

Sistema Basado en FPGA para la Medición de Velocidad de Detonación en Cordones Detonantes

FPGA-Based System for Velocity of Detonation Measurements on Detonating Cords

Silvano R. Rossi^{#1}, Roberto J. de la Vega^{*2}, Franco E. Déber^{*3}

[#]Dpto. Ing. Electromecánica - Núcleo INTELYMEC – CIFICEN (UNCPBA-CICPBA-CONICET)
Facultad de Ingeniería, UNCPBA
Olavarría, Bs. As., Argentina

¹ srossi@fio.unicen.edu.ar

^{*}Dpto. Ing. Electromecánica - Núcleo INTELYMEC – Facultad de Ingeniería, UNCPBA
Olavarría, Bs. As., Argentina

² rjdlv@fio.unicen.edu.ar

³ fdeber@fio.unicen.edu.ar

Recibido: 27/09/24; Aceptado: 02/12/24

Resumen— Este trabajo presenta los aspectos más importantes del desarrollo de un sistema diseñado para medir la velocidad de detonación (VOD) de cordones detonantes utilizados en la industria minera. El sistema utiliza el método de medida punto a punto, empleando fibras ópticas como elementos sensores. Está compuesto por un dispositivo FPGA que permite la implementación de un sistema multicanal y fácilmente escalable y un microcontrolador que gestiona la interfaz de usuario. Este instrumento se desarrolló en respuesta al requerimiento de una empresa fabricante de cordones detonantes, ante la ausencia de este tipo de equipos en el mercado nacional. El medidor de VOD desarrollado es capaz de medir velocidades mayores a los 7500 m/s, cubriendo la mayoría de las aplicaciones en la industria minera y petrolera.

Palabras clave: velocidad de detonación; cordón detonante; FPGA.

Abstract— This work presents the most important aspects of the development of a system designed to measure the velocity of detonation (VOD) of detonating cords used in the mining industry. The system utilizes the point-to-point measuring method, employing optical fibers as sensing elements. It comprises an FPGA device that enables the implementation of a multi-channel, easily scalable system, and a microcontroller that manages the user's interface. This instrument was developed in response to a request from a detonating cords manufacturing company, addressing the absence of such equipment in the national market. The VOD meter developed is capable of measuring velocities greater than 7500 m/s, covering most applications in the mining and oil industry.

Keywords: velocity of detonation; detonating cord; FPGA.

I. INTRODUCCIÓN

Los explosivos industriales poseen un amplio campo de aplicación en la minería a cielo abierto, minería subterránea, obra civil e industria petrolera, entre otras. Se los utiliza para realizar voladuras controladas, excavaciones, perforaciones y punzado de pozos [1]-[4]. En este contexto,

la velocidad de detonación, comúnmente conocida como VOD (*Velocity of Detonation*) de un explosivo constituye uno de los parámetros característicos más importantes asociado a su desempeño y, por lo tanto, su medición es relevante tanto en su fabricación, como en su campo de aplicación [5], [6].

La VOD de un explosivo es la velocidad a la cual se propaga el frente de onda de detonación a través de una carga explosiva, pudiendo alcanzar valores mayores a los 7000 m/s en determinados casos [7], [8]. Mediante la VOD se puede obtener también la presión de detonación, también necesaria para evaluar el desempeño de los explosivos [9], [10].

Los distintos tipos de explosivos poseen diferentes VOD y el aumento de su valor está relacionado con la potencia de los mismos. En un explosivo, la VOD depende de su composición, densidad, grado de confinamiento, diámetro de la carga, tamaño de partícula de sus componentes y temperatura, entre otros parámetros y variables [11], [12]. Por los motivos expresados anteriormente, la medición de la VOD con un elevado grado de exactitud es fundamental en el campo de los explosivos industriales [13], [14], impactando, por un lado, en las empresas que emplean explosivos, ya que al medir correctamente y sistematizar la medición pueden mejorar las voladuras controladas y, por otro lado, en los fabricantes de explosivos y sus accesorios, porque pueden caracterizarlos de manera más adecuada y mejorar su producción.

Los cordones detonantes merecen especial atención en relación a su VOD, dado su elevado valor relativo respecto a otros explosivos y cargas explosivas. Los cordones detonantes son tubos flexibles que contienen material explosivo en su interior, caracterizados por su elevada VOD con valores superiores a los 5.000 m/s, alcanzando actualmente valores superiores a los 8.000 m/s [15]-[17]. Se utilizan principalmente para iniciar detonadores y como línea principal para conectar barrenos u otras cargas explosivas [18].

La VOD se mide con técnicas y/o instrumentos de medición que responden a diferentes métodos [19]-[22]. En términos generales, un sistema para medir VOD requiere elementos sensores que estén en contacto con el explosivo y un registrador que almacene los cambios a lo largo del tiempo, para finalmente visualizar la VOD en una pantalla.

Los métodos de medición de VOD continuos y discontinuos son los predominantes en los equipos comerciales [23]. En los métodos continuos se emplean cables o sondas de valor de resistencia lineal conocida y dispuestos a lo largo del explosivo. A medida que avanza el frente de onda de detonación, el explosivo consume la sonda y la resistencia del circuito disminuye en valor proporcional a la reducción de su longitud, para medir y registrar la variación de una variable eléctrica a lo largo del tiempo. En los métodos discontinuos, las mediciones se realizan en puntos específicos de la carga explosiva (punto a punto). En particular, mediante el sensado óptico empleando cables de fibra óptica dispuestas en diferentes puntos del explosivo, la VOD se obtiene midiendo el tiempo que tarda la onda de choque en viajar de una fibra a otra y conociendo la distancia de separación entre ellas [14], [23].

Existen, a nivel mundial, diversas opciones comerciales de alto costo relativo para la medición de la VOD, que se han utilizado y se utilizan en diferentes estudios sobre métodos de medición, propiedades de los explosivos y realización de mediciones en campo [18], [24]-[26]. La alternativa de desarrollos de dispositivos de bajo costo ha sido poco explorada, particularmente en los países en vías de desarrollo. Existen alternativas de dispositivos basados en microcontrolador [27], [28] para velocidades medias. No obstante, se aprecia una notable carencia en relación a los medidores basados en dispositivos lógicos programables tipo FPGA (*Field Programmable Gate Array*), aplicables a la medición de altas VOD, como es el caso concerniente a los cordones detonantes. En términos de aplicaciones basadas en dispositivos lógicos programables, se consideran relevantes los trabajos presentados en [29]-[31].

En [29] se presentó un sistema para mediciones de VOD que utiliza tecnología FPGA. Se trata de un registrador digital de datos diseñado para medir la VOD en aplicaciones de campo. En el trabajo se menciona que el registrador es capaz de grabar datos a altas velocidad (hasta 20 MHz), pero no se especifican las VOD medidas. En [30], se propuso un sistema de medida de VOD utilizando dos fibras ópticas para medición punto a punto. El trabajo muestra el registro de medición de VOD en cordones detonantes, con valores entre 7100 y 7300 m/s. Dicho sistema emplea una FPGA para procesar las señales, lo que mejora la precisión de la medida y simplifica la depuración del sistema. El dispositivo muestra la VOD obtenida en una pantalla. En [31] se presentó el desarrollo y las pruebas de un medidor de VOD llamado OPTIMEX, que utiliza múltiples sondas de fibra óptica independientes como sensores. El sistema está compuesto por una FPGA (sistema digital) y un microcontrolador que gestiona la interfaz con el usuario. El trabajo muestra el registro de medición de VOD en cordones detonantes, en el rango de 6000 a 8000 m/s.

En este trabajo se presenta el desarrollo de un sistema de bajo costo basado en FPGA para la medición de VOD a solicitud de una empresa fabricante de cordones detonantes con certificación ISO 9001:2015. El requerimiento de la

empresa surge debido a la ausencia de este tipo de dispositivos a nivel nacional y en gran parte de Latinoamérica.

El punto crítico y desafiante del presente trabajo se relaciona con la velocidad de procesamiento requerida para medir hasta 10.000 m/s, con una resolución de medición de tiempo de 0,1 μ s, lo que condujo a la decisión de utilizar una FPGA, que permite la implementación de un sistema multicanal (5 en este caso) y fácilmente escalable. De esta manera, el medidor de VOD desarrollado cubre la mayoría de las aplicaciones en la industria minera y petrolera.

El artículo está organizado de la siguiente manera: en la Sección II se describe el método de medición implementado, las partes constitutivas del medidor de VOD desarrollado y sus aspectos funcionales; en la Sección III se muestran los resultados obtenidos; en la Sección IV se discuten cuestiones asociadas a la medición de VOD y, finalmente, se presentan las conclusiones del trabajo.

II. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

A. Método de Medición Utilizado

El sistema desarrollado utiliza cables de fibra óptica como elementos sensores para detectar y transmitir la señal luminosa generada por el frente de onda de detonación. Se trata de un método discontinuo, punto a punto, en el que el primer cable de fibra óptica dispuesto en el cordón detonante señala el inicio del conteo de tiempo y la última fibra, fijada a una distancia conocida en el cordón, lo detiene. La distancia entre los puntos de medición (llamados segmentos), dividida por la diferencia de tiempo entre las señales transmitidas por las fibras ópticas, proporciona una estimación precisa del valor de la VOD. Siguiendo el mismo principio, se implementaron cinco puntos de medición que permiten la adquisición de cuatro mediciones de VOD.

El paso del frente de onda de detonación por un punto de la muestra (cordón detonante) se detecta y transmite mediante una fibra óptica plástica, con núcleo de polimetilmetacrilato (PMMA) de 1000 μ m de diámetro y revestimiento de polímero fluorado de 2,2 mm de diámetro. Dicha fibra se dispone de forma perpendicular al cordón detonante (Fig. 1), haciendo contacto con éste y asegurada con una cinta. La fibra óptica se conecta al medidor VOD en el otro extremo.



Fig. 1. Fibra óptica colocada en el cordón detonante.

Los tiempos a medir se sitúan en el rango de 1 μ s a 1.000 μ s con una resolución de 0,1 μ s. El equipo es capaz de medir hasta cuatro tiempos de recorrido, lo que equivale a cinco puntos, y calcular sus velocidades. Los resultados se muestran en una pantalla LCD, incluyendo los tiempos medidos, las distancias introducidas y las VOD calculadas.

El sistema permite almacenar hasta tres ensayos con su respectiva fecha y hora. En la Fig. 2 se muestra un diagrama del sistema de medición implementado.

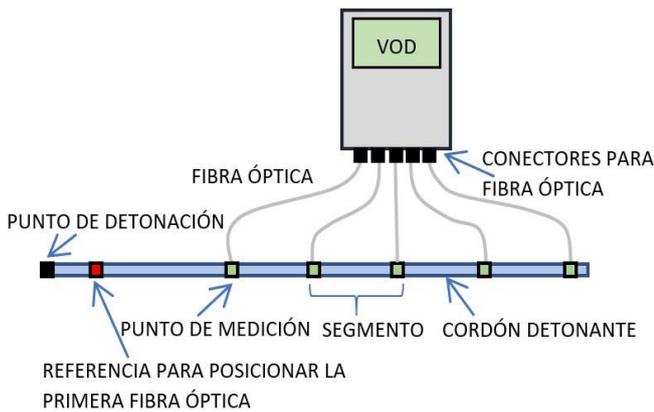


Fig. 2. Método de medición de VOD implementado.

B. Partes Constitutivas del Medidor

En la Fig. 3 se muestra el diagrama en bloques del medidor de VOD. El sistema está compuesto por las entradas de señal de fibra óptica FOn, que se conectan a un conformador de pulsos (CP), un sistema digital (SD) para el procesamiento de las señales recibidas, un host, un teclado y un display.

El SD se implementó en una FPGA y el host mediante un microcontrolador. Se eligió esta alternativa en función de los requerimientos planteados por el usuario, en cuanto a posibles modificaciones futuras de la interfaz de usuario. Por este motivo, se implementó un host basado en microcontrolador debido a la facilidad y versatilidad de las posibles modificaciones del software.

El SD se aloja en un dispositivo FPGA de la empresa Altera, familia CYCLONE II, soportado por una placa modelo EP2C5T144 miniboard genérica. Para la descripción del hardware se utilizó lenguaje VHDL. Tanto para la descripción como para la configuración del hardware del SD se utilizó la herramienta Quartus® II Versión 13.0.0 Web Edition. El módulo UART se implementó mediante descripción HDL pública.

Para el host se empleó un microcontrolador MSP430F247 de Texas Instruments. El uC utiliza la memoria flash disponible para el usuario para almacenar los ensayos. Como entorno de desarrollo de software se utilizó Code Composer Studio™. Se definió una interfaz hombre-máquina mediante una pantalla de 4 líneas x 20 caracteres y un teclado compuesto por cinco pulsadores con funciones específicas.

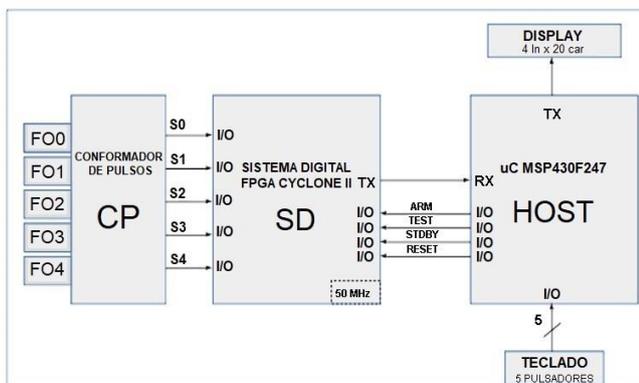


Fig. 3. Diagrama en bloques del medidor de VOD.

El medidor de VOD dispone de cinco pulsadores, cuatro de los cuales tienen doble función. Las funciones son las siguientes: ENTER para dar comienzo a la prueba, ARRIBA/ARM para subir o armar, ABAJO/GUARDAR para bajar o guardar, IZQ/NUOVO para mover a la izquierda o ejecutar una nueva prueba, y DER/MENU para mover hacia la derecha o volver a la pantalla del menú. La función de cada pulsador está determinada por la pantalla en la que se encuentre.

C. Descripción Funcional

El bloque SD permite determinar el tiempo transcurrido entre la transición de la señal S0 (que corresponde al inicio de la cuenta) y las transiciones de las señales digitales S1 a S4, mediante un contador de pulsos que produce un oscilador de 50 MHz, lo que permite una resolución de 20 ns. El bloque CP convierte las señales luminosas provenientes de las entradas FOn en señales eléctricas (S0 a S4) por medio de detectores fotoeléctricos aptos para operar con las fibras ópticas empleadas y comparadores de alta velocidad de respuesta. Una transición de BAJO a ALTO a la salida del comparador indica el pasaje del frente de onda de detonación por el punto de medición correspondiente.

En la Fig. 4 se presenta un diagrama detallado del SD, en el que pueden apreciarse una máquina de estados (ME), un contador, un multiplexor 8 a 1 (8-1 MUX), 4 registros de 16 bits (REG0-REG3) y un bloque UART.

Las señales S0 a S4 ingresan a la ME diseñada para controlar el bloque SD. Para su funcionamiento se definieron 40 estados. Por razones de simplicidad su operación será discutida brevemente. Cuando la ME se habilita para un ensayo (estado armado), un flanco creciente de S0 en la entrada de la ME dispara un contador síncrono de 16 bits, a través de la señal de salida CTENA de la ME, iniciando la cuenta.

A través de la ME se habilitan los registros REG0 a REG3 que almacenan el número de pulsos contados en las transiciones de las señales S1 a S4. Si no se detectan flancos crecientes en las entradas Sn de la ME, el contador alcanzará el valor final de la cuenta. En cambio, si se detectan todos los flancos crecientes de dichas señales el contador también alcanzará el valor final de la cuenta, llevando la ME al estado final de la medición, mediante la señal CTEND. En dicho estado, el contador se deshabilita a través de la señal CTENA de la ME, deteniendo la cuenta para pasar al estado de selección de registros. Posteriormente, el SD inicia el proceso de envío de los datos de los registros al host, seleccionando secuencialmente (salida SEL de la ME) cada salida de registro (entradas al 8-1 MUX) para ingresar los datos en la UART. Luego de finalizada la transmisión, el SD queda en espera hasta un nuevo proceso de medición.

Luego de recibidos los datos en el host, éste calcula los tiempos parciales: $t_0 = t_{REG0}$, $t_1 = t_{REG1} - t_{REG0}$, $t_2 = t_{REG2} - t_{REG1}$ and $t_3 = t_{REG3} - t_{REG2}$. Si los tiempos calculados resultan menores que 0, se les asigna el valor 0,0. Si los valores de las distancias son 0 (no se ingresó valor diferente al default), a los tiempos se les asigna el valor 0,0. Posteriormente se convierten los tiempos a código ASCII, preparando la información para enviar al display.

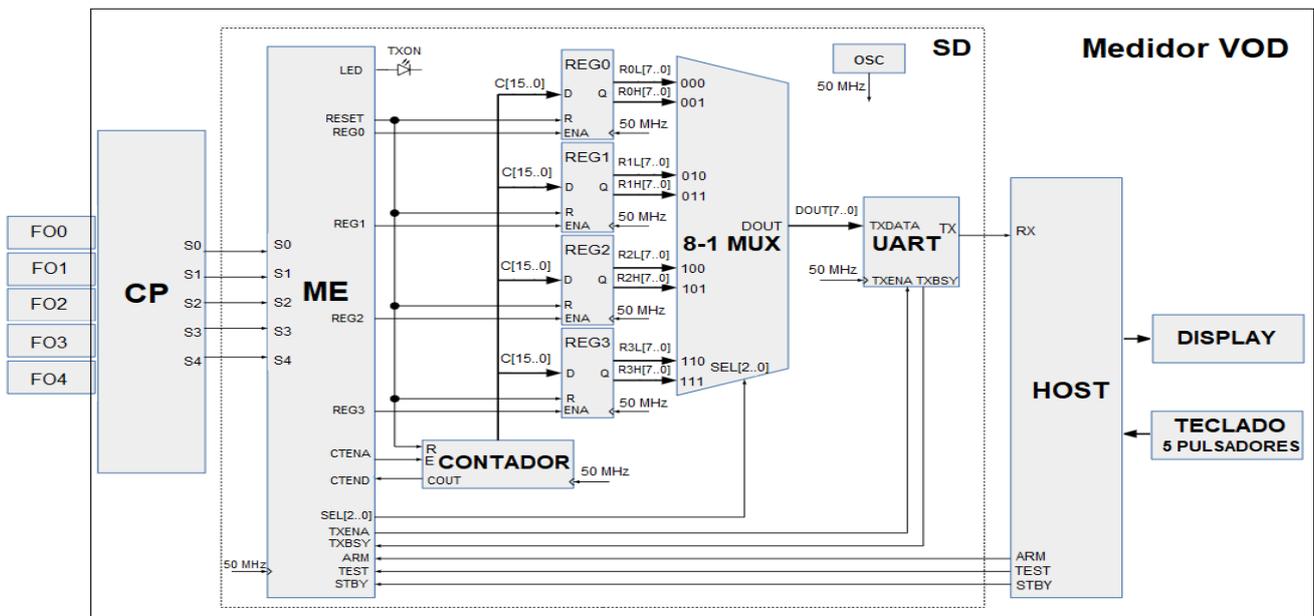


Fig. 4. Medidor de VOD – Detalles del sistema digital.

Si los valores de los tiempos son 0,0, se indica “----”. Si los tiempos resultan mayores a 999,9, se indica “OVL”. Luego se calculan las velocidades en m/s. Para determinar las 4 velocidades, el host utiliza las distancias ingresadas por el operador y el cálculo del tiempo correspondiente a cada segmento (número de pulsos contados x el período de los pulsos). Si los valores de los tiempos son 0,0, se les asigna el valor 0,0. Los datos de VOD se convierten a código ASCII, preparando la información para enviar al display. Si los valores de las velocidades son 0,0 se indica “-.-” en el display, en contrapartida, si resultan mayores a 999,9, se indica “OVL”.

III. RESULTADOS

A. Simulación Funcional

En la Fig. 5 se muestra una simulación funcional del sistema digital en ModelSim®, correspondiente al proyecto VOD-SD (realizado con la herramienta Quartus® II).

En la simulación se puede visualizar parte del funcionamiento de la ME y las salidas de los registros. Se han considerado las siguientes señales de entrada a la ME: *clock* de 50 MHz, *ARM*, *RESET*, *STBY* y *TEST*, y la salida *CTENA*. Con el *RESET* en nivel lógico ‘0’, *ARM* en nivel ‘1’, *TEST* en nivel ‘0’ y *STBY* en nivel ‘0’, respectivamente, la ME pasa al estado *espera_pulso*. La ME evoluciona al estado *marcha_arm* ante un flanco creciente en la señal *S0* y se habilita el contador (salida *CTENA* de la ME), iniciándose la cuenta. En el diagrama pueden verse las transiciones en las señales *S1* a *S4* y los valores correspondientes en la salida de los registros como resultado del conteo de pulsos. Si no se detecta flanco de *S0*, la ME permanece en el estado *espera_pulso* o evoluciona hacia *stdby*, cuando la entrada *STBY* pasa al nivel lógico ‘1’.

En cuanto a los recursos, se utilizaron 207 de los 4.608 elementos lógicos disponibles de la FPGA (4%), 151 de los 4.608 registros lógicos dedicados (4%) y 14 de los 89 pines (16%), lo que indica que el sistema digital puede escalarse sin cambiar la FPGA.

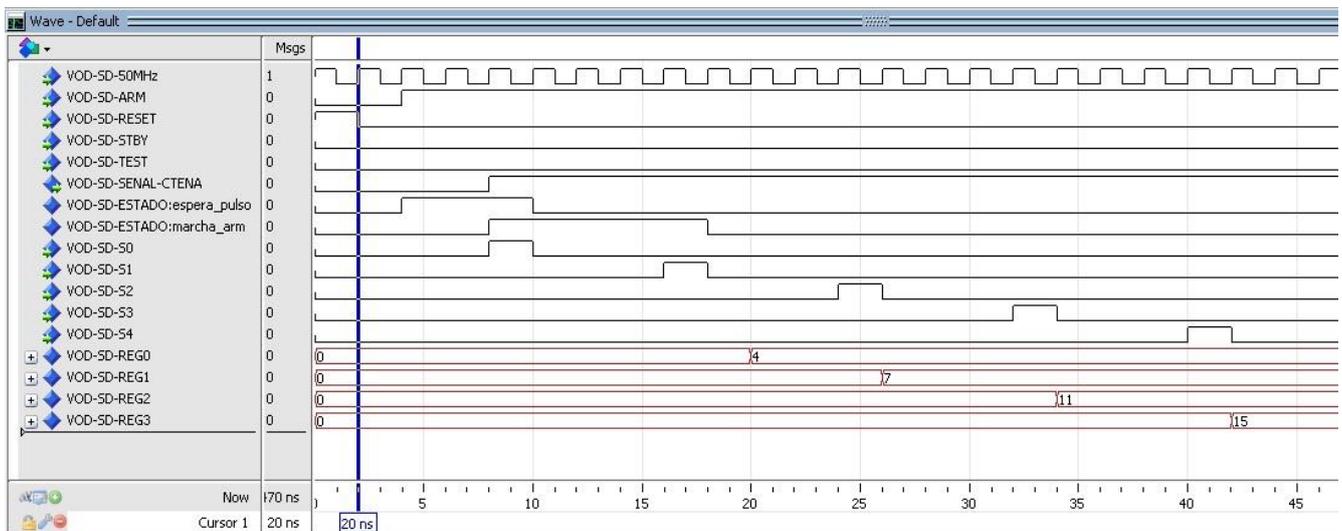


Fig. 5. Simulación funcional del sistema digital.

B. Ensayos de Campo

Para la realización de los ensayos de campo, inicialmente se deben colocar las fibras ópticas en el cordón detonante en orden secuencial, a partir del extremo en el cual se inicia la detonación. La cantidad de fibras a colocar depende de la cantidad de tiempos que se desee medir, hasta un máximo de 5 en este caso. La primera fibra, que corresponde a la entrada n° 1 del equipo, se debe colocar en cualquier caso de medición. El corte de la fibra se realiza en ángulo recto respecto a su eje longitudinal con una cortadora específica para fibras ópticas. En la Fig. 6 se puede observar la colocación de cuatro fibras ópticas en el cordón detonante para la realización de un ensayo de prueba. Posteriormente, los otros extremos de las fibras ópticas se conectan al medidor de VOD, a través de sus conectores de entrada. El instrumento se ubica en una zona protegida a una distancia aproximada de 5 m.

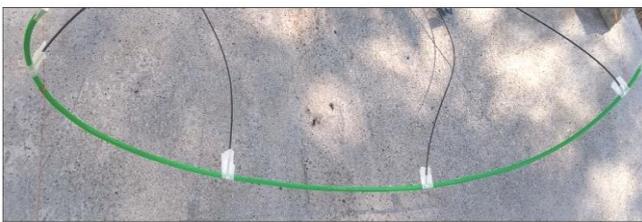


Fig. 6. Preparación del ensayo para medición de VOD de un cordón detonante.

Una vez encendido, el equipo realiza un autodiagnóstico para verificar el funcionamiento correcto del sistema y el estado de la batería. Si se verifica funcionamiento correcto, el operador puede operar normalmente el equipo. En esa instancia, se puede seleccionar una de dos alternativas: realizar un nuevo ensayo o acceder a la memoria para observar ensayos realizados anteriormente. Para proceder al ensayo, el operario del instrumento de medición debe cargar previamente las distancias comprendidas entre las fibras ópticas ubicadas en el cordón.

En la Fig. 7 se muestran los valores de VOD obtenidos en una prueba de campo, considerando 4 canales de medición, que corresponden a 3 distancias ingresadas y, por lo tanto, 3 tiempos medidos y 3 VOD medidas.

Los valores de VOD obtenidos deben ser comparables. Valores disímiles indicarían la presencia de un defecto o un problema de calidad del cordón detonante. Este resulta un dato de vital relevancia para el fabricante.



Fig. 7. Valores de distancias ingresadas, tiempos calculados y VOD medidas, mostrados en el display del instrumento de medición.

C. Especificaciones Principales

En la Fig. 8 se muestran dos vistas del medidor de VOD desarrollado, en la primera de ellas una vista frontal en la que pueden apreciarse el display y el conjunto de pulsadores y, en la segunda, una vista lateral en la que pueden verse los conectores de entrada de fibra óptica que contienen a los fotodetectores.

En la Tabla I se detallan las especificaciones principales del medidor.



Fig. 8. Vistas frontal y lateral del medidor de VOD.

TABLA I
MEDIDOR DE VOD – ESPECIFICACIONES PRINCIPALES

Características	
Parámetro	Especificación/Valor
Dimensiones	Largo: 20,5 cm; Ancho: 16 cm; Alto: 6 cm
Canales de entrada	5 entradas para conexión de fibra óptica
Máximo tiempo medible	999,9 µs
Resolución de tiempo	100 ns ± 20 ns
Máxima distancia medible	La suma de distancias no puede ser mayor a 999 cm
Máxima VOD medible	9999 m/s
Memoria	Capacidad para almacenamiento de 3 ensayos
Alimentación	Fuente de alimentación externa o batería de 9 V
Consumo de corriente	60 mA
Tipo de fibra óptica (consumible)	PMMA, diámetro de núcleo de 1000 µm y diámetro de revestimiento de 2,2 mm

IV. DISCUSIÓN

Mediante la medición de VOD, entre otros parámetros, se puede caracterizar a un explosivo determinado. No obstante, hay otra cuestión relevante asociada a los valores que se obtienen en las mediciones, dado que valores disímiles de VOD en un mismo ensayo de campo indica la presencia de un defecto o un problema de calidad del explosivo, auxiliando en su proceso de fabricación.

En los ensayos realizados en campo se han registrado valores de VOD superiores a los 7600 m/s, dado que los cordones detonantes ensayados poseen esa característica. No obstante, la VOD teórica medible es de 9999 m/s. Si se consideran los trabajos [29]-[31], mencionados en la introducción, puede observarse que el dispositivo desarrollado iguala y, en determinados casos supera, a los equipos existentes, pero con un concepto de bajo costo. Un aspecto importante en este sentido es disponer de un medidor de estas características a nivel nacional, pues no se tienen datos de registros de este tipo de equipos, desarrollados en el país, que se comercialicen en el mercado nacional. Los equipos disponibles son de origen importado y se comercializan fundamentalmente a través de proveedores internacionales. Se considera, así, que el medidor desarrollado puede reemplazar a los equipos importados, con prestaciones similares y con un costo competitivo.

En particular el medidor de VOD presentado en este trabajo ha sido transferido y actualmente se está utilizando para mediciones de campo en una empresa fabricante de cordones detonantes, llevando más de dos años de utilización.

Como fase siguiente del proyecto, actualmente se está ensayando un simulador óptico, también basado en FPGA, que permite simular la detonación de un cordón explosivo, constituyendo un instrumento patrón para el contraste el medidor de VOD y obtener la curva de error de instrumental.

V. CONCLUSIONES

Se desarrolló un medidor de VOD basado en FPGA, de bajo costo relativo, que permite realizar mediciones en cordones detonantes. En los ensayos realizados en campo se han registrado valores de VOD superiores a los 7600 m/s. No obstante, El medidor tiene la capacidad de medir velocidades de detonación hasta los 9999 m/s, cubriendo así la mayoría de las aplicaciones en el campo de la minería e industria del petróleo, con una resolución de 0,1 μ s en la medición de tiempo, la que se considera adecuada, pues iguala o supera a la de los equipos existentes.

El diseño del hardware permite la escalabilidad para acomodar más canales reutilizando la descripción del hardware realizada.

El medidor de VOD desarrollado se considera un aporte a la solución de un problema que tiene alcance regional, motivado por la necesidad de sustitución de importaciones.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado con el financiamiento y apoyo de la Empresa Explosivos Tecnológicos Argentinos S.A. viabilizado mediante un protocolo de desarrollo tecnológico entre la empresa y la UNCPBA.

REFERENCIAS

- [1] O. Khomenko, M. Kononenko, I. Myronoba, and M. Savchenko, "Application of the emulsion explosives in the tunnels construction," *E3S Web of Conferences*, vol. 123, pp. 1-15, 2019. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912301039>
- [2] E. Galante, A. Haddad, and N. Marques, "Application of explosives in the oil industry," *International Journal of Oil, Gas and Coal Engineering*, vol. 1, no. 2, pp. 16-22, Aug. 2013. <https://doi.org/10.11648/j.ogce.20130102.11>
- [3] P. A. Eshun, B. O. Afum, and A. Boayke, "Drill and blast performance evaluation at the Obra Pit of Chirano Gold Mines Ltd, Ghana," *Ghana Mining Journal*, vol. 6, no. 2, pp. 28-35, Dec. 2016. <https://doi.org/10.4314/gm.v16i2.4>
- [4] A. M. Pedro-Alexandre, S. A. Joe-Boy, and J. Otaño-Nogue, "Design analysis of blasting using compact loads in Cacao quarry," *Minería y Geología*, vol. 22, no. 4, pp. 1-16, Oct-Dec. 2006.
- [5] V. M. S. R. Murthy, M. S. Tiwari, and A. K. Raina, "Challenges in mining industry and addressing through research and innovation," *Helix – The Scientific Explorer*, vol. 10, no. 1, pp. 38-42, Feb. 2020. <https://doi.org/10.29042/2020-10-1-38-42>
- [6] E. Kabwe, "Velocity of detonation measurement and fragmentation analysis to evaluate blasting efficacy," *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 10, no. 3, pp. 523-533, Feb. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2017.12.003>
- [7] E. M. Chan, V. Lee, S. P. Mickan, and P. J. Davies "Low-cost optoelectronic devices to measure velocity of detonation", *Proc. SPIE 5649, Smart Structures, Devices, and Systems II*, 2005, pp. 586-594. <https://doi.org/10.1117/12.582232>
- [8] V. Bailey, "Characterisation of hydrogen peroxide based explosives and ventilation modelling to quantify re-entry times in underground development blasting," M. thesis, The University of Queensland, School of Mining and Mechanical Engineering, Australia, 2017.
- [9] S. Saran, M. K. Jha, H. Agrawal, and A. K. Mishra, "Influence of density and viscosity of emulsion explosive on its detonation velocity," *Minetech*, vol. 42, no. 1, pp. 22-34, Jan-March 2021.
- [10] P. Politzer and J. S. Murray, "The role of product composition in determining detonation velocity and detonation pressure," *Central European Journal of Energetic Materials*, vol. 11, no. 4, pp. 459-474, 2014.
- [11] H. Agrawal and A. K. Mishra, "A study on influence of density and viscosity of emulsion explosive on its detonation velocity," *AMSE Journals-AMSE IJETA*, Vol. 78, no. 3, pp. 316-336, 2018.
- [12] P. Manullang, M. Arbi, and S. R. Jaka, "Low density optimization of emulsion explosive to improve blasting quality (MNK Max70)," *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 2021, 882 012058, pp. 1-9. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/882/1/012058>
- [13] M. K. Jha, B. K. Singh, and H. Agrawal, "Variation of velocity of detonation (VOD) of bulk explosives under unconfined condition due to different diameter of cartridge," *Minetech*, vol. 42, no. 1, pp. 51-56, Jan-March 2021.
- [14] M. Dobrilović, V. Bohanek, and V. Škrlec, "Increasing measurement accuracy in electro-optical method for measuring velocity of detonation," *Rud.-geol.-naft. zb.*, vol. 29, pp. 49-55, 2014.
- [15] R. N. Jha, M. K. Jha, B. K. Singh, and H. Agrawal, "Influence of ground vibration due to different initiation system – A case study," *Minetech*, vol. 42, no. 1, pp. 35-43, Jan-March 2021.
- [16] K. Podoliak, "The evolution of detonator," Dyno Consult, New Leader's Conference, Dyno Nobel, Apr. 2004. Available at: https://oldcooperriverbridge.org/docs/dyno_nobel_shock_tube.pdf
- [17] I. Zawadzka-Małota and T. Sałaciński, "Some remarks on the safety of methane penthrite detonating cords against the inflammability of a methane-air mixture," *Central European Journal of Energetic Materials*, vol. 19, no. 2, pp. 181-203, 2022. <https://doi.org/10.22211/cejem/151774>
- [18] National Institute of Rock Mechanics, "Evaluation of explosives performance through in-the hole detonation velocity measurement," Final Report for S&T Project, Project Code. MT/96/96, NIRM, Kolar Gold Fields, Karnataka, India, Aug. 2001.
- [19] D. Tete, A. Y. Deshmunkh and R. R. Yerpude, "Velocity of detonation (VOD) measurement techniques practical approach," *International Journal of Engineering and Technology*, vol. 2, no. 3, pp. 259-265, Jun. 2013. <https://doi.org/10.14419/ijet.v2i3.1023>
- [20] K. Nikolczuk, A. Maranda, P. Mertuszka, K. Fuławka, Z. Wilk, and P. Koślik, "Measurements of the VOD of selected mining explosives and novel "green explosives" using the continuous method," *Central European Journal of Energetic Materials*, vol. 16, no. 3, pp. 468-481, 2019. <https://doi.org/10.22211/cejem/112481>

- [21] D. Kuhinek, B. Štimac, A. Hanić, and L. Čančar, "Improvement of the method for measuring the shock tubes velocity of detonation by using a CNC machined base and oscilloscopes," *12th International Conference on Measurement*, Smolenice, Slovakia, 2019, pp. 79-82. <https://doi.org/10.23919/MEASUREMENT47340.2019.8780094>
- [22] J. Quaresma, L. Deimling, J. Campos and R. Mendes, "Active and passive optical fiber metrology for detonation velocity measurements," *Propellants Explos. Pyrotech.*, vol. 45, no. 6, pp. 921-931, 2020. <https://doi.org/10.1002/prop.201900197>
- [23] S. Žganec, V. Bohanek, and M. Dobrilović, "Influence of a primer on the velocity of detonation of ANFO and heavy ANFO blends," *Central European Journal of Energetic Materials*, vol. 13, no. 3, pp. 694-704, 2016.
- [24] M. J. Louw, R. S. Sarracino, and S. M. Vather, "A comparison of the theoretical and measured velocities of detonation for selected explosives," *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, Vol. 93, no. 6, pp.147-153, Jun. 1993.
- [25] P. Mertuszka and M. Pytlik, "Analysis and comparison of the continuous detonation velocity measurement method with the standard method," *High Energy Materials*, vol. 11, no. 2, pp. 63-72, 2019.
- [26] C. A. Zúñiga-Arrobo, C. A. Rojas-Villacís, C. D. Rosero-Padilla, L. G. Fernández-Suárez, and J. P. Idrovo Palomeque, "Velocidad de detonación del explosivo, vibración y ruido en pequeña minería subterránea, Zaruma – Ecuador," *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, Vol. 17, no. 1, pp. 26-42, 2024. <https://doi.org/10.29166/revfig.v17i1.4634>
- [27] A. D. Tete, A. Deshmukh, and R. Yerpude, "Design and implementation of electronic measurement system for velocity of detonation of explosive," *International Journal of Scientific & Engineering Research*, Vol. 6, no. 6, pp. 613-617, 2015.
- [28] E. Cámara-Zapata, A. Arumi-Casanovas, J. Bonet-Dalmau, M. Bascompta, and L. Sanmiquel, "Arduino-based low-cost device for the measurement of detonation times in blasting caps," *Sensors*, Vol. 23, no. 14, pp. 6534, 2023. <https://doi.org/10.3390/s23146534>
- [29] K. H. P. Singh, N. Malhotra, and H. K. Gupta, "FPGA based development of a high-speed digital data recorder for detonation velocity measurement in field applications," *Programmable Device Circuits and Systems*, vol. 10, no. 11, pp. 208-214, 2010.
- [30] W. Xiaoyan, Z. Hui, W. Jian, and W. Gao, "Design of the fiber detonation velocity measuring system based on the FPGA," *Proc. Int. Conf. on Electronics and Optoelectronics (ICEOE 2011)*, Dalian, China, 2011, pp. V4-29 – V4-32. <https://doi.org/10.1109/ICEOE.2011.6013417>
- [31] J. Pachmáň, M. Künzel, K. Kubát, J. Šelešovský, R. Maršálek, M. Pospíšil, M. Kubíček, and A. Prokeš, "OPTIMEX: Measurement of detonation velocity with a passive optical fibre system," *Central European Journal of Energetic Materials*, vol. 14, no. 1, pp. 233-250, 2017.