

SISTEMA MECÁNICO-ELECTRÓNICO DE MEDICIÓN Y CONTROL DE PARÁMETROS DINÁMICOS EN FORMACIONES FERROVIARIAS

Miguel Antonio Ojeda

Universidad Nacional de Lomas de Zamora, Facultad de Ingeniería

miky@miky.com.de

Ricardo Mario Amé

Universidad Nacional de Lomas de Zamora, Facultad de Ingeniería

ingricardoame@gmail.com

Resumen

El control de la velocidad y posicionamiento geográfico exacto de las formaciones ferroviarias es un problema que se presenta a menudo. La importancia del mismo deriva en la necesidad de garantizar la calidad del servicio y la seguridad de las personas y mercancías que se transportan. Adicionalmente, el control de las aceleraciones en seis sentidos, combinado con el posicionamiento geográfico, permite efectuar un relevamiento automático del tendido de las trayectorias férreas, y la profesionalidad de la conducción [1]. En este trabajo se explica el desarrollo de un equipo mecánico-electrónico que permite la medición de una serie de parámetros para la mejora de la calidad y seguridad del servicio ferroviario, sin que ésta sea una aplicación taxativa.

Tensiones eléctricas, corriente eléctrica, presión de líneas de frenado, aperturas de puertas, sistemas de emergencia, Caudales de combustible, capacidad de colocar hasta 65000 sensores que funcionan en formato Máster Slave con comunicación RF433 dentro de toda la formación ferroviaria. Las mediciones a realizar son referidas no solo a las relacionadas a la aceleración, frenado, posicionamiento global, velocidad, sino a todos los parámetros eléctricos y mecánicos dentro de la cabina de conducción y mediante comunicaciones

radioeléctricas se colecta información de los diferentes vagones de la formación. esta información es almacenada visualizada y se envía en tiempo real a la oficina central Mediante comunicación telefónica GPRS esta información es almacenada en una FTP la cual podrá ser utilizada en tiempo real desde internet en cualquier lugar del planeta.

Contando a su vez de diferentes canales de comunicación que pueden sincronizarse con sistemas de señalización especialmente adaptados para este fin y/o sistemas de frenado que aumentan la seguridad. Además, cuenta con un sistema de comunicación GSM GPRS entre cabinas de diferentes formaciones lo cual nos permite ante una emergencia estar 100 % comunicados

Se desarrolló un sistema de visión binocular y un RADAR del tipo SAR (radar de apertura sintética) para la detección y monitoreo de vía libre de obstáculos. El equipo básico consta de dos conjuntos: uno, sensor de frecuencia de giro y aceleraciones, con posicionamiento geográfico, memoria, procesador [2] y emisor de señal inalámbrico; el otro es el receptor remoto que permite observar en una pantalla la información completa relevada.

El emisor se coloca en la rueda de la máquina locomotora y el receptor en la cabina del conductor. Éste último aporta datos a las imágenes de vídeo, normalmente captadas por las cámaras instaladas en la formación, completando una muy valiosa información para casos de accidentes. El equipo final cuenta con sistemas especialmente diseñados para aumentar la seguridad en el transporte, funciones redundantes, súper compacto, pantalla touch, salida de video barios sistemas de almacenamiento de datos indestructibles comparándolos con lo que se denomina caja negra. (Almacenamiento dinámico de toda la información de la cabina incluido audio de las comunicaciones) necesarios para un peritaje en el caso de accidentes

Comunicaciones RS232, RS422, RS485, CAN, Bluetooth2.0, Bluetooth 4.0, RF433 lora (Long range) llegando a una distancia de más de 5.000 metros garantizando la comunicación total dentro de una formación sin necesidad de cableado interno. Creación de múltiples sensores remotos totalmente autónomos para la medición de Velocidad, aceleración, peralte, tensión, corriente, presiones , con

comunicaciones AD4-20 para utilizar cualquier tipo de sensor industrial , adc , dac, conmutaciones, accionamientos, mediciones de caudales , para determinar consumos de diferentes fluidos, mediciones de temperatura, similar a las prestaciones de una ECU automotor.

Entradas Analógicas y digitales I2c, SPI, TTL, I2s, accionamiento de servo y motores paso a paso para el control de válvulas y demás procesos que requieran de un control de velocidad PWM. El dispositivo ha merecido una solicitud de patente, se ha probado exitosamente y está en período de desarrollo industrial.

Palabras Claves: Electrónica industrial, mecatrónica, microcontroladores ARM, procesamiento de señales, seguridad ferroviaria.

1. Introducción

La necesidad de conocer la velocidad de traslación de los objetos es muy antigua. Hacia principios del siglo XIX se inventa el “Tacómetro”, aparato diseñado para medir el número de vueltas de un eje; si éste está asociado a una rueda, conociendo su diámetro es suficiente para determinar la velocidad lineal del conjunto. Con tecnología moderna, continúa siendo utilizado.

A finales del siglo XIX, aparece el “Velocímetro”, que mide la rapidez de traslación de un objeto. Originariamente, consistía en un eje flexible, unido a un sistema de engranajes vinculados a alguna parte de la transmisión mecánica, un imán y una bobina excitada por éste para generar una señal de pulsos eléctricos; actualmente, es un aparato electrónico generador de pulsos con una frecuencia vinculada a la velocidad de giro del elemento controlado.

En vehículos y máquinas industriales se utilizan dispositivos electrónicos llamados “*encoder's*”; circuitos combinacionales que procesan las señales de entrada a datos de salida. Pueden ser ópticos o magnéticos, requiriendo conexión cableada. No se aplican en aquellas instalaciones que estén expuestas a suciedad o impactos.

Las aceleraciones se miden mediante dispositivos electrónicos conocidos como “Acelerómetros”, los cuales también requieren conexión cableada para transmitir la información.

Por último, el “Tacógrafo” complementa a los anteriores. En él es posible almacenar, en memorias digitales, los datos históricos de velocidades, aceleraciones y espacio recorrido por el móvil.

La localización geográfica de un objeto se realiza mediante la determinación de la latitud y longitud terrestres. En ciertas aplicaciones es necesario conocer su ubicación de manera instantánea, con cierto grado de precisión, al mismo tiempo que se mueve. Los modernos sistemas GPS (*Global Positioning System*) pueden establecerla con un error de entre 3 y 5 metros, admisible para ciertos usos, pero inaceptable para la seguridad de una formación ferroviaria. En algunas aplicaciones se utiliza para calcular la velocidad a partir de sucesivas posiciones geográficas correlativas, lo cual induce a la falta de exactitud y de información instantánea.

Si bien todos los elementos descritos son conocidos y ampliamente utilizados, formando parte de los tableros de control de automóviles, vehículos (en general) y ferrocarriles, se los instala de manera independiente entre sí, no combinando adecuadamente la información que generan.

Muchas patentes de invención [3] se han registrado sobre distintos dispositivos para la medición de la frecuencia de giro mediante sensores por efecto Hall, por medio de imanes actuando sobre bobinados, o dispositivos de ultrasonido, actuando sobre el cuerpo que se desplaza, e incluso otros métodos que utilizan señales emitidas por varios satélites que se comunican por radio a un receptor en el vehículo, realizando cálculos de la velocidad.

Otras patentes informan sobre dispositivos que detectan la velocidad y la posición relativa de dos partes de un componente mecánico y no del vehículo respecto del lugar en que se encuentra; y otras que aseguran determinar el desplazamiento mediante la aceleración en distintos ejes.

Todos ellos, si bien pertinentes, ya no tienen la virtud de la actualización generada por el acelerado devenir de la tecnología.

Existe la imprescindible necesidad de modernizar los sistemas de control del movimiento y de localización geográfica, generando datos interrelacionados, en un equipo único, evitando las conexiones cableadas, de modo de impedir

sabotajes, vandalismo y otras circunstancias no deseadas, procesando las señales de manera combinada y transmitiendo los datos por medios inalámbricos, con seguridad y muy alta precisión.

2. Objetivos y configuración conceptual del equipo diseñado

El desarrollo realizado conjuga la configuración de componentes Mecatrónica de control de posicionamiento, parámetros cinéticos y dinámicos, sustituyendo equipos individuales que proveen información dispersa, no armonizada, con la ventaja de independizarse del cableado de todo tipo, de alta velocidad de procesamiento de los datos, confiabilidad constructiva y en la provisión de la información, precisión y combinación racional de ésta.

El equipo cuenta con un algoritmo que permite calcular y medir en todo momento: localización geográfica con extrema exactitud, velocidad y sentido de traslación, aceleraciones en los seis ejes coordenados, procesar los datos de diversos modos (históricos, estadísticos, porcentuales, histogramas, por planimetría, etc.), almacenarlos en la memoria y transmitirlos a otros receptores de manera inalámbrica. Con esta información es posible, además de lo indicado:

- Vincular la velocidad y aceleraciones, con la posición geográfica, el día, la hora, mes y año en que se produjeron.
- Relevar el estado de la infraestructura vial, al vincular las aceleraciones verticales y horizontales con la posición geográfica.
- Vincularla con las imágenes de vídeo, tomadas por las cámaras de seguridad, generando un muy importante complemento informativo.

Estas características -objetivos del diseño- fueron implementadas en varios y sucesivos prototipos (figura 1) y probadas exhaustivamente, superando paulatinamente los inconvenientes que se fueron presentando y mejorando la confiabilidad, calidad y precisión de los datos relevados.



Figura 1 Prototipo.

3. Primer prototipo de prueba

La figura 2 muestra el conjunto en sección diametral del primer desarrollo realizado, con la disposición de sus componentes genéricos.

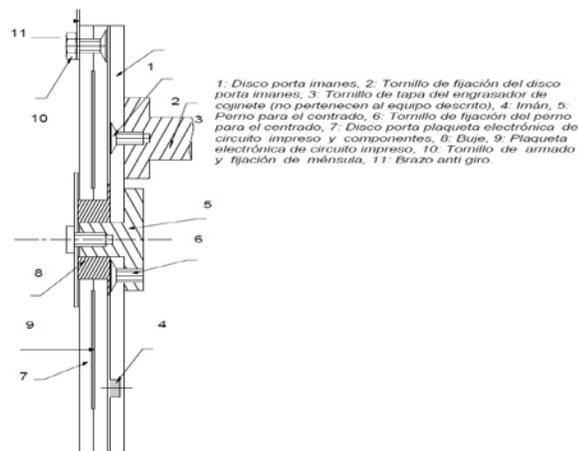


Figura 2 Corte diametral del conjunto con descripción de sus componentes genéricos.

El primer prototipo fue una construcción conceptual y consistía en dos discos independientes, uno que acompañaba el giro del eje a medir y el otro fijo, a unos pocos milímetros de separación del anterior, tomado a una parte estática de la estructura más cercana.

El disco 1 gira solidario con el eje estudio por estar vinculado mediante los tornillos 2, roscados a los tornillos 3, y éstos unidos a un disco de adaptación para las pruebas (no se ve en el dibujo). En el disco 1 se encuentran insertos los imanes 4, dispuestos sobre un determinado diámetro, y separados

angularmente de manera equidistante. El perno 5, unido al disco 1 mediante los tornillos 6, actúa de guía para la alineación correcta del disco 7. Un buje de material plástico 8 facilita el giro relativo entre ambas piezas con un mínimo rozamiento. El disco 7 contiene en su interior el circuito impreso 9. En esta plaqueta electrónica se disponen: un microprocesador; las bobinas que generan energía a partir de los campos magnéticos de los imanes; los detectores inductivos de campo magnético, con los cuales se calcula la frecuencia de giro; los sensores de aceleraciones; sistemas de comunicación; una memoria de capacidad suficiente para almacenar la información de varios meses, un sistema de hora, día, mes y año, y otros accesorios auxiliares. La generación de energía y los medios de comunicación no requieren cableado. Dado que el disco 7 está constituido por dos mitades, se aprovecha el tornillo 10, utilizado para fijar el brazo anti giro, para armar el conjunto. El brazo anti giro 11 inmoviliza al disco 7 contra la instalación.

4. Funcionamiento conceptual

Cuando el eje de interés comienza a girar, el disco 1 y los imanes pasan, sucesivamente, frente a las bobinas generando inmediatamente tensión de alimentación al circuito. Del mismo modo, el sensor inductivo es influenciado por el campo magnético de los imanes y detecta la frecuencia de giro, por la separación angular entre imanes. La gran cantidad de imanes y su escasa separación aseguran la inmediata detección del movimiento y su precisión, como así también la instantánea generación de energía de alimentación al sistema. Mientras tanto, el microprocesador temporal informa al microprocesador principal los datos de la hora, día, mes y año, del mismo modo que lo hace el posicionado satelital. A medida que la máquina que contiene el eje estudio se mueve y acelera, el detector informa de esta magnitud al procesador. Cuando la velocidad y las condiciones del terreno o de las vías -en la aplicación ferroviaria- lo inducen, los acelerómetros medirán las variaciones de estos parámetros en los tres planos ortogonales y en los seis sentidos. Toda esta información es almacenada en la memoria y/o enviada a un receptor remoto.

5. Lógica electrónica conceptual

En la figura 3 se observa el diagrama de bloques del circuito electrónico.

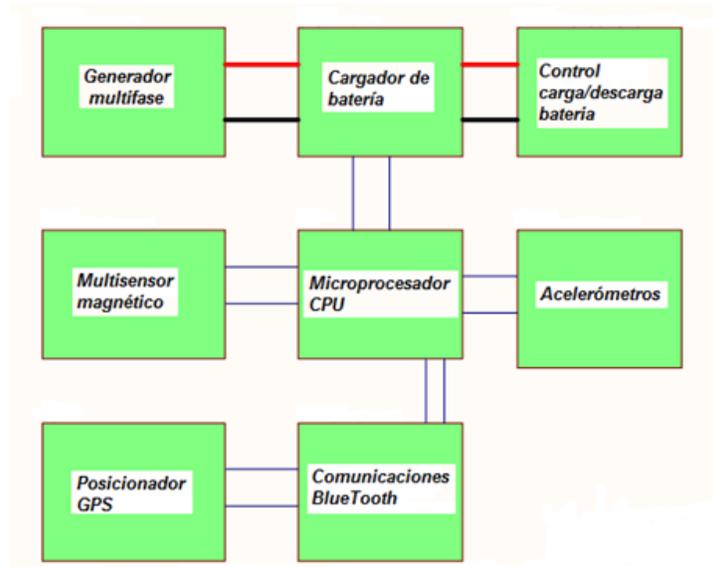


Figura 3 Diagrama de bloques del circuito electrónico.

La figura 4 muestra la plaqueta electrónica, posición 9 de la figura 2, y sus componentes, montada sobre el disco posición 7. En primer plano, se observa un módulo superpuesto conteniendo el procesador ATX mega 256 A3U, y un micro Bluetooth 2.0. La segunda plaqueta consta de un Bluetooth adicional para control de desarrollo.



Figura 4 Plaqueta electrónica de circuito impreso y sus componentes.

La figura 5 muestra un momento del ensayo de funcionamiento del primer prototipo. Se colocó sobre el plato de un torno para simular el giro. El disco

portante de los componentes electrónicos se trabó con un brazo tomado a la torreta porta herramientas. Las pruebas se realizaron a distintas frecuencias de giro y se recibió la información en una computadora portátil alejada.



Figura 5 El sistema colocado en un torno para simular el giro de la rueda.

En estas verificaciones no se pudo evaluar el funcionamiento de los acelerómetros. En la figura 6 puede observarse la composición de los dos discos que conforman el prototipo.

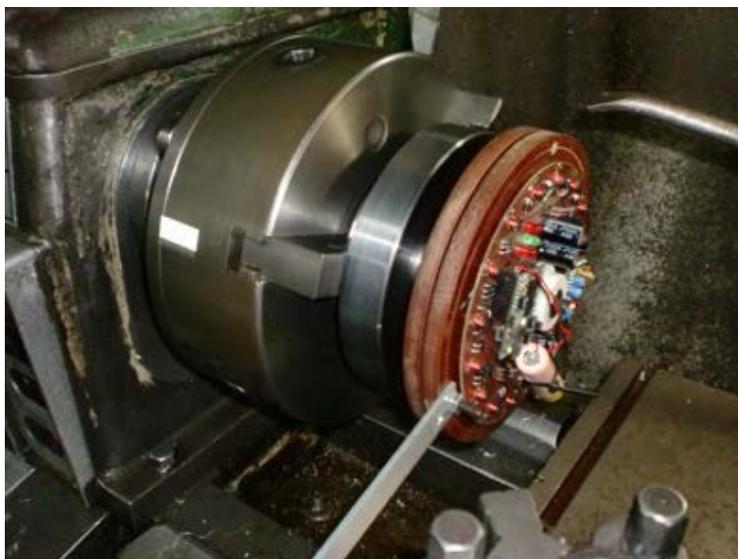


Figura 6 Primer prototipo en pruebas. Se observan las dos placas que lo componen.

Las figuras 7 y 8 muestran la recepción de datos en el procesador portátil, el cual contaba con un software que simulaba el equipo electrónico que, luego, se utilizaría en la realidad. El resultado de los primeros ensayos indicó que el

sistema de relevamiento de la frecuencia de giro funcionaba bien, la generación de energía era insuficiente para el consumo registrado y, además, de construcción relativamente engorrosa. También, se detectó que la transmisión de datos tenía alcance limitado



Figura 7 Recepción lejana de señales. Figura 8 Monitor del procesador portátil.

6. Segundo prototipo de prueba

Estas debilidades fueron superadas en el segundo prototipo. Éste se instaló en la rueda de la locomotora, aprovechando la disponibilidad de tres tornillos de la caja porta cojinete, como se muestra en la figura 9.



Figura 9 Lugar donde se instaló el segundo prototipo.

La instalación fue realizada por los autores del presente trabajo, como puede verse en la figura 10, en una máquina Diésel de la línea Belgrano Sur, en los talleres de la localidad de Tapiales, provincia de Buenos Aires, Argentina.



Figura 10 Instalación del segundo prototipo en la locomotora.

En la figura 11 puede observarse el segundo prototipo ya instalado en los momentos previos a las pruebas con la locomotora en marcha.



Figura 11 Segundo prototipo instalado en la rueda de la locomotora.

Por otra parte, la figura 12 muestra la plaqueta genérica desarrollada en la Cátedra de Electrónica Analógica y Digital de la carrera de Ingeniería Mecánica orientación Mecatrónica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Lomas de Zamora (UNLZ), utilizada para comprobar el funcionamiento del sistema de Comunicación y el software escrito. En ella puede leerse la recepción de la señal de velocidad de desplazamiento durante el recorrido de prueba llevado a cabo sobre la máquina.



Figura 12 Recepción remota de la señal de velocidad de desplazamiento.

Las condiciones reales de uso requirió de una construcción más robusta, apta para intemperie y, por lo tanto, cerrada. Se incorporó un conjunto de pilas alcalinas que proveían la energía a los sensores, al procesador y al sistema de comunicación. También, una caja adicional para incorporar tres interruptores a los fines de facilitar la operación de coordinación entre emisor y receptor remoto. Los ensayos confirmaron la mejora lograda en las comunicaciones, que permitió mayor alcance, pero con algunas deficiencias en la conexión automática entre emisor y receptor. Además, se comprobó que el paquete de baterías tenía una duración limitada a unas 200 horas continuadas.

7. Tercer prototipo de prueba

En el tercer prototipo se mejoraron los componentes del sistema de sensado, el sistema de comunicación y el software de operación, de modo de reducir al mínimo el consumo de energía. La tecnología aplicada consistió en la utilización de procesadores y materiales de excepcionalmente bajo consumo, al igual que la aplicación de circuitos operacionales como el MCP 6272 de baja demanda energética. También se diseñó un pequeño generador consistente en un rotor, con imanes permanentes, y un estator bobinado. La figura 13 muestra el dibujo en corte: 1: Disco de fijación, 2: Árbol principal, 3: Tapa de cierre, 4: Carcasa, 5: Disco porta imanes, 6: Plaqueta electrónica con sensores inductivos, 7: Rodamiento, 8: Rotor del generador, 9: Estator bobinado de generador, 10: Cubierta protectora de generador.

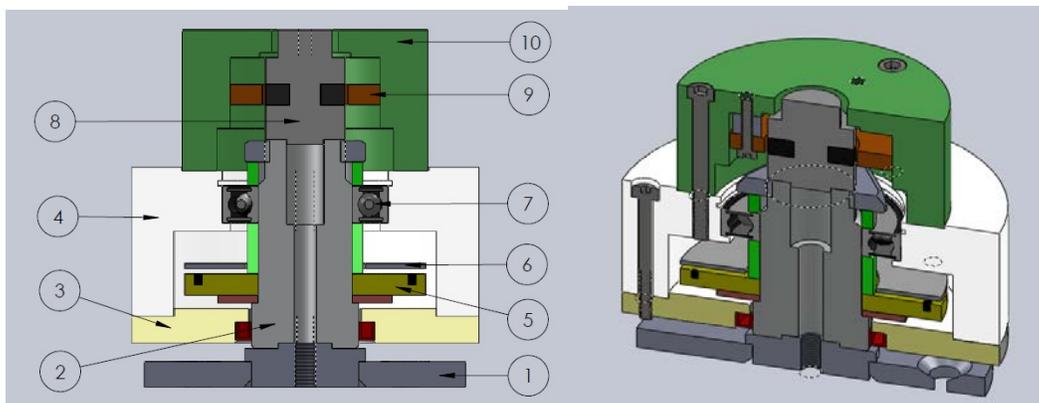


Figura 13 Corte tercer prototipo, vista 3D.

Las piezas 1, 2, 5 y 8 son solidarias a la rueda de la máquina, por lo que giran a la frecuencia de ella. El resto de las partes son inmóviles y se las vincula a la estructura cercana.

Al girar el disco porta imanes 5, el campo magnético de éstos actúa sobre los sensores generando los pulsos de tensión que identifican la frecuencia de giro.

En la figura 14 se ve el prototipo colocado en la rueda de la locomotora. En primer plano el brazo metálico anti-giro y el cable de antena del emisor. Este prototipo presentaba importantes ventajas respecto de los anteriores: mayor robustez y confiabilidad; alta capacidad de transmisión de datos; su nuevo software aseguraba la conexión automática entre el receptor remoto y el emisor; bajo consumo de energía; y facilidad para su montaje, inspección y desmontaje.

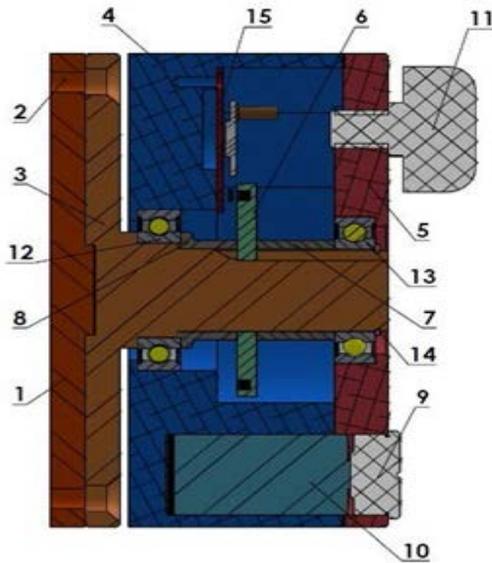


Figura 14 Tercer prototipo colocado en la rueda de la locomotora.

Las pruebas fueron exitosas, pero se dispuso eliminar el grupo generador por ser el factor más sensible en cuanto a desgastes y efectos derivados de las vibraciones.

8. Producto comercial

Finalmente, se construyó el equipo mostrado en la figura 15, que resume la experiencia acumulada en los distintos ensayos realizados sobre los prototipos descritos.



- 1: Disco de adaptación;
- 2: Ubicación tornillo de fijación;
- 3: Eje;
- 4: Cuerpo;
- 5: Tapa;
- 6: Disco porta imanes;
- 7: Separador largo;
- 8: Separador corto;
- 9: Tapón de batería;
- 10: Batería;
- 11: Antena multi|direccional
- [4]; 12 y 13: Rodamientos;
- 14: Anillo elástico de cierre;
- 15: Plaqueta electrónica.

Figura 15 Equipo final.

El diseño preliminar de la pantalla que el usuario observa se muestra en la figura 16. La misma puede adaptarse a distintas finalidades e incluso realizarse con el diseño y datos que se requieran.

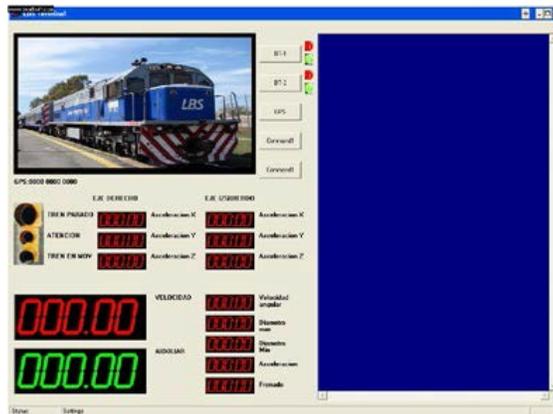


Figura 16 Pantalla de datos.

A posteriori se desarrolló un sistema de vídeo binocular y radar tipo SAR con un Controlador CPU Data logger, con sistemas de comunicación de alta eficiencia y modem telefónicos GPRS 4G y sensores diversos multi propósitos, actualmente en proceso, figuras 17 a 21.



Figura 17 Módulo de captura de vídeo binocular versión VR 3D y radar SAR final.



Figura 18 Unidad central de procesamiento de datos versión V final.



Figura 19 Unidad central de procesamiento desarrollada en la UNLZ.

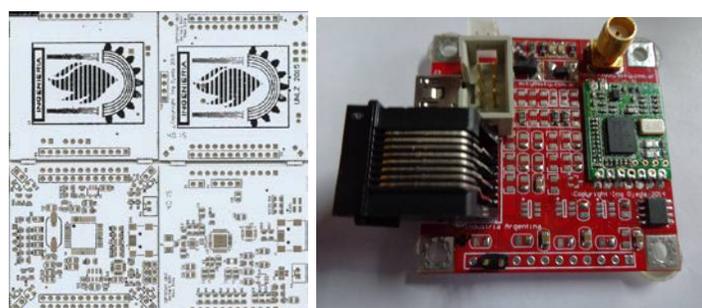


Figura 20 Sensores especiales con comunicación inalámbrica RF433.



Figura 21 Versión mecánica final del control de la velocidad y posicionamiento geográfico.

9. Avances Tecnológicos

Técnicas SAR para la detección temprana de obstáculos en vías

Ante la necesidad de poder tener mayor tiempo de frenado de una formación ante la detección de un objeto en las vías y ante la imposibilidad de usar Cámaras de video en modo nocturno se impulsó la creación de una cámara de video 3D estéreo que además utiliza tecnología SAR, figura 17 para poder monitorear tanto en modo diurno como nocturno el campo visual delante de la locomotora y/o detrás de la misma (vagón de cola). Se aplicó tecnología electrónica avanzada, y la creación de emisores de radiofrecuencia en la banda de los 2 a 4 Ghz para poder realizar una detección de obstáculos a una distancia mayor a los 5 km en línea recta en la figura 22 se puede apreciar un ejemplo de captura de imagen y su procesamiento en 3D y 2D

El resultado es independiente si es de día o de noche y también del nivel de iluminación, la aplicación resultante es apta para detectar obstáculos.

La aplicación de tecnología SAR (figura 23) y el procesamiento de señales nos dan como resultado imágenes de la cual se obtienen señales de Alarma temprana.

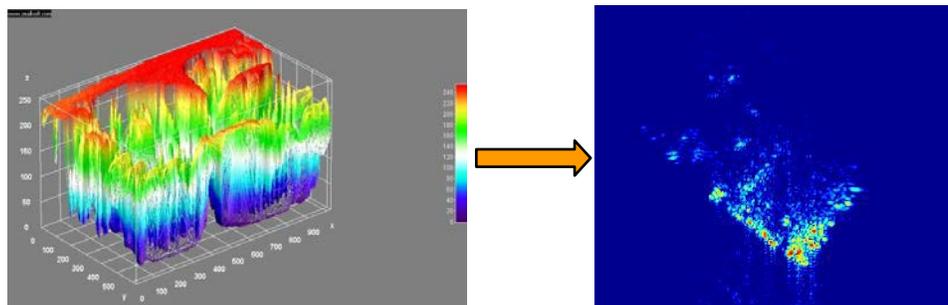


Figura 22 Captura de imagen 3D - SAR de obstáculo.

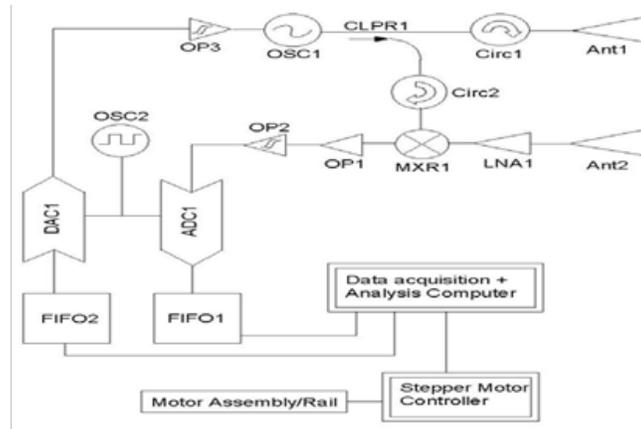


Figura 23 Diagrama en block visor SAR.

10. Conclusiones

Se aplicó tecnología electrónica avanzada, combinada con diseño mecánico, para hacer frente a la necesidad de contar con un dispositivo que realizara el relevamiento de parámetros y controles de una formación Ferroviaria su entorno y señalización.

Pudiendo controlar la totalidad de los parámetros involucrados utilizando módulos e interfaces especiales, diseñadas específicamente para cada medición y/o control de dispositivos, como ser velocidad, aceleración, frenado, posición geográfica, voltaje generados o de red, consumo de combustible, presiones, puertas abiertas, líneas de frenos de la locomotora y de cada vagón de la formación sin necesidad de cableado

El equipo desarrollado posee comunicación inalámbrica de largo alcance GSM GPRS, figuras 24 y 25.

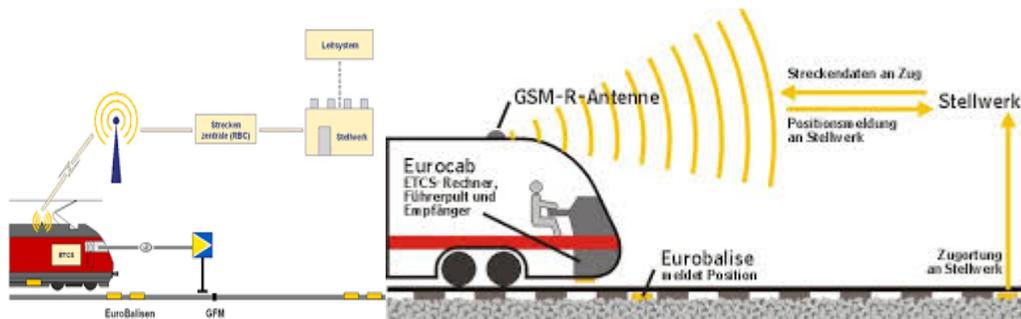


Figura 24 Comunicaciones GSM-GPRS-RF433.

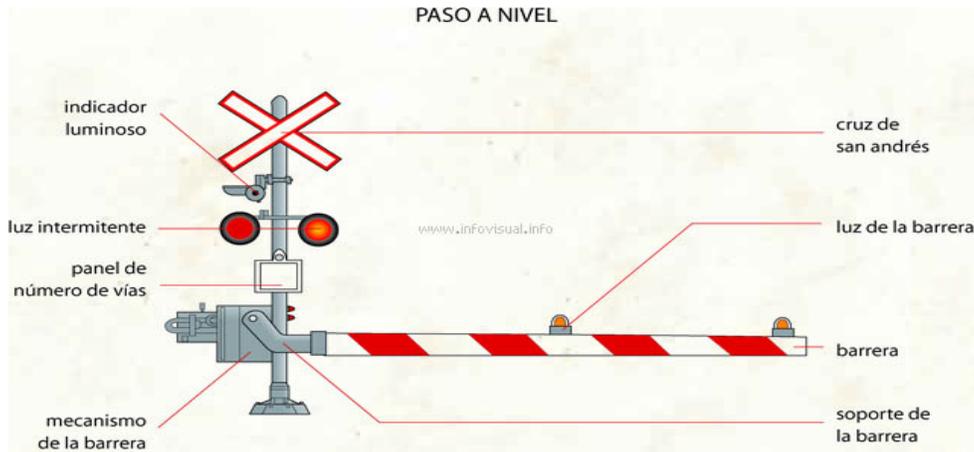


Figura 25 Comunicaciones RF433 con pasos a nivel.

Posibilidad de comunicación con barreras paso a nivel con aviso de status al igual que la comunicación con todo tipo de señalamiento límites de velocidad fijos o variables.

Robustez mecánica y alta confiabilidad; sus componentes y software aseguran muy bajo consumo de energía y ésta es suministrada por una batería de litio de significativa estabilidad de depreciación [5]. Con lo cual se retiene la información ante cortes de energía además se almacena tipo caja negra toda la información de funcionamiento histórica.

El desarrollo fue resultado de un convenio de colaboración entre la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Lomas de Zamora y la empresa Antrieb Sudamericana SA, y derivó en la solicitud de Patente de Invención según expediente N° 20130104206 ante el INPI, Instituto Nacional de la Propiedad Intelectual, Administración Nacional de Patentes, Argentina.

11. Bibliografía y Referencias

- [1] J. J. D`Azzo, C. H. Houpis, Sistemas Realimentados de Control (Análisis y Síntesis). 2ª edición. 1975. Paraninfo. Madrid.
- [2] S. Yeralan, A. Ahluwalia, Programming and Interfacing the 8051 Microcontroller. 1995. Addison-Wesley Publishing Company. EE. UU.
- [3] <http://lp.espacenet.com>. 2013-2014.

- [4] RF Solutions LTD. PUK Dual Band Antenna, 433/868MHz. www.rfsolutions.co.uk.
- [5] EVE ENERGY CO., LTD. Technical Specification.
- [6] ER34615. www.evebattery.com.
- [7] B. Lovell. *Echoes of War: The Story of H2S Radar*. 1991. Taylor & Francis Group. New York. NY.
- [8] W.G. Carrara, R.S. Goodman, R.M. Majewski, *Spotlight Synthetic Aperture Radar Signal Processing Algorithms*. 1995. Artech House. Boston, MA.
- [9] G. L. Charvat, *A Low-Power Radar Imaging System*. 2nd Edition. 2007. Department of Electrical and Computer Engineering, Michigan State University. East Lansing, MI. 2007.

12. Autores

Miguel Antonio Ojeda Moreno es Profesor Adjunto en la Universidad Nacional de Lomas de Zamora (UNLZ), Facultad de Ingeniería, Ciclo Superior de especialización de Ingeniería Mecánica, orientación Mecatrónica. También es Profesor Adjunto en la Universidad Tecnológica Nacional (UTN.BA), Facultad de Ingeniería, orientación Mecatrónica.

Ricardo M. Amé es Profesor Titular Ordinario en la Universidad Nacional de Lomas de Zamora (UNLZ), Facultad de Ingeniería. Coordinador del Ciclo Superior de la carrera de Ingeniería Mecánica, orientaciones Mecánica y Mecatrónica.