



PONTIFICIA **UNIVERSIDAD CATÓLICA** DEL PERÚ

Esta obra ha sido publicada bajo la licencia Creative Commons  
Reconocimiento-No comercial-Compartir bajo la misma licencia 2.5 Perú.

Para ver una copia de dicha licencia, visite  
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/pe/>



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**SISTEMA DE MEDICIÓN DE VELOCIDAD Y TIEMPO DE  
DETONACIÓN PARA EXPLOSIVOS USANDO EL MÉTODO DE  
FIBRAS ÓPTICAS**

Tesis para optar el título de ingeniero electrónico, que presenta el bachiller:

**Laureano Serafín Rodrigo Rodríguez Polo**

**Asesor: Willy Carrera Soria**

**LIMA – PERÚ**

**2009**

## RESUMEN

Los insumos de voladura como fulminantes o explosivos usados en la minería y construcción pueden presentar problemas debido a procesos de producción inadecuados, condiciones ambientales adversas y mala manipulación en el transporte y almacenaje.

La velocidad de detonación, llamada comúnmente VOD (Velocity of Detonation), es la velocidad a la cual las ondas de detonación viajan a través de un producto explosivo y es uno de los principales métodos para determinar las prestaciones de los explosivos y fulminantes.

Por lo tanto, las empresas usuarias de insumos de voladura requieren de sistemas de medición del VOD precisos, robustos y de bajo costo para poder mejorar sus procesos de extracción de materiales. Así mismo, para las empresas fabricantes de explosivos es fundamental el uso de sistemas de medición del VOD para el control de calidad de sus productos. Lamentablemente, los sistemas de medición de VOD disponibles en el mercado tienen precios que no están al alcance de muchas empresas peruanas y frecuentemente el diseño de estos sistemas no se amolda a las necesidades y costumbres de nuestro medio. Esto ha provocado la falta de interés de las empresas en adquirir sistemas apropiados para la medición del VOD.

Este trabajo concluye con el diseño y construcción de un sistema portátil de medición del VOD utilizando el método de las fibras ópticas a un precio asequible. En la construcción de este sistema de medición del VOD se evaluó cada uno de los componentes para obtener una mejor performance del equipo y un bajo costo.

Este sistema, denominado CRONEX, es capaz de operar a temperaturas negativas (ideal para trabajos en minas de nuestra sierra), posee una precisión de hasta 0.005% en la medición de tiempos y entre 1 a 9,999 m/s en el rango de medición de velocidad de detonación.

Para mejorar la autonomía se hace uso de métodos de ahorro de energía, almacenamiento y descarga de los datos obtenidos en las pruebas a la PC. Además, posee una pantalla LCD que muestra menús en español configurables, reduciendo el tiempo de entrenamiento del operario y agilizando los procesos de control de calidad.





## ÍNDICE

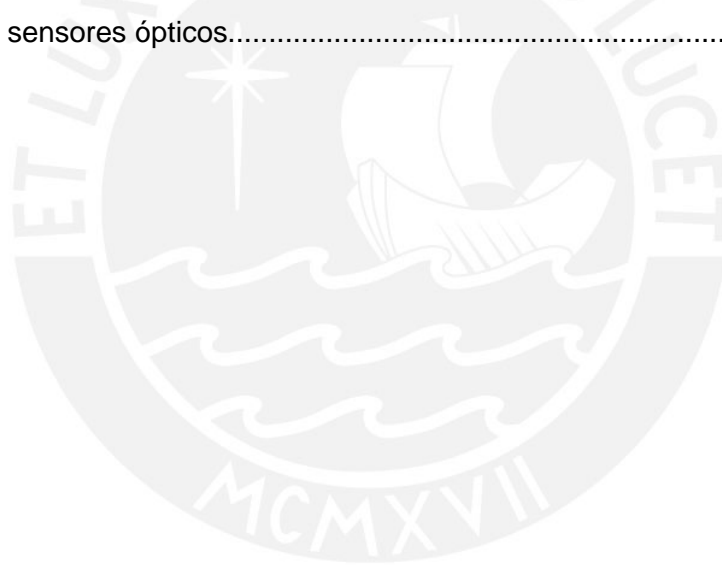
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>01</b>
<b>CAPÍTULO 1: MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD DE DETONACIÓN.....</b>	<b>02</b>
1.1 Investigación Preliminar .....	02
1.2 Análisis de los entornos .....	02
1.3 Análisis del proceso de un acontecimiento no deseado.....	05
<b>CAPÍTULO 2: SISTEMAS DE MEDICIÓN DE VELOCIDAD DE DETONACIÓN PARA EXPLOSIVOS.....</b>	<b>06</b>
2.1 Estado del arte .....	06
2.2 Sistema medidor de tiempo y velocidad de detonación mediante fibra Óptica.....	19
2.3 Osciladores.....	20
2.4 Uso de la óptica para medición del V.O.D .....	23
2.5 Accesorios para voladuras .....	26
2.6 Voladuras .....	28
2.7 Definiciones Operativas .....	29
<b>CAPÍTULO 3: DISEÑO DEL HARDWARE Y SOFTWARE.....</b>	<b>32</b>
3.1 Introducción .....	32
3.2 Hipótesis Principal.....	32
3.3 Hipótesis secundarias.....	32
3.4 Objetivos.....	33
3.5 Metodología de la investigación.....	34
3.6 Descripción del Sistema.....	44
3.7 Selección de componentes de control.....	47

3.8 Circuito de Sensado.....	55
3.9 Circuito contador.....	60
3.10 Administración de Energía.....	63
3.11 Funcionamiento del programa.....	70
3.12 Diagramas Esquemáticos y de Pistas.....	79
3.13 Costos.....	85
<b>CAPÍTULO 4: PRUEBAS Y RESULTADOS.....</b>	<b>86</b>
4.1 Calibración del Oscilador .....	86
4.2 Calibración de los Sensores Ópticos.....	89
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>91</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>92</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>93</b>

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

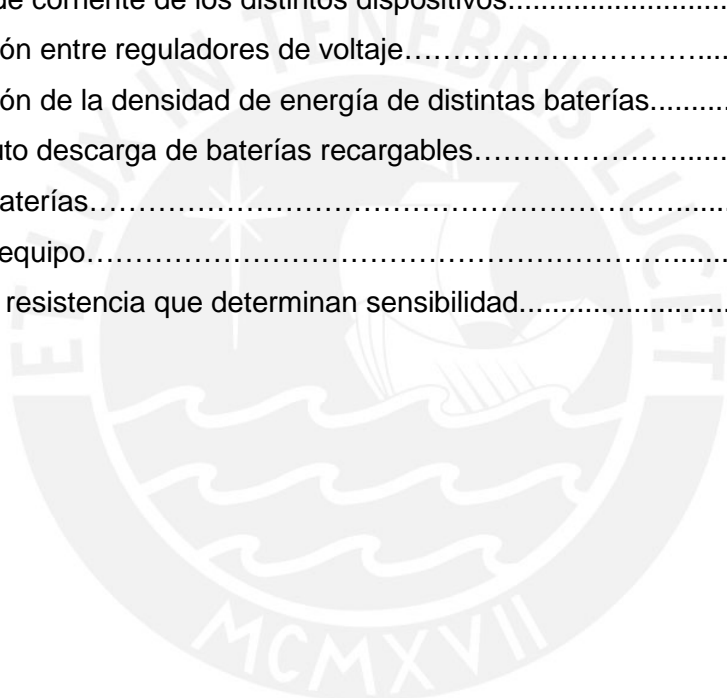
1.01 Análisis del proceso de selección de explosivos y detonadores.....	5
2.01 Curva de desviación en frecuencia vs. Temperatura de cristales.....	21
2.02 Curva de respuesta general de los distintos tipos de detectores ópticos.....	25
3.01 Medición de Tiempo de retardo de un detonador no eléctrico.....	38
3.02 Medición de VOD de una manguera de un detonador no eléctrico.....	39
3.03 Medición de VOD de una cartucho de dinamita.....	40
3.04 Medición de tiempos de retardo de 2 detonadores electrónicos.....	41
3.05 Diagrama de Bloques del sistema CRONEX-5.....	45
3.06 Fotografía de la pantalla usada.....	52
3.07 Circuito de BackLight.....	53
3.08 Ganancia de Corriente (DC).....	54
3.09 Región de Saturación.....	54
3.10 Corriente máxima $I_F$ LED del backlight .....	54
3.11 Relación entre el Duty Cycle y el brillo de la pantalla.....	55
3.12 Diagrama de bloques del circuito de sensado.....	56
3.13 Fotodiodo IF-D91.....	57
3.14 Circuito de prueba dado por el fabricante.....	58
3.15 Curvas de respuesta en el tiempo del comparador.....	59
3.16 Diagrama esquemático de uno de los seis sensores ópticos.....	60
3.17 Diagrama de Bloques del circuito contador .....	61
3.18 Potencia VS Precisión de varios tipos de osciladores.....	62
3.19 Sistema de alimentación de energía.....	65
3.20 Curva de carga/descarga de una batería ideal.....	66
3.21 Curva de descarga de baterías recargables a una corriente de descarga.....	67
3.22 Laptop Sony destruida por una Batería de Li-Ion.....	69
3.23 Pantalla Principal del CRONEX.....	71
3.24 Diagrama de Flujo Programa Principal.....	71
3.26 Menú Principal.....	72
3.27 Diagrama de flujo de la función MENU PRINCIPAL.....	73
3.28 Menú Tiempo.....	74
3.29 Diagrama de Flujo de MENÚ TIEMPO.....	74

3.30 Ingreso de Pruebas de Velocidad.....	75
3.31 Ingreso de distancias.....	75
3.32 Diagrama de flujo de la Función MENU VELOCIDAD.....	76
3.33 Menú mostrado en pantalla de la configuraciones de brillo.....	77
3.34 Diagrama de flujo de la función cambiar brillo.....	77
3.35 Diagrama de flujo de la función menú comunicación.....	78
3.36 Sistema CRONEX para medición de tiempo y velocidad de detonación.....	79
3.37 Diagramas esquemáticos.....	80
3.38 Distribución de componentes cara superior e inferior.....	83
3.39 Diagrama de pistas cara superior e inferior.....	84
4.01 Señal en el canal 2 con desplazamiento a la izquierda, $f_2 > f_1$ .....	86
4.02 Señal en el canal 2 con desplazamiento a la derecha, $f_2 < f_1$ .....	87
4.03 Calibración del equipo usando un generador de señales .....	89
4.04 Circuito de sensores ópticos.....	90



## ÍNDICE DE TABLAS

3.01 Comparación entre microcontroladores .....	48
3.02 Comparación entre memorias no volátiles.....	49
3.03 Comparación entre RTCs.....	50
3.04 Comparación entre Circuitos integrados para interfase RS-232.....	51
3.05 Comparación entre pantallas LCDs.....	52
3.06 Comparación entre sensores ópticos.....	57
3.07 Comparación entre circuitos integrados comparadores.....	58
3.08 Comparación entre diversas tecnologías de osciladores.....	63
3.09 Consumo de corriente de los distintos dispositivos.....	64
3.10 Comparación entre reguladores de voltaje.....	64
3.11 Comparación de la densidad de energía de distintas baterías.....	67
3.12 Tasa de auto descarga de baterías recargables.....	68
3.13 Costo de baterías.....	70
3.14 costos del equipo.....	85
4.01 Valores de resistencia que determinan sensibilidad.....	90



## INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo de investigación describiremos los ensayos e instrumentos disponibles para evaluar la performance de un explosivo mediante el cálculo de la velocidad de detonación.

La velocidad de detonación o VOD (Velocity of Detonation) de un explosivo es la velocidad con que el frente de detonación recorre la longitud del mismo. Dicha velocidad es supersónica y puede ser tan alta como 8000 m/s. El VOD es uno de los parámetros más importantes del proceso de detonación. Su valor es indicativo de la calidad y prestaciones del explosivo. Se utiliza para inferir otros parámetros como la presión de detonación y la presión de los gases de explosión [1].

Es bien sabido que la performance de un explosivo está vinculada con su capacidad para liberar energía, la cuál es función de la composición química y de la densidad del mismo. Ambos parámetros definen a su vez el VOD. Existe por lo tanto, una relación entre la performance y velocidad de detonación [2].

Al utilizar la medición del VOD como herramienta de evaluación de la calidad de los explosivos, las empresas fabricantes tienen la posibilidad de mejorar sus procesos de producción y control de calidad. Así mismo, las compañías mineras podrán optimizar sus procesos de voladura reduciendo los costos en transporte y extracción del mineral.

## CAPÍTULO 1: MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD DE DETONACIÓN

### 1.1 Investigación Preliminar:

Los insumos de voladura como los fulminantes y detonadores pueden presentar problemas debido a procesos de producción inadecuados, condiciones ambientales adversas, mala manipulación en el transporte y almacenaje. Por otro lado, los equipos necesarios para el control de calidad de estos insumos tienen precios que son excesivos para muchas empresas peruanas, por lo cual dichas empresas optan por procesos de control de calidad más tradicionales y poco fiables.

El uso de materiales de mala calidad o defectuosos provoca secuencias de detonación imprecisas que generan cuantiosas pérdidas de tiempo y dinero a las empresas dedicadas a la exploración y explotación minera. Debido a esto, es necesario para un gran número de compañías mineras adquirir sistemas que evalúen los insumos usados de manera confiable y a un costo asequible.

### 1.2 Análisis de los entornos

#### 1.2.1 Medio Organizacional

Las empresas nacionales dedicadas a la fabricación de explosivos están en la necesidad de mejorar sus procesos de control de calidad en los productos que fabrican a consecuencia del aumento de la demanda y el ingreso de nuevas empresas extranjeras.



Uno de los métodos más efectivos para determinar la calidad de los insumos de voladura es usar equipos medidores de VOD, pero los altos costos de estos equipos impiden a las empresas peruanas su adquisición.

La política actual de las empresas peruanas es aumentar la exportación de sus productos, para ello se debe cumplir estrictos controles de calidad. Cabe resaltar que no todas sus plantas poseen medidores de VOD, por lo tanto una parte de la producción sale al mercado sin un adecuado control de calidad.

Debido a la necesidad de reducir los costos de operación, las empresas peruanas solo pueden destinar pocos operarios a los procesos de evaluación de VOD. Por lo tanto, los sistemas de medición de VOD deben ser automatizados y requerir la menor cantidad de operarios.

### **1.2.2 Medio específico**

Las compañías de extracción minera adquieren insumos de voladura que muchas veces no cumplen con los parámetros indicados por los fabricantes debido a diversos factores como fabricación deficiente, grado de confinamiento, humedad, altura sobre el nivel del mar, almacenaje, etc. Estas deficiencias en los insumos pueden generar procesos de voladura erróneos, lo cual producirá tierra no removida y rocas mal fragmentadas, aumentando el número de voladuras secundarias.

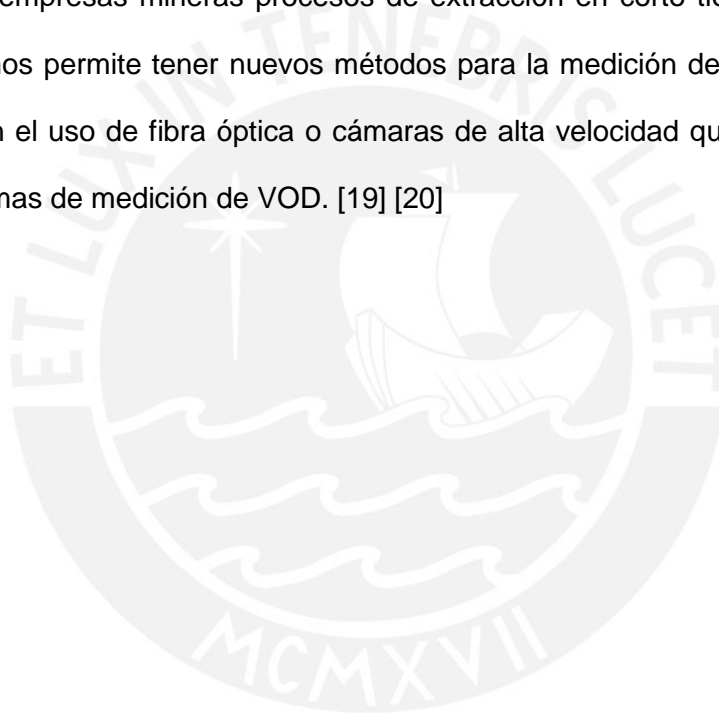
Las empresas requieren de sistemas de control de calidad que estén económicamente a su alcance. Actualmente, en el mercado existen varias marcas de medidores de VOD que utilizan diversos métodos, pero estas marcas son importadas y de alto costo.



### 1.2.3 Medio General

En el mundo globalizado existe la tendencia de exigir a las compañías mineras procesos de extracción de minerales más eficientes y menos contaminantes. Por lo tanto, cuando los procesos de voladura son más eficientes, reducen la contaminación y disminuyen el uso de recursos durante el transporte y procesamiento del material.

El incremento en la demanda mundial de minerales (debido al auge económico chino) exige a las empresas mineras procesos de extracción en corto tiempo. El avance de la tecnología nos permite tener nuevos métodos para la medición del VOD. Estos métodos se basan en el uso de fibra óptica o cámaras de alta velocidad que mejoran la precisión de los sistemas de medición de VOD. [19] [20]



1.3 Análisis del proceso de un acontecimiento no deseado

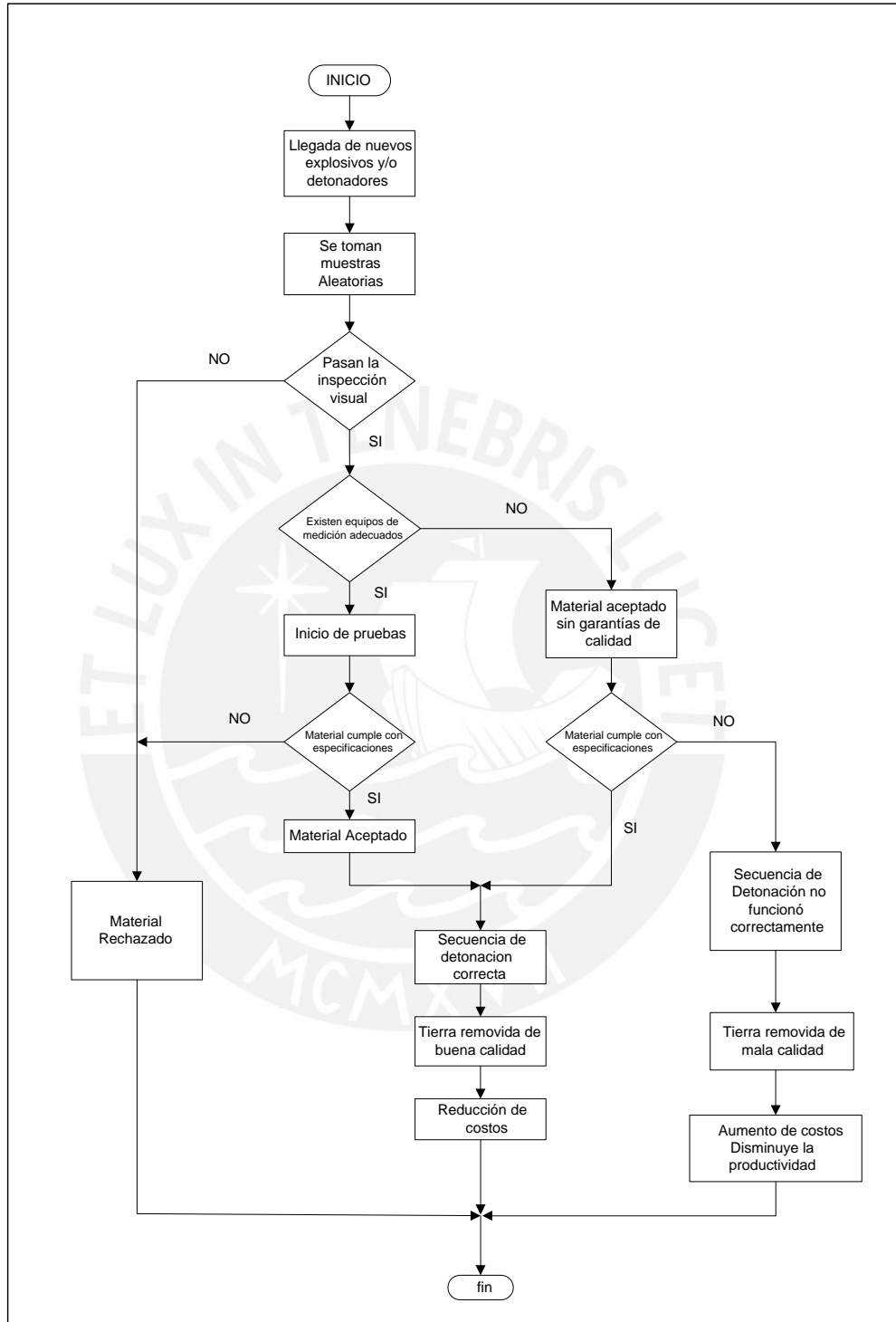


Figura 1.01 Análisis del proceso de selección de explosivos y detonadores para un proceso de voladura.

## CAPÍTULO 2: SISTEMAS DE MEDICIÓN DE VELOCIDAD Y TIEMPO DE DETONACIÓN PARA EXPLOSIVOS.

### 2.1 Estado del arte

#### 2.1.1 Presentación del asunto de estudio

La medición del VOD de explosivos rápidos e iniciadores es un método usado en el proceso de evaluación de los insumos de voladura que serán usados en la minería y construcción, ya que la selección de los explosivos adecuados permiten mejorar la precisión de la explosión y aumentar la calidad de la tierra removida, logrando disminuir los costos operativos tanto en la minería como en la construcción.

La velocidad de detonación (VOD) es la velocidad por la cual las ondas de detonación viajan a través del producto explosivo (ya sea un detonante o un iniciador), lo cual representa la rapidez de la reacción química. La velocidad de la reacción es medida en metros por segundo (m/s) y la velocidad de detonación de la onda de choque de un explosivo rápido usualmente va de los 2000 m/s a 8000m/s. Para tener una idea de que tan rápido puede viajar una onda de choque, se debe tomar en cuenta que la velocidad del sonido en el aire es de 331m/s. Por lo tanto, el uso de sistemas de medición del VOD es requerido en situaciones en las que son indispensables tener explosiones de alta precisión. [3],[26]

El presente estudio muestra las tecnologías y sistemas que se utilizan para realizar mediciones precisas del VOD.

## 2.1.2 Estado de la Investigación

Las técnicas de medición de VOD pueden agruparse en las siguientes categorías:

### 2.1.2.1 Técnicas discontinuas

Las mismas consisten en colocar dos o más sensores dentro del cartucho explosivo o en la columna de explosivos a distancias predeterminadas, midiendo el tiempo en el cual el frente de detonación pasa por dichos sensores.

Los sensores comúnmente utilizados son circuitos eléctricos o sensores ópticos que generan pulsos eléctricos al ser comprimidos o iluminados. Estos pulsos son registrados en un osciloscopio y/o contador electrónico. Este tipo de método solo determina la velocidad promedio entre dos sensores y no da información alguna sobre lo que sucede entre los mismos.

La principal ventaja de los métodos discontinuos radica en que son más económicos y simples de usar. Estos instrumentos son prácticos para medir el VOD en cartuchos o tubos de ensayo en donde se requiera un valor aproximado del mismo. Su utilización en perforaciones de taladro no es práctica y sus resultados son cuestionables.

Los sistemas o métodos discontinuos más conocidos son:

### a. El método de D´Autriche:

Es un método muy poco sofisticado que se puede utilizar en casos en que no se cuente con ningún instrumento de medición y se necesite determinar la velocidad de detonación. Este método solo utiliza un cordón detonante y da lugar a errores de considerable magnitud debido a que se le asume un valor de VOD (entre 6200 a 6800 m/seg).

El método de D´Autriche consiste en insertar en un explosivo a una distancia conocida los dos extremos de una cierta longitud de cordón detonante, marcando luego su centro exacto sobre una placa metálica (preferentemente de plomo) que se usa como testigo. Al chocar los frentes de detonación provenientes de cada extremo del cordón se producirá una muesca en la plancha de metal. [4]

Conociendo las distintas distancias, la VOD se puede calcular con la siguiente fórmula:

$$VOD = \frac{VOD(\text{cordon}) \times L}{2 \times h}$$

Donde:

L: Es la distancia que separa los dos extremos del cordón detonante.

h: Es la distancia entre el centro del cordón detonante y la muesca.

### b. Métodos de medición con pines eléctricos:

Comúnmente llamados “Start-stop”, estos métodos utilizan un osciloscopio o un contador universal [5] para medir el intervalo de tiempo en que el frente de detonación comprime dos o más pines colocados en el explosivo a distancias preestablecidas. Dichos pines consisten en dos alambres sin contactarse por los que se induce un cierto voltaje, formando así un circuito eléctrico abierto.

Cuando el frente de choque comprime los pines, juntará los dos alambres y cerrará el circuito produciendo una señal eléctrica.

### **c. Monitor de Vibraciones:**

Este método fue desarrollado por Blastronics en Australia. Incluye un sistema electrónico de adquisición de datos que registra las señales eléctricas producidas por un sensor. El sensor puede consistir en acelerómetros, sensores de presión, geófonos, etc. El monitor hace uso de un accesorio llamado "Blastronics VOD" para medir el VOD, el cual a su vez se conecta a los sensores. Formando parte integral del sistema, una computadora portátil es utilizada para operar y analizar los resultados. [2]

Se utilizan cables de 24 conductores como sensor de VOD, los cuales producen 23 mediciones de velocidad por barreno. Los cables vienen suministrados en longitudes de 30 y 100 metros, con los primeros 10.5 metros como longitud activa. La separación de los sensores viene establecida de fábrica en 0.5 metros.

### **d. Monitor de Fibras ópticas:**

Su principio de operación consiste en medir el intervalo de tiempo, en el cual la luz que acompaña al frente de detonación del explosivo tarda en pasar por los sensores de fibras ópticas. Dicha solución elimina el problema del ruido eléctrico e interferencias producidas al usar conductores eléctricos de gran longitud. Uno de los sistemas existentes en la actualidad es el Xplomet fabricado en Suiza por la empresa Kontinitro. [8]

Este método será usado en el presente proyecto de tesis.

#### **e. Monitor Vodex:**

Este monitor consiste básicamente en un contador electrónico de 8 canales que registra los intervalos de tiempo, en el cual el frente de detonación tarda en pasar por los sensores conectados a cada canal. Dichos tiempos son automáticamente convertidos en velocidad, ya que la distancia entre los sensores es suministrada al monitor con anterioridad a la medición.

#### **2.1.2.2 Técnicas continuas**

Los métodos continuos permiten monitorear la velocidad de detonación en forma continua a lo largo del explosivo. Ello nos permitirá evaluar los efectos del cebo, los efectos de material contaminante dentro del explosivo (agua, atacado, etc), la propagación de la detonación, la zona de velocidad transiente, etc. Es decir, los métodos continuos nos proporcionarán una información mucho más detallada de lo que sucede dentro del cartucho o columna de explosivo.

Se han desarrollado varios instrumentos capaces de medir el VOD en forma continua, cada uno de ellos emplea un principio de operación distinto que trataremos a continuación.

#### **a. Monitor SLIFER:**

Este monitor fue desarrollado por Sandia National Laboratories, en EE.UU. El objetivo es medir la propagación de ondas de choque originadas por explosiones nucleares. Su nombre deriva de “Shorted Location Indication by Frequency of Electrical Resonance”, el



cual nos indica que su principio de operación se basa en el cambio de frecuencia de resonancia registrado por el cable sensor cuando su longitud es modificada.

El sistema utiliza como sensor un cable coaxial cortocircuitado en uno de sus extremos, formando parte de un circuito oscilador. La inductancia entre el conductor interior y el conductor exterior es modificada a medida que el cable es cortado y consumido por el frente de detonación, este cambio en la inductancia del cable modifica su frecuencia de resonancia. Durante la detonación, un circuito electrónico monitorea y registra continuamente la frecuencia. La información registrada permite determinar la longitud del cable en función de tiempo lo que nos lleva a determinar el VOD del explosivo usado.

Una de las limitaciones del sistema SLIFER es que la longitud del cable esta restringida a 66 metros, por lo tanto este sistema debe estar peligrosamente cerca de la detonación.

#### **b. Monitor VODR-1:**

La técnica usada por este monitor fue desarrollada en Los Alamos National Laboratories en EE.UU, como parte de las herramientas de diagnóstico utilizadas en la evaluación de explosiones nucleares.

El principio de operación del sistema se conoce como CORTEX (Continuos Reflectometry for Radius versus Time Experiments). Este sistema es similar al Radar, donde un pulso de ondas de radio es transmitido en el aire y su eco registrado para obtener así la información de distancia. En el caso del VODR-1 se utiliza cable coaxial para transmitir pulsos eléctricos y se mide con precisión el tiempo transcurrido entre la emisión y la recepción de los mismos. Dichos pulsos van a ser reflejados en la



discontinuidad presente donde el cable coaxial está siendo comprimido por el frente de detonación. La longitud del cable coaxial estará dada por:

$$L(t) = \frac{K \times c \times t}{2}$$

2

Donde:

K= constante de transmisión del cable coaxial (0.8)

c= velocidad de la luz (300 000 Km/seg)

t= tiempo entre emisión y recepción del pulso.

La repetición de los pulsos permitirá obtener un historial de longitud-tiempo que es procesado para calcular la velocidad y presentarla en gráficos. La frecuencia de transmisión de los pulsos eléctricos del VODR-1 está limitada a 200 KHz, es decir hasta 200.000 muestras por segundo. Entonces, si se usa un VODR-1 para evaluar un explosivo cuyo VOD es de 5.000 m/seg, solo se obtendrá 40 lecturas de velocidad por metro de cable coaxial.

### **c. Sistema con sensor de alta resistencia:**

El principio de operación de este sistema fue desarrollado originalmente por el USBM (United States Bureau of Mines). Consiste en utilizar un generador de corriente constante para mantener una corriente de intensidad uniforme a lo largo de un sensor de alta resistencia, basándose en la ley Ohm. Los cambios de voltaje asociados con los cambios de resistencia son registrados por un osciloscopio y/o equipo de adquisición de datos cuando el sensor es consumido por el frente de detonación. Al ser la corriente constante a lo largo del evento, los cambios de voltaje serán linealmente proporcionales a los de la resistencia. Conocida la caída total de voltaje y la resistencia por unidad de longitud del

sensor se puede determinar el VOD del explosivo mediante la interpretación de la pendiente del gráfico voltaje versus tiempo. Para mediciones en cartuchos o cargas de pequeña longitud, el sensor resistivo consiste en un hilo conductor de nicromo colocado dentro de un tubito de cobre de aproximadamente 1 metro de largo, ambos conectados en uno de sus extremos. Para mediciones en columnas explosivas de mayor longitud se ha desarrollado un cable sensor coaxial que permite la aplicación de este método a pozos de producción. La resistencia lineal del hilo de nicromo es constante y viene especificada por el fabricante.

#### **d. Fotografía de alta velocidad:**

Los procesos de detonación están acompañados por emisiones de luz, esto permite la visualización de la propagación de la detonación usando cámaras de alta velocidad y haciendo posible el cálculo del VOD.

Diferentes tipos de cámaras de alta velocidad pueden ser utilizadas para la medición del VOD y según su tipo de operación pueden ser clasificadas en los siguientes grupos: cámaras de tambor rotatorio, cámaras streak (ranura) y cámaras framing (cuadros).

Las cámaras de tambor rotatorio son un viejo tipo de cámaras de alta velocidad y están conformadas por un tambor hueco, un motor eléctrico, un sistema de sincronización, un generador de pulso temporizado y un film que puede estar montado dentro o fuera del tambor. La luz proveniente del frente de detonación pasa por la lente y choca con un punto del film alojado en el tambor (ubicado perpendicularmente a la dirección del frente de detonación). Si este tambor no gira, obtendríamos una línea recta paralela al eje del tambor. Por el contrario, si la velocidad de detonación y el giro del tambor son constantes, se obtendrá una línea curva en el film.

La pendiente de esta curva distancia-tiempo nos proporciona la velocidad de detonación.

[6]

Las cámaras streak están formadas por un espejo rotatorio de metal pulido, una pequeña ranura (de unos 100 micrones de ancho) por donde pasará la luz, lentes y dispositivos electrónicos de control. La luz proveniente del frente de detonación pasa por la ranura y es reflejada por el espejo rotatorio a un film que permanece estático. La pendiente de la curva de distancia-tiempo es obtenida en el film. Este método es similar al caso previo pero permite obtener curvas con una resolución de tiempo de hasta 100 femtosegundos.

[25]

Las cámaras framing funcionan de manera similar a las streak, pero poseen un obturador de alta velocidad y permiten obtener imágenes en dos dimensiones como cualquier cámara regular. Las cámaras framing producirán registros discontinuos, ya que existe un lapso de tiempo entre los cuadros sucesivos en que no se registra ninguna información del evento. [2]

### 2.1.3 Sistemas de iniciación de Voladuras

Para que un explosivo detone se requiere una cierta energía de iniciación, la cual puede ser suministrada en forma de calor, fricción, impacto, onda de choque, etc. Distintos explosivos requieren distintas energías de detonación. Por ejemplo, la pólvora puede ser iniciada mediante la llama de un fósforo, mientras que los explosivos secundarios requieren una fuente de mayor presión y temperatura.

Hay dos métodos básicos usados durante la iniciación de un explosivo: el método eléctrico y el método no-eléctrico

Para ambos casos se requiere calcular la velocidad de propagación usando un medidor de VOD, pues los detonadores deben cumplir las especificaciones dadas por el fabricante.

### 2.1.3.1 Detonadores eléctricos:

Existen dos tipos de detonadores eléctricos: los instantáneos y los de retardo.

#### a) Detonador instantáneo

Un detonador eléctrico instantáneo consiste en una cápsula de aluminio o cobre dentro de la cual se comprime un explosivo secundario de alto poder, formando la llamada carga base del detonador. Sobre dicha carga se comprime una pequeña cantidad de explosivo primario formando una carga de iniciación. Por último, se coloca una mezcla pirotécnica o carga de ignición, la cual se inicia debido al calor que es generado por un filamento de alta resistencia de platino-iridio. Cuando una corriente eléctrica circula por el filamento, se produce la siguiente secuencia de eventos:

Primero, la carga de ignición es encendida, luego el filamento se rompe y la carga iniciadora detona. Finalmente, esto hace que la carga base detone.

Aunque dicha secuencia es siempre la misma, el tiempo de duración no siempre lo es. Por consiguiente, son necesarios equipos de medición de VOD para determinar el comportamiento estadístico de estos.

### **b) Detonador de retardo**

Los detonadores eléctricos de retardo son de construcción similar a los instantáneos con la diferencia de que se les agrega un elemento retardador entre la carga iniciadora y la carga de ignición. Existen dos tipos de detonadores de retardo, los LP (periodo largo, en el orden de los segundos) y los MS( periodo corto, en el orden de los milisegundos). Las principales ventajas generadas por la utilización de retardos, tanto en operaciones a cielo abierto como en minas subterráneas son: Reducción del nivel de vibraciones, optimización de la fragmentación, disminución de sobre rompimientos, mayor control del material proyectado, menor número de voladuras secundarias y reducción de fallas de encendido como consecuencia del movimiento del talud.

La diferencia entre los tiempos de retardos reales y nominales (aquellos establecidos por el fabricante) ha sido ampliamente documentada como resultado de numerosos trabajos de investigación. Esta diferencia puede ser causada por variaciones en la intensidad de la corriente y puede ser motivada por un pobre control de calidad durante el proceso de fabricación, un almacenamiento inapropiado o una mala utilización de los mismos durante la ejecución de la voladura.

#### **2.3.1.2 Iniciación No eléctrica de voladuras**

Los sistemas de iniciación no-eléctrica son una alternativa válida al uso de sistemas eléctricos para todo tipo de voladuras con excepción de aquellas utilizadas en minas subterráneas de carbón u otras operaciones que presenten condiciones peligrosas de gases o polvos explosivos. Ello se debe a que los sistemas no-eléctricos tienden a

producir llamas y gases de combustión que podrían inducir explosiones pulverulentas o de gas. A continuación los principales dispositivos no-eléctricos utilizados en la iniciación de voladuras. [3]

#### **a) Mecha de seguridad**

Las mechas de seguridad se usan para propagar una llama a una velocidad relativamente uniforme hacia una carga explosiva para su iniciación. Las mismas contienen en su centro una mezcla de pólvora negra, azufre y carbono, envuelta en tramas de distintos tejidos y protegidos por capas de betumen, cera y polietileno.

La velocidad de propagación especificada por el fabricante tiene un margen de error del 10% cuando la misma es ensayada al nivel del mar. Debido a la variedad de causas que afectan dicha velocidad (grado de confinamiento, humedad, altura sobre el nivel del mar, almacenaje, etc) los fabricantes no garantizan la misma, por lo que es aconsejable realizar ensayos utilizando un medidor de VOD y un metro de mecha para corroborar dicha velocidad y efectuar los cambios necesarios para obtener los tiempos de combustión requeridos.

#### **b) Cordón Encendedor**

Este es un cordón fino y flexible que genera una vigorosa llama que se propaga a lo largo del mismo. Se utiliza para iniciar cualquier número de mechas de seguridad a través de los correspondientes conectores. Su uso incorpora grandes ventajas desde el punto de vista de seguridad y la eficiencia de la voladura.

De acuerdo a su velocidad de propagación se agrupan en tres tipos: lentos (50-70 seg/m), medios (26-33 seg/m) y rápidos (10-17 seg/m).

### **c) Cordón detonante**

El cordón detonante consiste en un tubo flexible conteniendo en su centro un alto explosivo (PETN o RDX) envuelto en tramas de tejidos naturales y/o sintéticos, recubierto externamente con una capa de plástico o cera. Las tramas le confieren resistencia a la tracción mientras que la cera lo hace resistente a la humedad y al agua. El cordón tiende a absorber agua por sus puntas abiertas, lo cual no impedirá la propagación de la detonación una vez que haya sido iniciada. Su velocidad de detonación es de 6000 a 7000 m/seg

### **d) Sistema Nonel (fulminante no eléctrico)**

Consiste en un tubo de plástico transparente con un diámetro externo de 3mm e interno de 2 mm. La superficie interior está cubierta de una fina capa de material reactivo (HMX o PETN) con un contenido de 0.02g/m de explosivo. La cantidad de explosivo que sostiene la propagación es tan chica que la parte exterior del tubo Nonel permanece intacta, aún después de la detonación. Al ser iniciado, dicha capa explosiva se desprende, generando una explosión de polvo explosivo que se transmite a lo largo del tubo a una velocidad de 2000 m/seg. El tubo es a prueba de agua, no es afectado por electricidad ni radiofrecuencias, también es insensible a la iniciación por fricción, impacto o shock y a la iniciación como consecuencia de un fuego, ya sea con el producto confinado o sin confinar.



### e) Sistema Hercudet

Consiste en un detonador sellado con su elemento de retardo incorporado y con dos tubos plásticos de pequeño diámetro en reemplazo de los cables eléctricos. La explosión se propaga a lo largo del tubo a una velocidad promedio de 3000 m/s, iniciando todos los detonadores conectados en sus extremos. [4]

## 2.2 Sistema medidor de tiempo y velocidad de detonación mediante fibra óptica

Un sistema medidor de tiempo y velocidad de detonación mediante fibra óptica es un equipo electrónico diseñado con la capacidad de evaluar la performance de un explosivo como una herramienta de control o evaluación en el proceso de optimización de voladura.

Para ello, el sistema captará la luz producida por los iniciadores y la detonación a través de sensores ópticos que medirán el tiempo transcurrido y podrá calcular la velocidad de detonación utilizando los parámetros ingresados. Estos resultados deberán ser mostrados en un dispositivo de visualización y almacenados en una memoria no volátil para su posterior análisis. El uso de fibra óptica y sensores de luz elimina el problema del ruido eléctrico e interferencias producidas al usar conductores eléctricos de gran longitud que son usados en la mayoría de los medidores de VOD del tipo discontinuo.

La precisión del sistema de medición se basa en la calidad del oscilador de cristal de cuarzo, cuyo principal propósito es proveer un reloj confiable para el sistema.



## 2.3 Osciladores

Son dispositivos capaces de crear perturbaciones o cambios periódicos en un medio, ya sea un medio material (sonido) o un campo electromagnético (ondas de radio, infrarrojo, microondas, luz visible, rayos X, rayos gamma, rayos cósmicos).

En Electrónica, un oscilador es un circuito que es capaz de convertir la corriente continua en una corriente que varía de forma periódica en el tiempo (corriente periódica). Dependiendo de la forma que tenga la onda producida, estas oscilaciones pueden ser: sinusoidales, cuadradas, triangulares, etc.

A continuación se describen los distintos tipos de osciladores:

### 2.3.1 Cristales de Cuarzo:

El cuarzo es la forma cristalina de dióxido de silicio. Este material en su forma amorfa es comúnmente encontrado en la arena de mar y en el vidrio de las ventanas. Como cristal, el cuarzo muestra efectos piezoeléctricos así como comportamientos mecánicos de expansión y contracción, los cuales dependen del tipo de corte realizado en el cristal. La mayoría de los cristales que se fabrican hoy en día son los del tipo A-T, los cuales proveen las más altas frecuencias y la mejor estabilidad de frecuencia ante cambios de temperatura a un bajo costo. [9]

En la figura 2.1 se muestra la curva de comportamiento de un oscilador con corte AT.

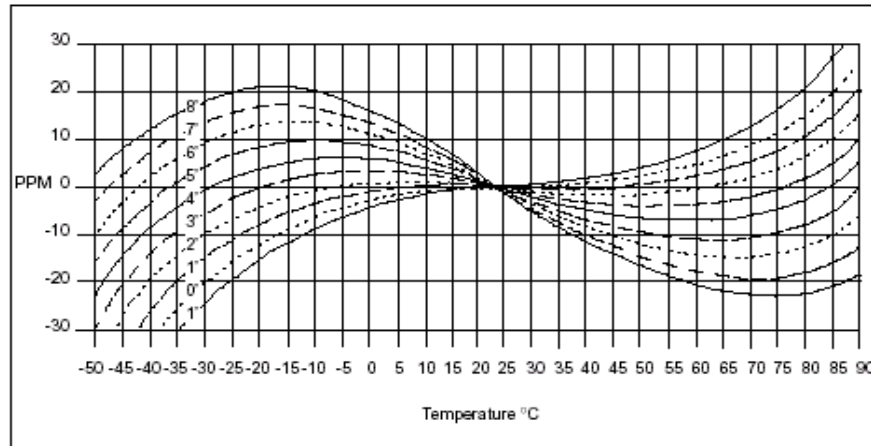


Figura 2.1 Curva de desviación en frecuencia vs. Temperatura de cristales

Fuente: Oscillator design guide, Microchip Inc.

Los osciladores basados en cristal de cuarzo se pueden clasificar en los siguientes tipos:

#### **XO (Clock Oscillator)**

Es un simple cristal de cuarzo oscilador usado como referencia en diversos circuitos electrónicos.

#### **VCXO (Voltage Controlled Crystal Oscillator)**

Es un oscilador de cristal controlado por voltaje. En otras palabras, es un oscilador con un pin de entrada de modulación en frecuencia para controlar la frecuencia de salida.

#### **TCXO (Temperature Compensated Crystal Oscillator)**

Es un oscilador de cristal con compensación de temperatura. Estos dispositivos utilizan un circuito de compensación de temperatura en el oscilador para alcanzar una frecuencia estable.

### OCXO (Oven Controlled Crystal Oscillator)

Es un oscilador de cristal controlado por un pequeño horno. Entre los osciladores basados en cristal de cuarzo, este es el de más alta precisión. El cristal es mantenido a una temperatura constante dentro de una capsula con un pequeño horno resistivo. [10]

#### 2.3.2 relojes ATOMICOS y otras tecnologías

Se denomina reloj atómico a un reloj cuyo funcionamiento oscilatorio se basa en la frecuencia de una vibración atómica, usando el efecto de emisión-absorción de radiación electromagnética que ocurre en átomos individuales libres.

Hoy los mejores patrones de frecuencia atómicos se basan en las propiedades físicas que tienen las fuentes de emisión de cesio.

El primer reloj atómico de cesio fue construido en 1955 en el Laboratorio Nacional de Física (NLP), en Inglaterra. Sus creadores fueron Louis Essen y John VL Parry. A pesar de ello, los físicos continúan experimentando con nuevas variaciones como los másers de hidrógeno (Townes), los de bombeo óptico de rubidio (Kasler) y los recientemente propuestos de mercurio que permiten alcanzar mayor precisión. También, se mejora constantemente la precisión de los relojes de cesio al usar láser para enfriar los átomos logrando así, una desviación del orden de un segundo en veinte millones de años. [11]

Además, existen tecnologías híbridas como los cristales osciladores de rubidio (**RbXO**) que proveen lo mejor de dos mundos: la gran estabilidad de los osciladores de rubidio y el bajo consumo de energía de lo osciladores de cristal.

## **2.4 Uso de la óptica para medición del V.O.D**

El empleo de sistemas ópticos elimina el problema del ruido eléctrico e interferencias producidas al usar conductores eléctricos de gran longitud. Estos sistemas hacen uso extensivo de la fibra óptica y detectores ópticos.

### **2.4.1 Fibra óptica**

Son filamentos de vidrio (cristales naturales) o plástico (cristales artificiales), del espesor de un cabello (entre 10 y 300 micrones). Llevan mensajes en forma de haces de luz que realmente pasan a través de ellos de un extremo a otro, donde quiera que el filamento vaya (incluyendo curvas y esquinas) sin interrupción. [12]

Entre las fibras ópticas podemos encontrar la siguiente clasificación:

#### **a) Multimodo índice escalón**

Son aquellas en las cuales el valor del índice de refracción en el núcleo permanece siempre constante y mayor que el valor del revestimiento. En estos tipos de fibras los distintos modos de propagación o rayos siguen distintos caminos y llegan al otro extremo en instantes diferentes, provocando un ensanchamiento de la señal óptica transmitida. Este es el tipo de fibra óptica usada en la evaluación de explosivos y generalmente tiene núcleo de plástico para reducir los costos.

**b) Multimodo índice gradual**

Este tipo de fibra posee un núcleo cuyo índice de refracción varía con la distancia a lo largo del eje, dicha variación tiene como objetivo disminuir los efectos de la dispersión modal. Al igual que la fibra de índice escalón, el núcleo está rodeado por el vidrio del cladding ó revestimiento de menor índice refractivo.

**c) Modo único o monomodo**

Estas fibras están caracterizadas por contener un núcleo de pequeñísimo diámetro, de tal forma que pueda restringir la comunicación a un solo modo, logrando minimizar la atenuación de la luz y aumentar el ancho de banda. Generalmente, es usada en telecomunicaciones.

**2.4.2 Detectores ópticos**

Son dispositivos físicos capaces de reaccionar eléctricamente o mecánicamente ante una fuente de luz.

Entre los detectores ópticos podemos encontrar la siguiente clasificación:

**a) Detectores de Germanio (Ge)**

Son detectores para medir luz con longitudes de onda desde 850nm a 1550nm (luz infrarroja). No es recomendado para condiciones de trabajo de baja temperatura.

**b) Detectores de indio, galio y arsénico ( InGaAs )**

Son detectores para mediciones de luz entre 1000nm a 1650nm (luz infrarroja). No es recomendado para fibras ópticas multimodo.

**c) Detectores de silicio (Si)**

Son detectores para hacer mediciones de luz con longitudes de onda desde 600nm a 1000nm (Luz visible en infrarroja). [13]

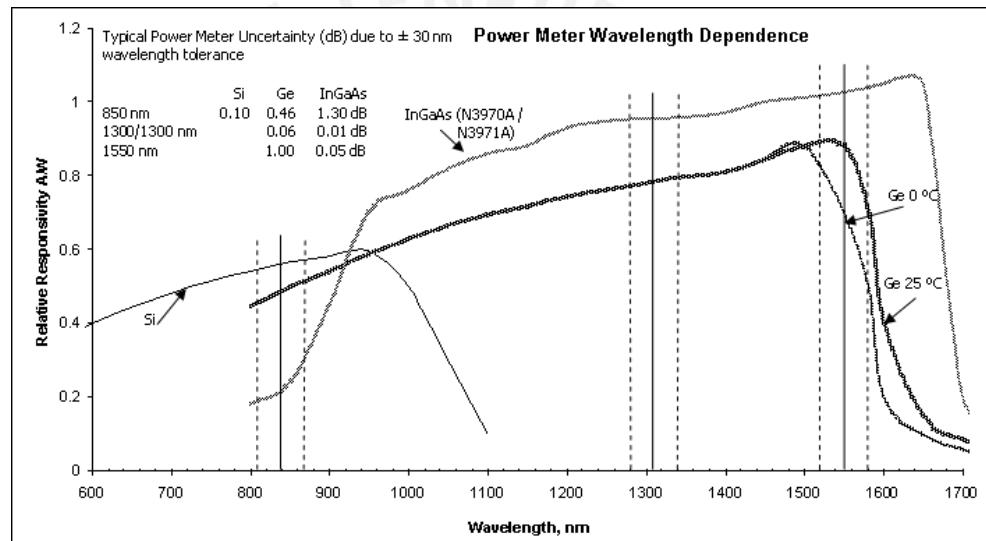


Figura 2.2 curva de respuesta general de los distintos tipos de detectores ópticos.

Fuente: Sandia National Lab.

## 2.5 Accesorios para voladuras

Son dispositivos o productos empleados para cebar cargas explosivas, suministrar o transmitir una llama que inicie la explosión y llevar una onda detonadora de un punto a otro o de una carga explosiva a otra. Además, son necesarios para probar las conexiones y disparar los explosivos, produciéndose así la voladura.

### 2.5.1 Detonador.

Es un dispositivo usado para explotar bombas, materiales explosivos y dispositivos de explosión.

Hay tres categorías de detonadores según su retardo: detonadores Instantáneos (DEI), Detonadores de Período Corto (DPC) y Detonadores de Período Largo (DPL). Los detonadores DPC se miden en milisegundos, mientras que los DPL se miden en segundos.

Hay tres categorías según su mecanismo de acción: eléctricos, químicos y mecánicos; siendo estos dos últimos los más utilizados actualmente. En los artefactos explosivos militares tales como granadas de mano o minas submarinas, los detonadores suelen ser mecánicos, mientras que en el uso comercial de explosivos es más común el uso de detonadores no eléctricos (Nonel) que han desplazados a los eléctricos por su mayor seguridad.



### 2.5.2 Fulminantes.

Los fulminantes o cápsulas detonadoras son casquillos metálicos cerrados en un extremo, los cuales contienen una carga explosiva de gran sensibilidad, por ejemplo fulminato de mercurio. Además, están hechos para detonar con las chispas del tren de fuego de la mecha de seguridad.

### 2.5.3 Estopines eléctricos.

Los estopines eléctricos son detonadores elaborados de tal manera que pueden explotar una pequeña carga de detonación con una corriente eléctrica que pasa por un filamento. Con ellos pueden iniciarse varias cargas de explosivos de gran potencia y se puede controlar con precisión el momento de la explosión, lo que no sucede con los fulminantes por la variación de la velocidad de combustión de la mecha.

Dentro de los estopines eléctricos encontramos los instantáneos y de retardo que son similares entre sí, con la diferencia que los de retardo tienen un elemento retardador (pólvora lenta) colocado entre el filamento y la carga de detonación.

Estos estopines de retardo tienen una etiqueta de color que muestra el número de período de retardo y que sirve para su identificación. El disparo con estopines de retardo tiene por objetivo mejorar la fragmentación y el desplazamiento de la roca, así como proporcionar mayor control de vibraciones, ruido y proyecciones. Cuando se utilizan adecuadamente pueden reducir costos.

Los estopines de retado tienen alambre de cobre calibre 24 forrado cada uno de distinto color, generalmente uno es azul y el otro es amarillo.

## 2.6 Voladuras

Para obtener una buena voladura no basta con seleccionar correctamente el explosivo, también es necesario conocer el método de aplicación más indicado para cada clase de trabajo obteniendo así una máxima eficiencia, la cual se traduce en menor costo de obra. Generalmente, los resultados óptimos en voladuras se adquieren a través de la experiencia y el uso de insumos de primera calidad. [2] [14]

Los objetivos de una voladura se deben tener en cuenta desde el inicio de su diseño.

Los principales objetivos son:

- La roca debe tener la granulometría deseada. Esto se refiere a los tamaños de los fragmentos de roca que muchas veces están limitados por ciertos factores tales como: la clase y tamaño del equipo de excavación y acarreo, la abertura o boca de la trituradora primaria, o simplemente por el uso al que se va a destinar el material.
- Procurar el consumo mínimo de explosivos para fracturar la roca. El tipo de explosivo a usar deberá ser aquel que tenga un menor costo por m<sup>3</sup> de roca volada. Una vez elegido el explosivo, se intentará usar el mínimo de explosivos en la carga de los barrenos que produzca los resultados requeridos, esto redundará en el aspecto económico de la voladura.

- Realizar la mínima perforación posible. Se debe intentar hacer una distribución adecuada de los barrenos (o agujeros de perforación) procurando tener una longitud de barrenación mínima, esto conducirá a ahorrar tiempo y recursos influyendo también en la economía de la voladura.
- Evitar proyecciones de roca. Se entiende como proyección al lanzamiento de fragmentos de roca al aire procedentes de la voladura. Es conveniente que las proyecciones de roca sean mínimas, pues son productos que hacen uso inútil de la energía del explosivo y pueden ocasionar daños.
- Evitar fracturas de roca detrás de la línea de corte o proyecto.

Quando un explosivo se usa apropiadamente, consume mayor parte de su energía en forma útil, ya sea fracturando la roca o moviéndola de lugar para evitar uniones entre sus fragmentos. Sin embargo, el resto de la energía se consume inútilmente proyectando rocas, lo cual es muy peligroso. El control de la energía se puede llevar a cabo mediante el tamaño de los agujeros de perforación, las separaciones entre los mismos y por el tipo de explosivo. [2], [15] y [16]

## **2.7 Definiciones Operativas**

### **2.7.1 Indicadores Cualitativos**

Permiten conocer la calidad y los grados de mejora de ciertas características claves de la medición del VOD.

- **Eficiencia del sistema de medición:** Medido en función de la rapidez con que se logran los procesos de medición y la precisión de la misma. Estos factores

influirán en gran manera en la percepción que los usuarios tengan del sistema que se les ofrece.

- **Satisfacción del Cliente:** Se puede percibir mediante la evaluación de las quejas y/o sugerencias que tengan los usuarios acerca del sistema, tales como confiabilidad, facilidad de operación y robustez del sistema.
- **Capacidad del Personal encargado de la medición:** Es relativo al personal técnico encargado del monitoreo y al uso de los sistemas de medición de VOD. Su capacidad ayudará a identificar las muestras medidas que no cumplen con los estándares de calidad deseados.

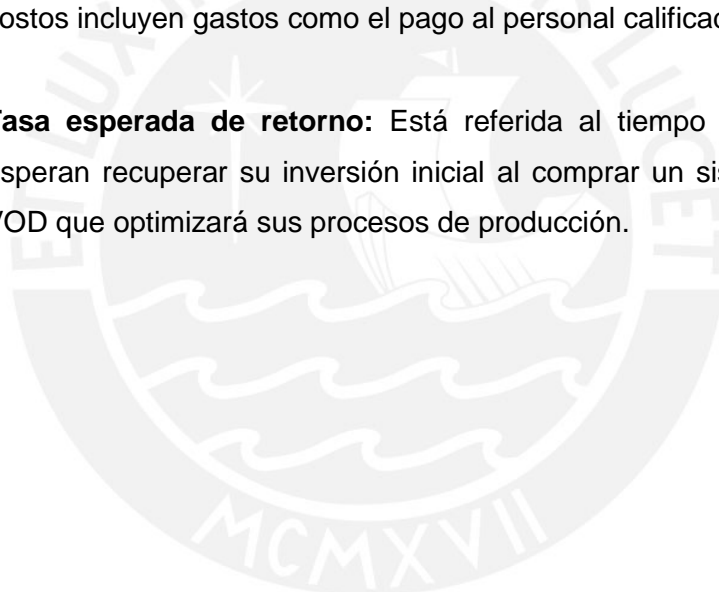
### 2.7.2 Indicadores Cuantitativos

Indica numéricamente los logros o degradaciones de ciertas características de los sistemas de medición de velocidad de detonación.

- **Rango de medición de velocidad de detonación:** Es el rango de la velocidad de detonación de los explosivos, detonadores y/o fulminantes que serán medidos. Puede estar en el orden de los metros por segundo (m/s) hasta los kilómetros por segundo (Km/s).
- **Rango de la medición de tiempo:** Se refiere al tiempo que puede tomar las pruebas para determinar el VOD desde la iniciación hasta la detonación. Puede estar en el rango de los microsegundos ( $\mu$ s) hasta los segundos (s).
- **Precisión de la medición de tiempo:** Se refiere a la exactitud con la que se mostraran los resultados, esto dependerá de la calidad del corte del cristal oscilador, su estabilidad ante cambios de temperatura y la rapidez de los sensores ópticos. El error de la medición deberá ser menor al 0.005%.
- **Número de puntos de prueba:** Es la cantidad máxima de mediciones de tiempo y VOD que puedan realizarse en forma consecutiva o simultanea, la

cual dependerá del número de contadores de tiempo, sensores ópticos y memoria del sistema para registrar todos los eventos. Por lo general, el número de puntos de prueba van desde 2 hasta 10.

- **Tiempo de autonomía:** Es el tiempo en el que el sistema puede operar haciendo usos de sus baterías, las cuales deberán operar correctamente en un rango amplio de temperaturas. el tiempo de autonomía mínimo requerido es de 24 horas.
- **Costos en adquisición, instalación y mantenimiento de equipos:** Está relacionado con el presupuesto necesario para que una empresa pueda implementar y mantener en operación un sistema de medición del VOD. Estos costos incluyen gastos como el pago al personal calificado.
- **Tasa esperada de retorno:** Está referida al tiempo en que las empresas esperan recuperar su inversión inicial al comprar un sistema de medición de VOD que optimizará sus procesos de producción.



## CAPÍTULO 3: DISEÑO DE HARDWARE Y SOFTWARE

### 3.1 Introducción

En el presente capítulo se relata los datos recopilados y criterios utilizados para el diseño de un sistema de medición de VOD de bajo costo y altas prestaciones, el cual en adelante será denominado CRONEX.

### 3.2 Hipótesis Principal

Actualmente se ha producido un incremento en la demanda mundial de minerales como el oro, cobre y zinc. El Perú, uno de los principales productores [19 y 20], necesita aumentar su producción, disminuyendo los costos de operación, así como los tiempos de extracción y procesamiento del material. Por otro lado, los defectos de la fabricación, transporte inadecuado y almacenamiento en condiciones no favorables pueden alterar las propiedades de los insumos para voladura, lo cual conlleva a errores en la secuencia de detonación provocando desplazamientos pobres y rocas mal fragmentadas.

### 3.3 Hipótesis secundarias

- Una medición precisa del VOD permite a los fabricantes de explosivos e insumos de voladura mejorar los procesos de control de calidad de sus productos, aumentando de esta manera el nivel de satisfacción de sus clientes.
- Una medición precisa del VOD permite a las empresas mineras determinar la calidad de los insumos antes de usarlos en sus procesos de voladura.

- La mayoría de las empresas peruanas tienen desconfianza de la calidad de los sistemas electrónicos desarrollados en el país.

### 3.4 Objetivos

#### 3.4.1 Objetivo General

Diseñar e implementar un sistema de medición de tiempo y velocidad de detonación con interfaz óptica de alta precisión y bajo costo, el cual estará orientado al control de calidad de explosivos y detonares usados en la minería y construcción. El sistema permitirá al usuario determinar la velocidad de detonación real de los insumos que serán utilizados para calcular con precisión la secuencia de detonación.

#### 3.4.2 Objetivos Específicos

- Desarrollar un sistema con seis sensores ópticos (con entradas para fibras ópticas) y tiempos de respuesta inferiores al microsegundo.
- Lograr un amplio rango de temperatura de operación, pues se debe garantizar el funcionamiento del equipo en ambientes muy fríos y cálidos, ya que el rango de operación exigido por los clientes es de  $-10^{\circ}\text{C}$  a  $+50^{\circ}\text{C}$ .
- Desarrollar un sistema a base de osciladores de cristal que permita la medición de tiempos y velocidad con alta precisión.



- Establecer una estrategia de mercadeo para generalizar el uso de sistemas de medición de VOD en las empresas fabricantes de explosivos y compañías mineras.
- Respetar el medio ambiente minimizando el uso de dispositivos electrónicos que produzcan contaminación luego de ser desechados.
- Precio asequible. El sistema CRONEX es un sistema de fabricación nacional que debe competir con equipos extranjeros de marcas reconocidas en el medio, por ello se tiene como objetivo reducir los costos sin descuidar la calidad.

### 3.5 Metodología de la investigación

El procedimiento que se usará para realizar el presente trabajo de estudio es la técnica discontinua para la medición de velocidad de detonación empleando el método de fibras ópticas. Además, se empleará la tecnología de osciladores de cristal con compensación de temperatura, los cuales proveen comportamientos estables en un rango amplio de temperaturas.

#### **Etapas 1: Investigación Preliminar**

La investigación preliminar determinó los siguientes hechos como posibles causas de las fallas en los insumos de voladuras:

- a) En los detonadores eléctricos instantáneos se observan tiempos de reacción distintos cuando:
  - La corriente de iniciación de los detonadores o gotas pirotécnicas no es igual para cada una de ellas, lo cual se debe generalmente a fallas en el

generador de la corriente de impulso. El tiempo de reacción promedio de una gota pirotécnica sísmica tipo SA es de 700 microsegundos a 2 Amperios.

- Los detonares eléctricos usados provienen de lotes distintos.

b) En detonadores no eléctricos tipo Nonel, los cuales son muy populares en la actualidad, se registran fallas por dos motivos principales:

- Desprendimiento del material reactivo adherido a las paredes del tubo de plástico debido a mala manipulación o transporte.
- Debido a una fabricación deficiente, ya que la superficie interior de estos fulminantes está cubierto de una fina capa de material reactivo (HMX o PETN) con un contenido de 0.02g/m de explosivo, por lo cual las pequeñas variaciones en esta densidad afectarán el comportamiento del detonador.

En las entrevistas previas con los ingenieros, personal técnico y operarios de fábricas de explosivos se obtuvieron sugerencias sobre las características que un sistema VOD con entradas ópticas debería tener:

- Botones numéricos grandes con un área mínima de 1.2x1.2 cm, serigrafía de alta resistencia a ralladuras y a prueba de agua, además de una vida útil de por lo menos un millón de ciclos.
- Pantalla de cristal líquido de alto contraste.
- Rango de operación desde 10°C a 40°C.
- Caja metálica de alta resistencia con protección IP55 o superior.
- Autonomía mínima de 40 horas.

## Objetivos de la solución

Los objetivos de la solución son los siguientes:

- seis entradas ópticas: una de inicio y cinco de término. Capaz de realizar cinco mediciones independientes y mostradas indistintamente en serie o paralelo.
- Medición de intervalos de tiempo hasta un máximo de 200 segundos.
- Resolución de un microsegundo.
- Precisión de +/- 0.005%.
- Rango de operación de **-5 a 50 °C**
- Baterías recargables de Ni-Mh (Níquel-Hidruro metálico) para operaciones portátiles.
- Adaptador / Cargador de 110-220v autorregulable.
- Capacidad de almacenar hasta 1000 resultados en memoria no volátil.
- Capacidad de Registrar la hora y fecha de cada medición.
- Salida serial USB o RS-232 para comunicación con una PC.

## **Etapas 2: Análisis del Proceso**

### **a) Análisis de los requerimientos**

El requerimiento exigido por las empresas fabricantes de explosivos fue realizar un sistema integrado capaz de medir tiempos y velocidad de detonación. Adicionalmente, el sistema deberá amoldarse a los distintos productos usados en la minería y construcción.

A continuación se presentan los distintos métodos de medición que debe realizar el sistema. En las figuras 3.01, 3.02 y 3.03 se muestran tres pruebas típicamente realizadas para medir tiempos de retardo y VOD de explosivos.

En la figura 3.01 se puede apreciar la medición de un tiempo de retardo basado en un detonador no eléctrico. El procedimiento es el siguiente: se conecta la primera fibra óptica en la manguera (uno o dos centímetros antes del fulminante), luego se conecta la segunda fibra al extremo final del fulminante y después se conecta el extremo opuesto de cada fibra óptica a los sensores ópticos. El tiempo de retardo será la diferencia del tiempo entre la llegada de la luz al primer y segundo sensor óptico.

En la figura 3.02 se muestra el proceso de medición del VOD de una manguera de detonador no eléctrico. Las dos fibras se conectan a la manguera con una separación de uno o dos metros entre ellas. Posteriormente, se mide la diferencia de tiempo entre la llegada de la luz al primer y segundo sensor óptico, para luego calcular la velocidad en base al tiempo y la separación entre ellas.

El mismo procedimiento es utilizado para medir el VOD de una dinamita o una emulsión, pero las fibras son introducidas dentro del mismo cartucho con una separación de 5 a 10 cm.

El sistema también debe estar preparado para medir tiempos de retardo donde hay un inicio común pero con paradas independientes entre sí, como se da en el caso de detonadores electrónicos o detonadores no eléctricos duales. Esto se puede apreciar en la figura 3.04.

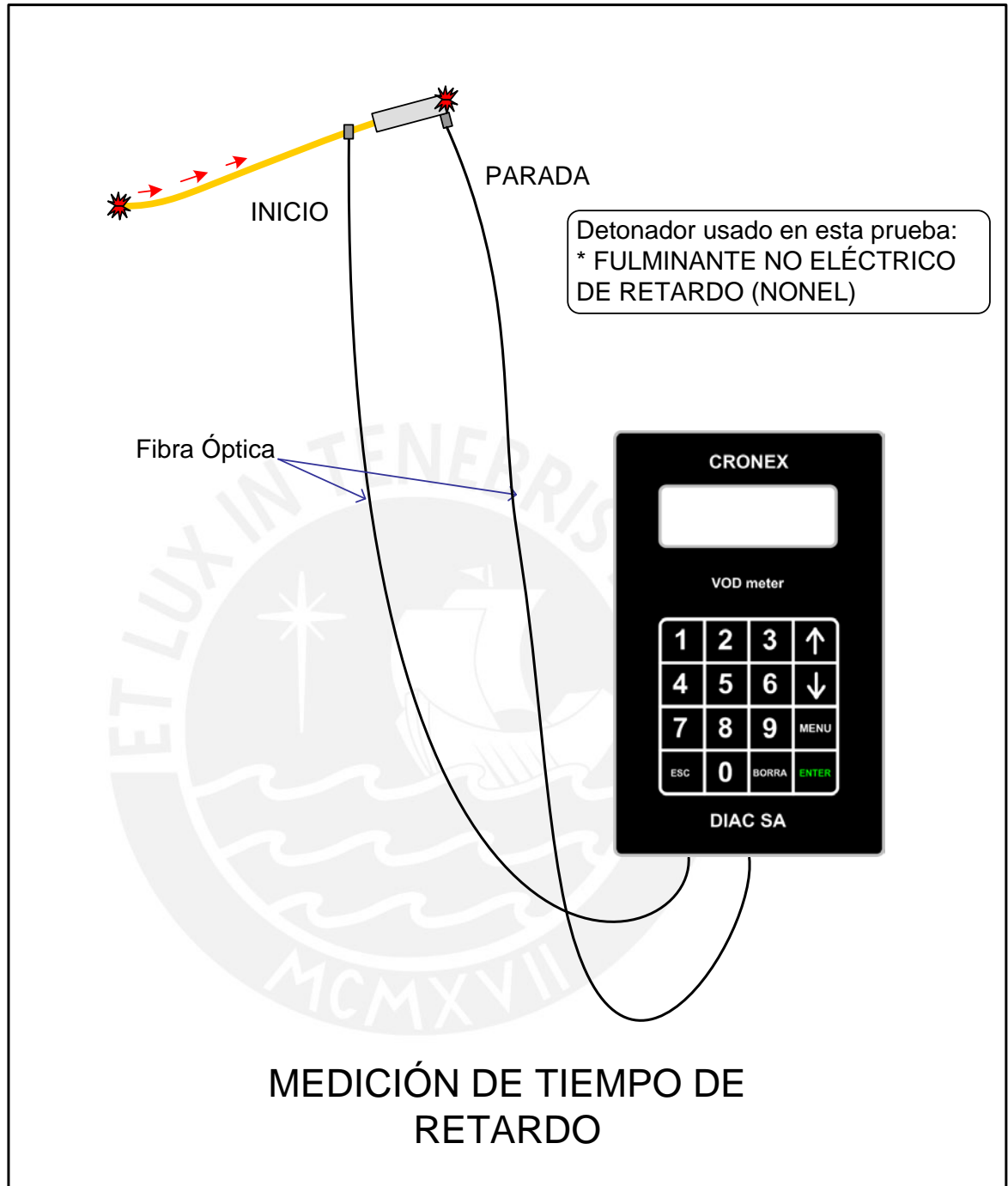


Figura 3.01 Medición de Tiempo de retardo de un detonador no eléctrico.

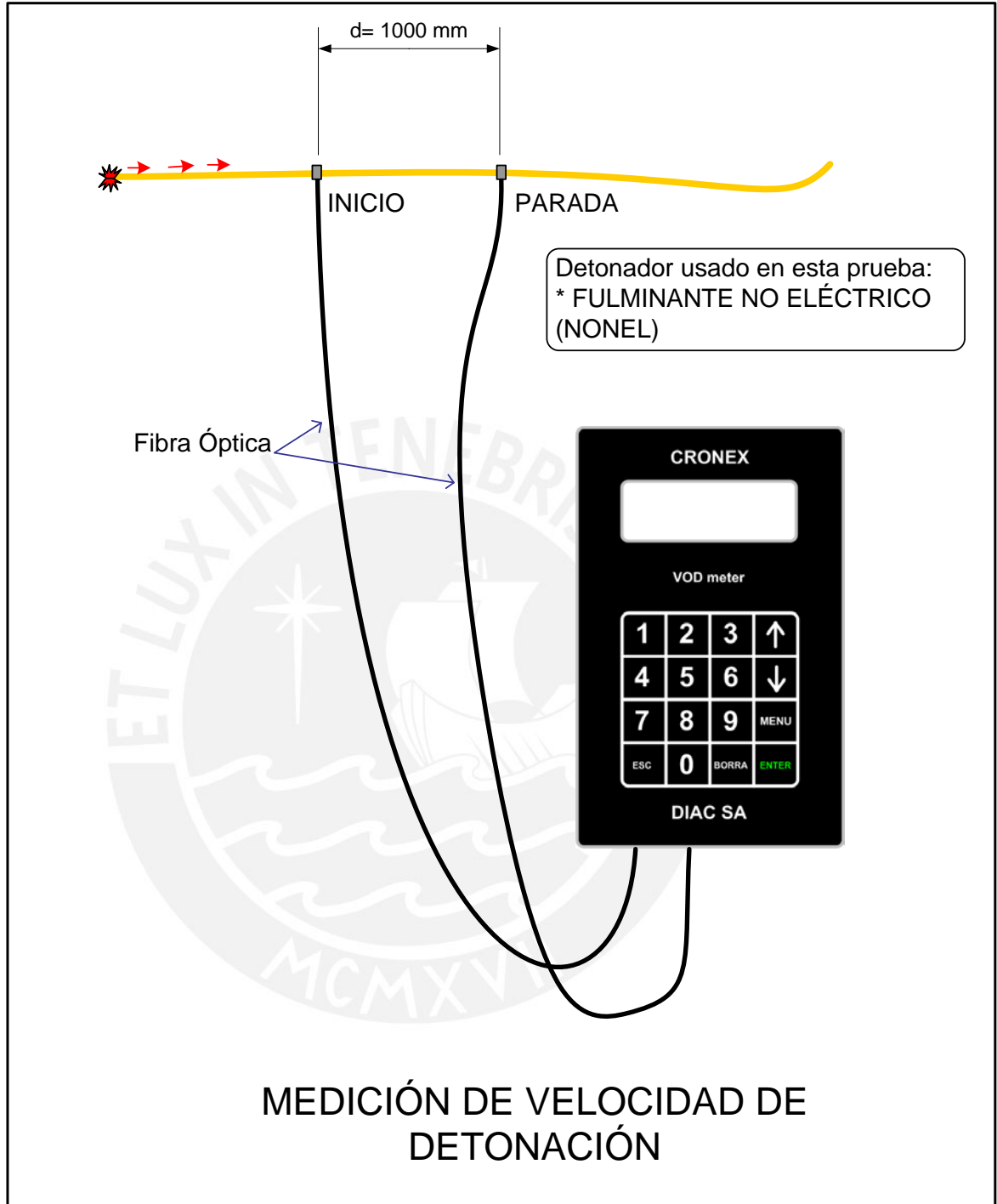


Figura 3.02 Medición de VOD de una manguera de un detonador no eléctrico.

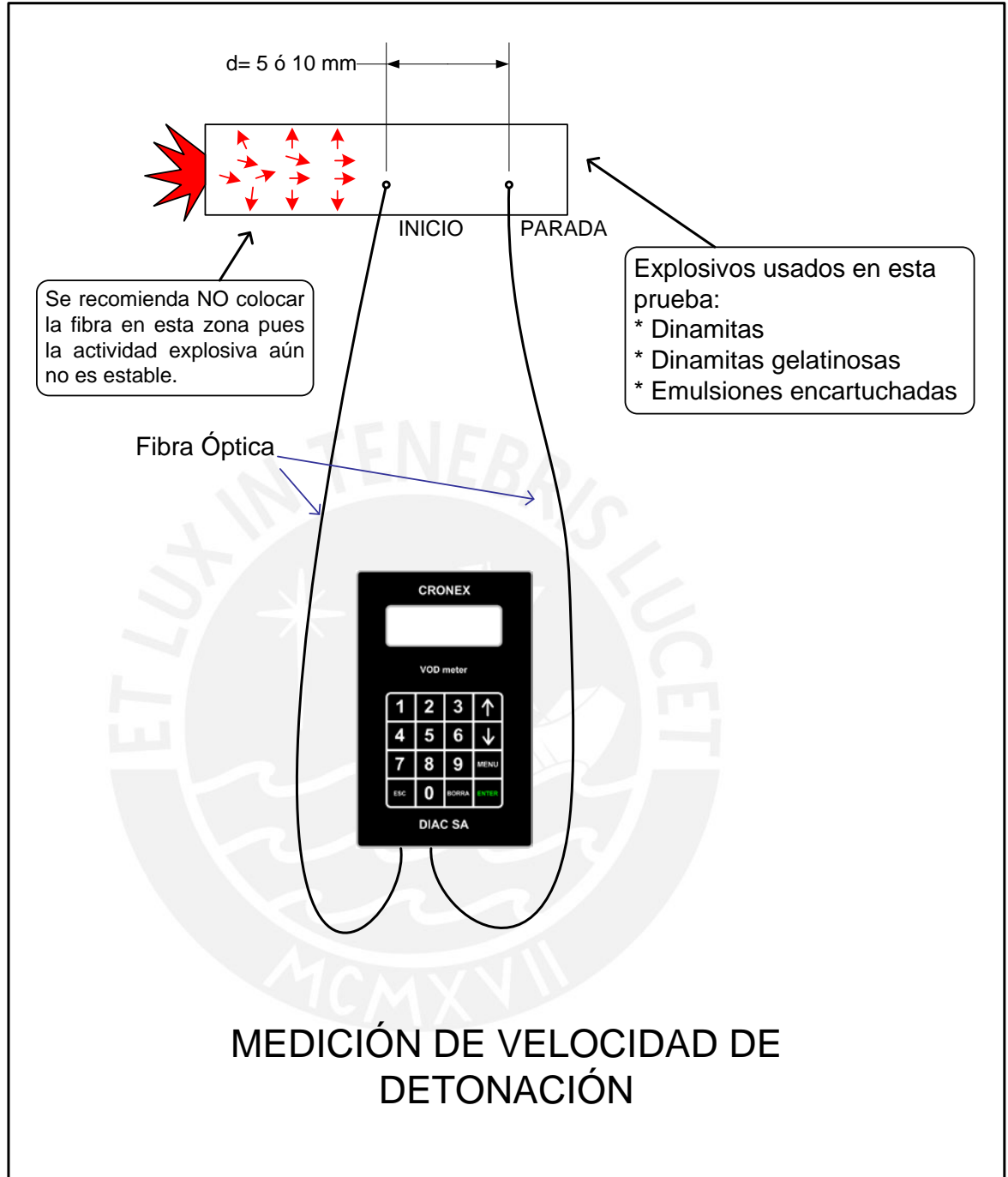


Figura 3.03 Medición de VOD de una cartucho de dinamita.



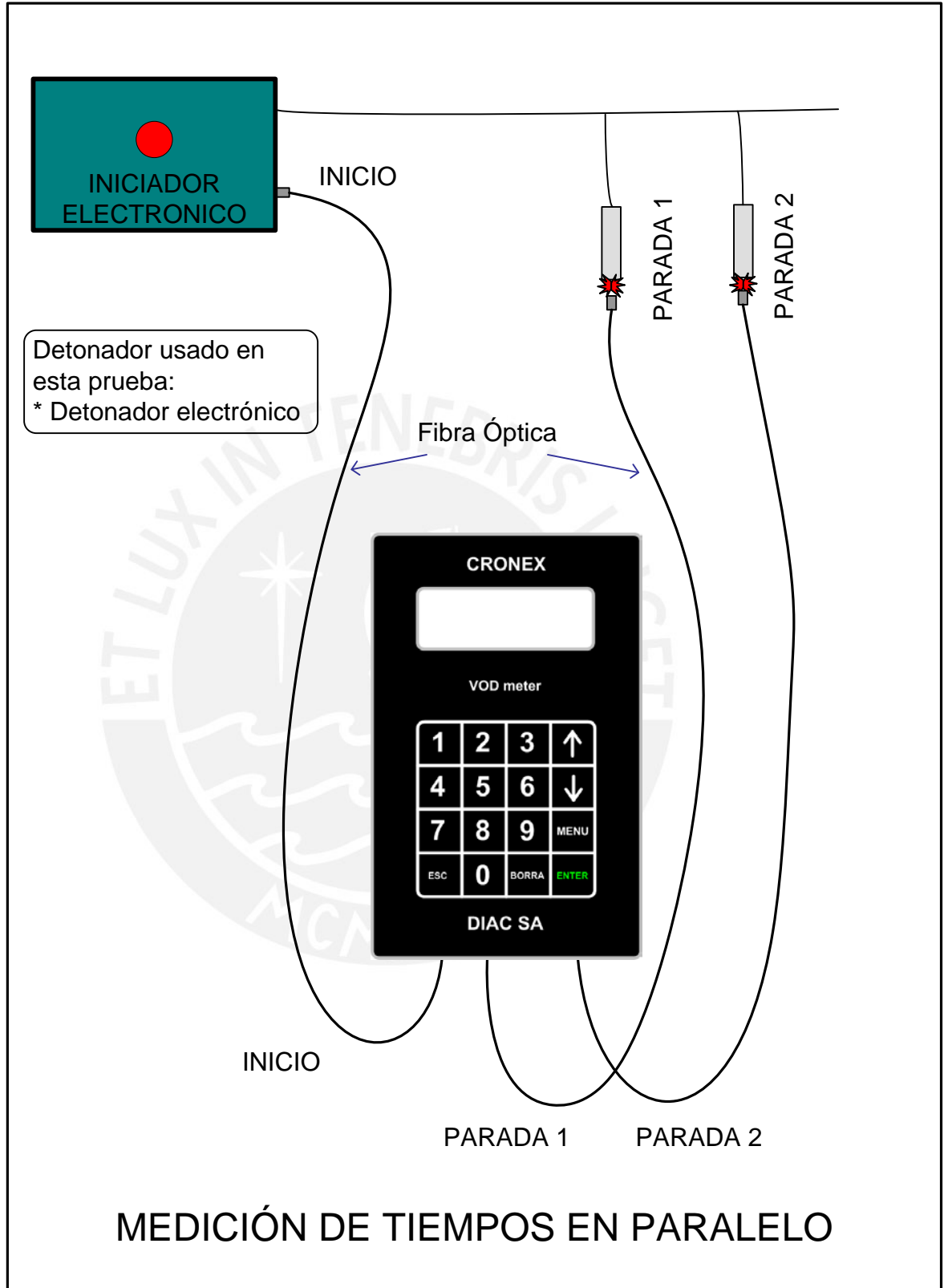


Figura 3.04 Medición de tiempos de retardo de 2 detonadores electrónicos.

### Etapa 3: Análisis y Diseño del Sistema

#### a) Análisis de las especificaciones

Una de las especificaciones más importantes y la cual determinará la complejidad del equipo es el rango de temperatura de operación. Como se explicó anteriormente, los sistemas de medición de velocidad de detonación (VOD) deben cumplir con los niveles de precisión exigidos por los usuarios (entiéndase productores y consumidores de insumos de voladura) en condiciones extremas de operación (climas fríos y secos como la sierra hasta ambientes cálidos y húmedos como la costa).

Para cumplir estas especificaciones se tuvo en cuenta que la mayoría de pantallas de cristal líquido (en las cuales se visualiza la información) son del tipo reflectivo. Dichas pantallas son visualizadores no emisivos, es decir que no tienen fuente de luz propia y se basan en una fuente de luz externa (solar o artificial) para poder ver los caracteres en la pantalla. Tienen la desventaja de no trabajar a temperaturas menores a 0°C ni mayores a los 40°C.

Las pantallas de tecnología transmisiva cumplen con el requerimiento de operación a temperaturas extremas. La tecnología transmisiva es la opuesta a la tecnología reflectiva pues no requieren de luz exterior para su visualización, es decir trabajan en modo negativo ya que la fuente de luz debe estar detrás de la pantalla. De esta forma que la luz brillará a través del visualizador y solo los pixeles que están activados dejarán pasar la luz.

Los elementos semiconductores también deben tener un rango amplio de temperatura de operación. Por ejemplo, en el caso del microcontrolador del sistema se seleccionó el modelo con especificaciones industriales, así éste podrá operar a temperaturas tan bajas como los  $-40^{\circ}\text{C}$  y tan altas como los  $80^{\circ}\text{C}$ .

La autonomía prolongada es otra de las especificaciones que debe poseer el sistema, para ello existen dos caminos. El camino más sencillo es usar una batería de ácido-plomo con una capacidad de varios amperios / hora. Lamentablemente, esta solución aumenta el peso considerablemente y así como también el tamaño, por ende la portabilidad del sistema se ve afectada.

La segunda solución es usar baterías pequeñas y reducir el consumo, para ello se debe optimizar el uso de componentes. Por ejemplo, un regulador de voltaje muy usado es el L7805, este regulador tiene una corriente de fuga típica de  $4.3\text{mA}$  y máxima de  $6\text{mA}$  y requiere una caída de voltaje de  $2\text{V}$  a  $1\text{A}$ . Una solución a este problema es usar reguladores de voltaje de bajo consumo como el MCP1700T, el cual solo consume  $4\mu\text{A}$  y tiene una caída de voltaje de solo  $178\text{mV}$ .

#### **Etapas 4: Desarrollo de la Solución**

- Importación de los componentes a ser empleados.
- Desarrollo del prototipo.
- Pruebas preliminares.
- Desarrollo del sistema de medición.
- Desarrollo de la aplicación propuesta.
- Validación del sistema.
- Plan de pruebas.

## **Etapas 5: Implementación y Puesta en Marcha**

- Elaboración de la documentación del sistema.
- Capacitación.
- Implementación de la solución.
- Análisis de los resultados del sistema.
- Plan de mantenimiento del sistema.

### **3.6 Descripción del Sistema:**

La figura 3.05 muestra el diagrama de bloques del sistema CRONEX. La parte superior representa los dispositivos encargados del suministro de energía, mientras que la parte inferior muestra los dispositivos relacionados a la medición de tiempo, ingreso de datos y visualización de los resultados.

A continuación se describe cada uno de los elementos que conforman al sistema CRONEX.

#### **3.6.1 Microcontrolador**

Es un circuito integrado que incluye en su interior las cuatro unidades funcionales de un computador: CPU, memoria, circuito temporizador y unidades de E/S, es decir se trata de un computador completo en un solo circuito integrado.

El sistema de medición del VOD requiere de un dispositivo encargado de controlar los periféricos que intervienen en la medición del tiempo (circuito de sensado y circuito temporizador), además controla la pantalla LCD, el teclado, el reloj en tiempo real y la memoria no volátil.

Para realizar todas estas funciones se tiene a los microcontroladores como una solución ideal.

### 3.6.2 Memoria No volátil

Para almacenar los datos obtenidos durante las pruebas se utiliza un dispositivo de almacenamiento que retenga la información por un periodo largo de ausencia de energía en el sistema. Cabe mencionar que una de las especificaciones requeridas es la capacidad de almacenar los datos obtenidos de por lo menos mil pruebas. En el presente capítulo se mencionan y comparan distintos tipos de memorias no volátiles.

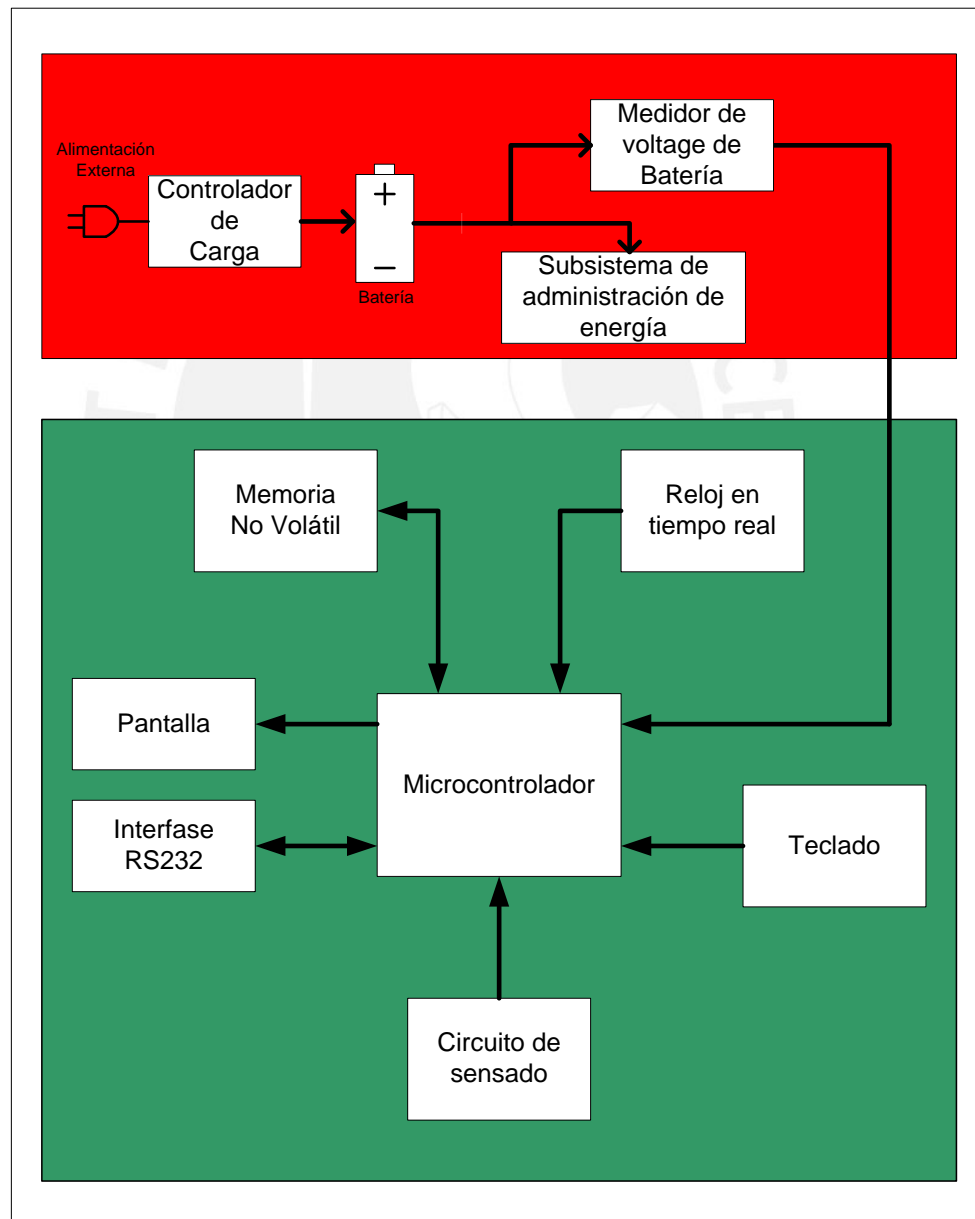


Figura 3.05 Diagrama de Bloques del sistema CRONEX-5.

### 3.6.3 Reloj en tiempo Real

Es un circuito integrado que mantiene la cuenta de la hora actual sin importar que el sistema esté energizado o no. Un reloj en tiempo real trabaja con una batería que no está conectada a la fuente de energía del sistema, por el contrario un reloj que no es de tiempo real dejará de funcionar cuando el sistema este apagado.

### 3.6.4 Pantalla

El sistema usa una pantalla de cristal líquido para la visualización de los datos obtenidos en las pruebas realizadas, así como los diferentes menús y mensajes del sistema. Esta pantalla es controlada por el microcontrolador.

### 3.6.5 Teclado

Para el proceso de interacción con el usuario el sistema de medición del VOD hace uso de un teclado matricial de 16 teclas, el cual también es controlado por el microcontrolador.

### 3.6.6 Interfase RS232

Para lograr la comunicación entre el sistema CRONEX y una computadora personal se utilizará un circuito integrado especializado, así como un conector externo.

### 3.6.7 Circuito de Sensado

Este circuito está basado en seis transductores de luz a voltaje, donde las fibras ópticas que llevan la luz (producida por la detonación) son conectadas a los sensores y la luz recibida es convertida a señales digitales que luego serán procesadas por el microcontrolador.

### 3.6.8 Batería

Este dispositivo se encarga de dar energía al sistema brindando la portabilidad requerida por los clientes.

### 3.6.9 Sub-sistema de administración de energía

Es un conjunto formado por circuitos integrados y sub-rutinas de programa diseñados para brindar energía a los distintos elementos del sistema.

### 3.6.10 Medidor de Voltaje de Batería

Es un circuito conformado por un divisor resistivo conectado al conversor análogo digital del microcontrolador, cuya finalidad es permitir el sensado del nivel de carga de la batería.

## 3.7 Selección de componentes de control

### 3.7.1 Selección del Microcontrolador ideal

Durante el desarrollo se tuvo como premisa utilizar un microcontrolador con las siguientes características:

- Bajo costo.
- Por lo menos seis capturadores de entrada para el circuito temporizador.
- Un gran número de puertos de Entrada/Salida para controlar todos los periféricos previamente mencionados.
- Conversor análogo digital para medir el estado de la batería.
- Tener un bajo consumo de energía.
- Herramientas de desarrollo ya disponibles.

La tabla 3.01 muestra una comparación entre los principales microcontroladores disponibles en el mercado. Nótese que todos poseen memoria de programa de tamaño similar pues el programa que se requiere no sobrepasa el 50% de la capacidad, dejando el resto a futuras actualizaciones o mejoras.



Dispositivo	MAXIM MAXQ2000	Microchip DSPIC33FJ64GP	Atmel Atmega64
Arquitectura/ #bits	<b>Harvard / 16bits</b>	<b>Harvard / 16bits</b>	<b>Harvard / 8bits</b>
Memoria Flash	64 KB	64 KB	64 KB
Memoria SRAM	2.0 KB	16 KB	4 KB
Puertos E/S	50	53	53
Consumo de corriente	2.2 mA a 2.5MHz	2 mA a 1 MHz	2.2 mA a 1 MHz
Registros/ Acumuladores	16	16	32
Temporizadores De 16bits	3	9	2
Capturadores de Entrada	3	8	2
Precio*	19.22	\$21.60	\$22.80
<b>RoHS compliant</b>	si	Si	si
<b>Libre de Plomo</b>	si	Si	si

Tabla 3.01 Comparación entre microcontroladores.

\*Precios dados por el importador

Los tres microcontroladores poseen características similares, sin embargo se eligió el microcontrolador DSPIC33FJ64GP pues destaca por su gran número de capturadores de entrada y temporizadores.

Al elegir el DSPIC33FJ64GP también se tomó en cuenta la protección del medio ambiente, es por eso que se utilizó empaquetados libres de plomo que cumplen con las directivas de restricción de ciertas sustancias peligrosas de la Unión Europea para aparatos eléctricos y electrónicos (**RoHS compliant**). Esta directiva fue adoptada en febrero del 2003 pero entró en vigencia el primero de julio del 2006.

Como su nombre lo indica, la directiva RoHS no es una ley sino una serie de recomendaciones para restringir el uso de seis sustancias peligrosas en la fabricación de dispositivos eléctricos y electrónicos.

Las sustancias en cuestión son: plomo, mercurio, cadmio, cromo VI (también conocido como cromo hexavalente), PBB (Polibromobifenilo) y PBDE (**polibromodifenil éter**). Los dos últimos usados como retardadores de fuego para algunos plásticos. [18]

Durante el soldado de todos los componentes de la tarjeta se utilizó soldadura de la marca RADIOSHACK libre de plomo, con 4% de plata en su composición y 220°C para la temperatura de fundido.

### 3.7.2 Selección de la Memoria No volátil:

Los criterios tomados en cuenta para la selección de la memoria no volátil fueron: dimensiones del dispositivo, tamaño de memoria de 128Kbytes, precio x byte y consumo de energía. La tabla 3.02 muestra la comparación de tres tipos de memoria no volátil.

Modelo	Atmel AT24C1024	Texas Instruments BQ4013	Atmel AT29C010A	ST M24M01-RMW6G
Interfase	Serial I <sup>2</sup> C	Paralela	Paralela	Serial I <sup>2</sup> C
Tecnología	EEPROM	NVRAM	FLASH	EEPROM
Número máximo de ciclos de escritura	1000 000	Sin límite	10 000	1000 000
Temperatura de Operación	-40 a 85° C	0 a 85° C	-40 a 85° C	-40 a 85° C
Consumo en modo inactivo	3 μA	3 mA	100 μA	3 μA
Consumo en Escritura/Lectura	3 mA / 2 mA	90 mA	50 mA	5 mA / 2 mA
Empaquetado / Dimensiones (mm)	SOIC-8 7.7 x 5.2	DIP-32 42.4 x 18.8	TSOP-32 8.1 x 20	SOIC-8 7.7 x 5.2
Precio (US \$)	6.60	55.44	5.26	6.68
Precio x KB (US \$)	0.05	0.43	0.04	0.05
<b>RoHS compliant</b>	Si	No	si	Si
<b>Libre de Plomo</b>	Si	No	Si	Si

Tabla 3.02 Comparación entre memorias no volátiles.

A pesar que la memoria AT29C010A tiene el mejor precio por byte, se eligió el modelo AT24C1024 debido a:

- Interfaz serial I<sup>2</sup>C, pues permite ahorrar puertos E/S del microcontrolador, así como espacio en la tarjeta.
- Menor consumo de corriente.
- Mayor número de ciclos de escritura
- Menor precio

### 3.7.3 Selección del Reloj de tiempo Real:

Los criterios tomados en cuenta para la selección del reloj de tiempo real (RTC) fueron: dimensiones del dispositivo, precio y consumo de energía. La tabla 3.03 muestra la comparación entre dos tipos de reloj de tiempo real.

Modelo	Dallas DS 1307	Texas Instruments BQ3287	STMicroelectronics M41T0M6F
Interfaz	Serial I <sup>2</sup> C	Paralela	Serial I <sup>2</sup> C
Cristal 32.768KHz	Externo	Interno	Externo
Batería de respaldo	Externa	Interna	Externa
Rangos de Temperatura de Operación	-40 a 85° C	-20 a 85° C	-40 a 85° C
Consumo en modo activo	200 $\mu$ A	15 mA	200 $\mu$ A
Empaquetado	SOIC-8	DIP-24	SOIC-8
Precio (US \$)	6.58	12.76	5.56
Libre de Plomo	Si	Si	Si
<b>RoHS</b> compliant	SI	Si	SI

Tabla 3.03 Comparación entre RTCs.

A pesar que los RTC con interfase I<sup>2</sup>C tienen un empaquetado más pequeño, utilizan mayor espacio pues requiere de batería de litio externa, diodos, porta batería y cristal, pero dan la posibilidad de reemplazar la batería de litio con mayor facilidad. Se eligió el de la compañía STMicroelectronics por su bajo consumo de corriente, mayor rango de temperatura y menor precio.

### 3.7.4 Selección del Circuito de interfase RS-232:

Para seleccionar el circuito de la interfase de comunicación RS-232 se tuvo como objetivo el precio y un bajo consumo de energía. En la tabla comparativa 3.04 se muestran dos circuitos integrados que proveen una interfase eléctrica entre el módulo de comunicación asíncrona del microcontrolador y el puerto serial RS-232.

Ambos dispositivos poseen características similares como se ve en la tabla, pero se eligió el MAX3232 por su bajo consumo de corriente.

Modelo	Maxim MAX232 I	Maxim MAX3232
Corriente de fuga típica	8 mA	0.3 mA
Voltaje de alimentación	4.5 – 5.5 V	3 – 5.5 V
Rangos de temperatura de operación	-40 a 85 °C	-40 a 85 °C
Precio (US \$)	1.80	3.00
Libre de Plomo	Si	Si
<b>RoHS</b> compliant	Si	Si

Tabla 3.04 Comparación entre Circuitos integrados para interfase RS-232.

### 3.7.5 Selección de la pantalla LCD

La tabla 3.05 muestra la comparación entre una pantalla LCD reflectiva tradicional con backlight (Optrex DMC20481) y una pantalla transmisiva de última generación (Optrex C-51847N). Para seleccionar la pantalla usada en el CRONEX, se tomó en cuenta la capacidad de operar en ambientes fríos y cálidos con distintos niveles de luminosidad y bajo consumo de energía.

Se eligió la pantalla transmisiva C-51847N ya que a un costo ligeramente mayor brinda un rango de temperatura de operación más amplio, contraste superior y menor consumo de corriente.

Modelo	Reflectiva DMC20481	Transmisiva C-51847N
Luminancia Típica	60 cd/m <sup>2</sup> a I <sub>f</sub> =240mA	70 cd/m <sup>2</sup> a I <sub>f</sub> =30mA
Potencia Típica Disipada en el LED	960mW	105 mW
Potencia Máxima Disipada en el LED	2 Watts	0. 24 W
Temperatura de operación	0°C a 50°C	-20 °C a 70°C
Consumo de corriente del Circuito Controlador	2.3 mA	2.8 mA
Precio U.S. \$	60.40	68.00

Tabla 3.05 Comparación entre pantallas LCDs.

En el sistema de medición de VOD CRONEX, el usuario tiene tres opciones de brillo de pantalla: bajo, medio y alto. Se recomienda usar el nivel de brillo bajo pues está diseñado para ambientes cerrados con iluminación artificial o días nublados, donde la luz que proviene de la pantalla no es mitigada por la luz externa, permitiendo ahorrar la energía de la batería. Por el contrario, es recomendable usar el nivel de brillo alto en ambientes con mucha iluminación como un día soleado. La figura 3.06 muestra una imagen de la pantalla transmisiva utilizada en el sistema Cronex-5.



Figura 3.06 Fotografía de la pantalla usada, nótese los caracteres blancos en fondo negro.

La figura 3.07 muestra el circuito usado para controlar el brillo de la pantalla transmisiva del sistema CRONEX. Nótese que cuando el Transistor Q1 está en saturación, la corriente que pasa por el LED del BACKLIGHT es cercana a los 25 mA, corriente recomendada por el fabricante [21]

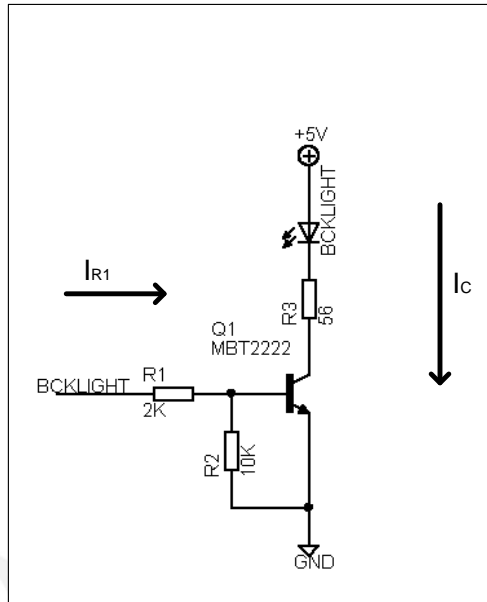


Figura 3.07 Circuito de BackLight.

A continuación se presentan los cálculos realizados en el circuito de polarización del transistor.

Señal BCKLIGHT=3.3 v

$$I_{R1} = (3.3v - 0.7v) / 2 K\Omega = 1.3 \text{ mA}$$

$$I_{BASE} = I_{R1} - I_{R2} = 1.3 - (0.7v / 10K\Omega) = 1.23 \text{ mA}$$

$$I_c = (5v - V_{F_{LED}} - V_{CE}) / 56\Omega = 25 \text{ mA} \quad \rightarrow I_F \text{ LED} = 25 \text{ mA}$$

Donde:  $V_{F_{LED}} = 3.5 \text{ v}$

$$V_{CE-SAT} = 0.1v \text{ (aprox.)}$$

$$h_{FE} = 200 \text{ a } I_c = 25\text{mA}$$

$$\beta_{sat} = 25 / 1.23 = 20.3$$

\* Se asume que el voltaje del puerto de salida del microcontrolador es 3.3

Las figuras 3.08 y 3.09 muestran las curvas características del transistor MMBT2222ALT1

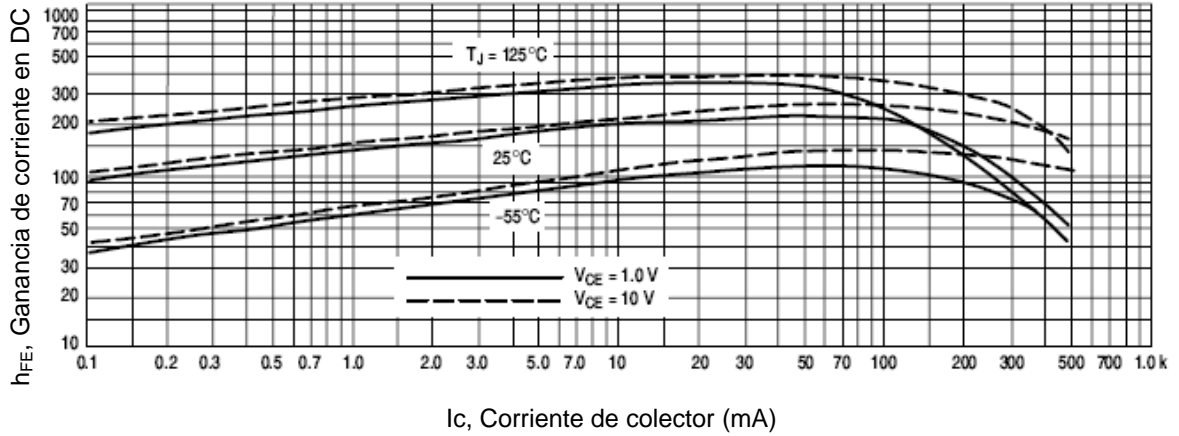


Figura 3.08 Ganancia de Corriente (DC)  
Fuente: Hojas técnicas ON Semiconductor MMBT2222LT1

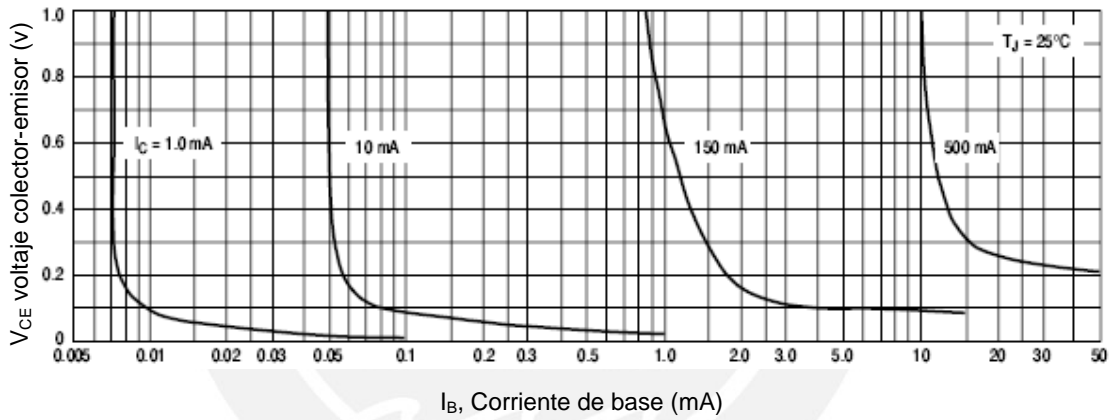


Figura 3.09 Región de Saturación  
Fuente: Hojas técnicas ON Semiconductor MMBT2222LT1

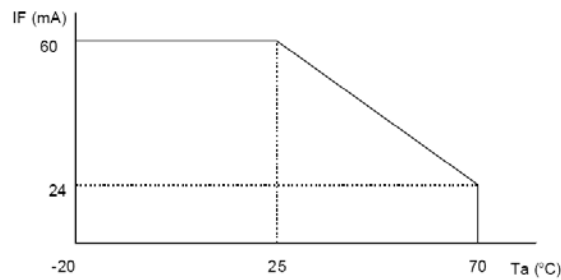


Figura 3.10 Corriente máxima  $I_F$  LED del backlight  
Fuente: Hojas técnicas OPTREX C-51847N



Los tres niveles de brillo se logran modificando el duty cycle de una onda PWM de 500 Hz generada por el microcontrolador y conectada a la señal BCKLIGHT del circuito de retroiluminación de la pantalla. Los tres valores de Duty cycle fueron determinados según la intensidad del brillo deseada por los distintos usuarios, tal como se detalla en la figura 3.11.

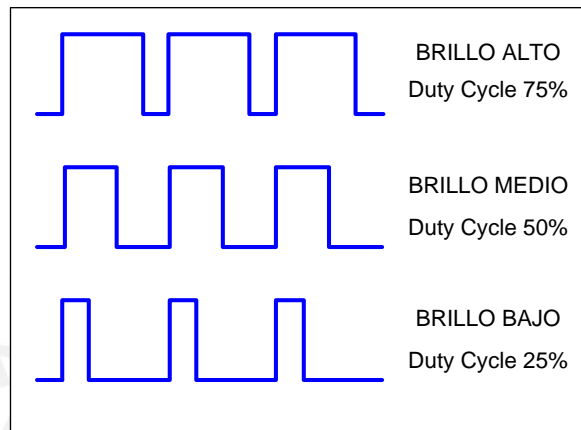


Figura 3.11 Relación entre el Duty Cycle y el brillo de la pantalla.

### 3.8 Circuito de Sensado

El sistema de medición de velocidad de detonación CRONEX utiliza transductores para convertir la luz producida por la detonación a señales digitales. Las señales activan los capturadores de entrada del microcontrolador, capturando de forma inmediata el valor de los temporizadores internos de 32 bits. La figura 3.12 muestra el diagrama de bloques del circuito de sensado.

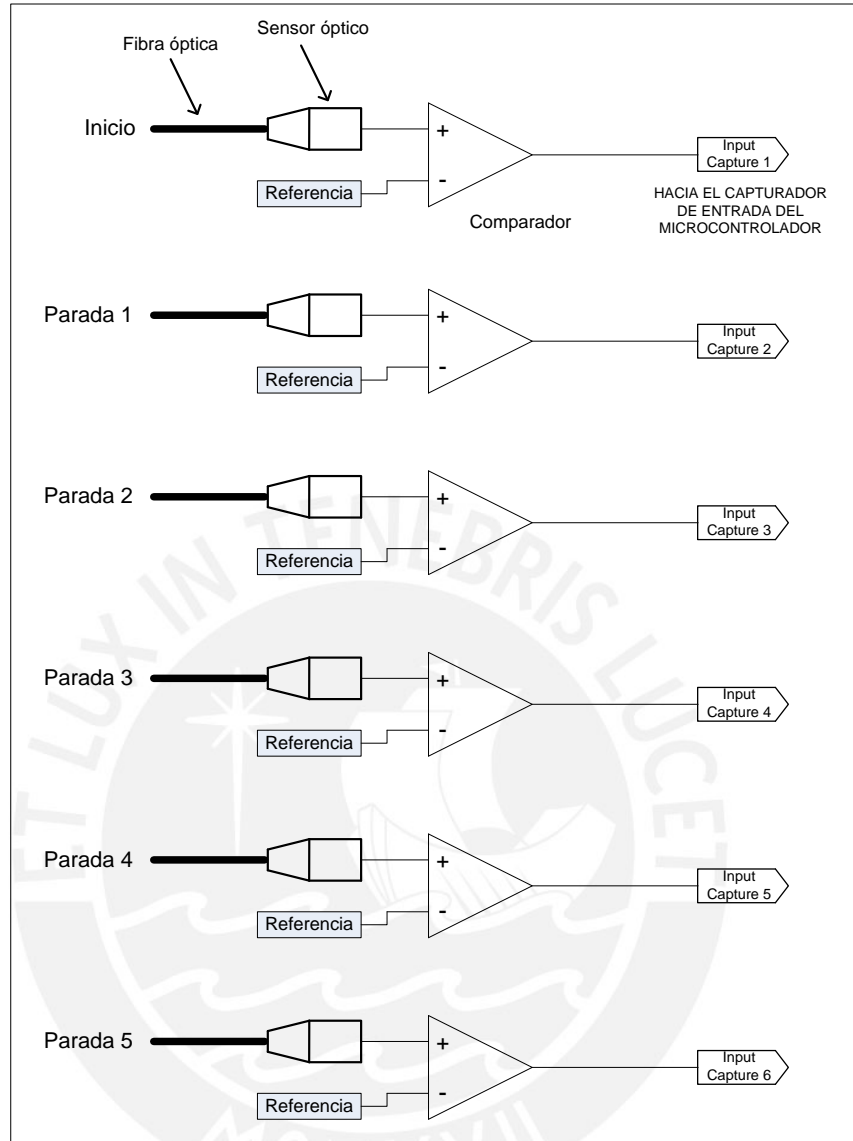


Figura 3.12 Diagrama de bloques del circuito de sensado.

### 3.8.1 Selección del sensor óptico

Para seleccionar el sensor óptico se tuvo como premisa el tiempo de respuesta del sensor, pues mientras menor sea el tiempo de respuesta, menor será la latencia del circuito de sensado. La tabla comparativa 4.06 muestra algunas características de sensores ópticos disponibles en el mercado.

El fotodiodo IF-D91 fue seleccionado para ser usado en este circuito por su bajo tiempo de respuesta y diseño exterior.

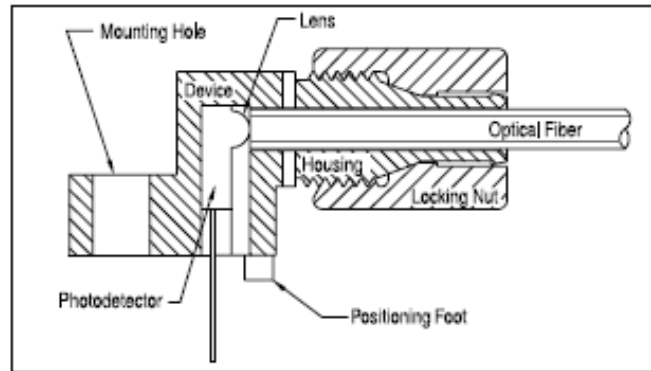
Modelo	Advanced Photonix Inc PDV-P9007	Texas Instruments OPT 101	Industrial Fiberoptics IF-D91
Tipo	Fotorresistencia	Fotodiodo con amplificador	Fotodiodo
Tiempo de subida /bajada	60 ms / 25 ms	28 $\mu$ s / 28 $\mu$ s	5 ns / 5 ns
Respuesta espectral	400 – 700 nm	400 – 1100 nm	400 – 1100 nm
Rangos de temperatura de operación	-30 a 75 °C	0 a 70 °C	-40 a 85 °C
Precio (US \$)	1.77	5.50	4.18

Tabla 3.06 Comparación entre Sensores ópticos.

En la figura 3.13 se muestra el encapsulado del fotodiodo que está especialmente diseñado para colocar una fibra óptica de núcleo de plástico estándar de 1000  $\mu$ m. Esto evita el uso de conectores de fibra y herramientas para su colocación.



a



b

Figura 3.13 a y b fotodiodo IF-D91

\*Fuente: INDUSTRIAL FIBER OPTICS, INC.

En la figura 3.14 se muestra un circuito básico dado por el fabricante, pero como la corriente en reversa del fotodiodo es muy baja (en el orden de unos cuantos microamperios) se optó por mejorar este diseño y tener una señal digital con mayor

inmunidad al ruido. Para lograrlo, se utilizó circuitos integrados comparadores con baja corriente de polarización y alta velocidad de respuesta.

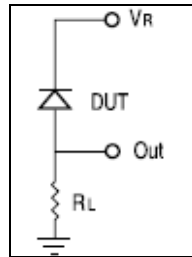


Figura 3.14 Circuito de prueba dado por el fabricante.

### 3.8.2 Selección del comparador

La tabla 3.07 muestra las características principales de dos circuitos integrados comparadores. El modelo de Texas Instruments fue seleccionado para ser usado junto con el fotodiodo en el circuito de sensado.

Modelo	Nacional Semiconductor LM 339	Texas Instruments TLV3501
Comparadores internos	4	1
Salida	Colector Abierto	Push – pull
Corriente de polarización	25 nA	2 pA
Voltaje de offset	2 mv	1 mv
Consumo en modo activo	0.8 mA	3.2 mA
Consumo en modo inactivo	No disponible	2 $\mu$ A
Tiempo de respuesta	1.3 $\mu$ s	4.5 ns
Rangos de Temperatura de Operación	-40 a 125° C	-40 a 125° C
Precio (US \$)	1.07	3.38
Libre de Plomo	Si	si
RoHS compliant	SI	si

Tabla 3.07 Comparadores.

Como se puede apreciar en la tabla 3.07, el comparador TLV3501 ofrece una respuesta mucho más rápida, así como una corriente de polarización mucho menor permitiendo mejorar la sensibilidad ante emisiones de luz de baja intensidad o perdidas en la fibra

óptica por distancias largas. Además, puede entrar a un modo de bajo consumo cuando no esté siendo utilizado aumentando así la autonomía del sistema. La figura 3.15 muestra la respuesta en el tiempo del comparador. Nótese que para un  $\Delta V > 50\text{mV}$  en las señales de entrada, el tiempo de respuesta es menor a 5ns, por lo tanto el diseño del circuito se realizó tomando en cuenta este dato.

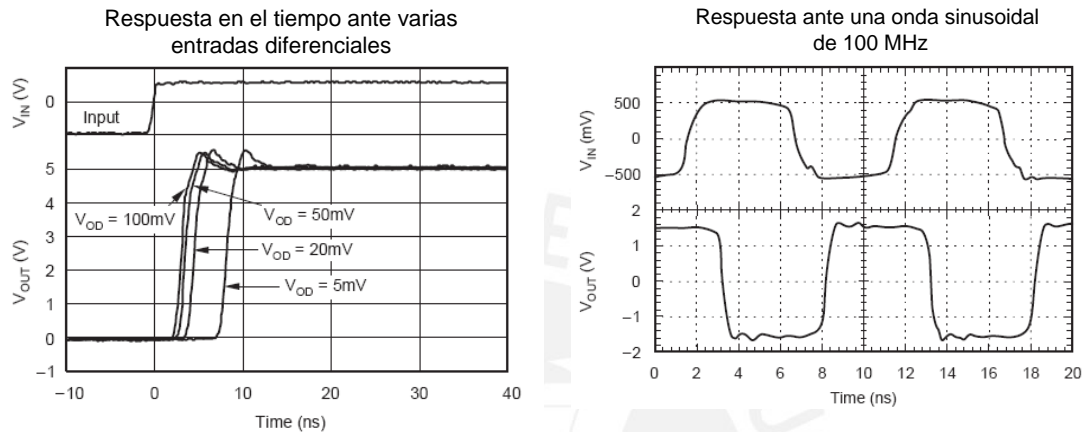


Figura 3.15 Curvas de respuesta en el tiempo del comparador.

Fuente: Hojas Técnicas del comparador Texas Instruments TLV3501

El circuito está conformado por una entrada óptica para el inicio de las mediciones y cinco para las respectivas paradas. La figura 3.16 muestra el circuito de una de las seis entradas ópticas. Se puede deducir que el comparador tiene un voltaje de salida 0v cuando no hay luz que excite al fotodiodo o cuando está en modo de bajo consumo (señal SHDN en alta).

La corriente en reversa en el fotodiodo en completa oscuridad tiene como valor máximo 60nA. En este caso extremo, el voltaje en el nodo 3 es aproximadamente 6 mv mayor que el nodo 2, mientras que en el nodo 1 el voltaje es 24.8 mv mayor al nodo 2.

Entonces se tiene:

$$V_3 = v_2 + 6\text{mv} \quad \text{y} \quad v_1 = v_2 + 24.8\text{mV}$$

Entonces,  $v_1-v_3=18.8\text{mV}$  (diferencia de voltaje en las entradas del comparador) esto supera largamente al voltaje de offset típico de  $1\text{mV}$  y al máximo de  $6\text{mV}$ . Por lo tanto, el voltaje de salida será cero.

Cuando la luz es lo suficientemente alta habrá una corriente en reversa en el diodo que elevará el voltaje en el nodo 3, el  $\Delta V$  es mucho mayor a los  $50\text{mV}$  y el tiempo de respuesta será mínimo. Los condensadores  $C_1$ ,  $C_2$  y  $C_3$  sirven para estabilizar el voltaje diferencial ante posibles fuentes de ruido que pueden alterar el comportamiento del comparador. Por ejemplo, cuando se conecta el CRONEX a la red eléctrica para cargar la batería o a una computadora para descargar datos.

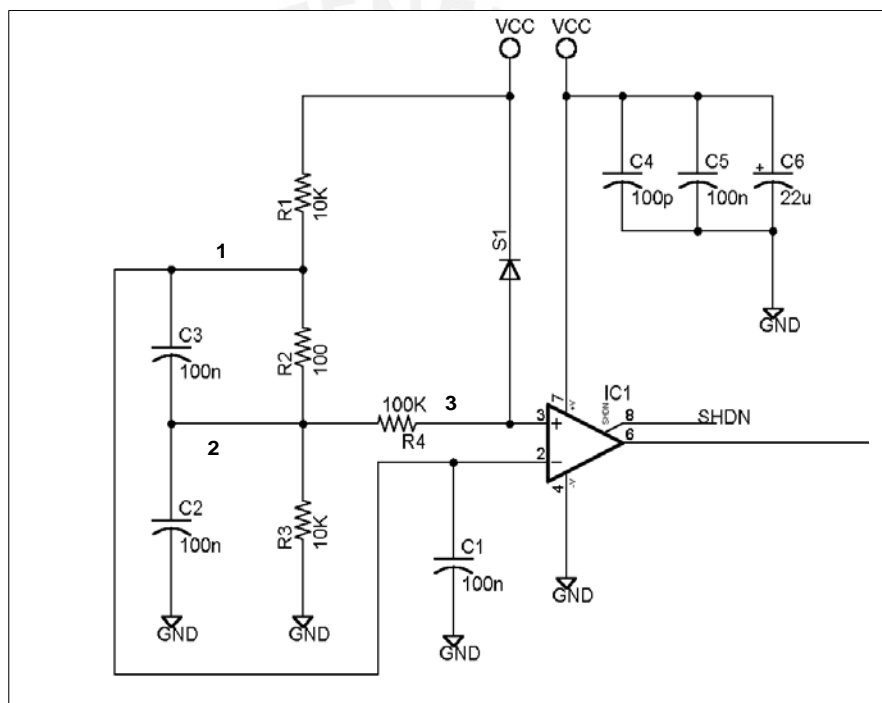


Figura 3.16 Diagrama esquemático de uno de los seis sensores ópticos.

### 3.9 Circuito contador

#### 3.9.1 Descripción del circuito contador

El circuito contador está conformado por un oscilador, un temporizador de 32 bits del microcontrolador y seis capturadores de entrada del mismo. La figura 3.17 muestra el diagrama de bloques.

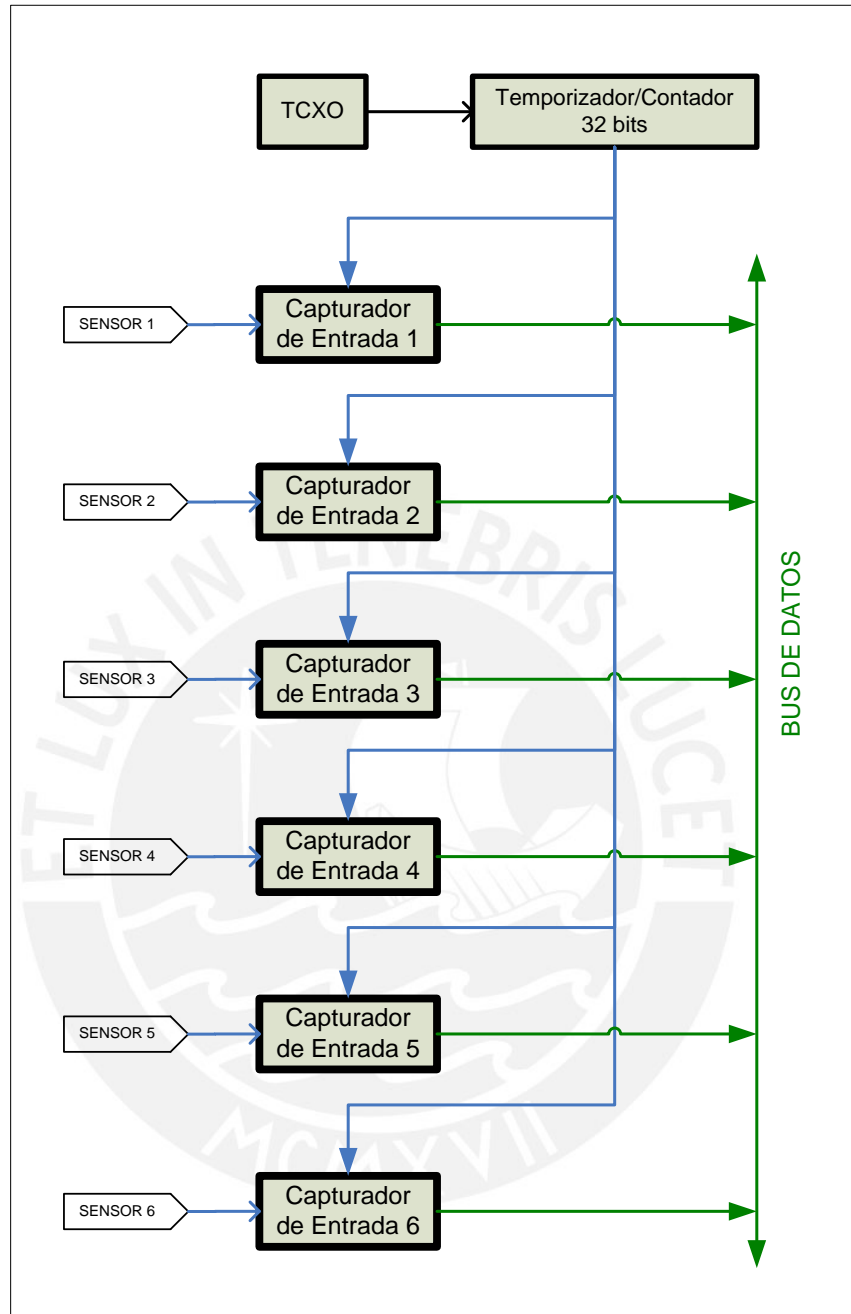


Figura 3.17 Diagrama de Bloques del circuito contador

El temporizador empieza su cuenta al iniciar la medición. Cuando una de las señales activa alguno de los capturadotes de entrada, el valor que posee el temporizador en ese momento es capturado en el registro correspondiente. Por ejemplo, para determinar el tiempo transcurrido entre el inicio y la parada, simplemente se resta el valor registrado en el capturador de entrada 2 menos el capturador de entrada 1.



### 3.9.2 Selección del oscilador

Para realizar el sistema de medición de VOD, se realizó un estudio de diversos tipos de osciladores disponibles en el mercado, desde un simple cristal de cuarzo hasta los osciladores basados en cesio de alta precisión. A medida que incrementa la precisión, también lo hacen la potencia de consumo, el tamaño y el costo.

La figura 3.18 muestra la relación entre precisión y potencia requerida para osciladores simples de cristal de cuarzo (XO), osciladores compensados en temperatura (TCXO), osciladores controlados por horno (OCXO), osciladores de rubidio (Rb) y de cesio (Cs). [21]

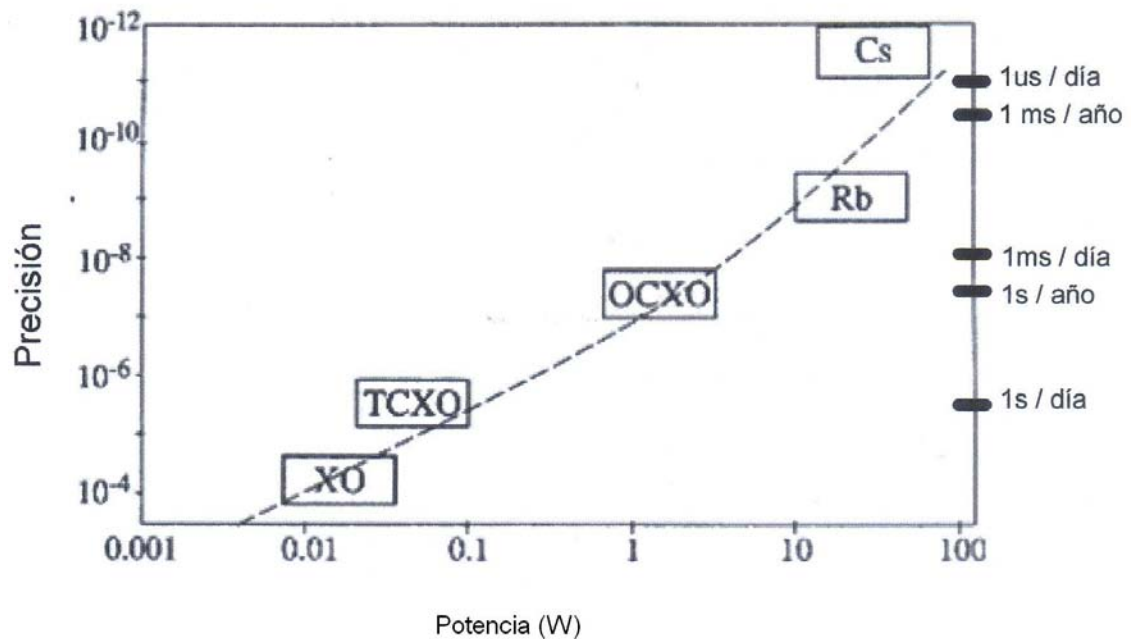


Figura 3.18 Potencia VS Precisión de varios tipos de osciladores.

La figura 3.18 fue realizada por Richard Sydnor, Jet Propulsion Laboratories.

Si bien la precisión del oscilador es importante, el precio es fundamental. Por lo tanto, se eligió un oscilador compensado en temperatura (TCXO) pues cumple con los requerimientos de bajo consumo, precio asequible y buena precisión en un amplio rango de temperatura. [23]

La tabla 3.08 muestra una comparación de características y valores promedio entre los diversos tipos de osciladores disponibles en el mercado.

	Osciladores de cuarzo		Osciladores Atómicos	
	TCXO	OCXO	rubidio	cesio
Precisión promedio (En un año)	$2 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-8}$	$5 \times 10^{-10}$	$2 \times 10^{-11}$
Envejecimiento Por año (partes por millon)	1	0.05	$2 \times 10^{-4}$	0
Temperatura de operación	-55 a +85	-55 a +85	-55 a +68	-28 a +65
Estabilidad ante cambios de temperatura	2.5 ppm	$1 \times 10^{-3}$	$3 \times 10^{-4}$	$2 \times 10^{-5}$
Potencia mW	0.05	0.6~2	20	30
Precio aproximado en U.S. \$	\$ 20	400	2 000	10 000

Tabla 3.08 Comparación entre diversas tecnologías de osciladores.

Fuente: IEEE Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control Society

El oscilador VC-TCXO FOX914 está basado en un cristal de cuarzo con compensación de temperatura, fabricado por la compañía FOX Electronics. Tiene muy buena estabilidad de frecuencia en un rango amplio de temperatura: 2.5 partes por millón desde  $-30^{\circ}\text{C}$  hasta  $+75^{\circ}\text{C}$ . La desviación en frecuencia producida por envejecimiento es de solo  $\pm 1$  parte por millón y el precio en el mercado es menor a los \$20.

### 3.10 Administración de Energía

#### 3.10.1 Descripción del sub-sistema de energía del Cronex:

El sistema CRONEX, debido a su complejidad, debe poseer un sistema de energía que provea el voltaje apropiado a los diferentes dispositivos que lo componen. Los distintos requerimientos de energía se detallan en la tabla 3.09.

Dispositivo	Voltaje de operación	Corriente máxima de consumo	Funcionamiento
Pantalla LCD con Backlight	5v	25mA	Solo en modo activo
Microcontrolador y periféricos	3.3v	100mA	Modo activo y modo de bajo consumo
Sensores ópticos	5v	30mA	Solo durante medición
Oscilador TCXO	3v	2mA	Solo durante medición

Tabla 3.09 Consumo de corriente de los distintos dispositivos.

### 3.10.2 Selección del regulador de voltaje:

A continuación se explica los criterios usados para uno de los regulares requeridos. Este mismo criterio se aplicó al elegir los otros dispositivos.

Para seleccionar el regulador de 5 voltios que alimenta a la pantalla LCD, se tuvo como objetivo un regulador económico de muy bajo consumo de corriente y con capacidad de entregar 5V usando solo 4 baterías de 1.5v. En la tabla comparativa 3.10 se muestran tres reguladores. El primero es el 7805, regulador que goza de gran popularidad pero que no cumple con los objetivos iniciales y los otros dos son reguladores lineales de bajo consumo, ligeramente más caros pero que cumplen con los requerimientos del proyecto.

Modelo	ST Microelectronics L7805	Microchip MCP1700	Texas Instrumets TPS76350
Corriente de fuga Típica	4.3 mA	1.6 $\mu$ A	85 $\mu$ A
Voltaje de caída Típico	2 V	0.18 v	0.3 v
Corriente se salida máxima	1A	250mA	150 mA
Habilitacion externa	NO	NO	SI
Rangos de temperatura de operación	-40 a 125 °C	-40 a 125 °C	-40 a 125 °C
Precio (US \$)	0.40	1.10	1.50
Libre de Plomo	Si	Si	Si
<b>RoHS</b> compliant	Si	Si	Si

Tabla 3.10 Comparación entre reguladores de voltaje.

Si bien el MCP1700 de la compañía microchip es el que mejor cumple con los objetivos mencionados, se eligió el TPS76350 de Texas Instruments pues posee una entrada para la habilitación del regulador. Cuando el regulador está deshabilitado, los dispositivos que no están siendo usados se apagan y la corriente de fuga del regulador se reduce a  $2\mu\text{A}$ , esta función aumenta la autonomía del equipo. Este nuevo esquema de administración de energía se muestra en el diagrama de bloques de la figura 3.19.

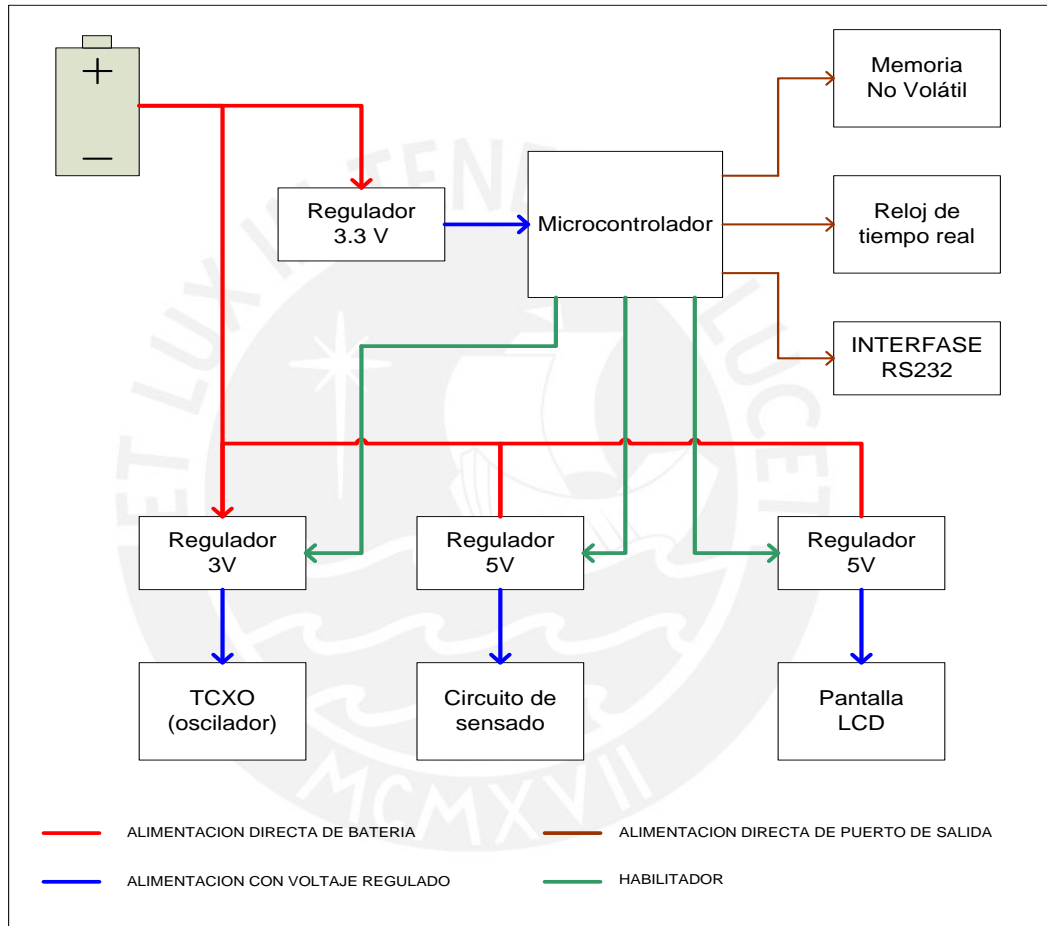


Figura 3.19 Sistema de alimentación de energía.

### 3.10.3 Selección de batería:

Para la selección del tipo de batería recargable usada en el sistema de medición del VOD, se tomó en cuenta factores como la capacidad, densidad de energía, estabilidad de voltaje, tiempo de recarga, entre otros.

La capacidad en amperios-hora de una batería es la característica más importante a tomar en cuenta, se define como la cantidad de corriente que una batería puede entregar por 1 hora antes que el voltaje de la batería alcance su punto de fin de descarga.

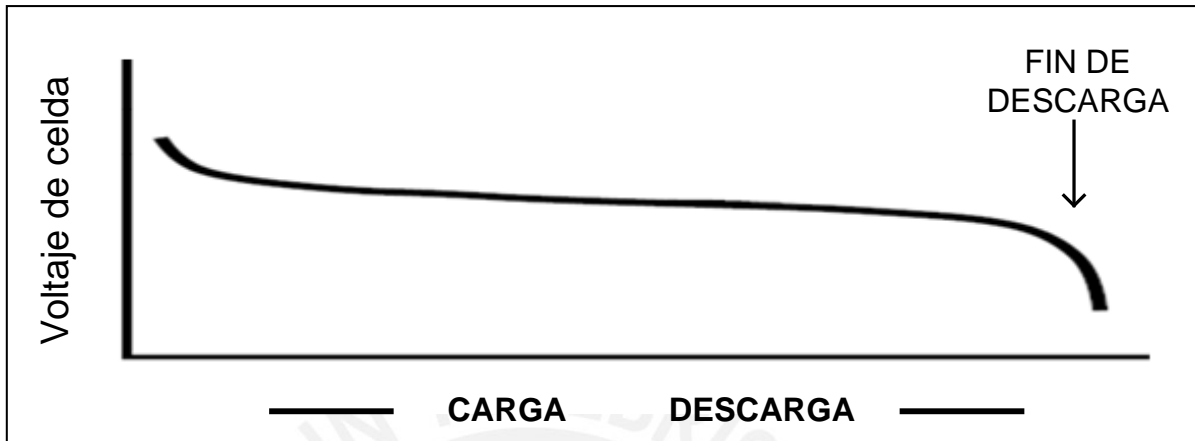


Figura 3.20 curva de carga/descarga de una batería ideal.

Fuente: National Semiconductors

La densidad de energía de una batería se expresa en dos formas: densidad de energía gravimétrica y densidad de energía volumétrica [24].

La densidad de energía gravimétrica de una batería es una forma de medir la cantidad de energía que contiene una batería en comparación con su peso y típicamente es expresada en Watts-horas por kilogramo (W-hr/Kg).

La densidad de energía volumétrica de una batería es una medida de la cantidad energía que contiene una batería en comparación con su volumen y es expresada en Watts-horas por litro (W-hr/l).

La tabla 3.11 muestra una comparación de densidad de energía de los distintos tipos de baterías recargables disponibles en el mercado. Como se puede apreciar, las baterías de Li-ion (iones de litio) tienen una densidad gravimétrica muy superior a las demás, esto significa que productos energizados con baterías Li-ion pueden ser mucho más livianos. En contraposición, las baterías de ácido plomo deberán ser más pesadas y ocupar un volumen mucho mayor para proporcionar la misma cantidad de energía. Por lo tanto, las baterías de ácido plomo fueron descartadas como fuente de energía.

Tipo	NI-MH	Ni-CD	Li - Ion	Acido Plomo
Densidad Gravimetrica (W-hr/Kg)	80	50	170	30
Densidad Volumetrica (W-hr/l)	260	140	370	60
Rango de temperaturas	-20 a 60°C	-20 a 60°C	-20 a 60°C	-20 a 60°C

Tabla 3.11 Comparación de la densidad de energía de distintas baterías.

Fuente: Hitachi-Maxwell industrial batteries.

### 3.10.2.1 Estabilidad de voltaje

La estabilidad de voltaje es una característica que fue usada en la determinación de las baterías adecuadas para el sistema CRONEX. La batería ideal debe tener la curva de descarga sumamente plana, tal como lo muestra la figura 3.20. Las baterías de níquel cadmio (Ni-Cd) y las de níquel e hidruro metálico (Ni-MH) tienen un voltaje nominal de 1.2v por celda y sus curvas de descarga son muy similares, tal como se puede observar en la figura 3.21. En esta figura se puede apreciar que la curva de descarga de las baterías Ni-CD y NI-MH son extremadamente planas, mientras que cada celda de Li-Ion (que tiene un voltaje nominal de 3.7v) tiene una pendiente muy pronunciada, lo cual la pone en desventaja frente a las Ni-CD o NI-MH.

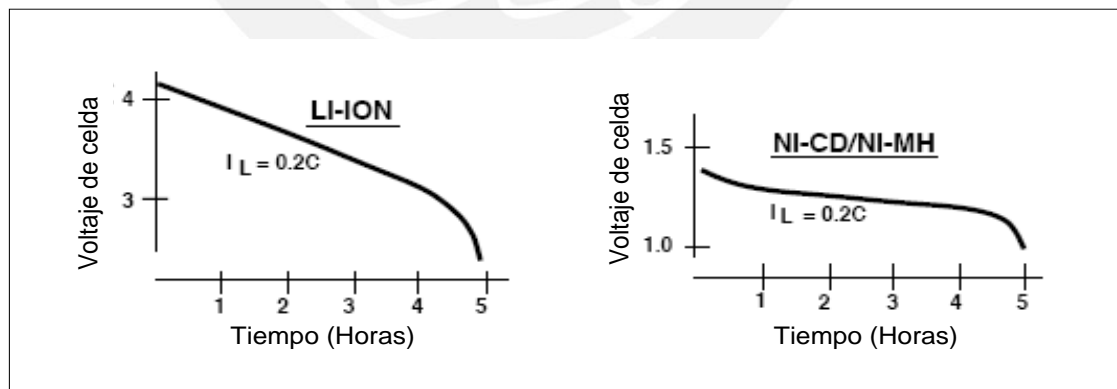


Figura 3.21 Curva de descarga de baterías recargables a una corriente de descarga.

$I_L = 20\%$  de la capacidad de la batería

Fuente: National Semiconductors



### 3.10.2.2 Auto descarga:

La auto descarga ocurre en todas la baterías y determina el tiempo de almacenamiento de las mismas. La tabla 3.12 muestra las tasas de auto descarga por mes de tres baterías recargables. Nótese que las baterías Li-Ion presentan la menor tasa de auto descarga, aumentando la autonomía del equipo cuando este es guardado por varias semanas. Es importante agregar que la auto descarga es altamente dependiente de la temperatura, incrementándose a medida que aumenta la temperatura de la batería.

Tipo	NI-MH	Ni-CD	Li-Ion
Auto descarga en un mes a 20°C (%)	20-30	15-20	5-10

Tabla 3.12 Tasa de auto descarga de baterías recargables.

### 3.10.2.3 Tiempos de recarga

El proceso de recarga de baterías se clasifica en carga lenta y carga rápida. La carga lenta está definida por una corriente de carga que puede ser aplicada con completa seguridad a una batería, indefinidamente y sin ninguna clase de monitoreo o método de fin de carga (modo trickle).

Una batería tipo Ni-CD puede tolerar corrientes de carga lenta de hasta 10% de su capacidad, mientras que una batería de NI-MH puede tolerar corrientes de carga lenta de hasta 2.5% de su capacidad. En contraste, las baterías de Li-Ion no toleran ningún método de carga lenta o de mantenimiento luego de que hayan sido completamente cargadas. Si una corriente es continuamente aplicada a una batería de Li-Ion (por más pequeña sea la corriente) se dañará. Por esta razón, las baterías de Li-Ion son cargadas usando cargadores de voltaje constante y no cargadores de corriente constante como las baterías Ni-CD/NI-MH.

La carga rápida esta definida como una recarga completa de una hora aproximadamente y requiere circuitos de carga más complejos.

Un cargador rápido de baterías Ni-CD/NI-MH típicamente provee corriente constante hasta que la batería esté cargada y luego pasa a un modo de carga lenta o de mantenimiento (modo trickle). Esto se logra monitoreando parámetros como el voltaje y la



temperatura de las celdas. Adicionalmente, muchos cargadores tienen temporizadores que luego de un tiempo apropiado terminan la carga rápida y pasan al modo de carga de lenta.

Las celdas de Li-Ion tienen un mínimo de tiempo de recarga de una hora (incluso dos horas) y no están diseñadas para soportar sobrecargas. Por lo tanto, los cargadores de voltaje constante diseñados para este tipo de batería usualmente terminan el proceso de carga cuando la corriente cae por debajo del 3% de la corriente nominal.

Cabe mencionar que las baterías del tipo Li-Ion almacenan una gran cantidad de energía en un pequeño espacio y poseen una resistencia interna muy alta, al combinar estos factores se tiene un producto potencialmente peligroso. Si una batería es cortocircuitada accidentalmente por unos pocos segundos, esta puede elevar rápidamente su temperatura, sobrepasar los 150°C (donde la mayoría de celdas de Li-Ion se vuelven inestables), incendiarse y posiblemente explotar.

La figura 3.22 muestra una laptop Sony Vaio destruida por una batería de Li-Ion que explotó debido a defectos en su fabricación. De acuerdo a Sony Corporation, la contaminación con partículas de Cu, Al, Fe y Ni durante el proceso de manufactura puede causar un cortocircuito interno. Si bien los procesos actuales de manufactura y empaquetado de baterías de Li-Ion las han hecho mucho más seguras, este antecedente y otros más descartan la posibilidad de usar estas baterías en un sistema de medición de explosivos.



figura 3.22 Laptop Sony destruida por una Batería de Li-Ion.

Fuente: Isidor Buchmann, Batteryuniversity

### 3.10.2.4 Costo

En la tabla 3.13 se muestran los precios de baterías de Ni-CD y NI-MH.

Tipo	Ni-CD	NI-MH
Fabricante	Panasonic	Panasonic
Tamaño	AA	AA
Capacidad	1000mAh	2000mAh
Precio	2.21	3.33

Tabla 3.13 Costo de baterías.

Como se puede apreciar, la opción de usar baterías de Ni-CD más baratas fue descartada debido a que estas tienen menor densidad de energía, sufren del llamado efecto memoria y poseen un alto contenido de cadmio (un metal pesado que causa gran contaminación cuando son incineradas o enterradas).

Las baterías de Li-on poseen la mayor densidad de energía pero fueron descartadas por ser más costosas, peligrosas y requerir un circuito de carga/descarga mucho más complejo.

Las baterías de NI-MH fueron seleccionadas porque presentan las mejores características de costo, densidad de energía, seguridad y cuidado al medio ambiente. También tienen la curva de descarga bastante plana, permitiendo el uso de reguladores lineales de voltaje de bajo consumo.

### 3.11 Funcionamiento del programa

En esta sección se explica el funcionamiento del programa principal del sistema de medición de tiempo y velocidad de detonación. La figura 3.24 muestra el diagrama de flujo del programa principal (hecho en lenguaje C) del sistema de medición de velocidad de detonación. El código fuente puede verse en el ANEXO A.

### 3.11.1 Programa Principal

Al encender el sistema de medición de velocidad de detonación CRONEX, usted podrá visualizar un mensaje de bienvenida, la hora y fecha actual, el estado de la batería y un mensaje invitando a presionar la tecla MENU.



Figura 3.23 Pantalla Principal del CRONEX.

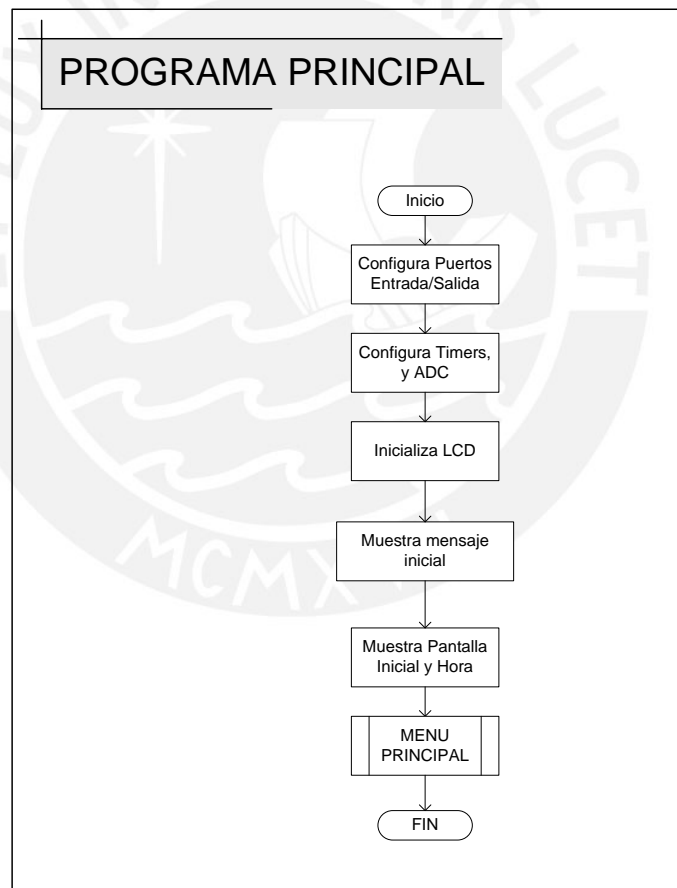




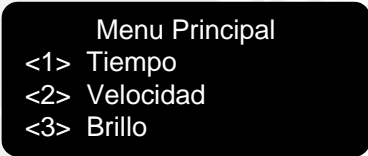
Figura 3.24 Diagrama de Flujo Programa Principal.

Al presionar la tecla MENU , el sistema CRONEX mostrará un amigable menú en español que le permitirá realizar las siguientes funciones:

- Medición de Tiempo de detonación
- Medición de Velocidad de detonación
- Configuraciones de Brillo de Pantalla
- Comunicación con la PC

Para salir del menú principal, el usuario debe presionar la tecla ESCAPE .

En la figura 3.26 se muestra una imagen del menú principal y en la 3.27 el diagrama de flujo del menú principal.



Menu Principal  
<1> Tiempo  
<2> Velocidad  
<3> Brillo

Figura 3.26 Menú Principal.

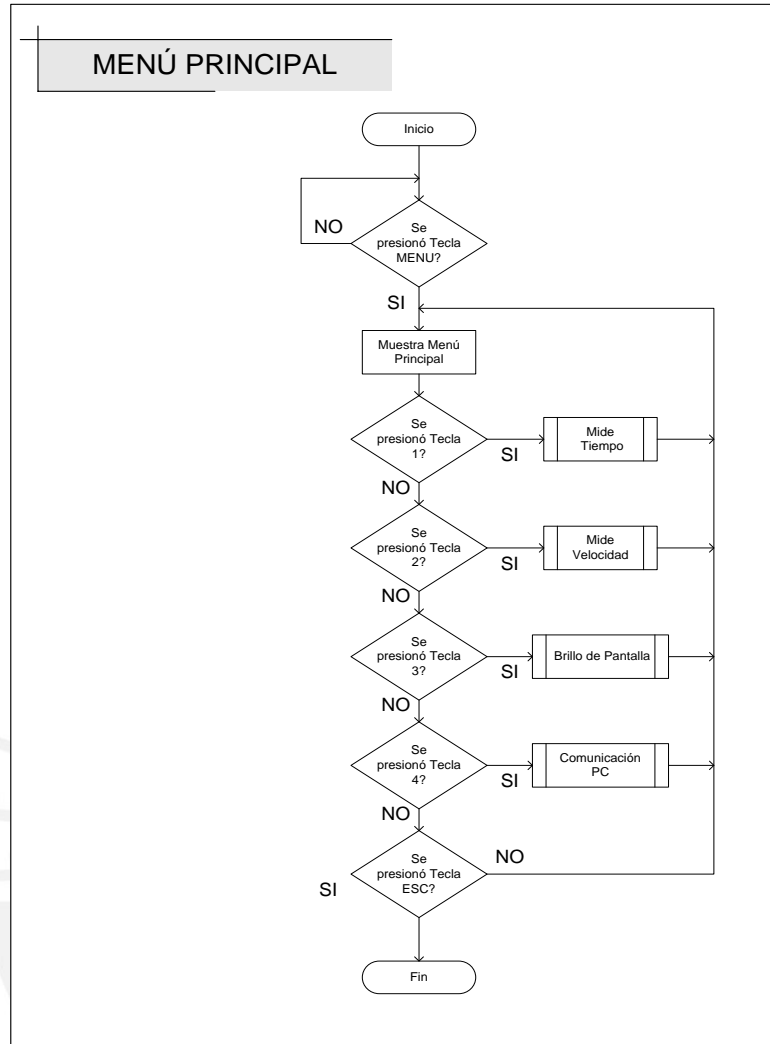


Figura 3.27 Diagrama de flujo de la función MENU PRINCIPAL

### 3.11.2 Medición de Tiempo

Este modo está diseñado para realizar pruebas de medición de tiempo en serie o en paralelo. Al elegir la opción 1, el usuario podrá realizar hasta cinco pruebas de medición de tiempo en serie (por ejemplo con Fulminante No eléctrico). La opción 2 Permite realizar mediciones de tiempo en paralelo (por ejemplo con fulminante NO eléctrico DUAL o detonadores electrónicos). La figura 3.28 muestra el diagrama de flujo de la función MENU\_TIEMPO que realiza esta tarea.

Menu Tiempo  
<1> Tiempo Serie  
<2> Tiempo Paralelo

Figura 3.28 Menú Tiempo.

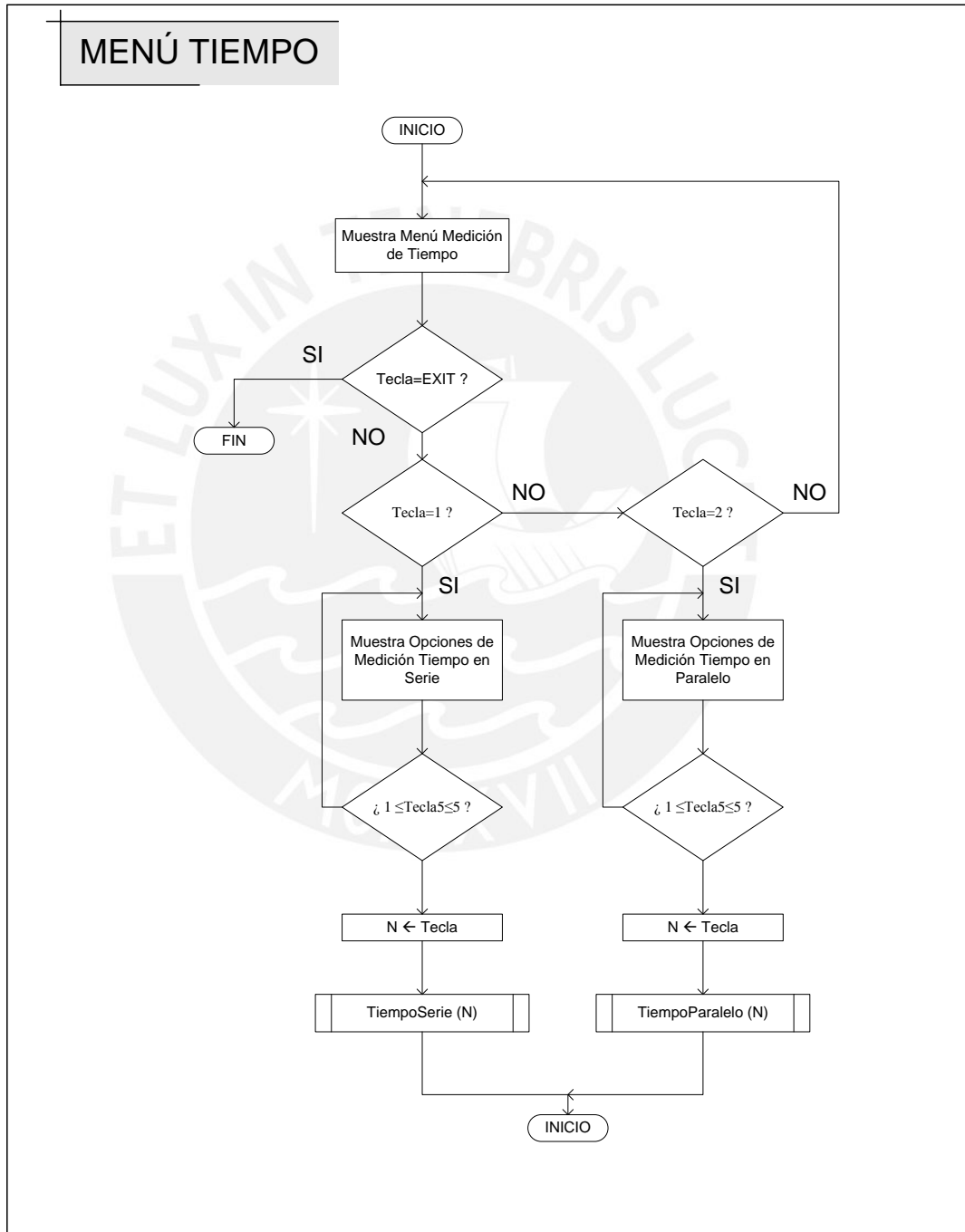
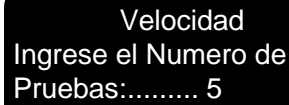


Figura 3.29 Diagrama de Flujo de MENÚ TIEMPO.

### 3.11.3 Medición de Velocidad



Este modo está diseñado para realizar pruebas de medición de velocidad de detonación. Con en el sistema CRONEX el usuario podrá realizar hasta cinco pruebas de medición de velocidad de detonación.

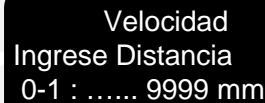
Como primer paso, se debe indicar al sistema cuantas mediciones se van a realizar.



Velocidad  
Ingrese el Numero de  
Pruebas:..... 5

Figura 3.30 Ingreso de Pruebas de Velocidad.

La tecla  sirve para corregir cualquier número incorrecto, y la tecla  para ingresar el número al sistema. Luego de esto, el sistema pedirá las distancias correspondientes a cada una de las pruebas. El sistema CRONEX permite ingresar distancias desde 1mm hasta 9999 mm.



Velocidad  
Ingrese Distancia  
0-1 : ..... 9999 mm

Figura 3.31 Ingreso de distancias.

Luego de ingresar las distancias y de concluir las pruebas, el sistema realizará la siguiente formula para el cálculo de la velocidad de detonación:

$$V = \text{Distancia (en mm)} / \text{Tiempo medido (en ms)}$$

El diagrama de Flujo de la Función encargada de la medición de la velocidad se muestra en la figura 3.33.



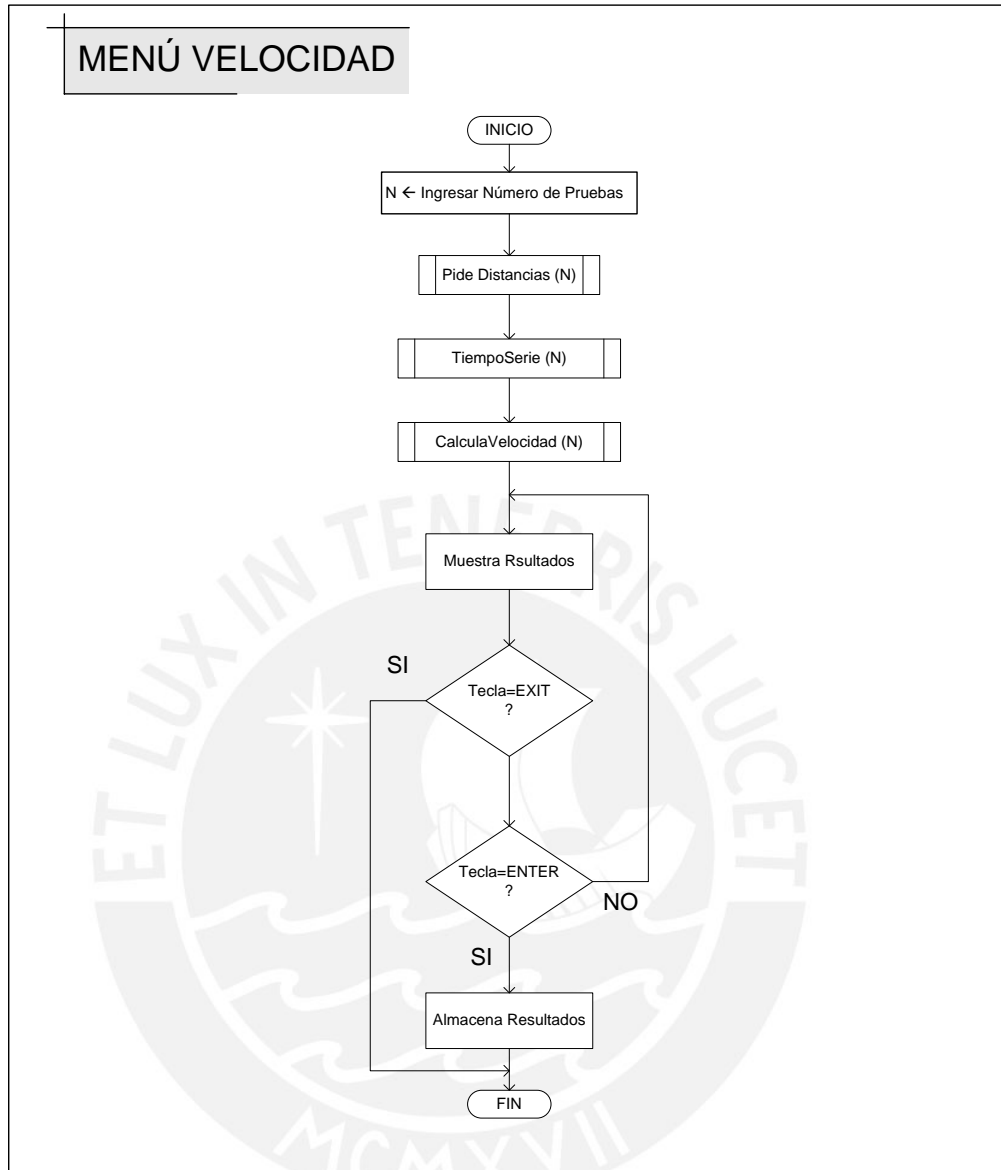


Figura 3.32 Diagrama de flujo de la Función MENU VELOCIDAD.

### 3.11.4 Configuración del Brillo de Pantalla.

Para modificar los parámetros que determinan el brillo de la pantalla, se hace uso de la función CAMBIARBRILLO. La figura 3.34 muestra el diagrama de flujo de esta subrutina.

**Configuraciones**  
 <1> Brillo Bajo  
 <2> Brillo Medio  
 <3> Brillo Alto

Figura 3.33 Menú mostrado en pantalla de la configuraciones de brillo.

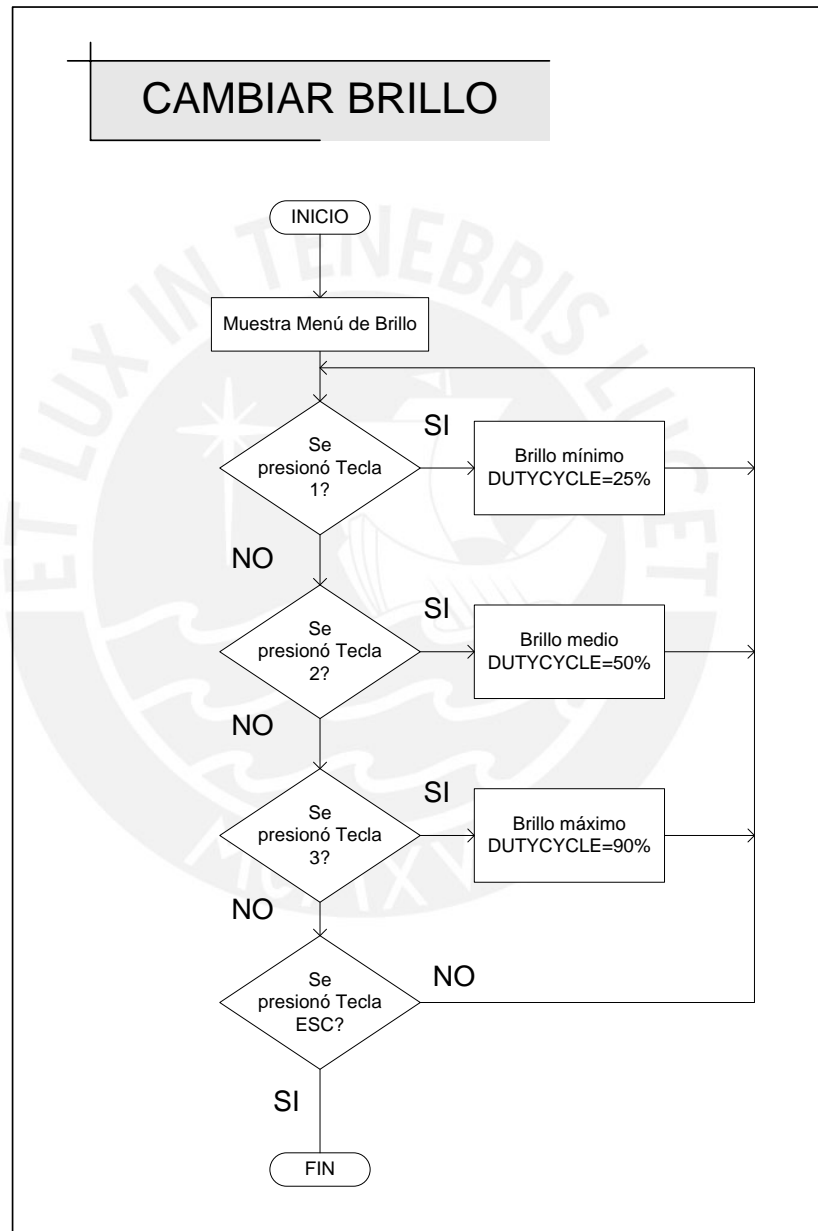


Figura 3.34 Diagrama de flujo de la función cambiar brillo.

### 3.11.5 Comunicación con la PC

En esta opción el equipo esperará la comunicación con la computadora. La descarga de datos se realizará en forma automática y el equipo indicará cuando dicha descarga haya concluido.

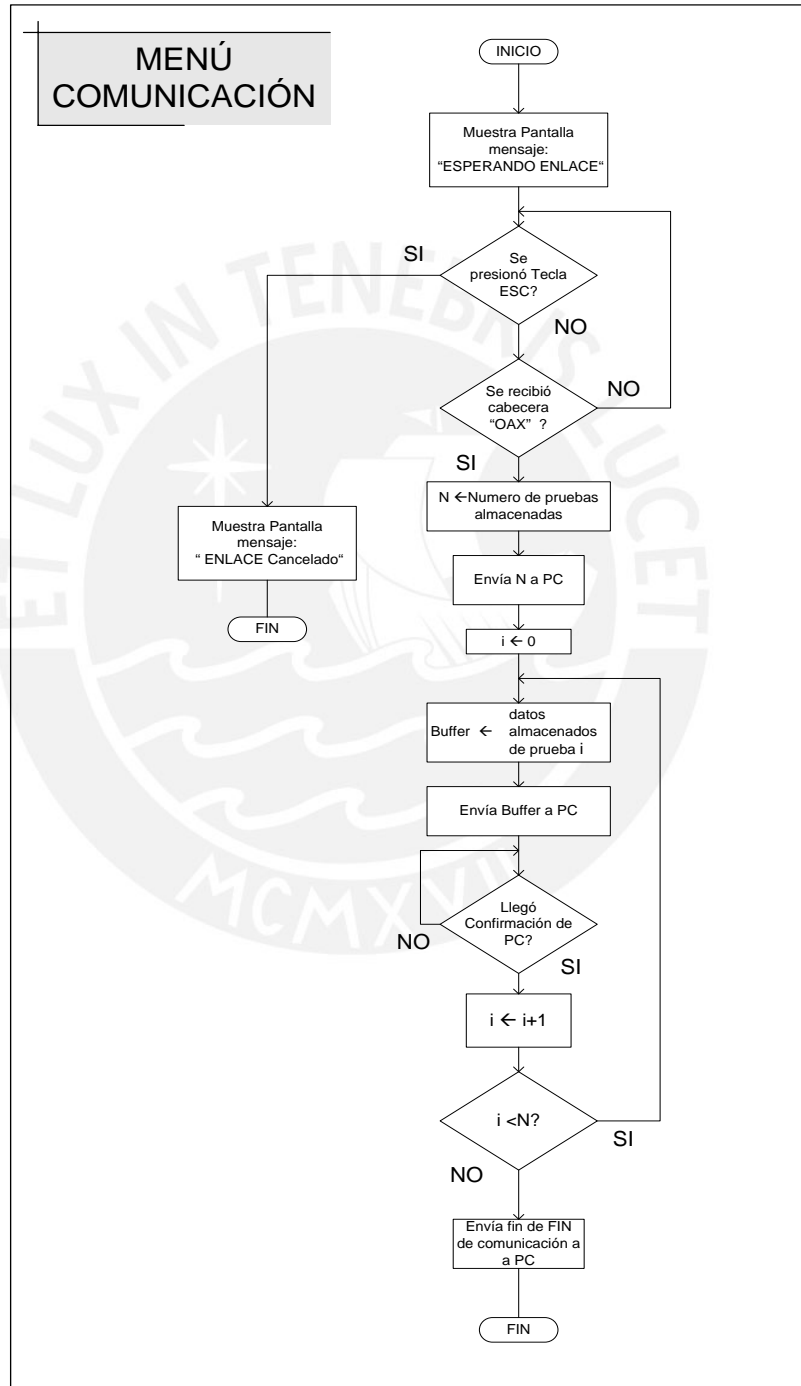


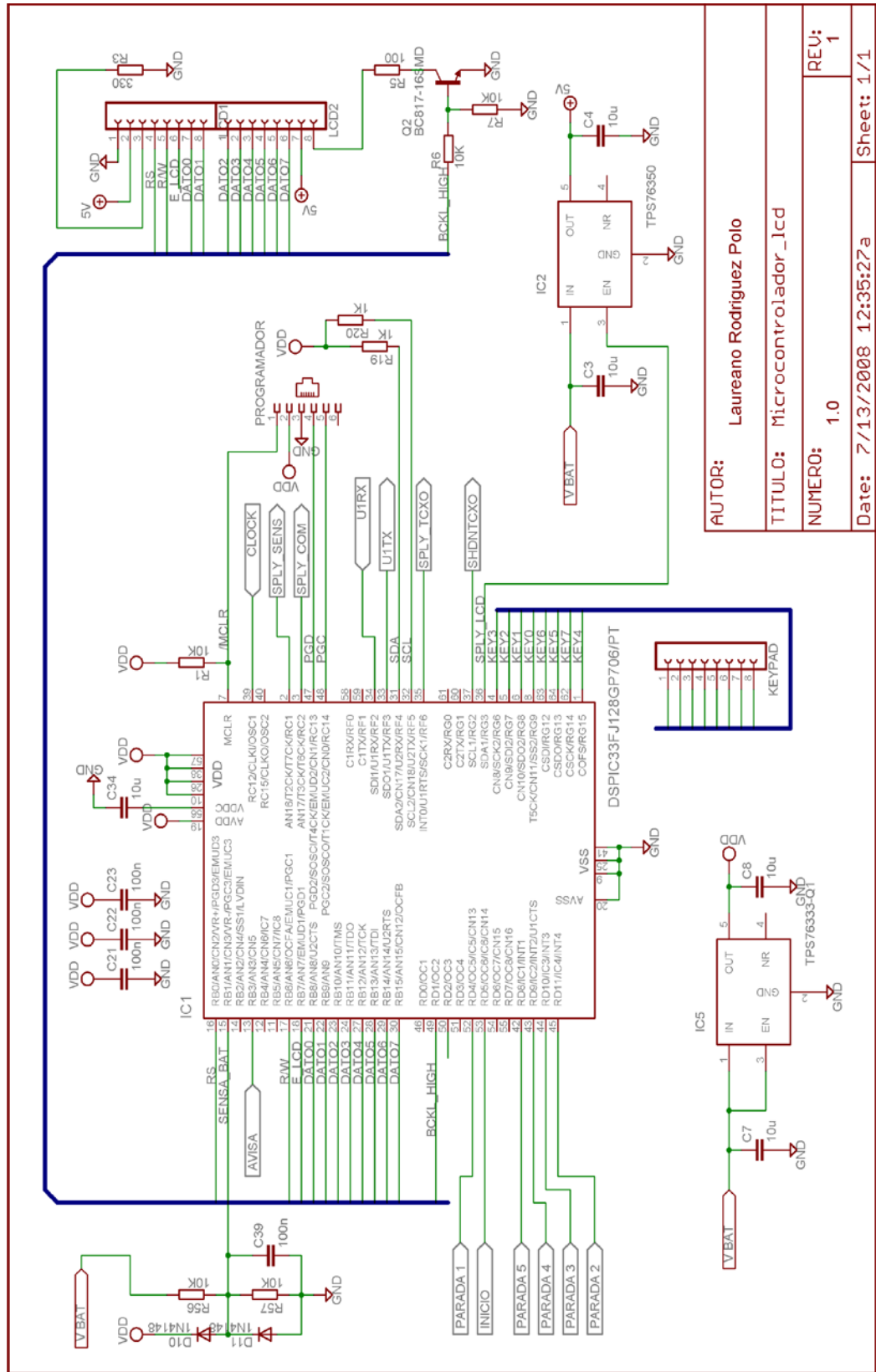
Figura 3.35 Diagrama de flujo de la función menú comunicación.



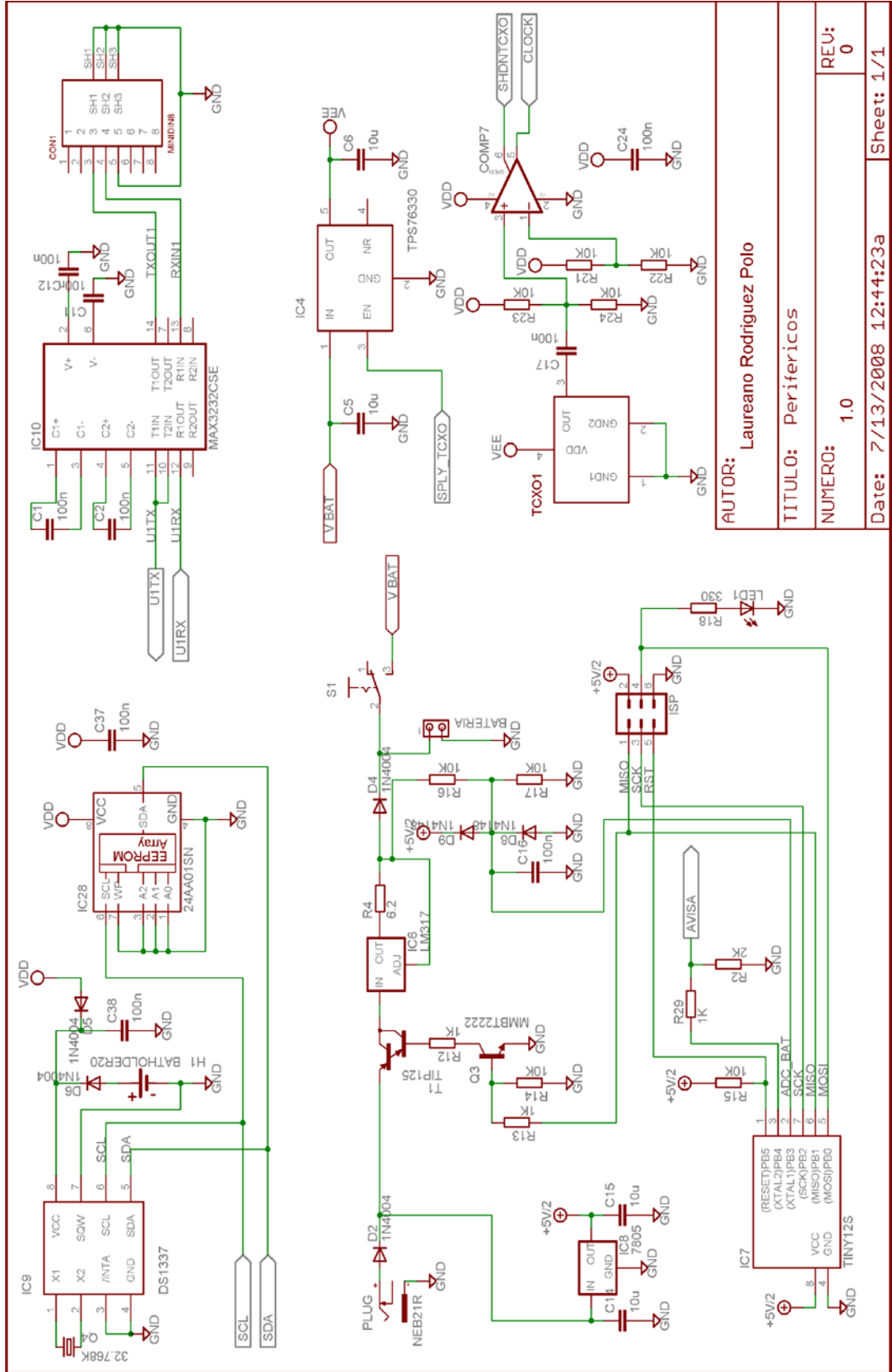
Figura 3.36 Sistema CRONEX para medición de tiempo y velocidad de detonación.

### **3.12 Diagramas Esquemáticos y de Pistas.**

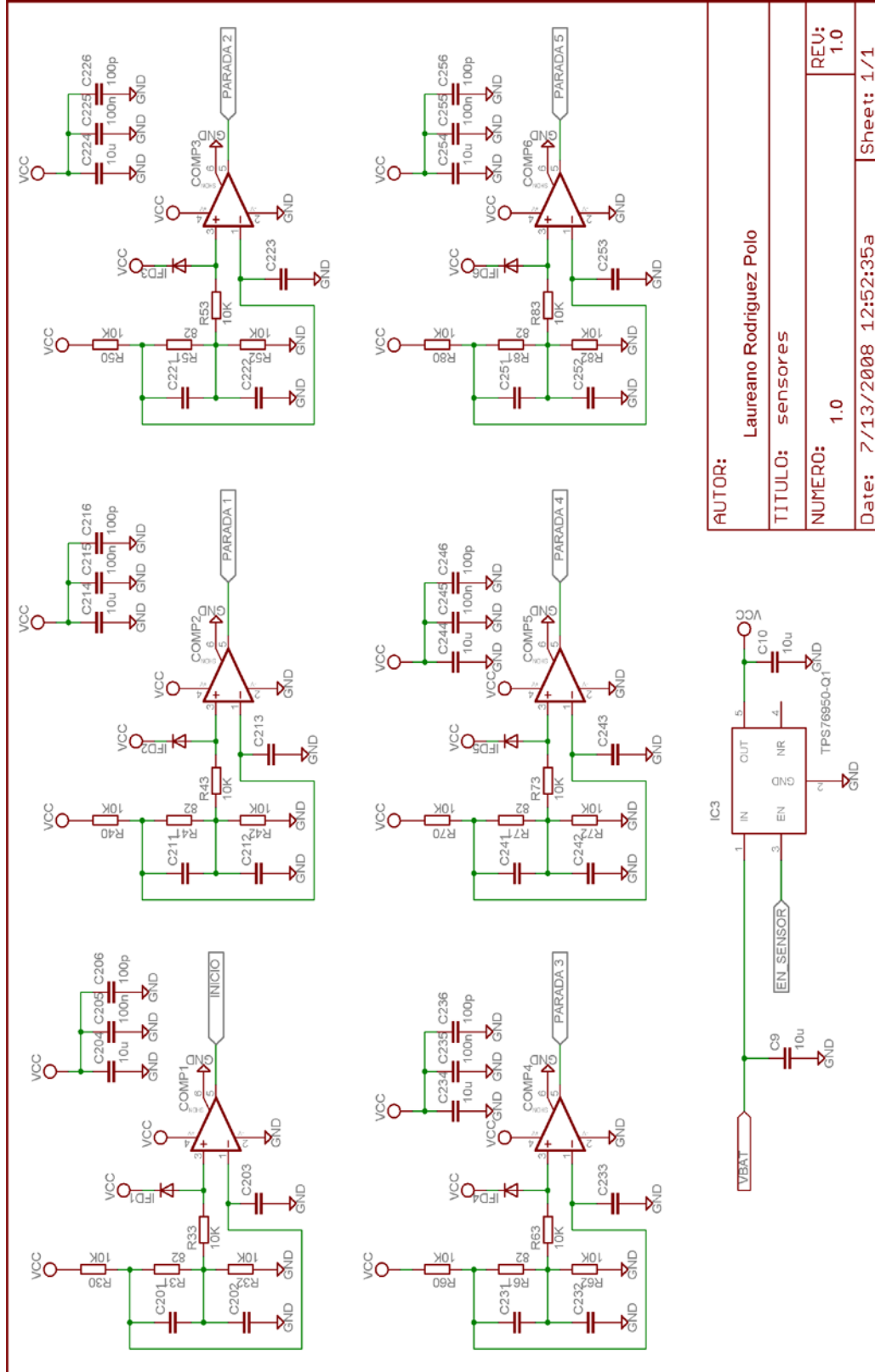
A continuación se muestran los diagramas esquemáticos del CRONEX, los diagramas de pistas (cara inferior y superior) y también la máscara de distribución de componentes.



AUTOR:	Laureano Rodriguez Polo
TITULO:	Microcontrolador_lcd
NUMERO:	1.0
Date:	7/13/2008 12:35:27a
Sheet:	1 / 1



AUTOR:	Laureano Rodriguez Polo
TITULO:	Perifericos
NUMERO:	1.0
REU:	0
Date:	7/13/2008 12:44:23a
Sheet:	1/1



AUTOR:		Laureano Rodriguez Polo	
TITULO:		sensores	
NUMERO:		1.0	
Date:		7/13/2008 12:52:35a	
REU:		1.0	
Sheet:		1/1	

Figura 3.37 a,b y c Diagramas esquemáticos.



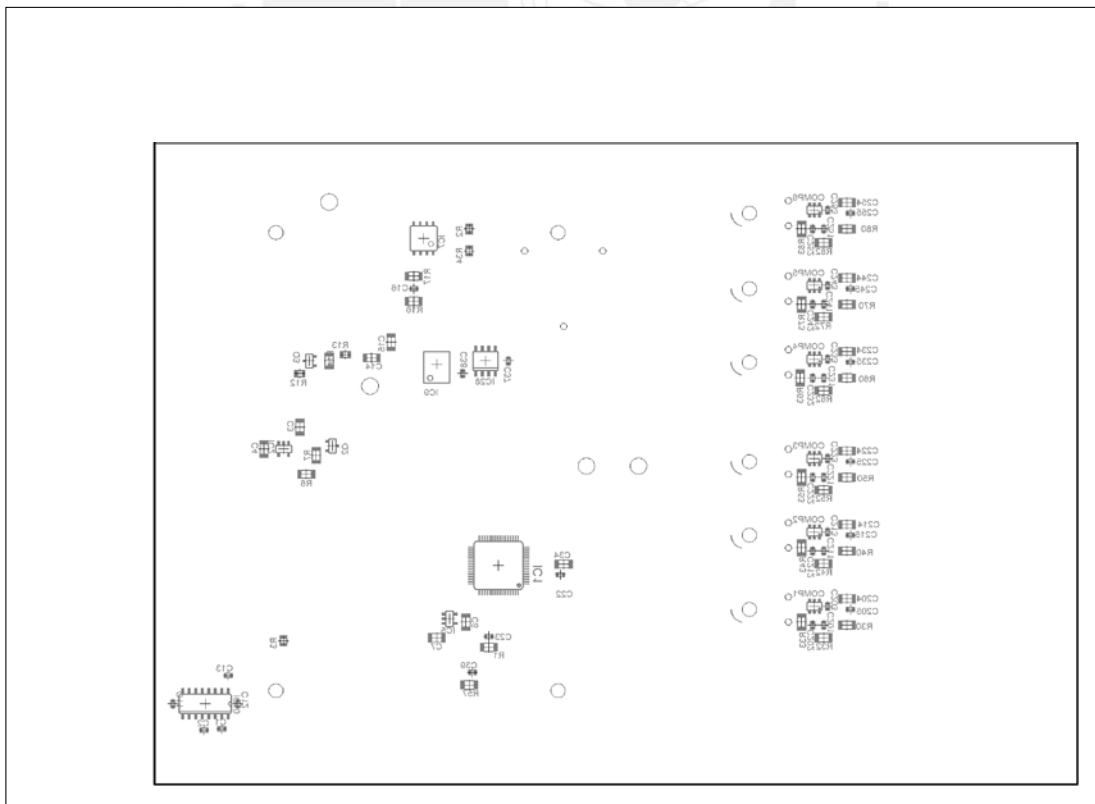
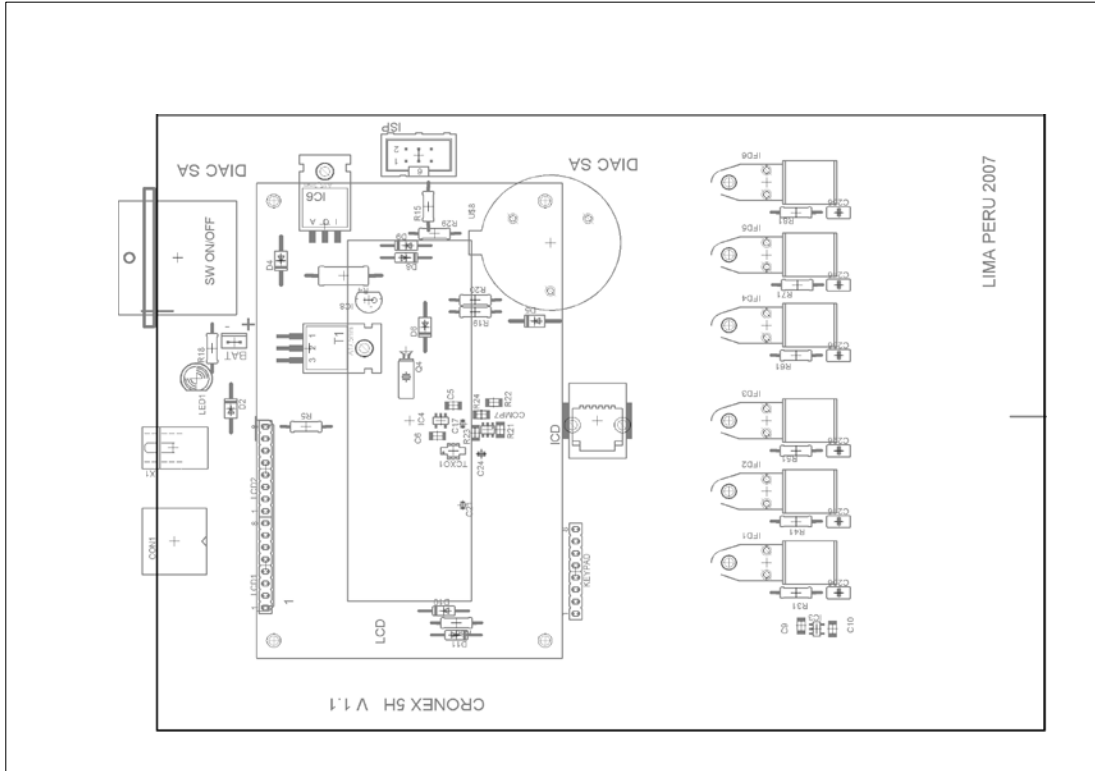


Figura 3.38 a y b Distribución de componentes cara superior e inferior.

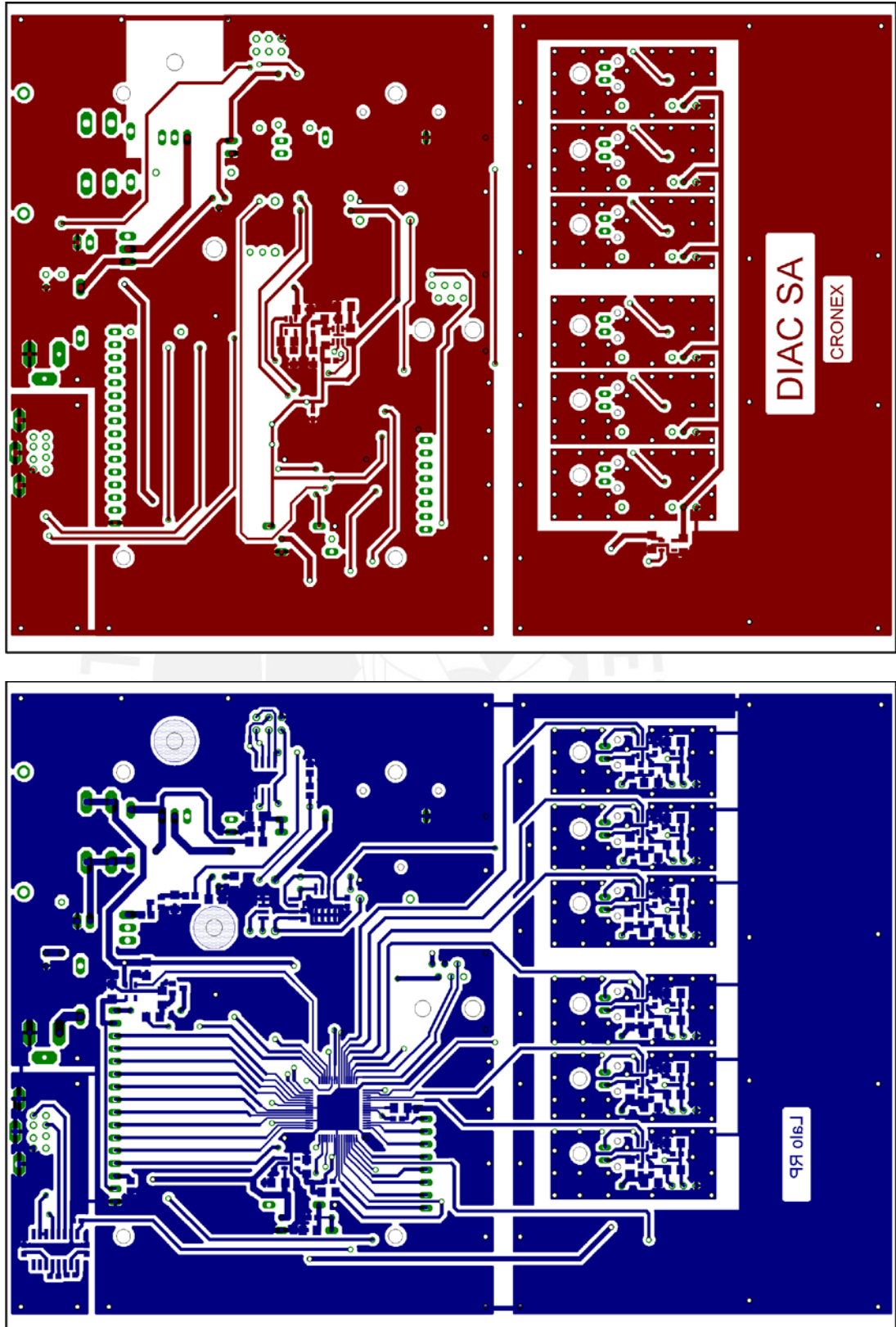


Figura 3.39 a y b Diagrama de pistas cara superior e inferior.

### 3.13 Costos

El costo del equipo se puede observar en la tabla 3.14

Descripción	Costo US \$
Microcontrolador	21.26
componentes Electrónicos	200
Pantalla LCD	68
Caja Aluminio	300
Serigrafía	2
Conectores Fibra óptica	30
Teclado Matricial	47
Interruptor Encendido/Apagado	12.3
Fuente de Voltaje para el cargador	7
Maletín Protector	100
Baterías Recargables 2500mAh	16
Circuitos impresos	80
Trabajo de Soldadura y ensamble	100
Investigación y desarrollo	1000
TOTAL	1983.56

Tabla 3.14 costos del equipo.

## CAPÍTULO 4: PRUEBAS Y RESULTADOS

En este capítulo se explica el proceso de calibración de los sensores ópticos, las pruebas realizadas al oscilador principal y otros dispositivos del sistema CRONEX.

### 4.1 Calibración del Oscilador

El oscilador principal del sistema CRONEX está conformado por un oscilador de cristal con compensación de temperatura (TCXO) con una desviación en frecuencia de solo 2.5 ppm en un rango de temperatura comprendido entre los  $-30^{\circ}\text{C}$  hasta  $+75^{\circ}\text{C}$ .

Para esta prueba se usó el generador de ondas FLUKE PM5193, el cual posee un oscilador controlado por horno de alta precisión. Para obtener el menor error en la generación de la señal de calibración, se encendió el equipo 45 minutos antes de la prueba, pues así lo sugiere el fabricante del generador para estabilizar su oscilador.

Se configuró el FLUKE PM5193 para generar una onda cuadrada a una frecuencia de 10MHZ, luego se conectó la salida al canal 1 de un osciloscopio digital TekTronix TDS220 y la señal del TCXO al canal 2 del osciloscopio, además se seleccionó el canal 1 como señal de disparo.

Si la señal del canal 2 se mantiene estática respecto al canal 1, entonces ambas están en la misma frecuencia. Si se observa un desplazamiento hacia la izquierda de la señal en el canal 2 respecto al canal 1, entonces la frecuencia del TCXO es mayor y si el desplazamiento se da hacia la derecha, la frecuencia es menor.

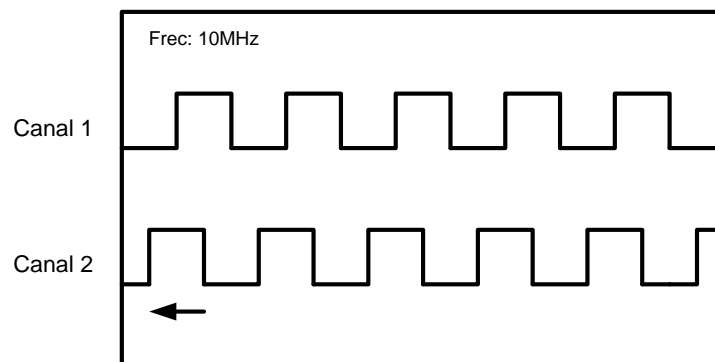


Figura 4.1 señal en el canal 2 con desplazamiento a la izquierda,  $f_2 > f_1$ .

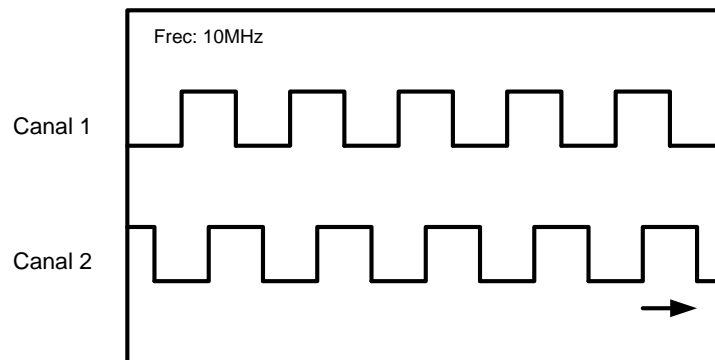


Figura 4.2 señal en el canal 2 con desplazamiento a la derecha,  $f_2 < f_1$ .

Para verificar las especificaciones dadas por el fabricante se realizaron tres pruebas:

#### 4.1.1 Prueba a temperatura ambiente (25 °C).

Se observó un desplazamiento a la izquierda de dos ciclos por segundo, entonces aplicando la siguiente formula:

$$f = f_R + 1/t$$

Donde:

$f$  es la frecuencia obtenida en el oscilador TCXO.

$f_R$  es la frecuencia de referencia brindada por el generador.

$T$  es el tiempo en que un periodo de onda completa se desplaza.

Entonces:

$$f = 10 \times 10^6 + 1/0.5$$

$$f = 10\,000\,002 \text{ Hz}$$

Por lo tanto, la desviación de frecuencia obtenida por el oscilador TCXO se encuentra por debajo de las 2.5 ppm indicadas por el fabricante.

#### 4.1.2 Prueba a bajas temperaturas (-20 °C).

Para esta prueba se colocó el sistema CRONEX en una caja con hielo seco hasta alcanzar una temperatura de -20 °C.

Se observó un desplazamiento a la derecha de varios ciclos por segundo, entonces se varió la frecuencia del generador digital FLUKE PM5193 hasta que ambas ondas quedaron fijas. La frecuencia obtenida fue:

$$f = 9\,999\,985 \text{ Hz}$$

Esto da una desviación de frecuencia de -1.5 ppm, la cual se encuentra dentro de las especificaciones del fabricante.

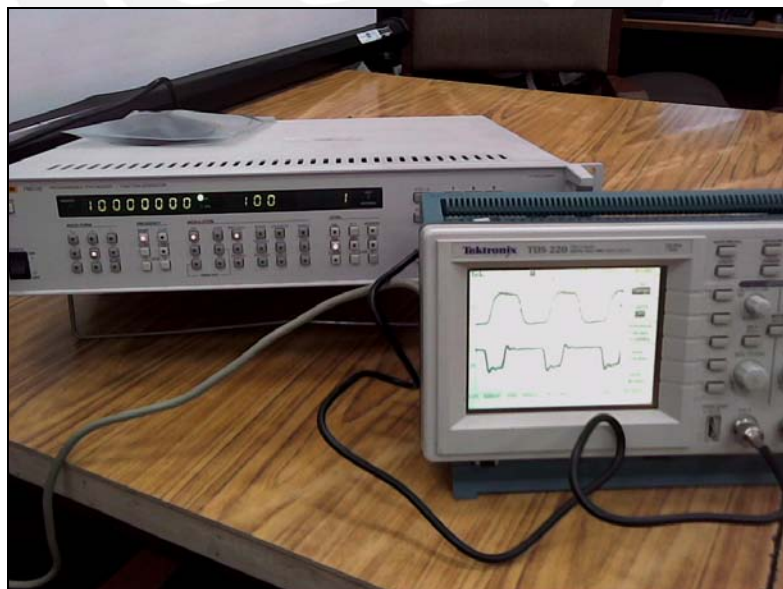
#### 4.1.2 Prueba a altas temperaturas (60 °C).

Para esta prueba se colocó el sistema CRONEX en un horno eléctrico hasta alcanzar una temperatura de 60 °C.

Se observó un desplazamiento a la izquierda de varios ciclos por segundo, entonces se varió la frecuencia del generador digital FLUKE PM5193 hasta que ambas ondas quedaron fijas. La frecuencia obtenida fue:

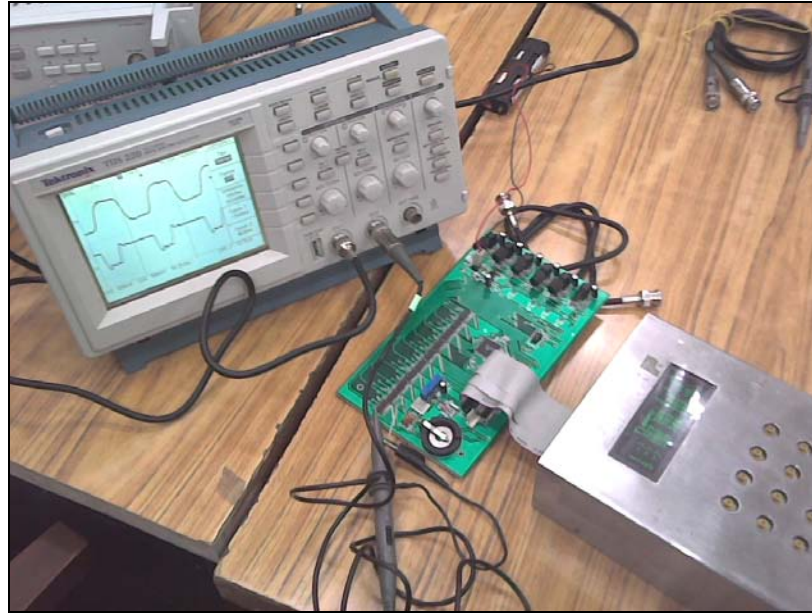
$$f = 10\,000\,020 \text{ Hz}$$

Lo que da una desviación de frecuencia de 2 ppm y está dentro de las especificaciones del fabricante.



a





b

Figura 4.3 a y b Calibración del equipo usando un generador de señales FLUKE PM5193

#### 4.2 Calibración de los Sensores Ópticos.

Para obtener una óptima respuesta en cada uno de los sensores se utilizó un LED rojo como patrón y una fibra óptica de núcleo de plástico de 1000  $\mu\text{m}$ .

Se realizaron pruebas con distintos valores de resistencia  $R_2$  (ver figura 4.4) que determina la sensibilidad de los sensores. Luego de varios ensayos se escogió la resistencia de 100  $\Omega$ . Los resultados de las pruebas se pueden apreciar en la tabla 4.1.

Para esta prueba se utilizó un LED modelo HLMP-EG08-Y2000 de la compañía Avago Technologies US Inc., el cual tiene una longitud de onda de 626nm y una luminosidad de más de 18000 milicandelas con un ángulo de visión de 8°.



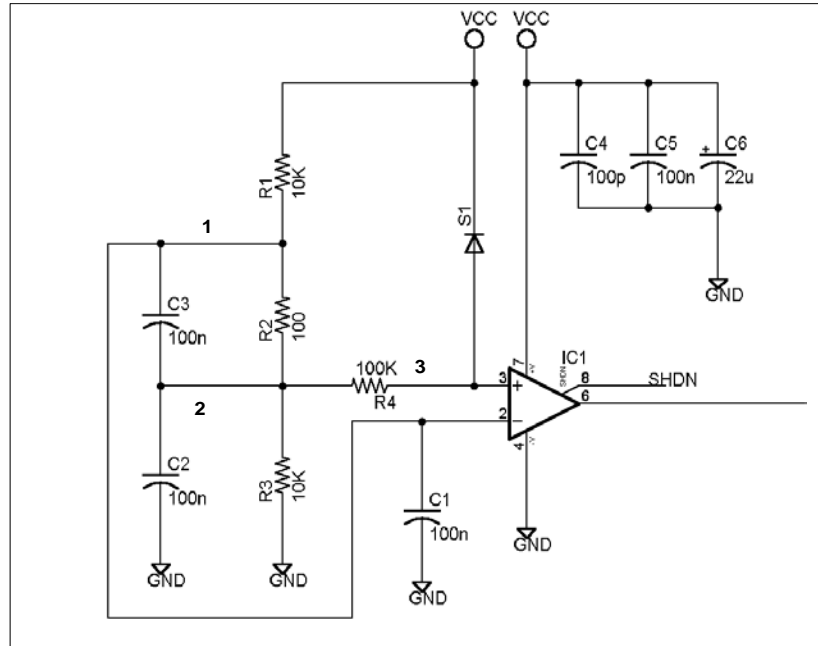


Figura 4.4 circuito de sensores ópticos.

Donde:  $V_3 = v_2 + 6\text{mV}$  es el voltaje en el nodo 3 cuando el sensor S1 no recibe luz. Para mayor información referirse a la sección 3.7

Valor de R2	V1	$\Delta V = V1 - V3$	Distancia Máxima de la fibra	Problemas encontrados
1K $\Omega$	$v_2 + 238\text{mV}$	236mV	1m	Distancia máxima de las fibras ópticas no es segura.
330 $\Omega$	$v_2 + 81\text{mV}$	75mV	25m	Distancia máxima de las fibras es segura pero poco practica.
100 $\Omega$	$v_2 + 24.8\text{mV}$	18.8mV	120m	Ninguno
50 $\Omega$	$v_2 + 12.4\text{mV}$	6.4mV	250m	Sensibilidad muy alta, sensores se activan al conectar computadora

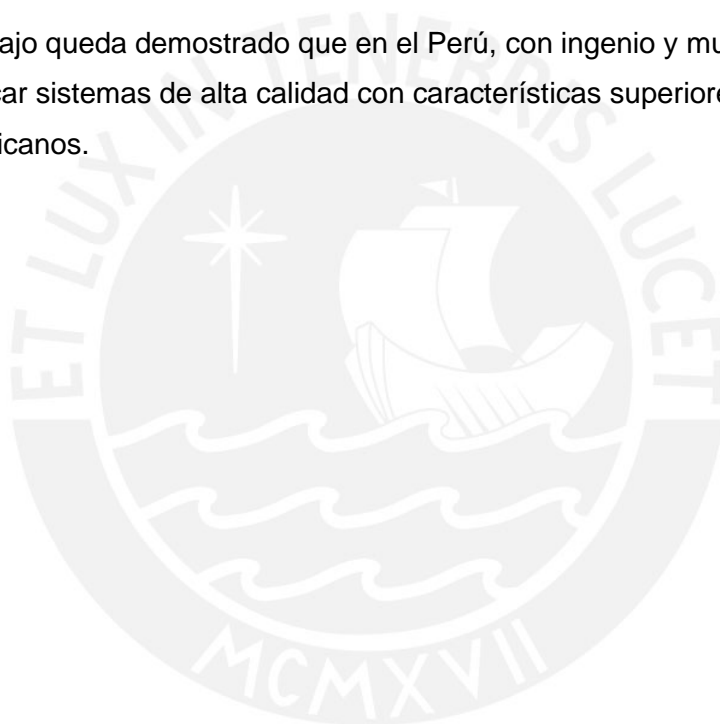
Tabla 4.01 Valores de resistencia que determinan sensibilidad.

## CONCLUSIONES

El sistema de medición de tiempo y velocidad de detonación CRONEX es un equipo portátil con características similares o superiores a equipos importados a una fracción del costo. Este sistema ya está siendo utilizado en varias empresas de Perú, Bolivia y Brasil que están dedicadas a la fabricación de explosivos o insumos de voladura.

Esta tesis no profundiza en temas relacionados a explosivos o fulminantes, sino brinda información importante para todo aquel que desee diseñar un equipo de medición portátil.

En este trabajo queda demostrado que en el Perú, con ingenio y mucha dedicación, se puede fabricar sistemas de alta calidad con características superiores a equipos europeos y norteamericanos.



## RECOMENDACIONES

Se recomienda mejorar el diseño de la primera versión del sistema de medición de tiempo y velocidad de detonación CRONEX en los siguientes aspectos:

- Descarga de datos a través de un puerto USB.
- Cambiar la pantalla LCD de caracteres por una gráfica de mayor resolución, la cual permita visualizar simultáneamente todos los valores de la prueba. En la actualidad, al ser más populares, las pantallas gráficas tienen un precio menor.
- Lograr certificación UL y CE.



## BIBLIOGRAFÍA

[1] Blasting technology for mining and civil engineers  
Sen, Gour C.  
Sydney, 1995  
ISBN-13: 978-0868402949

[2] Tecnología de explosivos y técnicas de voladura  
Dr. P.D. TAKIS KATSABANIS, Ph.D.  
Queen's University  
Kingston, Ontario Canada 1996

[3] Tecnología de los explosivos  
Chacón Fernández, Jaime  
Santiago de Chile : Universidad de Chile, 2000  
ISBN:956190277X

[4] Diseño de voladuras  
Konya, Calvin J.  
Ediciones Cuicatl, 1998  
ISBN: 9709207601

[5] HP 5370B Time Interval Counter  
<http://www.febo.com/time-freq/hardware/5370B/>

[6] Test Methods for Explosives  
Muhamed Suceska  
Springer; 1 edition (October 12, 1995)  
ISBN-10: 0387945555

[7] ASP BLASTRONICS  
<http://www.aspblastronics.cl/>  
Consulta: 10 Mayo 2008

[8] KONTINITRO AG  
<http://www.explomet.ch/page0001.htm>  
Consulta: 10 Mayo 2008

[9] **QUARTZ CRYSTAL, THEORY OF OPERATION**  
Fox Electronics  
<http://www.foxonline.com/techdata.htm>  
Consulta: 25 Julio 2007

- [10] Oscillator design guide ,  
Kim Peck  
1997  
Microchip Inc.  
<http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00588b.pdf>  
Consulta: 25 Julio 2007
- [11] A history of the quartz crystal industry in the USA  
Bottom, Virgil E.  
1981
- [12] Understanding Fiber Optics 5th Edition  
Jeff Hecht  
Prentice Hall; 5 edition (April 29, 2005)  
**ISBN-13:** 978-0131174290
- [13] Sandia National Lab <http://www.sandia.gov/>  
Consulta: 15 Abril 2007
- [14] Introducción a la tecnología de explosivos  
Agreda, Carlos  
Lima : UNI, 1992
- [15] Manual de empleo de explosivos  
Unión Española de Explosivos  
Madrid : U.E.E., 1994
- [16] Manual práctico de voladura **4a ed.**  
EXSA  
Lima-Perú
- [17] USBS The United States Bureau of Mines  
<http://www.ntis.gov/products/specialty/bom.asp?loc=4-5-1>  
Consulta: 4 Julio 2007
- [18] What is RoHS?  
<http://www.rohs.gov.uk/>  
Consulta: 02 Agosto 2007
- [19] El Cobre en la Economía  
Pro-Cobre  
[http://www.procobre.org/procobre/acerca\\_del\\_cobre/economia\\_productores.html](http://www.procobre.org/procobre/acerca_del_cobre/economia_productores.html)

Consulta: 4 Julio 2007

[20] Gold Fields Mineral Service

Oro y Plata: Las Perspectivas Son Igual de Buenas.

[http://www.gfms.co.uk/market\\_commentary.htm](http://www.gfms.co.uk/market_commentary.htm)

Consulta: 20 Noviembre 2007

[21] Optrex America Inc.

Part Detail: C-51847NFQJ-LG-ACN

<http://www.optrex.com/products/partdetail.asp?PartNumber=C-51847NFQJ-LG-ACN>

Consulta: 8 Mayo 2007

[22] Environmental testing at the Jet Propulsion Laboratory Frequency Standards Laboratory

Sydnor, R.L.

Frequency Control, 1989

[23] IEEE Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control Society (*UFFC*)

[www.ieee-uffc.org](http://www.ieee-uffc.org)

<http://www.ieee-uffc.org/main/publications/special/proceed/e917/e9170927.pdf>

Consulta: 25 Julio 2007

[24]

Characteristics Of Rechargeable Batteries

National Semiconductors

<http://www.national.com/appinfo/power/files/f19.pdf>

Consulta: 08 Agosto 2007

[25] Hamamatsu Photonics

Streak Cameras

<http://learn.hamamatsu.com/tutorials/streakcamera/>

Consulta: 12 Octubre 2009

[26] Evaluation of explosives performance through in-the-hole detonation velocity measurement

NATIONAL INSTITUTE OF ROCK MECHANICS

Champion Reef Post - 563 117

Kolar Gold Fields, Karnataka, India.

