

Desarrollo de un Simulador Óptico de Detonación de Cordones Detonantes Basado en FPGA

Development of an FPGA-Based Optical Detonation Simulator for Detonating Cords

Silvano R. Rossi^{#1}, Matias R. Simonet Faraldo^{*2}, Roberto J. de la Vega^{*3}, Franco E. Déber^{*4}, Roberto C. Leegstra^{*5}

[#]*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

²⁻⁵ dirie@fio.unicen.edu.ar

Recibido: 27/09/25; Aceptado: 17/11/25

Resumen— En este trabajo se presentan los aspectos más importantes del desarrollo de un sistema simulador óptico, basado en FPGA, que permite generar señales luminosas en rango del espectro visible. Además, el equipo permite generar patrones de tiempo. Con estas condiciones el sistema puede utilizarse para contrastar un medidor de velocidad de detonación (VOD) de cordones detonantes usados en la industria minera, basado en el método de medición punto a punto. El equipo comprende un dispositivo FPGA que permite la implementación de un sistema multicanal, fácilmente escalable y un microcontrolador que maneja la interfaz de usuario. Este dispositivo fue desarrollado en respuesta al requerimiento de una empresa fabricante de cordones detonantes, para disponer de un dispositivo para realizar el contraste de un instrumento medidor de VOD desarrollado por la Facultad de Ingeniería - UNCPBA, en una fase previa a este proyecto.

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

Abstract— This work presents the most important aspects of the development of an FPGA-based optical simulator system that allows the generation of luminous signals in the visible spectrum range. In addition, the instrument allows the generation of time patterns. With these features, the system can be used to calibrate a Velocity of Detonation (VOD) meter of detonating cords used in the mining industry, based on the point-to-point measuring method. It comprises an FPGA device that enables the implementation of an easily scalable multichannel 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 for a device to calibrate a VOD meter developed by the Faculty of Engineering - UNCPA, in a previous phase of this project.

Keywords: velocity of detonation; detonating cord; FPGA; calibration.

I. INTRODUCCIÓN

La utilización de cargas explosivas está ampliamente extendida en el campo de las industrias minera, petrolera y

construcción civil, entre otras, para la realización de voladuras controladas, siendo elementos imprescindibles para que dichas industrias puedan llevar a cabo sus operaciones [1], [2], [3].

Los explosivos industriales se presentan en una amplia variedad de formatos y configuraciones. En dicho contexto es relevante la medición de la velocidad de detonación (VOD) de un explosivo, dado que su valor indica la velocidad a la cual se propaga el frente de onda de detonación a través de una carga explosiva, siendo un indicador directo de su desempeño y calidad [4]. Por ejemplo, la VOD de diferentes explosivos tiene influencia directa en la intensidad de pre-fracturamiento (microgrietas inducidas) de la roca durante un proceso de voladura controlada. En la extracción de piedra para construcción dicho fenómeno afecta directamente la calidad del material obtenido en canteras, dado que un exceso de microfracturas generará material más fino no aprovechable [5]. Por lo antedicho, la correcta medición de la VOD es relevante tanto para fabricantes como para usuarios finales de cargas explosivas industriales.

Especificamente, dentro de la gama de cargas explosivas y sus accesorios, los cordones detonantes son tubos flexibles que contienen material explosivo de alto régimen en su interior, utilizados para iniciar detonadores y también como medio para conectar otras cargas explosivas [6], [7]. Los cordones detonantes presentan VOD mínimas del orden de los 6.000 m/s, pudiendo alcanzar velocidades mayores a los 7.000 m/s [8], [9], [10]. Estas VOD son considerablemente elevadas y hacen que el cordón detonante explote casi instantáneamente para las longitudes utilizadas en la práctica, garantizando la detonación simultánea, aplicable, por ejemplo, a la sincronización de varias cargas, aunque éstas se hayan colocado a diferentes distancias del punto de iniciación [11].

Existen diferentes métodos y equipamientos para la medición de la VOD [12], [13], [14], [15]. En particular, en los instrumentos medidores que utilizan el método punto a

punto, las mediciones se realizan empleando el sensado óptico de la detonación mediante cables de fibra óptica dispuestos en diferentes puntos del explosivo. De esta manera, el medidor calcula la VOD midiendo el tiempo que tarda el frente de onda de choque (onda de detonación) en viajar de una fibra a otra (punto a punto) y conociendo la distancia que las separa [16].

Al igual que otros instrumentos de medición, estos dispositivos deben ser contrastados periódicamente mediante un instrumento patrón para verificar que las mediciones no presenten errores o desviaciones mayores a las estipuladas en sus especificaciones de fabricación.

Más allá de los sistemas comerciales, la alternativa de desarrollos de dispositivos de bajo costo para la calibración de instrumentos medidores de VOD ha sido poco explorada. En [17] se desarrolló un método para la calibración de un temporizador electrónico para la medición de VOD, describiendo la configuración y las condiciones de medición. La comparación se realizó usando un cordón detonante como fuente de luz y un osciloscopio digital como referencia. En [18], se desarrolló un dispositivo basado en microcontrolador capaz de crear dos o más pulsos de luz con un retardo de tiempo de precisión en un rango de microsegundos a varios segundos. No obstante, no se tiene registro de este tipo de sistemas basados en FPGA, constituyendo el principal aporte de este trabajo, para cumplir el requerimiento de contrastación de medidores de VOD en el orden de los 7000 a 8000 m/s.

En este trabajo se presentan los aspectos más importantes del desarrollo de un sistema simulador óptico, basado en FPGA, que permite generar señales luminosas en el rango del espectro visible, en cada una de sus salidas, simulando el efecto de la detonación en diferentes puntos de un cordón detonante. Para ello, el dispositivo también permite generar un patrón de tiempos, haciendo que dichas señales luminosas se produzcan en los tiempos definidos por el usuario, dentro de un rango preestablecido. Bajo estas condiciones el equipamiento desarrollado puede ser utilizado para contrastar un medidor de VOD que emplee el método de medición punto a punto, basado en fibras ópticas.

Este desarrollo se realizó en respuesta a la solicitud de una empresa fabricante de cordones detonantes con certificación ISO 9001:2015, para disponer de un instrumento patrón para el contraste de un medidor de VOD previamente desarrollado por los autores del presente trabajo [16]. El requerimiento de la empresa surgió debido a la ausencia de este tipo de dispositivos a nivel nacional y en gran parte de Latinoamérica.

El artículo está organizado de la siguiente manera: en la Sección II se describe la medición de VOD mediante el método punto a punto, los aspectos centrales del simulador óptico desarrollado, su descripción funcional, aspectos de montaje y el método de obtención del error de instrumental; en la Sección III se muestran los resultados obtenidos. Finalmente se realiza una discusión y se presentan las conclusiones del trabajo.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Medición de VOD Mediante el Método Punto a Punto

El instrumento de medición de VOD, desarrollado en etapas previas a este proyecto, fue transferido a una empresa

fabricante de explosivos para su utilización en ambiente industrial [16]. El sistema se basa en el método de medición discontinuo, punto a punto, representado esquemáticamente en la Fig. 1. Para ello se utilizan fibras ópticas como sensores consumibles, dispuestas de manera perpendicular a la dirección de propagación del frente de onda de detonación [19]. Esta configuración transversal difiere del sensado longitudinal convencional, ya que en este caso se busca registrar la emisión luminosa generada por el frente de onda en la zona de interacción entre el cordón detonante y la fibra óptica, justo en el instante de su avance. De este modo, la fibra óptica capta y transmite la señal luminosa desde el sitio de medición en campo hacia el medidor de VOD. Como ejemplo de la preparación de un ensayo, en la Fig. 1 se muestra la disposición de una fibra óptica colocada perpendicularmente al cordón detonante, en contacto directo con éste y fijada mediante cinta adhesiva.

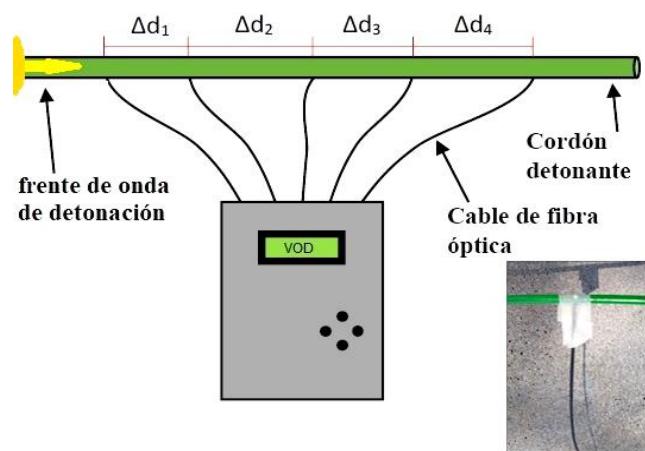


Fig. 1. Medición de VOD de cordón detonante mediante el método punto a punto.

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 conocida entre los puntos de medición (Δdx), dividida por la diferencia de tiempo entre las señales transmitidas por las fibras ópticas, proporciona el valor de la VOD de cada segmento. Con el equipo desarrollado puede medirse un valor máximo de tiempo de 999, 9 μ s, con una resolución de tiempo de $100 \text{ ns} \pm 20 \text{ ns}$. El instrumento es capaz de medir hasta cuatro tiempos de recorrido, lo que equivale a cinco puntos, y calcular sus velocidades.

Este tipo de ensayo es sumamente útil para caracterizar la VOD de un cordón detonante, dado que la obtención de valores diferentes de velocidad en un mismo ensayo de campo indica la presencia de un defecto o un problema de calidad en el cordón detonante fabricado, permitiendo al fabricante realizar las acciones correctivas necesarias.

B. Simulador Óptico de Detonación

En la Fig. 2 se muestra el diagrama en bloques del Simulador Óptico de Detonación (SOD) desarrollado.

El sistema está compuesto por un host, un teclado, un display, un sistema digital (SD) para el procesamiento de las señales recibidas, un sistema emisor de pulsos (EP) y las salidas para la conexión de las fibras ópticas (FOn), utilizando 5 canales.

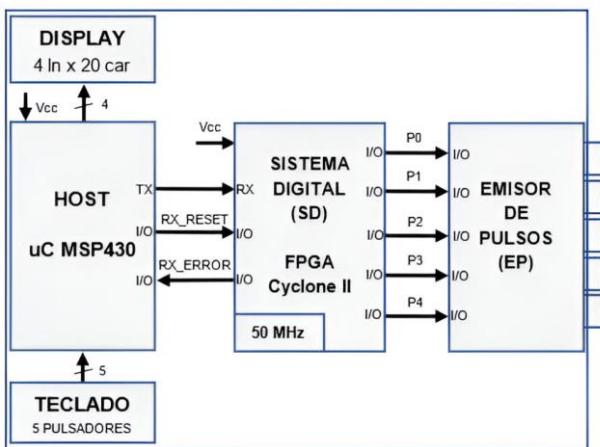


Fig. 2. Diagrama en bloques del Simulador Óptico de Detonación (SOD).

El SD se implementó mediante una FPGA y el host mediante un microcontrolador. Se eligió esta alternativa, por similitud con la arquitectura del medidor de VOD previamente desarrollado. El host basado en microcontrolador permite facilidad y versatilidad en las posibles modificaciones del software, de acuerdo a las necesidades del usuario.

El SD se aloja en un dispositivo FPGA de la empresa Altera, familia Cyclone II, soportado por una placa modelo EP2C5T144I8 miniboard genérica, con un reloj interno de 50 MHz. Aunque se trata de una FPGA de gama baja/media con un speed grade de -8, el más bajo dentro de las tres opciones disponibles para la familia Cyclone II, se considera suficiente para la aplicación. Por otro lado, el dispositivo elegido ofrece el rango de temperatura industrial (-40 °C a 80 °C), lo que la convierte en una alternativa adecuada para la aplicación en relación a las otras, con un costo relativo conveniente [20].

Para la descripción del hardware se utilizó lenguaje VHDL. A fin de minimizar problemas de sincronismo y latencia, se partió de una descripción VHDL a nivel de transferencias de registros (RTL), para obtener una síntesis del hardware más optimizada.

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 implementar el host se utilizó un microcontrolador MSP430G2553IN20 de Texas Instruments y como entorno de desarrollo de software se empleó Code Composer Studio™.

Por otro lado, se definió una interfaz hombre-máquina mediante una pantalla de 4 líneas x 20 caracteres y un teclado compuesto por cinco pulsadores con las siguientes funciones: ENTER para aceptar o continuar, ARRIBA para incrementar los dígitos en el menú de ingreso de tiempos, ABAJO para decrementar los dígitos en el menú de ingreso de tiempos, IZQUIERDA para el desplazamiento hacia la izquierda entre los dígitos en el menú de ingreso de tiempos y DERECHA para el desplazamiento hacia la derecha. Estos últimos dos también sirven para seleccionar un ensayo y guardarlo.

Para la emisión de los pulsos de luz se seleccionaron 5 fotodiodos AVAGO SFH757V de alta velocidad, para aplicaciones en redes ópticas, permitiendo la conexión de cables de fibra óptica de 2,2 mm de diámetro. Estos dispositivos emiten luz en el orden de los 650 nm.

C. Descripción Funcional

En la Fig. 3 se presenta el diagrama en bloques detallado del SD, en el que se puede apreciar un bloque UART, un contador de 16 bits, una máquina de estados (ME), 4 registros de 16 bits (RegA-RegD) y 5 bloques comparadores para la emisión de pulsos (pulso0-pulso4). El SD recibe del host las tramas de datos que contienen los valores de tiempo, los procesa y emite las señales de pulso hacia el sistema EP, que produce los pulsos de luz direccionalizados a las fibras ópticas conectadas en su salida (FOn).

El orden de valores de VOD en cordones detonantes hace que su medición sea un desafío en términos de exactitud en la medición de los tiempos involucrados.

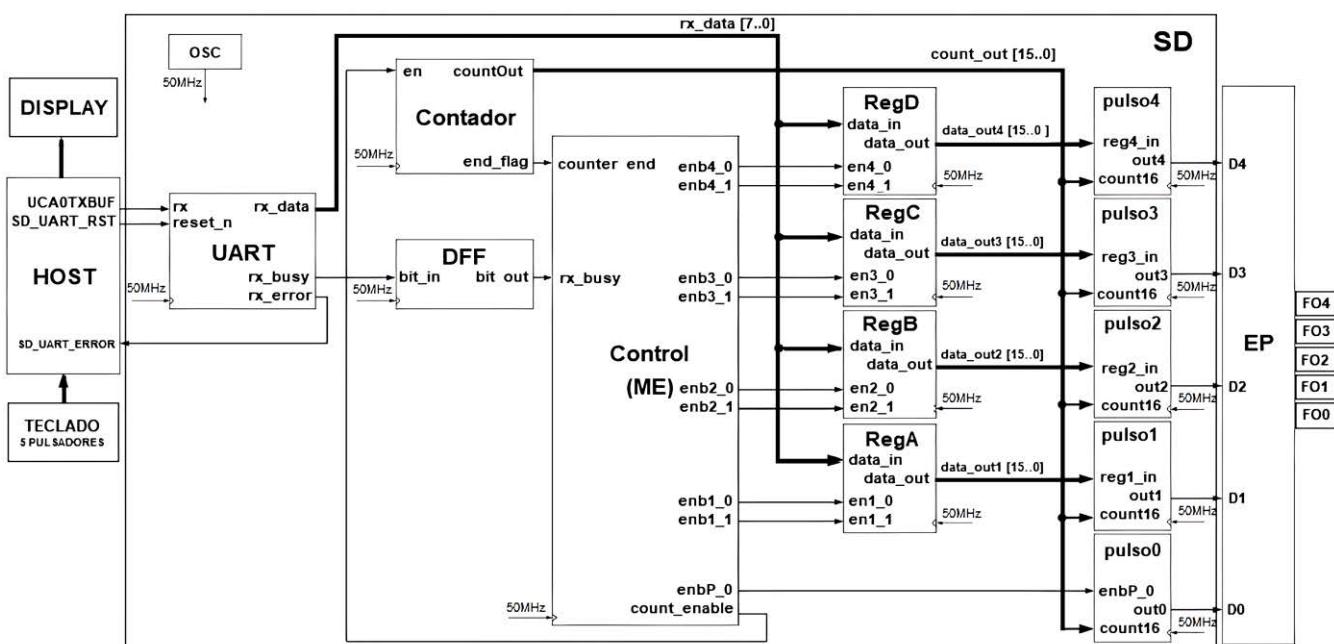


Fig. 3. SOD – Detalles del sistema digital.

Por tal motivo, el SD está compuesto por diferentes bloques funcionales, con un reloj interno de 50 MHz, para lograr una velocidad de ejecución acorde a los requerimientos planteados.

Al comenzar un ensayo, el host se comunica con el SD para enviar los valores de tiempo empleando 2 bytes (más y menos significativos respectivamente), vía comunicación UART. En el SD los tiempos se representan por vectores lógicos de 16 bits (representación desde 0 hasta 65.535), permitiendo trabajar con la resolución especificada de 0,1 μ s hasta un máximo de 1310,7 μ s (65.535 x 20 ns). Por razones de diseño, se limitó dicha capacidad hasta el máximo especificado de 999,9 μ s.

El bloque UART se encarga de la recepción de los bytes en conformidad con los parámetros definidos (paridad, tipo de paridad y tasa de transferencia de datos (9.600 bits/s)). Mientras la recepción se encuentra activa se emite una señal de aviso *rx_busy*. En caso de error de paridad se emite la señal de error hacia el bloque host (*rx_error*). La UART puede ser reiniciada a través de la señal *reset_n* desde el host. La señal *rx_busy* se dirige hacia un bloque flip-flop tipo D (DFF), se sincroniza con el reloj del SD y se envía hacia la máquina de estados (ME). Con dicha señal activa la ME inicia su ejecución habilitando el guardado de los vectores de datos (*rx_data [7...0]*) en cada uno de los bloques de registro (regX) de forma secuencial en función de la recepción de cada byte. A través de la ME se habilita primero el registro del byte menos significativo (*enbn_0*) y luego el del byte más significativo (*enbn_1*), de cada bloque, concatenándose ambos bytes para obtener el valor de tiempo de 16 bits (*data_out [15...0]*). Completado el proceso de recepción y registro de datos, la ME habilita al bloque pulso0 mediante la señal *enb_P0* y al bloque contador por medio de la señal *count_enable*. A continuación, se emite la señal del pulso inicial (*out0*) que marca el inicio de cuenta, mientras que el contador de 16 bits se ejecuta y envía en simultáneo cada valor de la cuenta (*count_out [15...0]*) hacia cada uno de los bloques comparadores pulsoN, que emiten los pulsos de salida (*outN*). En el bloque EP del dispositivo, estos pulsos se convierten en señales luminosas para ser captadas por las fibras ópticas. Dichos bloques comparan el valor de la cuenta con el valor del registro correspondiente (*regn_in*) y, cuando ambos valores son equivalentes, se emiten las señales de pulso (3,3 V) de salida (*outN*) durante el tiempo definido en base a la cantidad de ciclos configurado. Al finalizar la cuenta, el contador envía una señal a la ME (*end_flag*) y esta vuelve al estado inicial, llevando la señal de fin de cuenta a un estado alto.

D. Aspectos de Montaje

En la Fig. 4 se presentan los módulos constitutivos del SOD integrados en un gabinete de aluminio, pudiéndose apreciar los conectores para el acoplamiento de las fibras ópticas y el teclado conformado por 5 pulsadores. Asimismo, se ilustran aspectos básicos del montaje y la disposición de los subsistemas de alimentación, microcontrolador, FPGA y fotodiodos emisores. En la versión actual, se implementó una placa de circuito impreso destinada al montaje de los fotodiodos, mientras que el procesamiento digital se resolvió mediante una placa genérica que alberga la FPGA y un kit de desarrollo que incorpora el microcontrolador, conforme a lo detallado en la Sección II-B.



Fig. 4. Partes constitutivas del SOD y montaje.

Esta estrategia fue seleccionada en función de la relación costo-beneficio en la etapa de prototipado y por ser una estrategia similar a la empleada en el medidor de VOD desarrollado por este equipo de trabajo [16], dado que proporcionan flexibilidad mediante periféricos integrados y capacidad de reprogramación del microcontrolador y reconfiguración de la FPGA, lo cual ha permitido validar el desempeño del instrumento en condiciones de campo antes de la etapa final de diseño y fabricación de las placas definitivas.

E. Determinación del Error de Instrumental del SOD

Para obtener la especificación de error de instrumental cometido por el SOD se procedió a realizar un ensayo de contraste, comparándolo con un instrumento de medición patrón. Para ello se utilizó un contador digital de tiempo de dos canales y alta resolución marca Fluke® modelo PM6666 de 9 dígitos, calibrado y configurado en el modo de medición de intervalo de tiempo. Dicho modo permite medir el tiempo que transcurre entre una pendiente positiva detectada en el canal A y una pendiente positiva detectada en el canal B. Según el fabricante, en este modo de operación se produce un error de sesgo (*skew*) sistemático de 4 ns entre canales [21]. Esto implica que se producirá un valor de corrimiento (*offset*) de 4 ns en la medición correspondiente a la diferencia nula entre canales y se tendrá en cuenta para la obtención de la curva de error absoluto.

La metodología del ensayo, mostrada esquemáticamente en la Fig. 5, consiste en conectar el canal A del contador digital de tiempo al pin 0 de salida del SD (*out0*), donde se emite la señal de pulso inicial en el tiempo 0 y conectar el canal B de forma alternada a las salidas *out1* a *out4* del SD, donde se emiten las señales de pulso de salida restantes. De este modo se leen los cuatro valores de tiempo en el contador digital, es decir, el valor verdadero convencional o valor indicado por el instrumento patrón (*t_p*), en cada salida. Estos tiempos se corresponden con un mismo valor de tiempo configurado (tiempo medido – *t_m*), vía teclado, en el SOD.

Luego se obtiene el error absoluto (*E_{abs}*) en la medición de tiempo mediante (1) y el error relativo porcentual (*ε_{rel%}*), referido al valor verdadero convencional, utilizando (2):

$$E_{\text{abs}} = t_m - t_p \quad (1)$$

$$\epsilon_{\text{rel}\%} = (E_{\text{abs}} / t_p) \times 100 \quad (2)$$

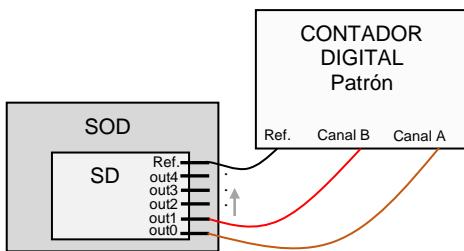


Fig. 5. Diagrama esquemático del contraste del SOD con un contador digital de tiempo patrón.

Para un mismo valor de t_m se miden cuatro t_p y se calcula en cada caso el error absoluto y el error relativo. Se adoptó como criterio tomar el mayor E_{abs} cometido, dado que representa la situación más desfavorable, para cada situación de medición. El ensayo se repite con valores de t_m fijados en distintos intervalos de tiempo. Dado que para el ensayo se tomaron 22 valores de t_m , en la Tabla I se muestran, a modo ilustrativo, los valores obtenidos en dos ensayos, para t_m 0,5 μ s y 100 μ s, respectivamente. Para el primer caso se adopta E_{abs} de 5 ns y ϵ_{rel} de 1 %, referido al valor patrón y, para el segundo caso exemplificado, se adopta E_{abs} de 17 ns y ϵ_{rel} de 0,0028 %, respectivamente. Como es de esperar, el error de instrumental relativo obtenido disminuye hacia el fondo de la escala y crece al inicio de la misma.

En la Fig. 6 se muestra una fotografía referente a la preparación del ensayo de contraste de tiempos, indicándose las partes principales.

TABLA I
VALORES OBTENIDOS EN ENSAYO DE CONTRASTE DEL SOD

Salida SD	t_m (μ s)	t_p (μ s)	E_{abs} (ns)	$\epsilon_{rel}\%$
1	0,5	0,505	5	1,000
2		0,504	4	0,794
3		0,504	4	0,794
4		0,504	4	0,794
1	600	600,016	16	0,0026
2		600,016	16	0,0026
3		600,017	17	0,0028
4		600,017	17	0,0028

III. RESULTADOS

A. Recursos Lógicos Utilizados

En términos de recursos se usaron 212 de los 4.608 elementos lógicos disponibles de la FPGA (5%), 172 de los 4.608 registros lógicos dedicados (4%) y 11 de los 89 pines (12%) de entrada/salida. Esto indica que un dispositivo de gama baja/media como el Cyclone II - EP2C5T144I8 emplea un bajo porcentaje de sus recursos, pudiendo escalarse fácilmente sin necesidad de cambio para esta aplicación.

Para la verificación del diseño no se implementó un módulo de prueba en VHDL destinado a la generación del testbench. En su lugar, se optó por realizar una verificación funcional manual del SD directamente en el entorno de simulación, empleando la herramienta ModelSim®. Esta estrategia permitió validar el comportamiento lógico del diseño de manera rápida, resultando adecuada para el alcance y complejidad del proyecto, en fase de prototipo.



Fig. 6. ENSAYO DE CONTRASTE DEL SOD CON UN CONTADOR DIGITAL DE TIEMPO PATRÓN.

B. Error de Instrumental del SOD

En la Fig. 7 se muestra la curva de error absoluto (E_{abs}) obtenida a partir del ensayo de contraste realizado con el contador digital de tiempo como instrumento patrón, presentado en la Sección II-E. Dicha curva permite conocer el error que se presenta en la medición para cada valor de tiempo medido (t_m). En el tiempo 0 el E_{abs} corresponde a 4 ns. Luego el E_{abs} fue de 5 ns con un t_m de 0,5 μ s, registrándose el mayor valor en 24 ns con un t_m de 1000 μ s. Para mayor claridad se muestra en la Fig. 8 la curva de error absoluto en el rango de 0 a 100 μ s del t_m , en la que puede apreciarse que el E_{abs} fue de 6 ns con t_m entre 5 μ s y 10 μ s, para posteriormente mantenerse en el orden de los 7 ns, hasta los 70 μ s de t_m . Luego se observa una tendencia creciente.

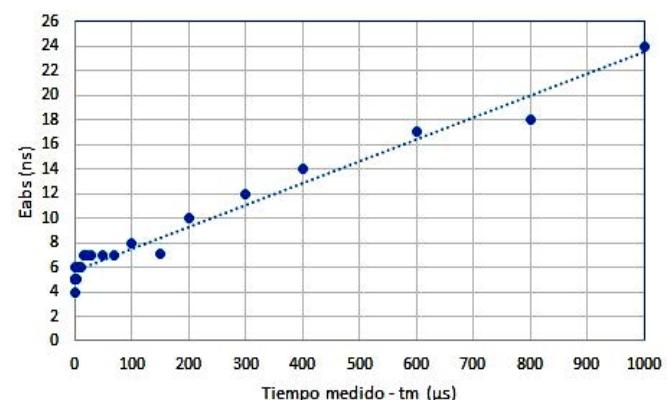


Fig. 7. ENSAYO DE CONTRASTE DEL SOD. CURVA DE ERROR ABSOLUTO.

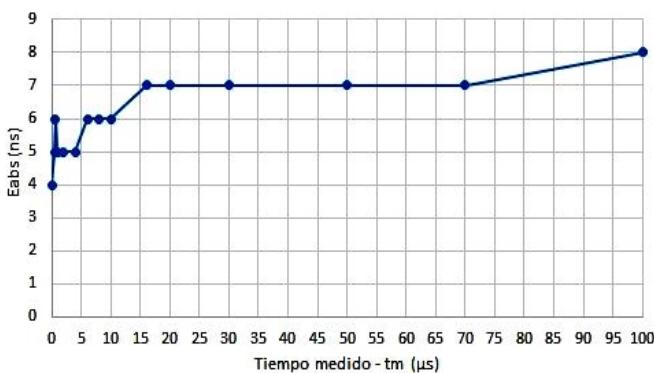


Fig. 8. Ensayo de contraste del SOD. Curva de error absoluto en el rango de 0 a 100 μ s de tiempo configurado (tiempo medido).

El mayor error relativo porcentual (ε_{rel} %) referido al valor patrón registrado fue del 1 %. Dado que el error anterior es más representativo de la exactitud en cada punto de la escala, se calculó el error relativo al fondo de escala (FE) mediante (3), a fin de establecer una especificación global de exactitud y que pueda ser comparable a la de otros instrumentos de calibración similares:

$$\varepsilon_{relFE\%} = (E_{abs} / FE) \times 100 \quad (3)$$

El mayor E_{abs} obtenido en el ensayo fue de 24 ns y siendo el FE igual a 1000 μ s se determina una exactitud global $\varepsilon_{relFE\%}$ del orden de 0,0025 % como especificación del instrumento. En estas condiciones, el SOD podría utilizarse para contrastar equipos con $\varepsilon_{relFE\%}$ de 0,025 % o superior, en la variable tiempo.

Un valor orientativo de exactitud para un calibrador de medidores de VOD puede situarse en el orden del 0,001 % FE, valor que podrá ser mayor o menor, considerando que pueden encontrarse dispositivos e instrumentos medidores de VOD de bajo costo [22], [23] y comerciales de media o alta gama [24], [25], [26]. No obstante, y dado que existen diferentes métodos de medición de VOD y diferentes condiciones [27], la especificación tiempo dependerá de las distancias a ser consideradas y los rangos de VOD a ser medidos. En este sentido y dada la orientación que posee el dispositivo desarrollado, sumado a la carencia de soluciones a nivel nacional, sobre todo en el rango de VOD de cordones detonantes, se considera una exactitud aceptable, al menos para la calibración de dispositivos medidores de VOD de bajo costo relativo o de gama baja/media.

C. Especificaciones Principales

En la Tabla II se resumen las principales especificaciones técnicas del dispositivo desarrollado. El tiempo máximo configurable se determinó en función de los requerimientos del adoptante. Los tiempos a contrastar se sitúan en el rango de 1 μ s a 1000 μ s, en equipos medidores de VOD del orden de los 8000 m/s. Este requerimiento condujo a la decisión de emplear una FPGA, en la que se alcanzó una resolución adecuada de $100 \text{ ns} \pm 20 \text{ ns}$, con un reloj de 50 MHz, mediante el uso de una placa genérica con una FPGA gama de baja/media. Para el requerimiento planteado, la resolución en tiempo y la cantidad de canales de salida se consideran adecuados.

El consumo de corriente verificado y establecido como especificación fue de 200 mA. Se espera que dicho consumo pueda ser reducido reemplazando los kits utilizados por placas de circuito impreso.

TABLA III
SIMULADOR ÓPTICO DE DETONACIÓN – ESPECIFICACIONES PRINCIPALES

Parámetro	Especificación/valor
Dimensiones	Largo: 15,5 cm; Ancho: 18 cm; Alto: 7,7 cm
Alimentación	9 Vcc (conexión fuente comutada o batería)
Consumo de corriente	200 mA
Canales de salida	5 conectores de cable de fibra óptica
Tipo de fibra óptica compatible	Fibra plástica con núcleo de polimetilmetacrilato (PMMA) de 1000 μ m de diámetro y revestimiento de polímero fluorado de 2,2 mm de diámetro
Tiempo máximo configurable	999,9 μ s
Resolución de tiempo	100 ns \pm 20 ns
Memoria	Capacidad de almacenamiento de 3 ensayos
Exactitud	0,0025% FE

D. Empleo del SOD en el Contraste de un Medidor de VOD de Cordones Detonantes

En la Figura 9 se muestra el montaje experimental en el cual se utiliza el SOD (a la izquierda) ahora como instrumento patrón para la verificación metrológica del medidor de VOD de cordones detonantes de 5 canales (a la derecha), que corresponde al instrumento a contrastar, previamente desarrollado y actualmente en funcionamiento en una empresa fabricante de cargas explosivas. En la imagen puede observarse la disposición de las fibras ópticas que interconectan ambos dispositivos, garantizando la transmisión de las señales necesarias para realizar el ensayo de contraste.



Fig. 9. Empleo del SOD (izquierdo) para contrastar un medidor de VOD (derecho).

SOD



Fig. 10. Ensayo de contraste de un medidor de VOD – Valores obtenidos.

En la Fig. 10 se muestra el procedimiento realizado, en términos de visualización en display. El procedimiento experimental se inicia con la programación de los cuatro intervalos temporales requeridos por el usuario, los cuales se introducen en el SOD mediante el teclado, estableciendo así el patrón de tiempos de referencia que deberá medir el medidor de VOD. Una vez definidos dichos parámetros, se procede a la ejecución del ensayo, permitiendo la comparación directa entre las mediciones del instrumento patrón (tiempo patrón - t_p) y las del dispositivo bajo prueba (tiempo medido - t_m). En el display de la derecha, en la Fig. 10, pueden observarse los valores de t_m , luego de finalizado el ensayo. El ensayo se repite para diferentes patrones de tiempo.

Si se toma como referencia el ensayo anterior, se tienen los valores indicados en la Tabla III, considerando los valores de t_m , los valores de t_p (valor verdadero convencional) y el error absoluto en la medición de tiempo (E_{abs}), como resultado de la sustracción entre el valor medido y el valor patrón. Finalmente se obtiene el error relativo referido al fondo de escala $\varepsilon_{relFE\%}$, aplicando (3). Para este ensayo en particular el error relativo se encuentra muy por debajo del 1% en todos los casos.

TABLA III
RESULTADOS DE ENSAYO DE CONTRASTE DE MEDIDOR DE VOD

t_m (μs)	t_p (μs)	E_{abs} (μs)	$\varepsilon_{relFE\%}$
101,5	100,0	1,5	0,15
200,0	200,0	0	0
110,3	110,3	0	0
280,7	280,8	-0,1	-0,01

IV. DISCUSIÓN

Parte de la premisa inicial planteada por el adoptante fue desarrollar un sistema de bajo costo relativo frente a equipos comerciales, manteniendo una confiabilidad aceptable. El simulador óptico de detonación desarrollado presenta características distintivas de aquellas que se han reportado en la literatura, especialmente si se considera el ámbito de aplicación y las implementaciones basadas en lógica programable.

La existencia de una alternativa local puede abrir la posibilidad de reducir costos y tiempos de adquisición para la industria. Se destaca que el desarrollo ha trascendido el plano experimental y se encuentra en uso dentro del sector productivo, sirviendo desde hace más de dos años como instrumento de contraste de un medidor de VOD, basado en el método punto a punto, en una empresa fabricante de cordones detonantes.

No obstante, el SOD requiere aún una caracterización más exhaustiva de su desempeño bajo diversas condiciones de ensayo, en particular, en lo que respecta al error relativo de medición de tiempos que conducen a VOD elevadas, del orden de los 8000 m/s. Asimismo, su validación se ha realizado en un entorno productivo específico, lo que restringe por ahora la generalización de sus resultados a otros contextos industriales. Sin embargo, el desafío de medir las VOD en cordones detonantes, que representan prácticamente las más elevadas del rango en cargas explosivas industriales, convierte los resultados obtenidos en un avance promisorio y potencialmente aplicable a otros escenarios de medición.

La exactitud y precisión en la medición de tiempos de estos sistemas calibradores depende de diversos factores entre los cuales se destacan los retardos en diferentes partes del circuito y sus fluctuaciones y al empleo de fotodiodos adecuados. En el SOD se han empleado fotodiodos de alta velocidad, propios de aplicaciones en redes ópticas y se han realizado ensayos de contraste que permite obtener una especificación de error cuantificable. Resulta difícil la comparación directa con sistemas similares al desarrollado, por su tipo de aplicación y su escasa existencia en el mercado, además de la heterogeneidad en relación a los métodos de medición de VOD existentes y los diferentes rangos de medición. Aun así, la especificación obtenida es satisfactoria para contrastar el medidor de VOD previamente desarrollado y ofrece la posibilidad de extenderse a medidores comerciales de gama baja y media.

Otro de los aspectos a discutir se relaciona con el costo de fabricación. Los equipos analizados difieren en arquitectura, método de medición, número de canales, resolución temporal e interfaz de usuario, lo que dificulta establecer una relación costo-desempeño homogénea que pueda servir como base de comparación y posicionamiento del equipo desarrollado. Mientras algunas soluciones de medición de VOD incorporan dispositivos adicionales de calibración [26], configurándose como sistemas de alta gama con costos elevados, el SOD desarrollado se posiciona en el segmento de menor costo relativo con un diseño específico y la ventaja estratégica de sustituir importaciones. En este sentido, el equipo puede ofrecer un desempeño técnico adecuado y accesible para la caracterización de la variable tiempo en la medición de VOD.

Los ensayos de campo han mostrado VOD superiores a los 7600 m/s, lo que refuerza la necesidad de avanzar hacia una fase orientada a la construcción de una base de datos sistemática de contrastes. Este registro permitirá evaluar los tiempos asociados a dichas velocidades y cuantificar el error relativo de forma trazable, asegurando la calidad de las mediciones. Con ello, se busca establecer procedimientos de contraste y calibración trazables conforme a la normativa internacional [28], [29], [30].

Finalmente, en la etapa de consolidación del SOD como producto se proponen mejoras que pueden resultar clave: sustituir los kits de desarrollo por placas de circuito impreso, describir en VHDL los módulos de verificación para disponer de un testbench que permita la verificación funcional automatizada, evaluar la incorporación de un dígito adicional en la lectura de tiempo, con el objetivo de aumentar la resolución y, finalmente, avanzar hacia una calibración trazable.

V. CONCLUSIONES

Se desarrolló un simulador óptico de detonación que permite simular las condiciones de una onda de choque que se produce al detonar un cordón detonante. El dispositivo permite generar un patrón de tiempos en el que se producen los pulsos de luz, a requerimiento del usuario del equipo.

El dispositivo se utiliza actualmente como instrumento para realizar el contraste de un medidor de VOD de cordones detonantes, considerando tiempos en el rango de 5 μs a 999 μs, presentando una exactitud aceptable.

El diseño del hardware realizado permite la escalabilidad del sistema para ampliar, de ser necesario, la cantidad de canales, reutilizando la descripción del hardware realizada.

En términos de posicionamiento, el desarrollo constituye un aporte al ámbito tecnológico nacional, dado que la mayoría de los equipos disponibles en el mercado son importados y comercializados a través de proveedores internacionales.

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] E. Thompson Branton, T.F. Appiah, I. Alhassan, G.M. Dzomeku, E.O. Boateng, B. Takyi, S. Sibil, E.K. Duodu and A.K. Kobi, "A comprehensive review of traditional, modern and advanced presplit drilling and blasting in the mining and construction industries," *Journal of Petroleum and Mining Engineering*, vol. 25, no. 2, pp. 7-97, March 2024, <https://doi.org/10.21608/jpme.2024.208017.1161>
- [2] J. Yernaidu, V.K. Patel and A.K. Tripathi, "An overview of explosive energy utilization in mining," *International Research Journal of Engineering and Technology*, vol. 9, no. 6, pp. 1110-1112, June 2022.
- [3] R. Domotor, "Controlled blasting for civil construction in an urban environment," *Expo Conférence, Melbourne*, Australia, Nov. 2011, pp.107-118.
- [4] S. Saran, A.K. Bal and M.K. Jha, "Comparative study of confined velocity of detonation (VOD) of ANFO & SME-A case study," *MineTech*, vol. 42, no. 1, pp. 7-13, Jan-March 2021.
- [5] S.V. Khokhlov, Yu. I. Vinogradov, V.A. Makkoev and Z.A. Abiyev, "Effect of explosive detonation velocity on the degree of rock pre-fracturing during blasting," *Mining Science and Technology*. Vol. 9, no. 2 pp. 85-96, 2014. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-11-177>
- [6] 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
- [7] F. Sumiya and Y. Kato, "A study on smooth blasting technique using detonating cords," *Sci. Tech. Energetic Materials*, vol. 68, no. 6, pp. 167-171, 2007.
- [8] V. Bacauanu, "High energy materials," MacMillan Research Group, Group Meeting, July 2019.
- [9] M.X. Zhang, P.E. Eaton and R. Gilardi, "Hepta- and octanitrocubanes," *Angewandte Chemie International*, Vol. 39, no. 2, pp. 401-404, Jan 2000.
- [10] A. Hawass and T.a Elshenawy, "Safety and performance for different high explosives in oil mining industry," *International Journal of Industry and Sustainable Development*, Vol. 4, no. 1, pp. 90-95, June 2023.
- [11] G. Liu, "Microstructure and mechanical properties of tin-based alloys for miniature detonating cords.", Doctoral Thesis, College of Engineering, Design and Physical Sciences, Brunel University London, United Kingdom, 2019.
- [12] C.A. Zúñiga-Arrobo, C.A. Rojas-Villacís, C.D. Rosero-Padilla, L.G. Fernández-Suárez, 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>
- [13] J. Pooley, E. Price, J.W. Ferguson and M. Ibsen, "Optimised chirped fibre bragg Gratings for detonation velocity measurements," *Sensors*, Vol. 19, pp. 2-15, July 2019. <https://doi.org/doi:10.3390/s19153333>
- [14] P. Rae, "Determining velocity of detonation using high-resolution time domain reflectometry," *Review of Scientific Instruments*, vol. 90, no. 8, pp. -7, Aug. 2019. <https://doi.org/doi:10.1063/1.5100750>
- [15] Y. Barbarin, A. Lefrançois, V. Chuzeville, S. Magne, L. Jacquet, T. Elia, K. Woirin, C. Collet, A. Osmont and J. Luc, "Development of a shock and detonation velocity measurement system using chirped fiber bragg gratings," *Sensors*, vol. 20, no. 4, pp. 1-30, 2020. <https://doi.org/10.3390/s20041026>
- [16] S.R. Rossi, R.J. de la Vega and F.E. Déber, "Sistema basado en FPGA para la medición de velocidad de detonación en cordones detonantes," *Revista Elektron - UBA*, vol. 8, no. 2, pp. 54-60, Dic. 2024, <https://doi.org/10.37537/rev.elektron.8.2.198.2024>
- [17] M. Dobrilović, V. Bohanek, V. Škrlec, S. Stanković and I. Dobrilović, "Velocity of detonation measuring device calibration method" *Proc. of 11th Int. Carpathian Control Conference, Eger, Hungary*, May 26-28, 2010. pp. 285-288.
- [18] D. Kuhinek, T. Bratko, H. Vukošić and I. Gavranić, "Development of a reference device for the calibration of optical one-shot time-interval measurements," *Electronics*, vol. 12, no. 439, pp. 1-14, Jan. 2023. <https://doi.org/10.3390/electronics120439>
- [19] J. Pooley, "Fibre optic methods for measuring detonation velocity," Doctoral Thesis, University of Southampton, United Kingdom, 2019, 127 pp.
- [20] Altera Corporation, *Cyclone II Device Handbook*, vol. 1, San Jose, CA, USA: Altera, 2007.
- [21] Fluke Corporation, *Programmable Time/Counter PM6666 Operators Manual*, Almelo, The Netherlands: Fluke, 1996.
- [22] E. M. Chan, V. Lee, S. P. Mickan, and P. J. Davies "Low-cost optoelectronic devices to measure velocity of detonation", *Proc. of SPIE 5649, Smart Structures, Devices, and Systems II*, 2005, pp. 586-594. <https://doi.org/10.1117/12.582232>
- [23] 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>
- [24] MREL – Group of Companies. [Online]. Available: <https://mrel.com/>
- [25] Digital Automation & Control S.A (DIACSA). [Online]. Available: <https://diacs.com/cronex.html>
- [26] Uttam Blastech. The Mining & Excavation Experts. [Online]. Available: https://uttamblastech.com/products_services/vod-meter-delay-timer
- [27] 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>
- [28] D. F. Zamora Blandón, D. C. Cárdenas Marulanda, M. Hincapie Quinchia, D. Z. Ramírez Marín, C. Pérez Muñoz, "Calidad y metrología: importancia y herramientas para el sector productivo," *Revista Grindaa – Ciencia, Tecnología e Innovación*, vol. 2, pp. 97-121, nov. 2020.
- [29] O. Cedeño Tamayo, "Introducción a la gestión metrológica," *Informador Técnico (Colombia)*, Ed. 75, pp. 47-52, 2011.
- [30] Instituto Nacional de Tecnología Industrial, "Metrología y calidad", [en línea]. Disponible en: <https://www.inti.gob.ar/areas/metrologia-y-calidad>. [Accedido: 26-ago-2025].