
MAGNETÓMETRO DE BAJO COSTO PARA DETECTAR VEHÍCULOS ESTÁTICOS

Ernesto Sifuentes de la Hoya, Francisco Javier Enríquez Aguilera, Juan de Dios Cota Ruiz, Jesús Martín Silva Aceves

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Computación, Estudios en Sistemas Digitales
Universidad Autónoma de Ciudad Juárez

RESUMEN

Un detector de vehículos en un sistema inteligente de control de tráfico debe ser autónomo, compacto, fácil de instalar, con bajo consumo de energía y robusto a factores climáticos. Los detectores actuales basados en espira inductiva, cámara de video, ultrasonido e infrarrojo no cumplen con esos requisitos, especialmente en aplicaciones al aire libre. Como alternativa este artículo propone un detector de automóviles estáticos que cumple con las características descritas. El sistema se implementó con un sensor magnetorresistivo, un circuito de interfaz digital directa, la aplicación de estrategias de gestión de energía y la implementación de un algoritmo de detección simple.

Palabras clave: Sensor magnetorresistivo, Interfaz directa, Detector de vehículos.

INTRODUCCIÓN

La disponibilidad de estacionamiento, sobre todo en horas pico, se ha vuelto un grave problema. Esto se debe al insuficiente número de plazas de estacionamiento, al gran incremento de automóviles durante las pasadas décadas y, en gran parte, a la falta de información al conductor sobre la disponibilidad y correcta ubicación de lugares vacantes. Motivo por el cual se han creado los sistemas inteligentes de gestión de estacionamientos SPMS (Smart Parking Management System) o sistemas inteligentes de control de tráfico ITS (Intelligent Traffic System), cuya función principal es informar a los conductores la disponibilidad y ubicación de plazas de estacionamiento en tiempo real (*Smith, 2003; Shaheen, 2005; Paniati, 2007*).

El detector de vehículos es el elemento más importante de cualquier sistema ITS o SPMS. Su función es detectar, en tiempo real, la presencia o el paso de vehículos y convertirla en parámetros de tráfico (presencia, paso, clasificación, dirección, conteo, velocidad, etc.) (*Klein, 2001*). Así, la información recopilada por el detector se envía a la unidad de control para informar al conductor por medio de señales de tránsito, pantallas LCD, Internet o dispositivos de comunicación personal (*Shaheen, 2005; Klein, 2001*), el estado actual de tráfico y el número de plazas disponibles en un determinado estacionamiento.

Desde hace más de cinco décadas el sistema de detección más utilizado es la espira inductiva. Algunas alternativas utilizan sensores magnéticos, ultrasonidos, radar, infrarrojos, cable piezoeléctrico, tubo

neumático e imágenes de video (Klein, 2001; Kell, 1990; Mimbela, 2007). Sin embargo, su diseño se ha enfocado principalmente a detectar vehículos en movimiento. Para detectar vehículos estáticos se utilizan sensores magnéticos, ultrasonidos o infrarrojos. En general, se considera que los detectores actuales tienen un costo de instalación, consumo de energía y gastos de mantenimiento excesivos para poder implementar una red cableada o inalámbrica de detectores de vehículos, sobre todo en aplicaciones a gran escala y al aire libre. Un detector de vehículos debe funcionar libre de mantenimiento durante varios años y, entre otras características, debe ser compacto, fácil de instalar, de bajo costo, bajo consumo de energía y robusto a factores climáticos. Por tanto, es necesaria la implementación de alternativas que tengan mejores prestaciones que un detector actual.

Recientemente, los sensores magnetorresistivos se han utilizado para detectar vehículos en movimiento (Kang *et al.*, 2005; Pelegrí, 2007), porque son compactos, tienen alta sensibilidad para medir variaciones en el campo magnético terrestre, pueden ir encima del pavimento, no necesitan lentes (como los sensores ópticos o las cámaras de video) y son más robustos a factores climáticos como lluvia, niebla, polvo y viento que los sensores basados en cámaras de video, ultrasonidos e infrarrojos. Además, en esas soluciones se emplean interfaces de acondicionamiento de señal basadas en amplitud de voltaje o corriente y, por tanto, son de mayor consumo de energía que la interfaz directa sensor magnetorresistivo-microcontrolador (Sifuentes, 2007; Sifuentes, 2007; Sifuentes, 2008).

Este artículo presenta el diseño y la implementación de un detector de presencia

de vehículos estáticos. El objetivo es demostrar que mediante un sensor magnetorresistivo, el uso y la caracterización de circuitos de interfaz directa (sensor resistivo-microcontrolador) (Sifuentes, 2007; Sifuentes, 2008), y el diseño de algoritmos de detección simples, es posible implementar un detector de vehículos compacto, de fácil instalación, bajo costo y bajo consumo de energía y, por tanto, con mayor robustez a factores ambientales, autonomía y fiabilidad que las soluciones actuales. El sistema propuesto sirve para implementar una red cableada o inalámbrica de detectores como parte integral en la infraestructura de un sistema de control inteligente de tráfico o un sistema inteligente de gestión de estacionamientos. Algunas aplicaciones pueden ser parquímetros automatizados, sistemas de control de acceso, semáforos inteligentes, casetas de peaje, cruces de trenes, puentes, túneles y, en general, donde se requiera detectar la presencia de un vehículo estático.

MODELADO CON EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Un vehículo crea una perturbación local (respuesta magnética), que puede ser detectable en un área cercana al vehículo y modelada por composición de uno o varios dipolos magnéticos. En una situación práctica, ciertos detalles físicos que no se consideren en los modelos pueden influir en la respuesta magnética esperada. Algunos detalles son: tamaño, forma y material de cada una de las partes magnéticas del vehículo (consideradas como dipolos puntuales), los cuales pueden diferir mucho de un vehículo a otro. El comportamiento magnético de un objeto con forma geométrica compleja no puede ser descrito de una forma analítica simple. Sin embargo, su comportamiento puede ser analizado

utilizando el método de elementos finitos. Este método consiste en dividir al volumen de interés en pequeños elementos llamados “elemento finito”. Por ejemplo, la superficie a evaluar se divide en triángulos, los puntos que definen cada triángulo son nodos y el triángulo es el elemento, la agrupación de esos elementos forma lo que se conoce como el mallado. Dentro de cada elemento, las ecuaciones diferenciales que gobiernan el comportamiento son aproximadas por ecuaciones algebraicas con solución numérica (Bastos, 2003).

El problema a resolver aquí es del tipo magneto-estático y por tanto las

ecuaciones que lo describen son las ecuaciones de Maxwell en magneto-estática. Bastos (2003) propone un método de solución de estas ecuaciones mediante el método de elementos finitos. Basado en esa propuesta, el análisis magneto-estático que aquí se presenta se realizó con el software COMSOL Multiphysics (FEMLAB). Se consideró un volumen de $10 \text{ m} \times 6 \text{ m} \times 7 \text{ m}$ que representa el espacio libre que rodea al vehículo. Las partes ferromagnéticas se modelaron como objetos geométricos simples. La tabla 1 resume los valores utilizados en la simulación.

Tabla 1. Valores utilizados para predecir la respuesta magnética de un vehículo con el método de elementos finitos.

Geometría	Dimensiones (m)	Posición (x', y', z') (m)	Representa
Esfera y cilindro horizontal	$R = 0.5$	$(-2.5, 0, 0.5), (-2.5, 0, 0.7)$	Eje delantero y motor
Esferoide	$(2.1, 0.5)$	$(0.3, 0, 0.5)$	Centro
Cilindro horizontal	$R = 0.3$	$(2.5, 0, 0.5)$	Eje trasero

La fig. 1 presenta los resultados de la simulación, en la figura 1a se muestran las líneas de inducción magnética B_z ; y la anomalía magnética causada por el vehículo, deformación de las líneas de un campo magnético terrestre (CMT) uniforme. La fig. 1b presenta un corte transversal del volumen a una distancia de 0.3 m debajo del vehículo, a nivel del piso donde se colocará el detector implementado (magnetómetro). Se observa la respuesta magnética del vehículo a lo largo del eje x . El color rojo (posición superior barra de colores) representa la mayor intensidad de B_z y el color azul intenso (posición inferior barra de colores)

representa el valor mínimo que corresponde al CMT. La mayor intensidad se observa en los puntos cercanos a las partes ferromagnéticas: eje delantero, eje trasero y la parte central del vehículo.

La fig. 2 muestra el valor de B_z para 200 puntos de observación en el eje x en un margen de $[-5, 5]$ m y a una distancia en z de 0.3 y 0.5 m (línea transversal de la fig. 1a). La forma de onda es similar a la de una línea de dipolos. En ambos casos se obtienen tres picos bien definidos con distinta amplitud, que representan las partes magnéticas consideradas.

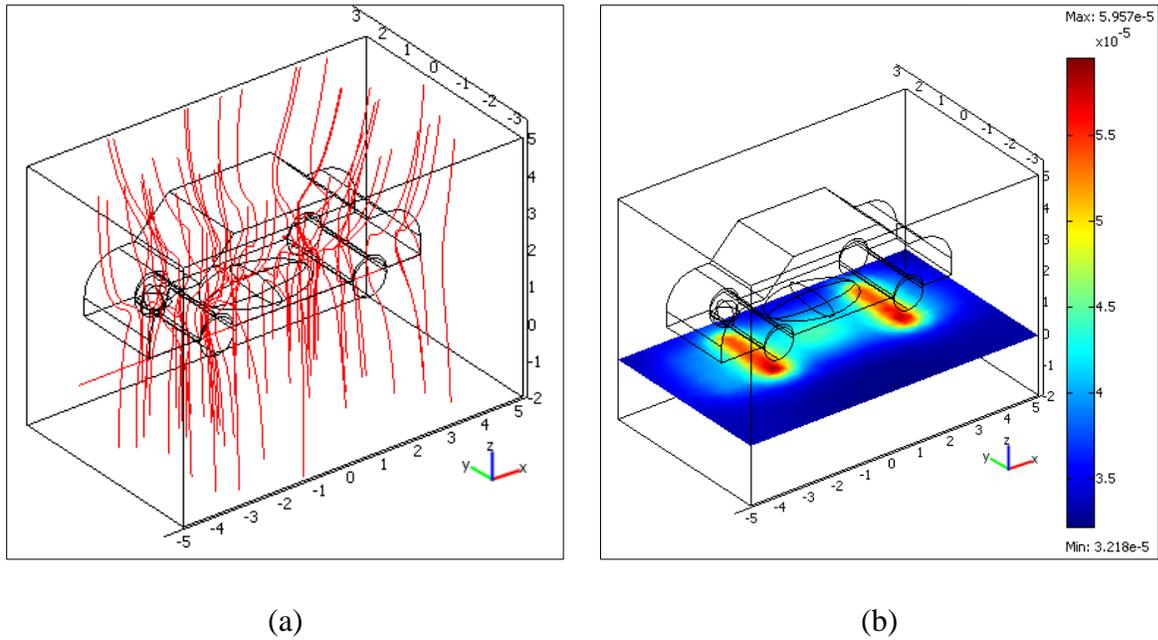


Fig. 1. Anomalía magnética en el CMT por la presencia de un vehículo (modelado con objetos de hierro).

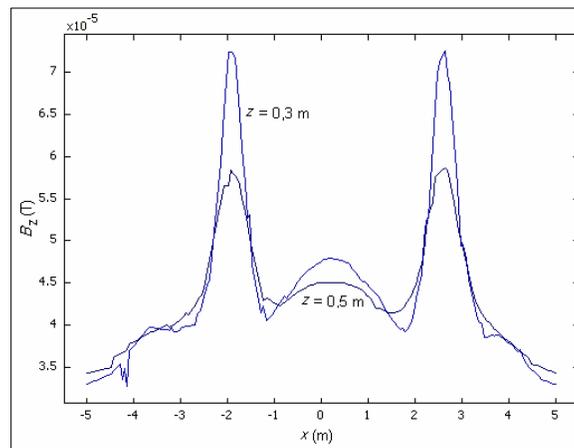


Fig. 2. Respuesta magnética de un vehículo, B_z representa el valor de inducción magnética que se obtendría con un magnetómetro (en dirección vertical). El valor del CMT es $40 \mu\text{T}$ en dirección vertical.

METODOLOGÍA PARA DETECTAR UN VEHÍCULO

Un vehículo, debido a su contenido de material magnético (hierro, níquel, acero, etc.) en su chasis inferior tiene una permeabilidad magnética mayor al aire que lo rodea. Esto concentra o distorsiona las

líneas de flujo del CMT e incrementa la magnitud de \mathbf{B} (inducción magnética) dentro y cerca del vehículo. Un sensor magnético (magnetómetro) debajo de un vehículo puede detectar esa perturbación magnética en el CMT debido a su presencia. Por lo tanto, sólo se requiere detectar un cambio en

alguna de las componentes del campo magnético sobre su valor base en el punto de observación. La magnitud de ese cambio permitirá establecer un umbral de comparación mínimo que determine si un vehículo está presente o no. Así, el sistema de medida debe tener suficiente resolución para detectar ese cambio, mas no necesariamente una elevada exactitud.

El CMT es uniforme en un área de varios kilómetros, pero su vector de dirección cambia de horizontal en el ecuador a casi vertical en los polos magnéticos. En Ciudad Juárez, Chihuahua, la componente vertical $F_V = 40 \mu\text{T}$, es mayor que la horizontal $F_H = 25 \mu\text{T}$ y la intensidad total es $F_T = 47 \mu\text{T}$ para una inclinación de 60° (Maus et al., 2010). Así, la componente vertical es la predomina y, por tanto, un magnetómetro con su eje de sensibilidad en dirección vertical (z) puede medir el valor de

esa componente y detectar un cambio debido a la presencia de un vehículo.

En conclusión, es posible detectar la presencia de un vehículo midiendo, a nivel del suelo, la perturbación del CMT. Cuando un vehículo se aproxime al sensor, el valor de inducción magnética medido (B_z) se incrementará y cuando el vehículo se aleje B_z disminuirá de acuerdo al inverso del cubo de la distancia. Conforme el vehículo se aleje se verá como un dipolo, pero cuando el vehículo se aproxime la componente (motor, ejes trasero y delantero) más cercana al sensor será la que se detecte. Por tanto, cabe esperar que cada vehículo entregue una firma magnética distinta con múltiples picos. La fig. 3 muestra una representación gráfica de la metodología propuesta para detectar un vehículo midiendo la componente B_z del CMT.

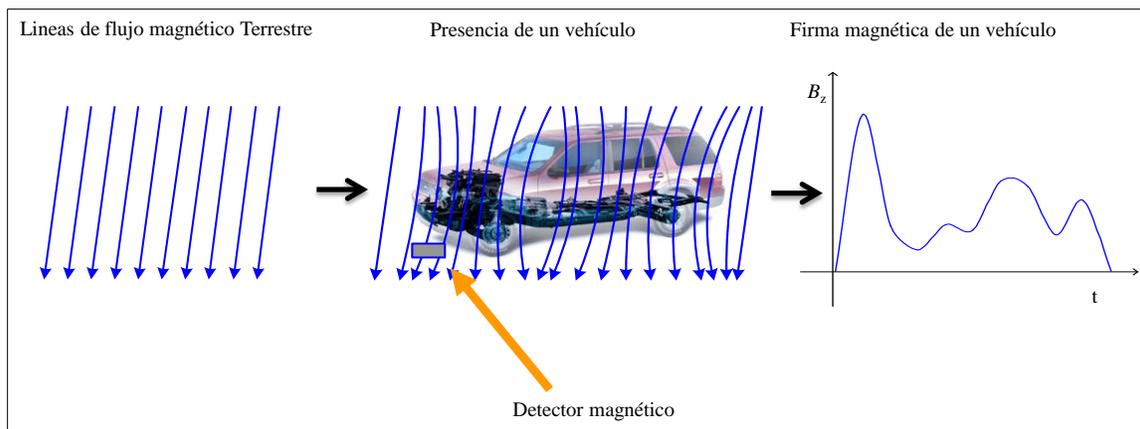


Fig. 3. Metodología para detectar la presencia de un vehículo con un magnetómetro.

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA

Hardware del sistema

La figura 4 muestra un diagrama a bloques del detector de vehículos propuesto. Se implementó con un sensor magnetorresistivo AAH002 (NVE) compacto, de bajo costo y tecnología GMR (Giant Magnetoresistive), con una

configuración $\frac{1}{2}$ puente de Wheatstone y valor nominal $R_0 = 2 \text{ k}\Omega (\pm 20\%)$, una sensibilidad de $11 \text{ mV} / \text{V} / \text{G}$ y un amplio rango de temperatura de -50 a $150 \text{ }^\circ\text{C}$. Un microcontrolador MSP430F123 (Texas Instruments) de bajo costo y bajo consumo de energía, con un cristal de cuarzo de 8 MHz ($T_s = 125 \text{ ns}$), que tiene 5 modos de bajo consumo, un tiempo de establecimiento menor a $6 \text{ }\mu\text{s}$ y un sistema de reloj programable. Para reducir el consumo de energía, el detector se alimenta a 3 V con una batería de litio TL-5135 que proporciona $20 \text{ }\mu\text{A}$ a 3.6 V por 10 años (según el fabricante) y un regulador de voltaje TS9011 cuyo consumo en estado activo es de $1 \text{ }\mu\text{A}$.

Como interfaz de acondicionamiento de señal se utiliza la conexión directa del

puente resistivo a un microcontrolador, tal como se describe en Sifuentes (2008). Esto permite en primera instancia, a diferencia de las interfaces de acondicionamiento basadas en amplitud de voltaje o corriente, obtener un sistema de medida compacto, simple y de bajo costo, ya que sólo se requiere el sensor y el microcontrolador. Como interfaz de comunicación se utiliza la comunicación serial RS-232 con un MAX3223 a 3 V , con un regulador independiente para evitar que posibles transitorios en la fuente de alimentación afecten al proceso de medida (Reverter, 2005). Esta interfaz de comunicación puede ser fácilmente remplazada por un transceptor RF (por ejemplo, un módulo de Telegesis o un X-bee).

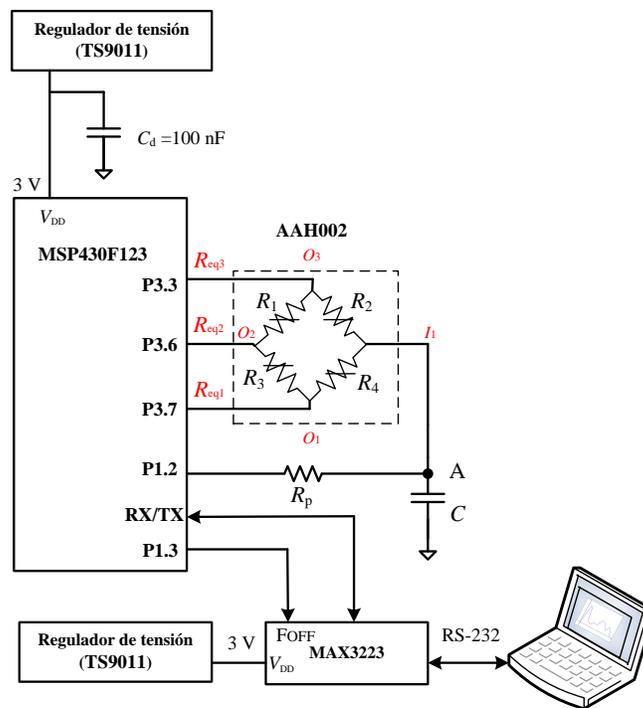


Fig. 4. Diagrama a bloques del detector de vehículos propuesto.

Método de medida

Para medir la inducción magnética, B_z , se utiliza el método de interfaz directa propuesto y caracterizado por *Sifuentes (2008)*, para puentes de sensores resistivos en distintas configuraciones. Con este método, a partir del sensor se obtiene una señal modulada en el dominio temporal que se digitaliza directamente con el microcontrolador. El puente se considera como una red con una entrada y tres salidas (texto en rojo fig. 4), en lugar de una red de dos puertos como en las interfaces basadas en amplitud de voltaje. El principio de medida consiste en medir el tiempo de descarga de un circuito $R_{eqi}C$, con el temporizador del microcontrolador. R_{eqi} es la resistencia equivalente vista desde cada uno de los pines hacia el nodo A. De acuerdo con la fig. 4 R_{eq1} , R_{eq2} , y R_{eq3} , respectivamente, son:

$$R_{eq1} = \frac{R_4(R_1+R_2+R_3)}{R_1+R_2+R_3+R_4} \quad (1a)$$

$$R_{eq2} = \frac{(R_1+R_2)(R_3+R_4)}{R_1+R_2+R_3+R_4} \quad (1b)$$

$$R_{eq3} = \frac{R_2(R_1+R_3+R_4)}{R_1+R_2+R_3+R_4} \quad (1c)$$

Cada medida se realiza en dos etapas: (a) etapa de carga y (b) etapa de descarga y medida de tiempo. En la etapa de carga, P1.2 se configura como salida en estado lógico "1", mientras que P3.3, P3.6 y P3.7 se configuran como entrada ofreciendo un estado de alta impedancia "HZ". Con esta configuración de puertos, el condensador C se carga hacia V_{DD} (tensión de alimentación del microcontrolador) durante un tiempo aproximadamente igual a kR_pC , donde k es el factor necesario de acuerdo con la resolución deseada. R_p forma un filtro pasa-bajo con C , lo cual mejora el rechazo de las

interferencias de la fuente de alimentación (*Reverter, 2007*). Se elige $R_p = 100 \Omega$ y $C = 1 \mu\text{F}$ ($\pm 5 \%$) con un coeficiente de temperatura de $100 \times 10^{-6}/\text{C}$ para tener un tiempo de carga de aproximadamente 1 ms.

En la segunda etapa, P1.2 se configura como entrada que ofrece un estado de alta impedancia "HZ", P3.7 se configura como salida en estado lógico "0", mientras que los puertos P3.3 y P3.6 permanecen en su estado anterior. En ese instante se inicia la descarga de C hacia V_{SS} a través de la resistencia equivalente, R_{eq1} , entre el nodo A y P3.7; éste es el punto de inicio del temporizador del microcontrolador para la medida de tiempo. Cuando el voltaje en C es inferior a V_{TL} (tensión de umbral inferior del disparador Schmitt, ST, de P1.2 del microcontrolador configurado como interrupción externa con atención en flanco descendente), se genera una interrupción que detiene el temporizador; el valor del temporizador es el equivalente digital del tiempo de descarga. El proceso de medida se realiza una vez más para medir el tiempo de descarga a través de R_{eq2} y R_{eq3} , respectivamente. Para un ciclo completo se realizan tres medidas, tal como se muestra en la fig. 5. La constante de tiempo óptima, en términos de tiempo de medida-resolución se determinó de forma experimental de acuerdo al procedimiento descrito en (*Reverter, 2005*), cuyo valor en este caso es 2-3 ms. Durante la medida del tiempo de descarga el microcontrolador permanece en modo de bajo consumo LPM0 (CPU deshabilitada e interrupción externa habilitada), esto para reducir los efectos del ruido de disparo (punto de parada del temporizador) y ruido generado por la actividad de la CPU, así como el consumo del sistema.

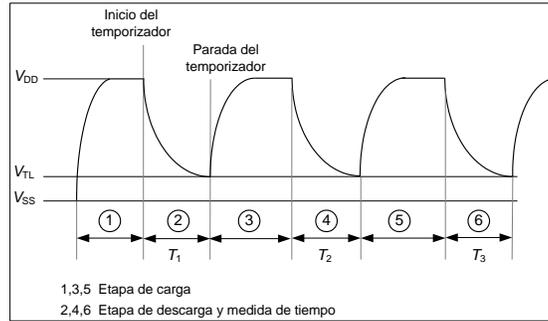


Fig. 5. Voltaje en C durante las fases de carga, descarga y medida de tiempo.

En condiciones ideales, el voltaje en C durante la fase de descarga es:

$$V_c = V_{SS} + (V_{DD} - V_{SS})e^{-t/\tau} \quad (2)$$

donde $\tau = R_{eqi}C$. A partir de (2) el tiempo de descarga de C de V_{DD} a V_{TL} es:

$$t_i = R_{eqi}C \ln \frac{V_{DD}-V_{SS}}{V_{TL}-V_{SS}} \quad (3)$$

Si V_{DD} , V_{SS} , C y V_{TL} permanecen constantes en cada medida, entonces t_i es proporcional a R_{eqi} . El temporizador del microcontrolador convierte el tiempo de descarga t_i en un valor digital T_i , así (3) se puede expresar como:

$$T_i = R_{eqi}C \ln \frac{V_{DD}-V_{SS}}{V_{TL}-V_{SS}} = R_{eqi}k \quad (4)$$

El objetivo es estimar el valor de x (cambio proporcional de resistencia del puente $x = \Delta R_0/R$). La ecuación basada en tiempo propuesta en Sifuentes (2008), que combina los tres tiempos de descarga medidos (T_1 , T_2 y T_3) para estimar el valor de x en una configuración de medio puente (sensor AAH002) es:

$$x^* = \frac{2(T_1-T_3)}{T_2+T_3-T_1} \quad (5)$$

Según la topología del sensor AAH002 (semi puente) el valor de la inducción magnética es:

$$B = \frac{x^*}{(x^*-2)S} \quad (6)$$

S es la sensibilidad del sensor GMR AAH002. Así, el sistema mide T_1 , T_2 , T_3 que corresponden a R_{eq1} , R_{eq2} , y R_{eq3} . Después, calcula x^* con (5) y B_z con (6) y su valor se envía a una PC vía RS-232 a un software de gestión desarrollado en LabVIEW®.

Algoritmo para detectar la presencia de vehículos

La fig. 6 describe el algoritmo implementado en el microcontrolador para detectar la presencia de un vehículo. Normalmente el detector está en modo *sleep* y se despierta en intervalos de tiempo programable con el *watchdog timer* (WDT). Esto es: microcontrolador en LMP4 y el MAX3223 en *shutdown*, el cual se controla a través del pin P1.3 del microcontrolador. En este modo de operación el consumo típico del MAX es de 1 μ A. Para determinar la presencia o ausencia de un vehículo, el detector mide el valor actual de inducción magnética (B_{act}) cada 2 s, según el procedimiento descrito y lo compara con el valor base (B_{ant}), previamente establecido durante la instalación del detector en el sitio

de interés. Si la diferencia absoluta de B anterior y B actual es mayor que $5 \mu\text{T}$ (valor de umbral obtenido experimentalmente con un magnetómetro comercial: Bartington Mag-01H), entonces hay un vehículo presente. Se activa el MAX3223 y se envía la información al PC; de lo contrario, el detector regresa al modo *sleep* a esperar otro

periodo (2 s) de inactividad. Después de detectar un vehículo presente, cuando la diferencia absoluta de B anterior y B actual es menor que $5 \mu\text{T}$, envía la información al PC indicando que el vehículo ya se ha ido, se desactiva el MAX3223 y el detector regresa al modo *sleep*. Este proceso se repite indefinidamente.

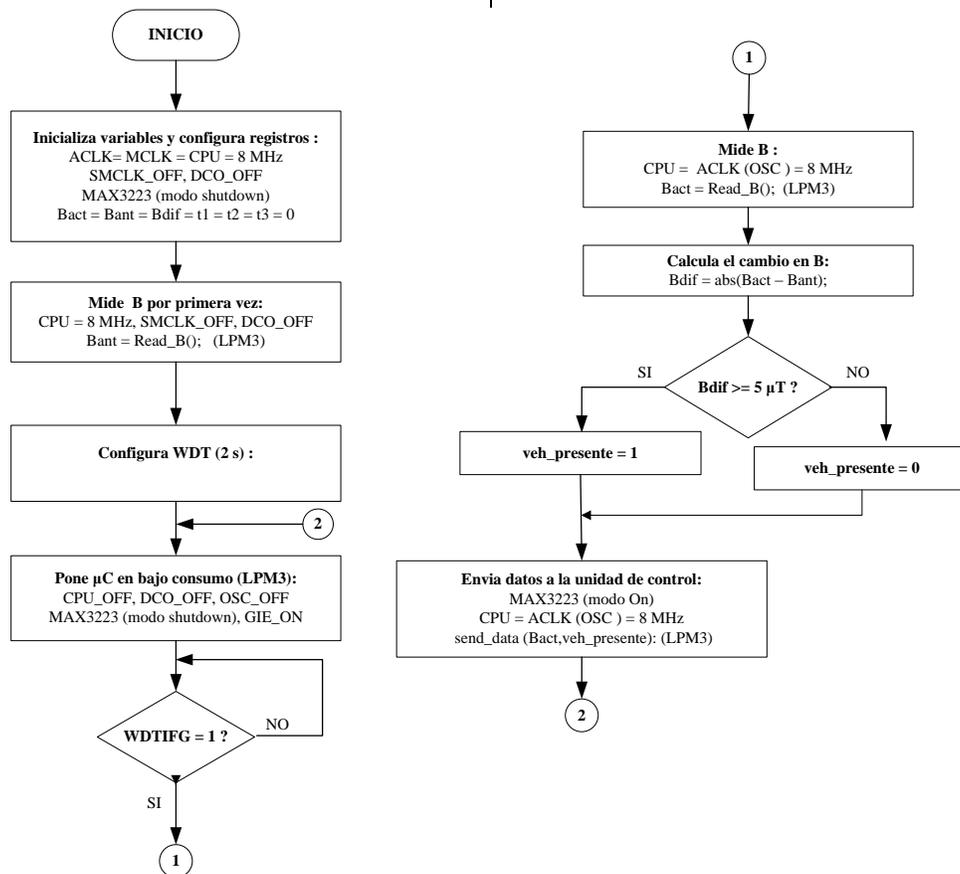


Fig. 6. Diagrama de flujo del algoritmo para detectar vehículos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para verificar el correcto funcionamiento del sistema propuesto, se realizaron medidas en un estacionamiento al aire libre y con distintos vehículos. El trabajo experimental se dividió en dos fases: (a) una medida de B_z cada 100 ms, y (b) una medida de B_z cada 2 s. En la fase (a) el WDT se configuró para que despertara al microcontrolador cada 70 ms, realizara una

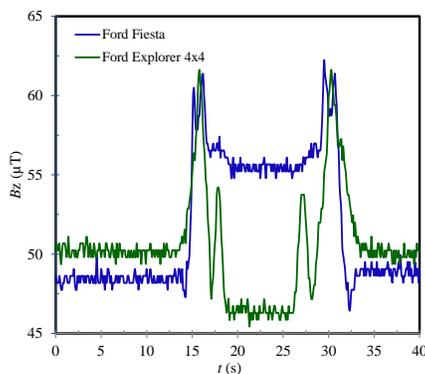
lectura de B_z y la enviara al software de gestión, esto con el fin de estimar la firma magnética de cada vehículo. En la fase (b) se implementó el algoritmo propuesto (fig. 6). En ambos casos el detector se colocó en el centro de un estacionamiento a nivel del piso $z = 0$. El valor de B_z se obtuvo aplicando la ecuación (6) a partir de la lectura de x^* en la ecuación (5). El vehículo entró, permaneció por un tiempo estático, y

salió de la plaza de estacionamiento (situación habitual al estacionar un vehículo).

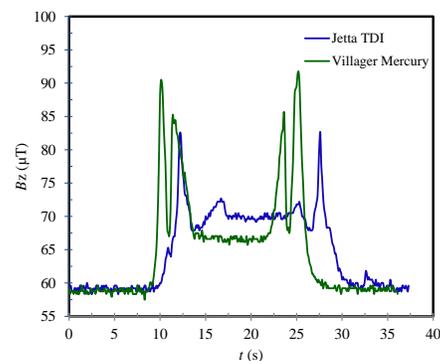
La fig. 7 muestra los resultados experimentales de B_z que corresponde a la respuesta magnética de un vehículo entrando y saliendo del estacionamiento. Se realizaron medidas en 4 vehículos: dos compactos (Ford Fiesta y VW Jetta TDI) y dos medianos (Ford Explorer 4x4 y Mercury Villager). Las medidas del Jetta y la Villager se realizaron en la misma plaza de estacionamiento, las del Fiesta y la Explorer en plazas de estacionamiento diferentes. La respuesta magnética obtenida corresponde con las previsiones teóricas (fig. 2). En todos los vehículos, la forma de onda obtenida contiene picos con diferente amplitud que, en este caso, corresponden al eje delantero, motor y parte central. La asimetría en la forma de onda cuando el

vehículo entra y cuando sale se podría utilizar para determinar la dirección en la que viaja un vehículo.

En general, se puede detectar la presencia de un vehículo mediante un algoritmo simple que compare el valor anterior de B_z (que se puede ir actualizando a intervalos fijos de tiempo) con el valor actual de B_z , y establecer un nivel de comparación superior a $5 \mu\text{T}$ con una cierta histéresis. Una vez que el valor medido sobrepase el nivel de comparación, se indicaría la presencia de un vehículo. A primera vista, según los resultados obtenidos se podría pensar en un nivel de comparación de $5 \mu\text{T}$, pero se puede dar el caso de que un vehículo mal estacionado (desplazado un poco hacia la derecha o hacia la izquierda) tenga un valor inferior al nivel de comparación y no se detecte su presencia (falso negativo).



(a)



(b)

Fig. 7. Resultados experimentales de B_z de un vehículo entrando y saliendo de un estacionamiento. (a) Ford Fiesta 2007 y Ford Explorer 4x4 2001, (b) VW Jetta 2006 y Mercury Villager 1999.

CONCLUSIONES

Es posible implementar un detector de presencia de vehículos compacto, de fácil instalación, bajo costo, bajo consumo de energía que las soluciones actuales. El

sistema propuesto sirve para implementar una red cableada o inalámbrica de detectores como parte integral en la infraestructura de un sistema de control inteligente de tráfico o un sistema inteligente de gestión de estacionamientos, en parquímetros

automatizados, en sistemas de control de acceso, semáforos inteligentes, casetas de peaje, cruces de trenes, puentes y túneles. En general, la metodología propuesta sirve para diseñar sistemas de medida autónomos o inteligentes en distintas áreas de aplicación. Por ejemplo: automatización industrial, medidores remotos (agua, luz, gas), domótica, automoción, sistemas de vigilancia, etc.

REFERENCIAS

- Bastos, J.P.A. Sadowski N. (2003). *Electromagnetic Modeling by Finite Element Methods*. New York, Marcel Dekker.
- Kang, M.H. Choi, B.W. Koh, K.C. Lee, J.H. Park, G. (2005). *Experimental study of a vehicle detector with an AMR sensor*. Elsevier, *Sensors and Actuators A*, 118: 278 – 284.
- Kell, J.H. Fullerton, I.J. Mills, M.K. (1990). *Traffic Detector Handbook*. USA, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, 2a ed., pp. 1-39.
- Klein, L.A. (2001). *Sensors Technologies and Data Requirements for ITS*. Norwood USA, Artech House Publishers, 549 p.
- Maus, S. Macmillan, S. McLean, S. Hamilton, B. Thompson, A. Nair, M. Rollins, C. (2010). *The US/UK World Magnetic Model for 2010-2015*. (En línea): <http://www.ngdc.noaa.gov/geomag-web/?id=igrfwmmFormId#igrfwmm>. (Consultado): Noviembre 4, 2012.
- Mimbela, L.E. Klein, L.A. (2007). *A Summary of Vehicle Detection and Surveillance Technologies Used in Intelligent Transportation Systems*. USA, Handbook, U.S Federal Highway Administration, Intelligent Transportation System. (En línea): <http://www.nmsu.edu/~traffic/Publications/VC/vdst.pdf>, feb-2013. (Consultado): Octubre 16, 2012.
- Paniati, J.F. (2007). *Advanced Parking Management Systems*. USA, U.S Federal Highway Administration, FHWA-JPO-07-011, Intelligent Transportation System. (En línea): http://ntl.bts.gov/lib/jpodocs/repts_te/14318_files/14318.pdf. (Consultado): Septiembre 16, 2012.
- Pelegrí, J. Alberola, J. Lajara, J.R. (2007). *Signal conditioning for GMR magnetic sensors applied to traffic speed monitoring GMR sensors*. Elsevier, *Sensors and Actuators A*. 137: 230 – 235.
- Reverter, F. y Pallàs, A.R. (2005). *Direct Sensor-to-Microcontroller Interface Circuits: Design and Characterisation*”, Barcelona, España, Marcombo.
- Reverter F., Gasulla M., Pallàs Areny R., 2007, *Analysis of power-supply interference effects on direct sensor-to-microcontroller interfaces*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 56: 171-177.
- Shaheen, S.A. Rodier, C.J. Eaken, A.M. (2005). *Smart Parking Management Field Test: A Bay Area Rapid Transit (BART) District Parking Demonstration*. California USA, Institute of Transportation Studies, University of California. (En línea): http://pubs.its.ucdavis.edu/publication_detail.php?id=44. (Consultado): Septiembre 16, 2012.
- Sifuentes, E. Casas, O. Reverter, F. Pallàs A.R. (2007a). *Improved direct interface circuit for resistive full- and half-bridge sensors*. México, D.F., International Conference on Electrical and Electronics Engineering, ICEEE.
- Sifuentes, E. Casas, O. Pallàs A.R. (2007b). *Direct Interface for Magnetoresistive Sensors*. Warsaw, Poland, IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, IMTC.
- Sifuentes, E. Casas, O. Reverter, F. Pallàs A.R. (2008). *Direct interface circuit to linearise resistive sensor bridges*. Elsevier, *Sensors and Actuators A*. 147: 210- 215.
- Smith, L. Roth, H. (2003). *Parking Systems Technologies*. California USA, Institute of Transportation Studies, Partners Advanced Transit and Highways, University of California at Berkeley. (En línea): http://www.calccit.org/itsdecision/serv_and_tech/Parking_Systems_Technologies/parking_systems_tech_summary.html. (Consultado): Septiembre 19, 2012.