adaptar el driver de lectura del sensor correspondiente.

AGRADECIMIENTOS

Este Proyecto fue financiado por la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, bajo el proyecto de convocatoria interna “Métodos de Caracterización de Asfalto Espumado” (2016-2017).

REFERENCIAS

[1] L. P. F. Abreu, J. R. M. Oliveira, H. M. R. D. Silva, D. Palha, y P. V. Fonseca, «Suitability of different foamed bitumens for warm mix asphalts with increasing recycling rates», *Constr. Build. Mater.*, vol. 142, pp. 342-353, 2017.

[2] H. I. Ozturk, «QUANTIFICATION OF QUALITY OF FOAMED WARM MIX ASPHALT BINDERS AND MIXTURES», Michigan State University, 2013.

[3] «Technical Guideline : Bitumen Stabilised Materials, A Guideline for the Design and Construction of Bitumen Emulsion and Foamed Bitumen Stabilised Materials.» Asphalt Academy., 2009.

[4] K. R. Hansen y A. Copeland, «Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage: 2014», nov. 2015.

[5] «The use of Warm Mix Asphalt». European Asphalt Pavement Association, jun-2014.

[6] J. Zhang, E. Arambula, D. Newcomb, A. Bhasin, y D. Little, «Effects of Asphalt Source, Asphalt Grade, and Inclusion of Additives on Asphalt Foaming Characteristics», *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board*, vol. 2505, pp. 76-83, ene. 2015.

[7] G. He y W. Wong, «Decay properties of the foamed bitumens», *Constr. Build. Mater.*, vol. 20, n.º 10, pp. 866-877, 2006.

[8] T. R. Board, National Academies of Sciences Engineering, y Medicine, *Properties of Foamed Asphalt for Warm Mix Asphalt Applications*. Washington, DC: The National Academies Press, 2015.

[9] Z. Arega, A. Bhasin, W. Li, D. Newcomb, y E. Arambula, «Characteristics of Asphalt Binders Foamed in the Laboratory to Produce Warm Mix Asphalt», *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 26, 2014.

[10] S. X. Campagnoli, E. Estupiñan, O. A. Parra, D. Puentes, A. Alvarez, y O. Reyes, «Aplicación del Procesamiento de Imágenes para Evaluar el Colapso y el Tamaño de Burbujas de Espumas de Asfalto», presentado en XIX CILA – Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto, Medellín, Colombia, 2017.

[11] «Raspberry Pi - Teach, Learn, and Make with Raspberry Pi», *Raspberry Pi*. [En línea]. Disponible en: <https://www.raspberrypi.org/>. [Accedido: 15-mar-2018].

[12] Elecfreaks, «Ultrasonic Ranging Module HC - SR04».

[13] «MB1040 LV-MaxSonar-EZ4», *MaxBotix Inc.*.

[14] ©SHARP Corporation, «Distance Measuring Sensor Unit Measuring distance: 20 to 150 cm Analog output type».