

## INSTRUMENTO ELECTRÓNICO PARA LA ESTIMACIÓN DEL ÍNDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL (IRI) CON BASE EN EL PERFILÓMETRO ESTÁTICO MERLIN

SERVANDO ÁLVAREZ<sup>1</sup>, RAFAEL RIVERO<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad Central de Venezuela. Escuela de Ingeniería Eléctrica. e-mail: servando.alvarez@gmail.com

<sup>2</sup>Universidad Central de Venezuela. Escuela de Ingeniería Eléctrica. e-mail: rafael.rivero@gmail.com

Recibido: junio 2010

Recibido en forma final revisado: mayo 2012

### RESUMEN

La medición del Índice de Rugosidad Internacional IRI mediante la utilización del perfilómetro estático MERLIN es un factor importante en la determinación de las condiciones de una carretera. La necesidad de la automatización de la toma de datos así como el cálculo del IRI en campo fijan los requerimientos principales para este proyecto. Para obtener las variaciones con respecto a la cuerda promedio se utilizan acelerómetros, midiendo el recorrido por la determinación del giro de la rueda del perfilómetro estático MERLIN. De las pruebas realizadas se obtuvieron resultados satisfactorios, reduciendo los costos de operación y el tiempo para el procesamiento de los datos.

*Palabras clave:* MERLIN, Índice de Rugosidad Internacional, IRI, Perfilómetro estático, Acelerómetro, Microcontrolador.

### ELECTRONIC INSTRUMENT FOR ESTIMATING INTERNATIONAL ROUGHNESS INDEX (IRI) BASED ON THE MERLIN PROFILOMETER

### ABSTRACT

Measuring the International Roughness Index IRI through the use of MERLIN profilometer is a key factor in determining road conditions. The need of data collection automation and the calculation of IRI into field data acquisition automation set the main requirements for this project. Variations are determined using accelerometers, and the distance is measured in terms of the rotation of the wheel of MERLIN profilometer. The results were satisfactory, reducing operating costs and the processing time.

*Keywords:* MERLIN, International Roughness Index, IRI, Profilometer static accelerometer, microcontroller.

### INTRODUCCIÓN

La calidad de la vialidad de una región determina el desarrollo productivo de la misma. Del estado de las vías de comunicación depende el costo del transporte para productos y personas.

Para la determinación de las condiciones de las vías, se utilizan diferentes métodos. Uno de los más utilizados es el Índice de Rugosidad Internacional (IRI). El cálculo del IRI presenta varias ventajas frente a otros índices como, por ejemplo, el PSR (Present Serviceability Rate) (Del Águila, P. 1999), entre ellas se puede mencionar que es estable en el tiempo, permite reproducir el perfil de la vía, es representativo de los efectos de la rugosidad, su escala comienza en cero, es compatible con cualquier tipo de perfilómetro, es coherente con las normas internacionales

establecidas y está relacionado con otras medidas de rugosidad. Por todo lo anterior el IRI es, hoy en día, una referencia para la evaluación de las condiciones de las vías, siendo recomendado por el Banco Mundial. Entre los distintos tipos de equipo para la determinación del IRI (ya sean bajo un principio de medición estático o dinámico), el perfilómetro estático MERLIN (Machine Evaluating Roughness using Low cost Instrumentation) destaca entre ellos, por su bajo costo de construcción y excelente desempeño. Razón por la cual el equipo electrónico desarrollado se ha elaborado instrumentando a este perfilómetro (Cundill, 1996).

### MERLIN

El perfilómetro estático MERLIN fue diseñado y desarrollado por el TRRL (Transport and Road Research

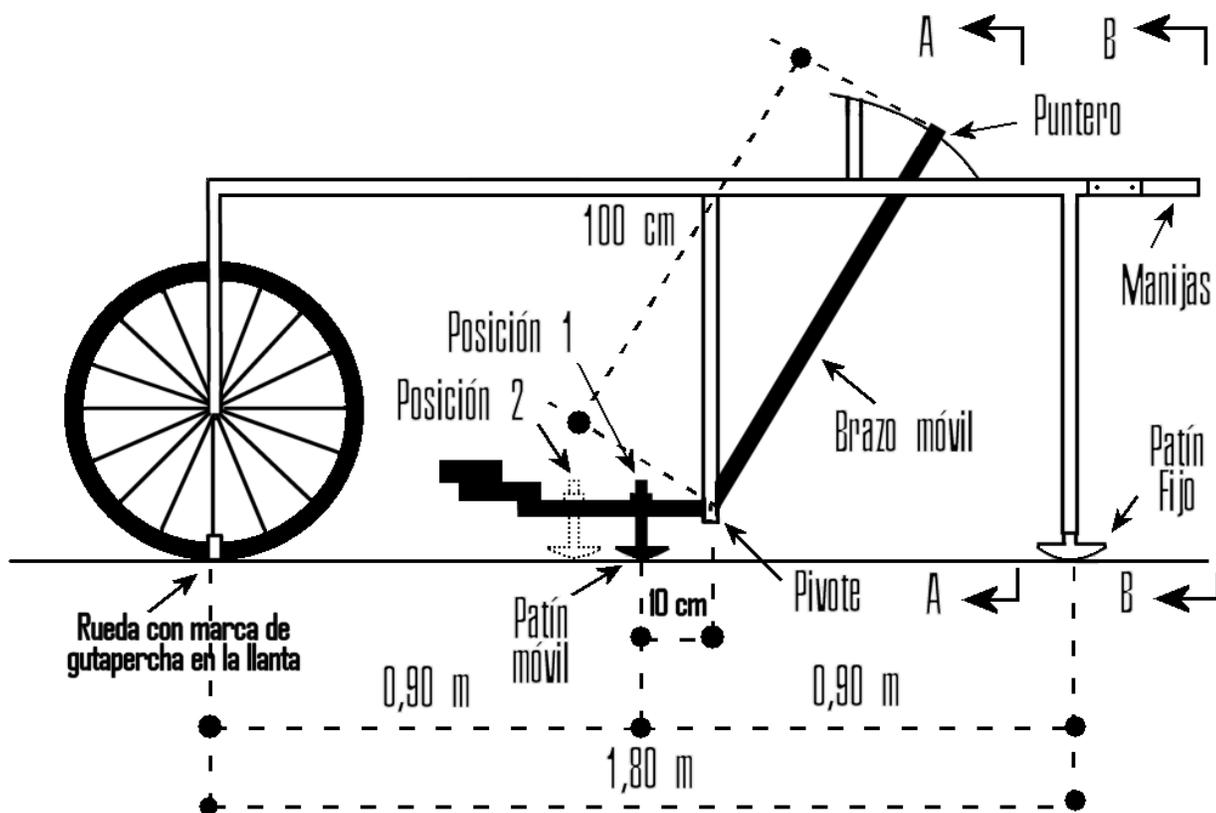


Figura 1. Diagrama del perfilómetro estático MERLIN

Laboratory), para evaluar las condiciones de rugosidad de un pavimento y ser utilizado en países en vías de desarrollo; resaltando las siguientes características: bajo costo, fácil construcción, calibración, uso y mantenimiento. Posee un notable desempeño por lo que se utiliza como patrón de calibración para otros sistemas de medición (Del Águila, 1999).

El perfilómetro MERLIN basa su funcionamiento en determinar la desviación del terreno frente a una cuerda definida entre 2 puntos ubicados antes y después del punto de medición. Para ello, el MERLIN utiliza un patín en contacto con el piso en el punto de medición, tal como se muestra en Figura 1, el cual permite encontrar la desviación del terreno respecto a la cuerda, definida por los puntos de apoyo del soporte posterior y la rueda anterior.

El patín se encuentra adosado a un brazo pivotado de tal forma que en el otro extremo se amplifica el desplazamiento 10 veces, de manera tal que pueda ser leído en una escala colocada sobre un cuadrante. Dicha escala está constituida, como indica la TRRL, por 50 graduaciones separadas en 5 mm. Así entonces, este arreglo puede resolver hasta 0,5 mm de desviación del terreno con un rango dinámico de 25 mm de amplitud y que contiene a la desviación cero.

Para determinar la rugosidad de pavimento se usa la

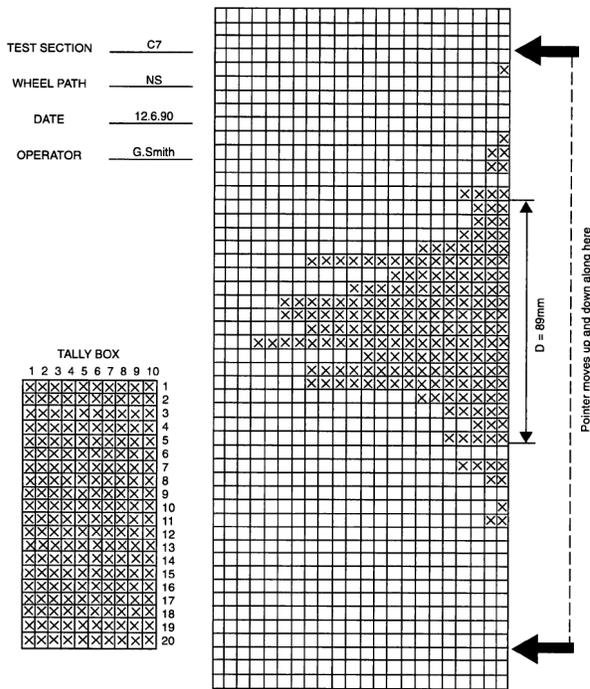
distribución de frecuencias de las desviaciones de la superficie respecto de una cuerda promedio establecida entre el punto de apoyo de la rueda y del pie posterior, los cuales están separados por 1,80 m.

Para obtener una medida significativa, el método del MERLIN requiere la determinación de 200 muestras de desviaciones (con respecto de la cuerda promedio), cada una ellas separadas a intervalos constantes de 2 m a lo largo de un tramo de 400 m de la vía.

En la Figura 2, se presenta la tabla para el registro de los datos obtenidos con el MERLIN.

Definiendo el histograma de la distribución de frecuencias de las 200 muestras, se puede obtener una medida de la dispersión del perfil de la vía y correlacionarla con la escala estándar de la rugosidad. Por definición la medida de la dispersión es el rango de la muestra (designado por **D**) que se determina después de eliminar el 10% de las mediciones (10 datos en cada extremo del histograma). El valor **D** es conocido como la rugosidad en unidades "MERLIN" (Cundill, 1996).

Hoy en día, se estima el valor **D** mediante el estudio estadístico de los datos, para obtener un resultado con menor error.



**Figura 2.** Tabla para el registro de los datos del MERLIN (Cundill, 1991)

Para obtener el índice IRI en Venezuela, se aplica la siguiente expresión:

$$IRI = 2,7 \cdot 10^{-7} D^3 - 1,34 \cdot 10^{-4} \cdot D^2 + 6,69 \cdot 10^{-2} D - 0,35347 \quad (1)$$

Expresión desarrollada por Carvajal (Lynch et al. 2006).

### MÉTODO UTILIZADO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA RUGOSIDAD DEL PAVIMENTO

El procedimiento para la medición de la inclinación utilizando acelerómetros (Freescale Semiconductor 2005) es la base con la cual se plantea este método.

Al colocar un acelerómetro solidario al pie móvil del MERLIN, se puede realizar la medición del ángulo de inclinación y con este ángulo se puede determinar la variación en altura del pavimento.

$$h \approx d \cdot \tan\left(\text{sen}^{-1}\left(\frac{a_{\text{movil}}}{g}\right)\right) \quad (2)$$

Donde:  $h$  es la altura del terreno respecto a la cuerda promedio, cuyo margen de variación tiene una amplitud  $D$  o bien la rugosidad del terreno en unidades “MERLIN”.

La distancia entre el punto de pivote y el punto de contacto con el terreno se denomina  $d$  y  $a_{\text{movil}}$  es la medición de la aceleración en la dirección del eje de medición, asumiendo

que la aceleración de la gravedad  $g$  es constante.

Sin embargo, si la vía presenta alguna inclinación el valor resultante de  $a_{\text{movil}}$  tiene componentes tanto de la inclinación del acelerómetro como de la inclinación del plano de referencia. Para corregir esto se adosó otro acelerómetro a la estructura, a fin de establecer la inclinación de referencia. En la Figura 3, se puede observar la relación entre los ejes de medición y de referencia.

Donde la desviación del pavimento vendría dado por

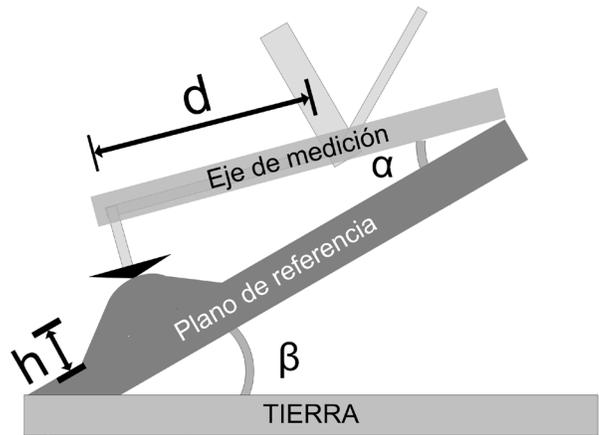
$$h = d \cdot \tan\left(\text{sen}^{-1}\left(\frac{a_{\text{fijo}}}{g}\right) - \text{sen}^{-1}\left(\frac{a_{\text{movil}}}{g}\right)\right) \quad (3)$$

y

$$a_{\text{fijo}} = g \cdot \text{sen}(\beta) \quad (4)$$

$$a_{\text{movil}} = g \cdot \text{sen}(\beta - \alpha) \quad (5)$$

Donde:  $\beta$  es el ángulo de inclinación del terreno y  $\alpha$  es el ángulo producido por la desviación del terreno más su inclinación.



**Figura 3.** Relación entre el eje de medición y el plano de referencia

Para simplificar estas expresiones se linealizan utilizando la aproximación de ángulos pequeños. Reduciendo de esta manera las exigencias computacionales sobre el procesador.

$$h \approx d \cdot \left(\frac{a_{\text{fijo}}}{g} - \frac{a_{\text{movil}}}{g}\right) \quad (6)$$

### DEFINICIÓN DEL EQUIPO

El equipo es capaz de automatizar la medición del perfilómetro MERLIN, facilitando la operación del mismo, el registro de los datos, el cálculo del índice IRI y permitiendo el almacenamiento de uno o más ensayos. Todo ello, a través de una unidad central de procesamiento

e instrumentación de las partes móviles del perfilómetro MERLIN.

## DESCRIPCIÓN DEL HARDWARE

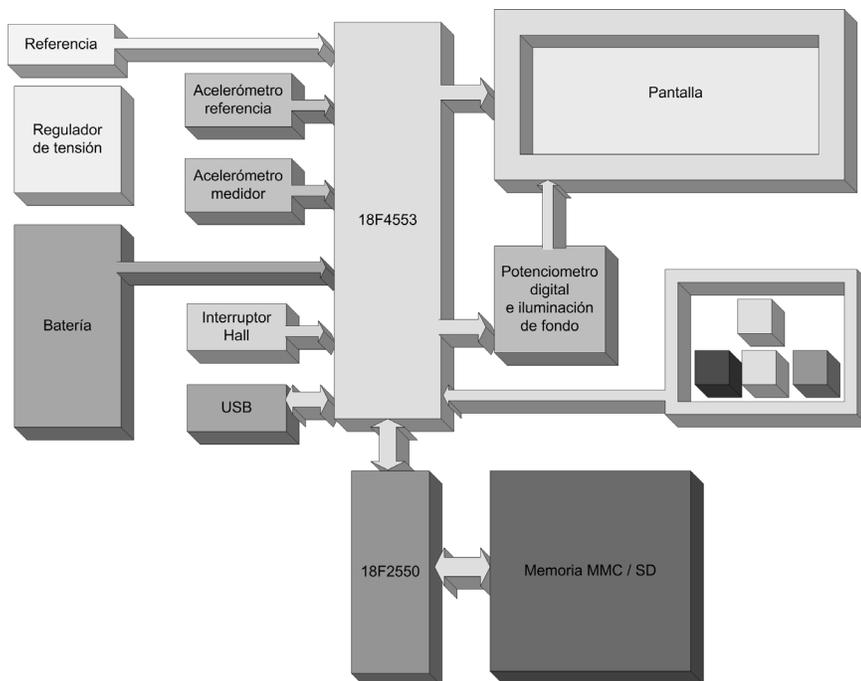
El instrumento de estimación del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) ha sido desarrollado alrededor de una unidad de procesamiento que usa un PIC18F4553 de la casa Microchip, mismo que ha sido seleccionado por cinco aspectos fundamentales a saber: su convertor analógico digital de 12 bits (Microchip Technology Inc. 2007), superior al estándar de 10 bits y necesarios para alcanzar la precisión deseada.

En segundo lugar por disponer de un puerto tipo USB (Universal Serial Bus) que permite una fácil conectividad con computadoras personales, también destaca un espacio de memoria ROM y RAM al menos suficientes para la extensión del software y para el almacenamiento de la información. Adicionalmente, este modelo de microcontrolador ofrece

mayores velocidades de procesamiento, respecto a otros de la misma familia por poder utilizar el reloj necesario para la comunicación USB (48 MHz) como reloj del sistema.

Finalmente los micro controladores de esta familia utilizan una tecnología denominada por el fabricante “nanowatt” que permite importantes reducciones del consumo de energía, lo cual en un equipo alimentado por baterías y que requiere largos periodos de operación, es un aspecto crucial.

A esta unidad central de procesos (CPU) se han conectado una serie de periféricos, los cuales pueden distinguirse, en el diagrama de bloques de la Figura 4 en tres secciones diferentes: la sección interfaz hombre maquina (IHM) y una sección de adquisición datos y una sección de almacenamiento masivo de datos.

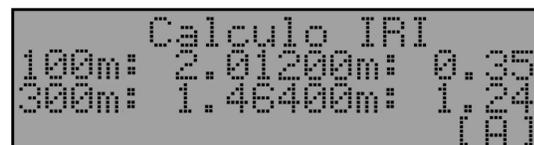


**Figura 4.** Diagrama de Bloques del Instrumento

La sección de IHM está constituida por un teclado de 4 teclas de múltiples funciones, que será utilizado fundamentalmente para navegar sobre un menú que se despliega en una pantalla de 4 filas por 20 caracteres y tipo LCD inteligente con iluminación de fondo como se puede ver en la Figura 5.

La sección de adquisición de datos, es la encargada de leer las salidas de los acelerómetros de tecnología “Micro Electro-Mechanical Structure” o MEMS, modelo MMA1260 de la casa Freescale (Freescale Semiconductor 2006), instalados

tanto en la estructura del marco del MERLIN como en el brazo del pie móvil. Esta sección también comprende la lectura de una sonda de tipo Hall que permite determinar cuando la rueda ha completado un nuevo giro, el cual corresponde con el avance de aproximadamente 2 m.



**Figura 5.** Pantalla de resultados parciales del IRI

Por último la sección de almacenamiento masivo, tiene por finalidad dotar al equipo de la capacidad de resguardar múltiples ensayos del mismo tramo de vía o de diferentes, para poder postergar la emisión de los reportes al regreso a la oficina base y no durante la visita al tramo de vía. Esta unidad está constituida por una memoria de tipo MMC/SD y un microcontrolador PIC18F2550 que gestiona su escritura o lectura desde el CPU mediante una comunicación serial. Esta estructura ofrece un sensible ahorro de energía, puesto que permite apagar la memoria MMC/SD y sólo encenderla cuando se va a respaldar los datos de forma más eficiente ya que la escritura de esta memoria en el modo de operación utilizado es en bloques de 512 bytes.

El uso de este tipo de memoria está pensado no sólo para proveer grandes cantidades (a los fines de esta aplicación, aproximadamente 2 años de mediciones continuas) de memoria no volátil, sino además para proveer de un medio de intercambio de información, razón por la cual se utilizó el formato FAT, siendo necesario la utilización de otro microcontrolador para su gestión.

## DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE

El software requerido está compuesto por:

- El firmware o programa del microcontrolador principal que se encarga de la operación de medición, control e interfaz con el usuario. Entre sus funciones más importantes se encuentran: la calibración general del equipo, ajuste del reloj interno (fecha y hora), introducción de los parámetros de la medición con

fines de identificación del reporte, realización de la medición, determinación y despliegue del IRI correspondiente a los 400 m medidos así como de cada 100m, estado de la batería, control del contraste de la pantalla, prueba de operación del equipo, encendido/apagado de la iluminación de fondo.

- El firmware o programa del microcontrolador para la gestión de las memorias MMC/SD.
- El programa para el computador a fin de procesar los datos y generar los reportes correspondientes (pantalla y copia dura).

El firmware de los microcontroladores de la casa Microchip se programó con el lenguaje PIC C, mientras que el programa para el computador se realizó en el lenguaje Visual Basic 6.0.

## Programa para el computador

El programa para el computador, denominado SICalIRI o Sistema para el Cálculo del Índice de Rugosidad Internacional, que fue desarrollado para este proyecto, se encarga de leer los datos almacenados en un archivo en la memoria de almacenamiento masivo (MMC/SD), los procesa para obtener el IRI cada 50 lecturas (100 m) y para las 200 lecturas. Presenta en una ventana de diálogo, que se muestra en la Figura 6, los resultados cada 100 m y del tramo total de 400 m, así como los datos de identificación del reporte.

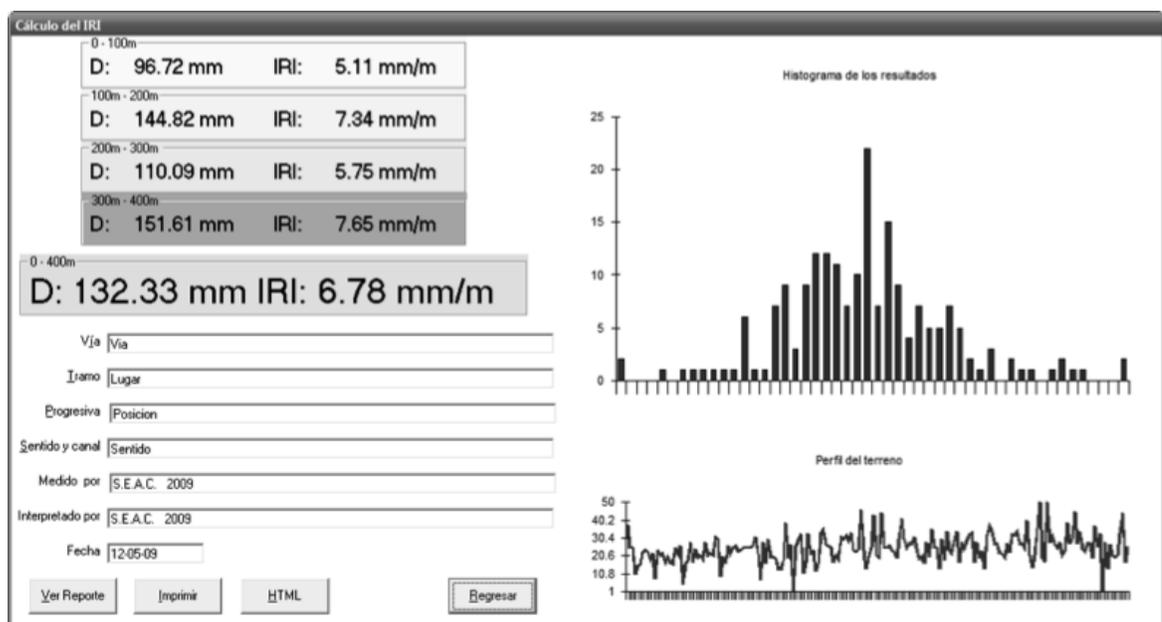


Figura 6. Presentación de los resultados mediante SICalIRI

Además, presenta un histograma de la distribución estadística de los datos, así como el perfil del tramo de vía bajo ensayo.

## ENSAYOS DE VALIDACIÓN

Para la comprobación del funcionamiento del equipo, se practicó el procedimiento de calibración previamente planteado, seguidamente, se procedió a la toma de un grupo de datos correspondientes a una medición de 200 datos.

Para cada uno de los datos, se registró la lectura dada por el MERLIN mecánico, así como por el instrumento diseñado. Finalizadas estas mediciones se anotaron los índices IRI calculados por el equipo, para su posterior comparación con los valores obtenidos en el software SICalIRI desarrollado para este proyecto.

Sobre la base de las lecturas obtenidas, se realizó una comparación, entre los diferentes métodos, para lo cual se determinó la desviación entre las diferentes medidas, utilizando como referencia las determinaciones hechas con el MERLIN “mecánico”.

En la Tabla 1, se presenta una comparación cuantitativa entre los índices de rugosidad internacional (IRI) determinados sobre la base de datos obtenidos en el MERLIN mecánico, datos almacenados por el equipo en la memoria MMC/SD y el IRI arrojado por el equipo electrónico. Para la determinación de las desviaciones se toma como referencia el IRI estimado con los datos obtenidos del MERLIN mecánico, procesados mediante una hoja de cálculo.

Además, se presentan en cada una de las tablas, los índices IRI cada 100 m o 50 datos, haciendo las comparaciones correspondientes.

En la Tabla 1 si bien puede observarse una desviación de la lectura de hasta casi 10%, la mayoría de las desviaciones son de aproximadamente 3 %, e independientes del método de determinación del IRI usado. Por otro lado se evidencia una correlación entre la magnitud del IRI y las desviaciones, en cuanto a un aumento de la desviación al disminuir la rugosidad y que podría ser atribuido a efectos de la no linealidad del IRI, respecto a la rugosidad D del pavimento.

Por otro lado es de hacer notar que las desviaciones, tanto en las determinaciones hechas sobre el PC como las obtenidas en el instrumento están altamente correlacionadas y no se diferencian en más de un 1 %, lo que validan las aproximaciones hechas en las determinaciones de las variaciones de altura del pavimento y la aritmética usada en la determinación del IRI. De manera tal que las desviaciones entre las determinaciones con el MERLIN usado en forma manual y el instrumentado electrónicamente, pueden atribuirse a diferencias en la resolución de la variación de la altura.

Al obtener valores de IRI similares entre los equipos evaluados, se demuestra que el equipo electrónico es válido para la instrumentación del MERLIN mecánico.

**Tabla 1.** Resultados de la cálculo del Índice de Rugosidad Internacional

IRI	Software PC	Equipo Electrónico	MERLIN Mecánico	Desviación Software PC	Desviación Equipo Electrónico
0 – 100 m	5,11	5,06	5,62	9,07 %	9,96 %
100 – 200 m	7,34	7,31	7,42	1,08 %	1,48 %
200 – 300 m	5,75	5,69	5,97	3,69 %	4,69 %
300 – 400 m	7,65	7,58	7,83	2,30 %	3,19 %
0 – 400 m	6,78	6,77	7,02	3,42 %	3,56 %

## CONCLUSIONES

El desarrollo de un equipo y más aún de instrumento siempre aporta aprendizajes desde el punto de vista de su diseño y concepción. En el caso del instrumento para estimación del IRI, quedan resaltadas las ventajas del diseño modular, desarrolladas a tal grado en este prototipo, que su particularización para otros instrumentos portátiles fundamentalmente afecta al bloque de sensores, a saber los

acelerómetros y la sonda Hall.

La experiencia de desarrollar un equipo para mediciones en campo, planteó varios desafíos interesantes como los de reducción del consumo de energía, el que asociado con la necesidad de reducir costos, hacen desarrollar estrategias de ahorro de energía en la gestión del hardware del instrumento y en la necesidad de manipulación.

Otro aspecto importante, fue proveer suficiente capacidad de almacenamiento, de datos de manera confiable, como para no entorpecer, ni interrumpir el desarrollo de los ensayos, así como también para no requerir de otros dispositivos donde descargar la información, durante los ensayos, reduciendo de esta manera problemas de índole logístico, peso, equipos, cuidados, baterías, mesas, entre otros. De manera tal que el operador puede ir al tramo de vía, solo con el equipo, e incluso realizar más de un ensayo consecutivo, en la misma o diferentes jornadas y restringir el trabajo de análisis y de reportes a la oficina base donde regularmente se dispongan de todas las facilidades. Lo que redundará en una disminución de horas-hombre en sitio de ensayo y de los costos logísticos asociados con la permanencia en campo.

El uso de los acelerómetros para la medición indirecta de la variación de altura del pavimento mediante mediciones de ángulos, ha demostrado ser un método conveniente y de bajo costo.

Aunque no es previsible la existencia de campos interferentes en las localidades de uso del equipo, es necesario disminuir la susceptibilidad electromagnética del instrumento, sobre todo en virtud de disminuir los requerimientos del local donde se practique sus calibraciones y/o pruebas de mantenimiento.

Para hacer posible la medición completamente automática, sería necesario practicar algunas modificaciones al MERLIN en cuanto a permitir el desplazamiento del patín sobre el pavimento. Por otro lado el desplazamiento debería garantizarse a velocidad constante o considerar en el procesamiento de las lecturas los efectos del sistema dinámico, por los esfuerzos y momentos que se generan al variar la velocidad. En caso contrario y mientras se requiera de un equipo económico, es recomendable hacer la medición manual o semiautomática.

El software SiCalIRI desarrollado para este proyecto facilita la generación de los reportes ya sea a partir de los datos provenientes del equipo electrónico como de los datos del MERLIN mecánico. Esto permite que pueda ser utilizado independientemente con cualquier MERLIN.

## REFERENCIAS

- CUNDILL, M.A. (1991). The MERLIN Low-cost Road Roughness Measuring Machine. Crowthorne. Transport and Road Research Laboratory, Department of Transport. TRRL Research Report 301, pp. 3-6.
- CUNDILL, M.A. (1996). The MERLIN Road Roughness Machine: User Guide. Crowthorne. Transport Research Laboratory, Overseas Development Administration. TRL Report 229, p. 6.
- DEL ÁGUILA (1999). Metodología para la determinación de la rugosidad de los pavimentos con equipo de bajo costo y gran precisión. Trabajo presentado al X Congreso Ibero-Latinoamericano. (Sevilla, España), pp. 1, 10.
- FREESCALE SEMICONDUCTOR. (2005). AN3107: Measuring Tilt with Low-g Accelerometers. Tempe. 8 p.
- FREESCALE SEMICONDUCTOR. (2006). MMA1260: Low G Micromachined Accelerometer. Tempe. 9 p.
- LYNCH, H., REDONDO, O., REYES, Y., DÍAZ, G., VILLASMIL, A., ESSIS, K. (2006). Diseño y fabricación de nuevos instrumentos de bajo costo, para la determinación del índice de rugosidad de un pavimento, con base al equipo MERLIN. Trabajo presentado al 3er. Simposio Venezolano del Asfalto. (Maracaibo, Venezuela), p.8.
- MICROCHIP TECHNOLOGY INC. (2007). PIC18F 2458/2553/4458/4553 Data Sheet. Chandler. 46 p.

