

# SISTEMA OPTO-ELECTRÓNICO PARA LA DETERMINACIÓN DE POSICIONES



Universidad Nacional de La Plata  
Facultad de Ingeniería  
Departamento de Electrotecnia

Cátedra de Trabajo Final

*Autor:* Rabal Sebastian N° 52598/0

*Director:* Ing. Eduardo Cortizo

La Plata, año 2010



## Agradecimientos

*A mi familia, al Ing. Eduardo Cortizo, al Ing. José I. Gialonardo, a todo el personal del laboratorio del Servicio de Corte láser (SCL) del CIOp, a la Lic. Graciela Mastropietro, y a una gran amiga María Paula Semle.*



## **Resumen**

El presente trabajo consiste en la actualización de un dispositivo apto para la detección continua de la posición, sobre un plano, de los puntos de incidencia de un par de haces de luz láser, existente en el laboratorio del Servicio de Corte Láser (SCL) del Centro de Investigaciones Ópticas (CIOp), que se utiliza en metrología óptica.

La detección de los haces se realiza por medio de un par de detectores de posición continuos (DPC) y la información que suministran se envía a una PC para su procesamiento. Mediante los algoritmos adecuados, se obtienen las posiciones de los haces sobre los detectores.

El trabajo incluye tanto el desarrollo del hardware de acondicionamiento de las señales antes de ser enviadas a la PC, como del software encargado del procesamiento que permite obtener las posiciones correspondientes.

## **Abstract**

The present work consists of the update of a device suitable for the continuous position detections, on a plane, of the incidence points of a couple of laser beams, which exists in the laboratory of the Laser Cutting Service (SCL in Spanish) in the Optics Research Center (CIOp) and is used for optical metrology.

The detection of the beams is achieved by means of two continuous position detectors (DPC), and the information supplied by them is sent to a PC for its processing. By means of adequate algorithms, the positions of the beams on the detectors can be obtained.

The work includes both the development of hardware required for signals conditioning before being sent to the PC, as well as of the software for processing that allows obtaining the corresponding positions.



# Contenido

INTRODUCCIÓN .....	1
i. Descripción General.....	1
i.a. Equipo preexistente.....	1
i.b. Motivación .....	5
ii. Organización del trabajo.....	6
Capítulo 1. El láser .....	9
1.1. Principio de funcionamiento .....	10
1.2. Tipos de láser según el medio activo.....	13
1.3. El láser de Helio-Neón .....	14
1.4. Regulación de la intensidad .....	18
1.5. Modelo disponible en el laboratorio .....	20
Capítulo 2. Detector de posición continuo (DPC) .....	21
2.1. Descripción general .....	21
2.2. Detectores del tipo Tetra-lateral y Dúo-lateral.....	22
2.3. Características principales de un DPC.....	24
2.4. Obtención de las coordenadas del <i>centroide</i> del haz incidente sobre un DPC .....	27
Capítulo 3. Placa adquiridora de datos NI-USB6009 .....	29
3.1. Descripción general.....	29
3.2. Entradas analógicas .....	30
3.3. Pruebas.....	34
3.3.1. Caracterización del dispositivo .....	34
3.3.2. Contraste con un instrumento patrón .....	40

Capítulo 4. Circuito de acondicionamiento de señal .....	43
4.1. Conversión de corriente a tensión. Amplificador de trans-impedancia.....	43
4.2. Etapas de diseño.....	45
4.2.1. Requisitos. Señales de entrada y de salida.....	45
4.2.2. Propuesta inicial.....	47
4.2.3. Modificaciones .....	52
4.2.4. Definición de los rangos de trabajo.....	52
4.2.5. Elección de los componentes.....	53
4.2.6. Ensayo en una placa de pruebas.....	59
4.2.7. Diagrama esquemático y circuito impreso .....	64
4.3. Ensayos en circuito impreso.....	68
4.4. Fuente de alimentación.....	71
4.4.1. Requerimientos.....	71
4.4.2. Diseño.....	73
4.4.3. Ensayos.....	74
Capítulo 5. Programa de aplicación .....	77
5.1. Menú Principal .....	78
5.2. Aplicaciones.....	79
5.2.1. Acondicionamiento y Calibración.....	79
5.2.2. Observación.....	92
5.2.3. Registro .....	99
5.2.4. Simulación .....	106
5.3. Ayuda.....	109
Capítulo 6. Integración final del sistema. ....	111
6.1. Ensayo integrador.....	111
6.2. Comparación entre distintos dispositivos láser .....	115
6.2.1. Registros de corta duración.....	115
6.2.2. Registros de larga duración .....	120
6.2.3. Conclusiones.....	122

CONCLUSIONES .....	123
Bibliografía .....	124
Anexo I .....	125
Anexo II .....	133
Anexo III .....	157
Anexo IV .....	181



## INTRODUCCIÓN

### i. Descripción General

El trabajo consiste en realizar la actualización de un equipo existente en el laboratorio del Servicio de Corte Láser del Centro de Investigaciones Ópticas, instituto dependiente de la Comisión de Investigaciones Científicas. A continuación se describen el equipo a actualizar, sus aplicaciones más comunes, y las razones que motivaron el trabajo.

#### i.a. Equipo preexistente

Consta de un conjunto de dispositivos opto-electrónicos: un láser de He-Ne y dos Detectores de Posición Continuos (DPC) bidimensionales, asociados a un Sistema Adquiridor Remoto (SAR), que es un circuito electrónico con el que se puede:

- Establecer la sensibilidad del detector.
- Convertir las señales analógicas en digitales
- Transmitir los datos en serie (modo RS-232) a cualquier PC - IBM compatible

Mediante un programa escrito en lenguaje C, se comanda el equipo desde la PC, permitiendo las siguientes prestaciones:

- Presentación a tiempo real en pantalla: Indicación numérica y gráfica de los desplazamientos, con funciones de zoom, promedio y ajuste de cero (lecturas absolutas o relativas).
- Registro en archivos de los datos provenientes del SAR, con elección de: promedio, período y número de muestras.
- Visualización en pantalla e impresión de los registros en forma de gráficos y planillas numéricas.
- Rutina de calibración para establecer la indicación en unidades de longitud.

En la figura 1 se muestra un esquema simplificado del sistema:

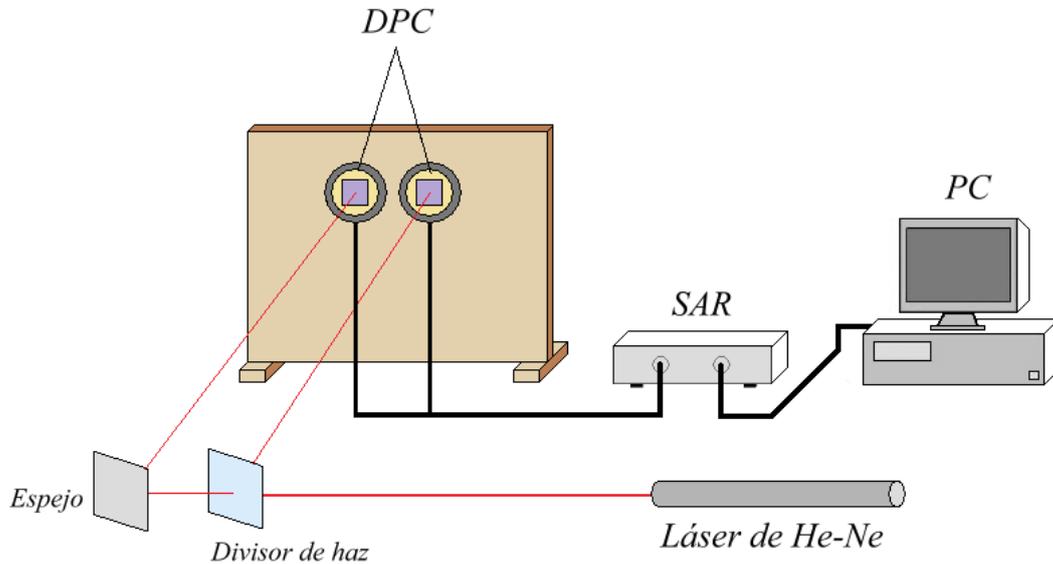


Figura 1: Esquema simplificado del sistema preexistente

## Funcionamiento

Se utiliza el láser de He-Ne como fuente de señal, y se divide el haz del mismo en dos mediante instrumentos ópticos para lograr un par de haces que inciden cada uno sobre un detector.

Un DPC bidimensional es un dispositivo semiconductor (en este caso un fotodiodo) que, previamente polarizado, convierte la radiación luminosa incidente sobre su superficie activa en corrientes eléctricas que ingresan por determinados nodos (cátodos), y se colectan a través de otros de salida (ánodos). La magnitud de cada corriente depende de la posición del punto de incidencia (*centroide*) del haz, de manera que si la misma coincide con el centro geométrico del detector, las intensidades de las corrientes resultan iguales.

El SAR dispone de 8 canales de entrada analógicos y 8 canales digitales de salida. Las señales provenientes de los DPC se conectan a la entrada y luego se convierten en tensiones por medio de amplificadores corriente-tensión, con ganancias definidas por pasos, programables por software.

Un convertidor Analógico/Digital toma muestras de las tensiones (870 muestras por segundo) y las transforma en dígitos (resolución 11 bits + 1 para indicar el signo). Luego una UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter) envía la información en serie a la PC según un protocolo de comunicaciones preestablecido.

El sistema diseñado emplea la máxima tasa de baudios posible para una PC (115.200) y requiere de la transmisión de sólo una palabra de control, al inicio del muestreo, para establecer las condiciones de trabajo: sensibilidad (ganancia) y número de canales. A partir de ese momento, ante una señal de control, el equipo envía en forma ininterrumpida datos que se identifican con el canal pertinente mediante la recepción de otra señal destinada para tal fin.

Con los datos de los cuatro canales correspondientes a un detector se calcula un par de coordenadas XY correspondientes a la posición del *centroide* del haz sobre el área activa del mismo. El algoritmo aplicado disminuye la dependencia de la posición indicada con la intensidad de la luz incidente, obteniendo las coordenadas en valores unitarios (rango  $\pm 1$ ) que, multiplicados por factores de proporcionalidad, indican las coordenadas en unidades de longitud.

El programa brinda acceso a tres rutinas de trabajo, a partir de una pantalla inicial de menú:

1. Calibración
2. Observación
3. Registro

1. Calibración:

Permite incorporar al programa los factores de proporcionalidad mencionados, ya sea por teclado o accediendo a ellos a través de una calibración asistida. Esta parte del programa guía al usuario para ubicar, en valores unitarios, cuatro puntos cercanos a cada uno de los laterales del sensor, luego a introducir por teclado la distancia en micrones que separa cada par de puntos opuestos (valores que deben ser medidos con un instrumento patrón), y calcula los nuevos factores de proporcionalidad que almacena en memoria. Cabe hacer notar que cuando se modifica la sensibilidad del dispositivo, cambiando la ganancia de los convertidores o la intensidad de la fuente de luz empleada, el equipo debe calibrarse nuevamente.

## 2. Observación:

Permite ver en pantalla una representación a tiempo real del punto de incidencia del haz sobre la superficie sensible del detector, pudiendo definir la resolución de la misma (zoom), establecer el número de muestras a promediar para cada presentación de datos, y ajustar el cero para obtener coordenadas relativas a un punto cualquiera del sensor.

La representación gráfica en pantalla, consiste en un cuadrado de 10x10cm aproximadamente, con cuatro cuadrantes separados por ejes de coordenadas XY, donde aparece un cursor en el lugar correspondiente al *centroide* del haz sobre el sensor. Sobre un costado se presentan las opciones de referir las coordenadas a la posición presente del *centroide* (indicando entre paréntesis la distancia de este nuevo origen al centro del detector), la elección del número de muestras a promediar es de 1 a 800 y la función de zoom permite modificar la resolución de la representación gráficamente, abarcando desde la totalidad del detector a su décima parte a partir de su centro geométrico.

## 3. Registro:

Permite registrar datos en archivos, definiendo: cantidad de coordenadas a tomar (máximo 5000) y número de muestras por segundo (1-800). Los registros pueden verse en pantalla, antes de archivarse, en forma de planillas distribuidas en páginas que contienen 80 coordenadas numeradas cada una. Los archivos (tipo ASCII), se incorporan a un subdirectorío de documentos, incluyendo en su encabezado la fecha y la hora. Esta rutina cuenta con una protección contra sobre-escritura al elegir el nombre del archivo.

## Aplicaciones

El sistema descrito es utilizable en toda aplicación en la que sea necesario determinar el movimiento relativo entre dos cuerpos. Por ejemplo, puede emplearse para posicionar y alinear piezas o elementos de máquinas. También es aplicable, con la inclusión de algunos accesorios, en el estudio de las vibraciones que presentan estructuras tales como edificaciones construidas en ciudades, puentes sometidos a corrientes de viento, etc. ya que pueden medirse la frecuencia y la amplitud de estas vibraciones en determinados puntos de la estructura.

Actualmente se lo utiliza para el estudio de las perturbaciones que una fuente de calor provoca en el movimiento de una masa de aire. Cuando el haz láser atraviesa dicha masa, los cambios que se producen en la densidad del aire hacen que el haz se curve por la variación del índice de refracción. Los DPC detectan estos movimientos sumamente pequeños del *centroide* del haz y los datos registrados permiten para caracterizar la turbulencia del medio.

Según los requerimientos de la aplicación, puede utilizarse uno o dos detectores. A cada detector se lo denomina *Monóculo* por su capacidad para “observar” los movimientos de un haz de luz. Por lo tanto cuando se utilizan dos monóculos simultáneamente, se hace referencia al sistema como un *Binóculo*.

Las ventajas de utilizar un binóculo son principalmente las siguientes:

- 1) Si se emplea en metrología mecánica (detección de la posición y/o desplazamiento de estructuras), permite detectar rotaciones en un plano al tener más de un punto de referencia.
- 2) Cuando se estudian las perturbaciones atmosféricas, a veces es necesario analizar más de una región, por ejemplo para desafectar las mediciones de las perturbaciones de fondo, que no son las propias del fenómeno en estudio.

### **i.b. Motivación**

Las razones que motivaron el trabajo se encuentran en el deseo de mejorar la prestación del sistema. El ancho de banda del equipo preexistente es menor a 500 Hz, mientras que el de los DPC es de 10 kHz. Esto significa que, con los mismos detectores, podrían detectarse movimientos más rápidos del haz si se utilizara un dispositivo adquiridor con mayor ancho de banda.

El laboratorio cuenta con una placa adquiridora de datos NI-USB6009 de la empresa National Instruments, capaz de adquirir muestras a 48 kHz. Se decidió utilizarla para realizar la actualización del SAR, aumentando así el ancho de banda del sistema completo a 3 kHz. Esta solución no alcanza el valor óptimo de 10 kHz, pero la utilización de la placa disponible permite adquirir experiencia y confianza en el fabricante para decidir utilizar una de mejores prestaciones y mayor costo en el futuro.

Por otro lado, el programa que utiliza el sistema preexistente funciona sobre plataforma DOS. Para que el nuevo dispositivo pueda utilizarse en cualquier plataforma actual, como Windows XP ®, es necesario desarrollar un nuevo programa.

## ii. Organización del trabajo

Para realizar la actualización del sistema es necesario implementar un circuito que acondicione las señales de los DPC a la placa adquiridora de datos, y un programa que procese dichos datos con el fin de obtener las posiciones correspondientes, presentarlas y registrarlas.

Al conjunto formado por el circuito de acondicionamiento de señal y la placa adquiridora de datos se lo denominará “SAR 2” debido a que cumple las mismas funciones que su predecesor, aunque con mejores prestaciones, mientras que al sistema completo, incluyendo los DPC y el programa de aplicación, se lo llamará Sistema Opto-electrónico para la Determinación de Posiciones (SODP).

A continuación se muestran los diagramas de bloques del sistema preexistente y del SODP.



Figura 2: Diagrama de bloques - Sistema preexistente

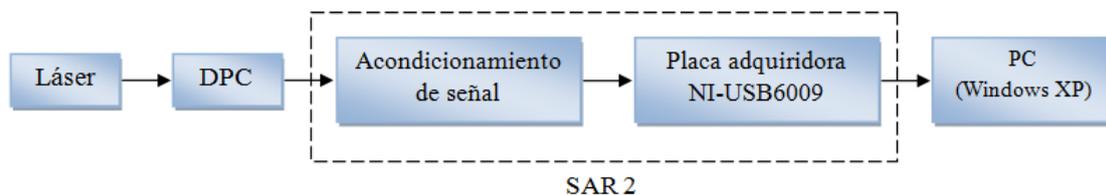


Figura 3: Diagrama de bloques - Sistema actualizado

La presentación del trabajo está organizada en 6 capítulos y 4 anexos:

- **Capítulo 1. El láser:** Descripción del dispositivo láser que el sistema utiliza como fuente de señal. Principio de funcionamiento y características principales.
- **Capítulo 2. Detector de posición continuo (DPC):** Detectores de posición continuos bidimensionales con los cuales se trabajará. Parámetros característicos y modelos utilizados.
- **Capítulo 3. Placa adquiridora de datos NI-USB6009:** Sus especificaciones relacionadas con el proyecto y descripción de las pruebas realizadas sobre la misma.
- **Capítulo 4: Circuito de acondicionamiento de señal:** Detalle de los pasos seguidos en el diseño del circuito de acondicionamiento de señal: principio de funcionamiento, elección de los componentes, y diseño del circuito impreso, propiamente dicho.
- **Capítulo 5. Programa de aplicación:** Descripción del programa de aplicación desarrollado para adquirir y procesar los datos desde el SAR 2.
- **Capítulo 6. Integración final del sistema:** Incluye un ensayo final a modo de ejemplo de utilización que permite extraer las conclusiones finales.
  - **Anexo I:** Descripción de las herramientas de programación.
  - **Anexo II:** Desarrollo de programas específicos para ensayos, y detalles del programa general.
  - **Anexo III:** Ensayos y resultados complementarios.
  - **Anexo IV:** Información técnica: instrumentos, planos, esquemas y hojas de datos.



## Capítulo 1. El láser

La palabra *Láser* surge del acrónimo L.A.S.E.R., de la expresión inglesa “Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation” que significa “Amplificación de Luz por Emisión Estimulada de Radiación” aunque muchos no están de acuerdo con este nombre ya que los láseres son dispositivos que no amplifican la luz en un sentido estricto, sino que producen luz de características especiales que es muy útil para los científicos e ingenieros.

La propiedad más importante de la luz láser es su coherencia, tanto temporal como espacial. Estos dos tipos de coherencia describen aspectos distintos de la luz, y son independientes uno de otro.

La coherencia temporal, también denominada coherencia de frecuencias, implica que toda la energía de la luz de un láser es emitida, idealmente, con la misma frecuencia o, lo que es lo mismo, con la misma longitud de onda. Esta característica se manifiesta en el hecho de que la luz de un dispositivo láser es monocromática.

La coherencia espacial se refiere a que todas las ondas parten del emisor en concordancia de fase, a diferencia de un haz incoherente, donde las ondas emitidas tienen una diferencia de fase aleatoria y por lo tanto algunas suman sus efectos y otras se contrarrestan.

La luz se considera coherente cuando se presentan simultáneamente ambos tipos de coherencia.

Otra propiedad importante del láser es su pequeña divergencia. Las fuentes comunes de luz, como una bombilla incandescente, irradian luz en todas direcciones. Los rayos pueden hacerse paralelos empleando espejos esféricos y lentes convergentes, pero estos sistemas ópticos son muy poco eficientes debido a que dichas fuentes de luz no son puntuales. El haz luminoso diverge, aumentando el área de incidencia y disminuyendo la densidad de energía a grandes distancias.

En cambio los rayos de luz que salen del dispositivo láser, debido a la estructura del mismo, son casi paralelos, y ésta propiedad es la que hace que los haces luminosos puedan alcanzar grandes distancias tales como la de la Tierra a la Luna con una divergencia muy pequeña.

### 1.1. Principio de funcionamiento

Un dispositivo láser basa su funcionamiento en uno de los 3 fenómenos que pueden producirse al interactuar la materia y la energía a nivel molecular o atómico.

Según el modelo del átomo de Bohr, el mismo está formado por un núcleo con carga eléctrica positiva y una nube de electrones con carga negativa distribuidos en órbitas discretas más o menos alejadas en función de su energía.

Cuando la radiación electromagnética interactúa con un átomo pueden ocurrir 3 fenómenos:

#### 1) Absorción:

Cuando un fotón, que es una cantidad discreta de energía, produce el salto justo para que un electrón ascienda a una órbita superior, es absorbido y se dice que el electrón se encuentra en un estado excitado. Pero éste sólo puede mantenerse en dicho estado por un tiempo muy breve.

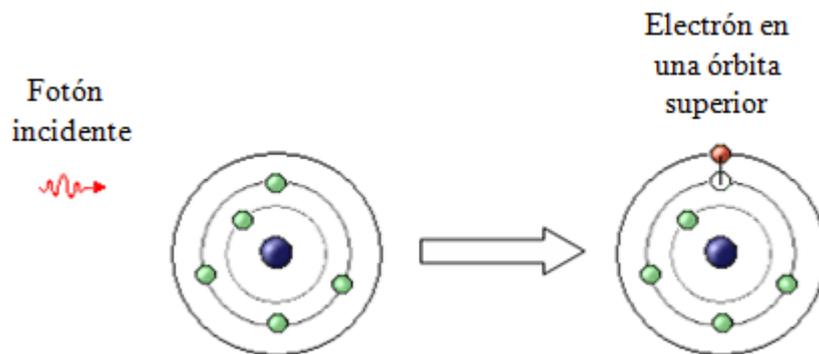


Figura 4: Absorción

2) Emisión espontánea:

Luego de la absorción, el electrón no puede mantenerse en el estado excitado y tiene lugar el siguiente fenómeno: la emisión espontánea. Ocurre cuando un electrón “cae” de su órbita en el estado excitado a su órbita previa o estado fundamental, emitiendo un fotón cuya longitud de onda depende del salto de energía entre órbitas.

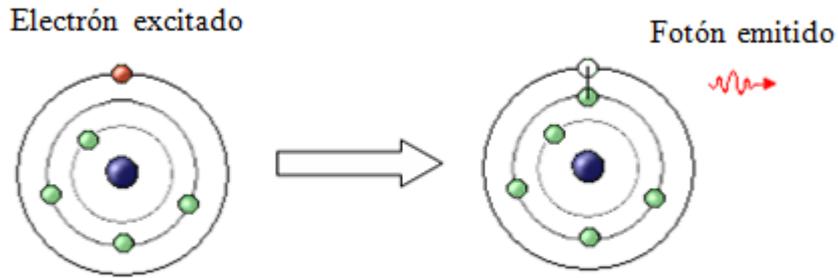


Figura 5: Emisión espontánea

3) Emisión estimulada:

En 1917, Einstein predijo el siguiente fenómeno que es la base del funcionamiento del láser:

Si un fotón con la energía adecuada (correspondiente al salto entre órbitas) incide sobre un átomo que posee un electrón en estado excitado, estimula la emisión de un segundo fotón con las mismas características de longitud de onda, fase y dirección.

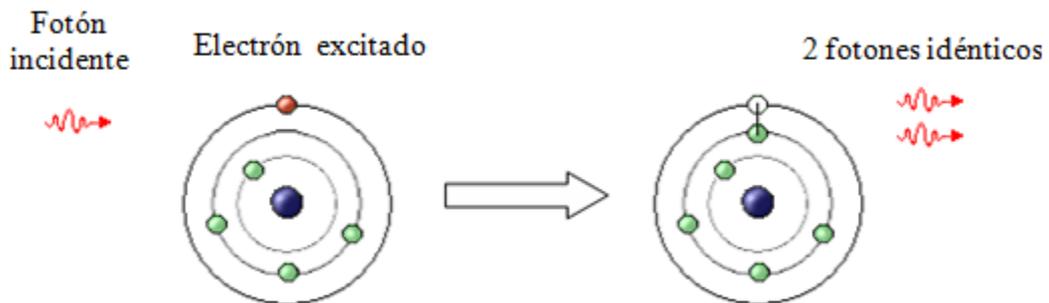


Figura 6: Emisión Estimulada

Debido a que es más común que los átomos tengan sus electrones en estado fundamental, la probabilidad de que ocurra una emisión estimulada es muy baja. Por lo tanto predomina el fenómeno de absorción.

### Inversión de población:

Se denomina así al proceso que consiste en aumentar la cantidad de átomos con electrones excitados en un material llamado “medio activo”, de manera que sea mayor que la cantidad de átomos con electrones en estado fundamental. De esta manera aumenta la probabilidad de que se produzca la emisión estimulada cuando existan fotones presentes.

Con éste objetivo se desarrolló una cavidad óptica formada básicamente por dos espejos de alta reflexividad y un material que cumple la función de medio activo.

Uno de los espejos es totalmente reflectante mientras que el otro es parcialmente transmisor o *semirreflectante*. Se encuentran enfrentados, dejando al medio activo entre ambos. Éste puede ser distinto según el tipo de láser.

Mediante el aporte continuo de energía externa, se produce una inversión de población en el medio activo y así se consiguen las condiciones necesarias para la emisión estimulada.

La radiación electromagnética emitida se refleja en los espejos, realimentando los fotones hacia la cavidad para mantener el proceso. Pero una pequeña parte de ésta radiación se transmite al exterior a través del espejo *semirreflectante* y es la parte que puede aprovecharse para las distintas aplicaciones.

En la figura 7 se muestra un esquema del funcionamiento de la cavidad óptica diseñada para producir la emisión de luz láser.

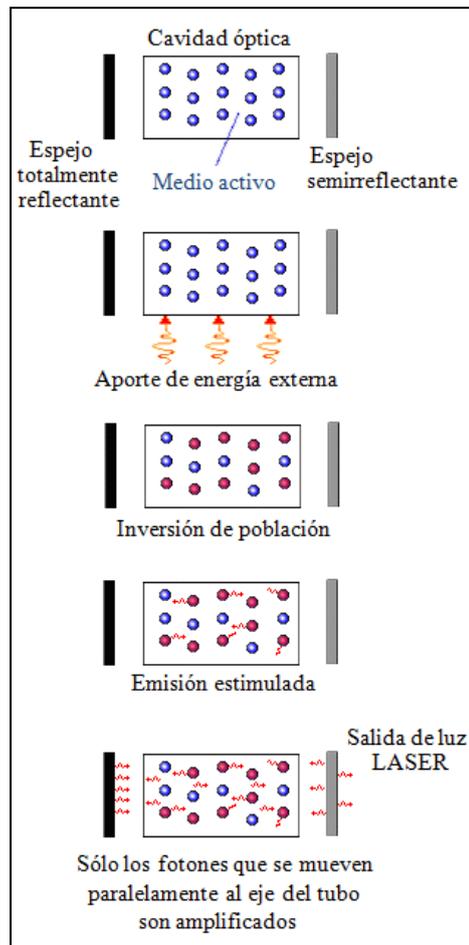


Figura 7

## 1.2. Tipos de láser según el medio activo

El medio activo utilizado para construir un láser determina las longitudes de onda del haz que son posibles de obtener. Además el suministro de energía externa se realiza de distintas maneras para cada caso.

- *Láser de estado sólido*

El medio activo lo constituyen cristales sólidos como el neodimio, rubí o titanio-zafiro y el aporte de energía externa para que se exciten se realiza con luz intensa. Un láser de titanio-zafiro emite luz cuya longitud de onda puede ser desde 690 a 1100 nm. Láseres de este tipo se utilizan en la industria, medicina y aplicaciones científicas.

- *Láser de gas*

En este tipo de láser el medio activo es un gas o una mezcla de gases, como argón o helio-neón (He-Ne), que se excitan con una corriente eléctrica. El láser de He-Ne en su versión más común, emite una luz roja de longitud de onda igual a 632,8 nm. Es de baja potencia (del orden de decenas de mW) y se utiliza con frecuencia en centros de enseñanza.

El láser de argón, es de media potencia (del orden de unidades de W) y se emplea mucho en medicina y aplicaciones científicas.

- *Láser de semiconductor*

Son láseres pequeños contruidos con materiales semiconductores que emiten un haz láser cuando se excitan con una corriente continua. Por ejemplo el láser de Arseniuro de Galio, que emite luz IR de longitud de onda entorno a 800 nm. Se utilizan sobre todo en equipos e instrumentos electrónicos y en sistemas de telecomunicaciones.

- *Láser de colorante*

El medio activo es un colorante líquido, por ejemplo Rodamina. Se excitan normalmente con un láser de argón o lámparas de flash. El colorante absorbe la luz de excitación produciendo fluorescencia en un espectro de luz muy amplio cuya emisión láser se selecciona mediante la utilización de prismas u otros elementos ópticos.

El rango de longitudes de onda es desde 400 hasta 1000nm. Se emplea en aplicaciones médicas y científicas.

### 1.3. El láser de Helio-Neón

Fue el primer láser de gas construido y actualmente sigue siendo uno de los más utilizados a pesar de la aparición y evolución de los láseres de semiconductores.

En un láser de Helio-Neón (He-Ne) el medio activo son los átomos neutros del gas Neón, pero el “bombeo” de éstos se realiza a través de los átomos de Helio.

En el siguiente diagrama de energía del sistema He-Ne se muestran las tres transiciones láser más importantes.

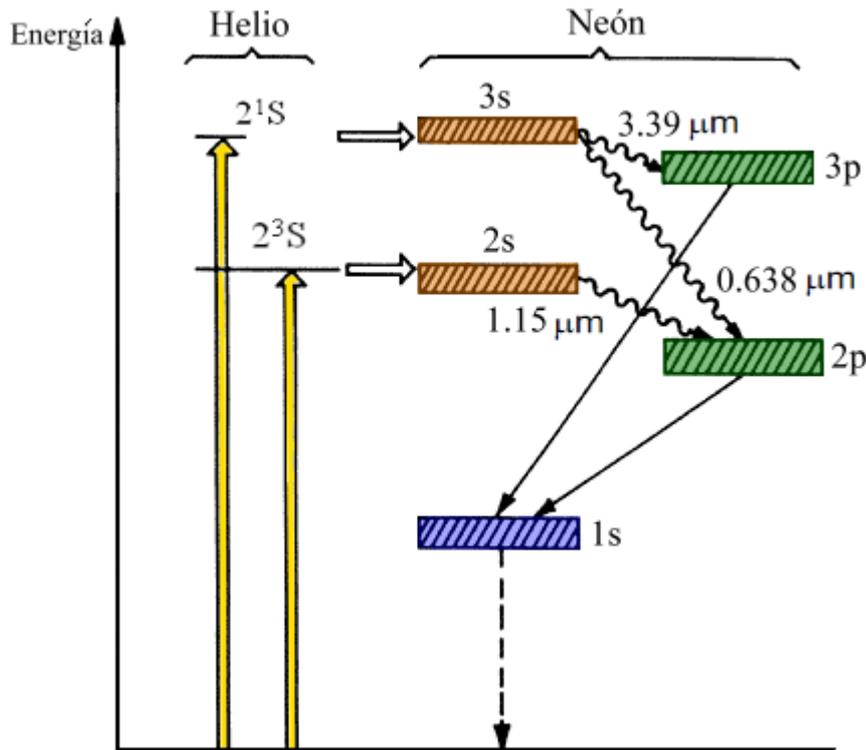


Figura 8: Diagrama de energía del sistema He-Ne

#### *Funcionamiento:*

En líneas generales, la cavidad óptica consiste en un tubo de vidrio lleno de gas excitado por una corriente eléctrica que lo atraviesa, con un espejo en cada extremo. A continuación se describe el proceso de generación del haz.

- 1) La corriente eléctrica suministrada es una descarga de electrones que colisionan fundamentalmente con los átomos de Helio, excitándolos a los niveles superiores  $2^1S$  y  $2^3S$ . A éste proceso se lo denomina “bombeo” del láser.
- 2) Cuando los átomos de Helio excitados chocan con átomos de Neón no excitados, les transfieren su energía. Como resultado, los átomos de Helio pasan a su estado base y los de Neón a los estados  $3s$  y  $2s$ . El tiempo de vida en estos estados es mayor que en los estados  $3p$  y  $2p$ , produciéndose una inversión de población en el Neón.

La transferencia de energía entre átomos de Helio y Neón ocurre debido a:

- a) La proximidad de los niveles de energía del Helio y el Neón, como se ve en el diagrama.
  - b) El hecho de que los estados  $2^1S$  y  $2^3S$  del He son meta-estables, lo que significa que tienen un tiempo de vida mayor, suficientemente largo como para colisionar con átomos de Neón antes de decaer espontáneamente.
  - c) En la mezcla He-Ne la presión del He es mayor, reduciendo la probabilidad de que la excitación ocurra en la dirección opuesta.
- 3) Cuando se emite un fotón espontáneamente dentro de la cavidad, al haber muchos átomos excitados se produce la emisión estimulada de fotones idénticos que viajan a lo largo del tubo.
  - 4) Parte de los fotones se reflejan en los espejos hacia el interior de la cavidad, donde contribuyen a la emisión estimulada de nuevos fotones, y otra parte se transmite al exterior como potencia útil. La inversión de población se mantiene gracias al aporte continuo de energía a través de la corriente eléctrica.
  - 5) Sólo los fotones que se mueven paralelamente al eje del tubo chocan con los espejos y se amplifican.

La amplificación producida por el medio activo desde un espejo al otro es del orden del 2%, por lo tanto todas las pérdidas (absorción por parte de otras moléculas, colisiones de átomos con las paredes del tubo, etc.) deben ser menores al 2%.

- 6) El vaciado de los átomos de Neón del estado meta-estable  $1s$  a su estado base ocurre fundamentalmente debido a las colisiones con las paredes del tubo. El número de colisiones aumenta a medida que el tubo se hace más estrecho, por lo tanto el diámetro del mismo debe ser lo más pequeño posible para que el vaciado sea más rápido y así aumentar la ganancia del láser.

**Estructura:**

- a) Tubo de plasma:

Es un tubo delgado de vidrio de alrededor de 2 mm de diámetro y longitud de decenas de centímetro, rodeado por un tubo externo grueso de unos 2,5 cm de diámetro y sellado por fuera.

El tubo exterior cumple dos funciones:

- Conseguir una estructura estable que proteja al tubo interior y a los espejos de los movimientos.
- Actúa como reserva de gas que repone el Neón que está siendo absorbido por el cátodo.

El tubo interior es el que contiene la mezcla de gases y es allí donde se producen las emisiones láser. La mezcla contiene entre 85% - 90% de Helio y 15% - 10% de Neón, a una presión de 0,01 atmósferas.

En los extremos del tubo, los electrodos están conectados a una fuente de potencia de alto voltaje que puede ser de corriente alterna o continua.

- b) Cavidad óptica:

Según la disposición y el tipo de espejos, existen varias configuraciones. La más común se muestra en la figura 9 y es la llamada “*semiconfocal*”. Está formada por un espejo plano que refleja alrededor del 98% de la luz que le llega, y un espejo cóncavo totalmente reflectante cuya distancia focal es igual a la longitud de la cavidad.

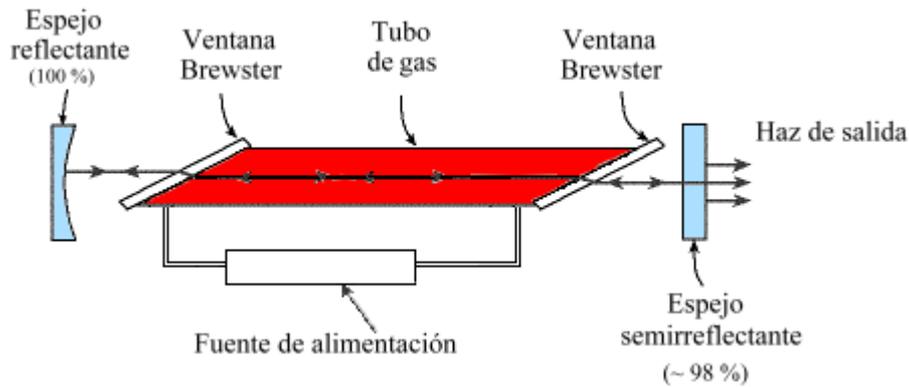


Figura 9: Cavidad óptica *semiconfocal*

\* Ventanas de Brewster:

Se utilizan a modo de interfaz entre el medio activo y el aire que lo separa de los espejos. Al formar un ángulo cercano al “ángulo de Brewster” con el eje del haz, las pérdidas por reflexión se vuelven despreciables (mucho menores al 1%) para luz polarizada linealmente con dicho ángulo. De otra manera, si las pérdidas fueran mayores, la amplificación en el medio activo no sería suficiente para mantener el haz.

c) Fuente de potencia:

El láser necesita una corriente constante para que el bombeo de los electrones sea continuo, de forma que se emplea un suministro de corriente estable.

Los láseres estándar que se utilizan en experimentos de laboratorio son de baja potencia de salida (entre 10 y 30 mW) y suelen utilizar una fuente de alto voltaje de DC del orden de los 2000 V.

Para iniciar la acción láser es necesario excitar los electrones del gas dentro del tubo y con este fin se utiliza un pulso de máximo voltaje llamado “voltaje de ignición”.

Cuando comienza la descarga, tanto la resistencia eléctrica del tubo como la tensión disminuyen rápidamente, mientras que la corriente aumenta. Para limitarla se utiliza una resistencia lastre cerca del ánodo y en serie con la fuente de potencia, como se observa en la figura 10.

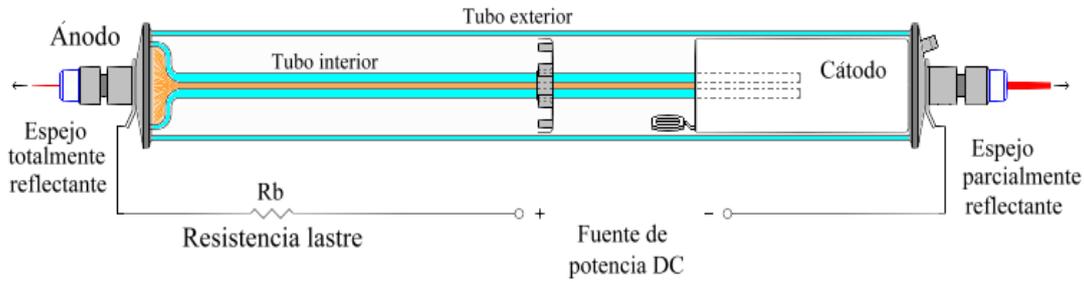


Figura 10

#### 1.4. Regulación de la intensidad

Ya sea para no dañar a los dispositivos detectores de luz, o para lograr determinadas condiciones de trabajo, puede ser necesario regular la intensidad del láser mediante instrumentos ópticos.

Con este fin, puede aprovecharse la propiedad de algunos láseres cuyo haz está *polarizado*.

##### *Polarización electromagnética:*

La luz es una onda electromagnética transversal compuesta por un campo eléctrico y un campo magnético, ortogonales entre sí, que oscilan perpendicularmente a la dirección de propagación.

Habitualmente se decide por convenio que para el estudio de la polarización electromagnética se atiende exclusivamente al campo eléctrico, ignorando el campo magnético, ya que el vector de campo magnético puede obtenerse a partir del vector de campo eléctrico, por ser perpendicular y proporcional al mismo.

En una onda electromagnética no polarizada, el vector de campo eléctrico oscila en direcciones aleatorias, siempre normales a la dirección de propagación.

En cambio, en una onda electromagnética polarizada, el vector de campo eléctrico oscila en direcciones determinadas, según las cuales existen tres tipos de polarización:

- Elíptica: La dirección de oscilación del vector de campo eléctrico describe una elipse en el plano perpendicular a la dirección de propagación.
- Circular: Caso particular del anterior, en el que la figura descripta es una circunferencia.
- Lineal: La dirección de oscilación se mantiene sobre una recta.

### *Filtro polarizador*

Un filtro polarizador o polarizador es un instrumento óptico formado por un material con *transmitancia* selectiva a una determinada dirección de oscilación del campo eléctrico de una onda electromagnética como la luz.

Cuando un haz de luz no polarizada atraviesa dicho material, la luz transmitida queda polarizada, como se muestra en la figura 11.

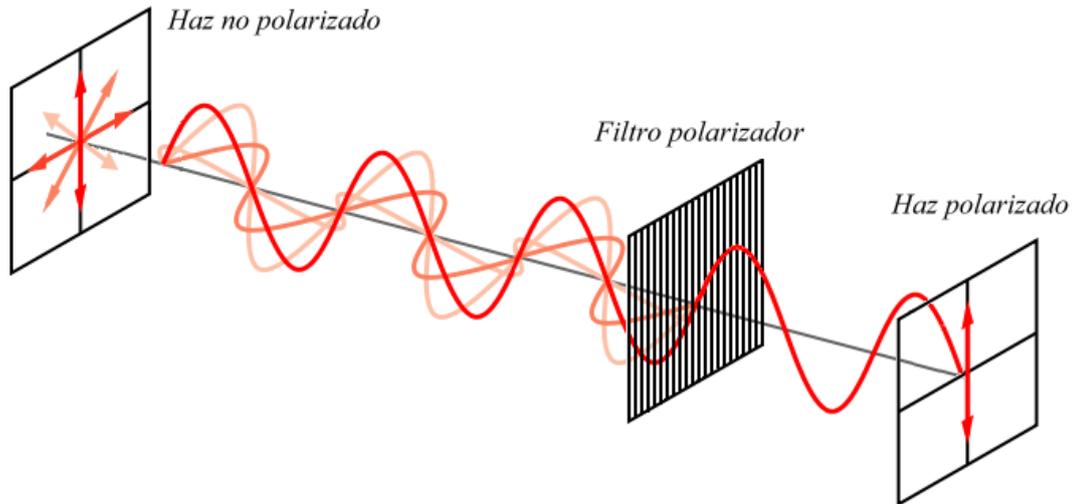


Figura 11: Efecto producido por un polarizador lineal

Un polarizador puede disminuir la intensidad de un haz de luz polarizado hasta, idealmente, bloquear su paso. En un polarizador lineal, la magnitud de dicha atenuación depende del ángulo entre el eje óptico del mismo y el de polarización del haz según la ley de Malus, que expresa lo siguiente para un polarizador ideal:

$$U = U_0 \cdot \cos^2 \alpha$$

Donde  $U_0$  indica la intensidad del haz incidente,  $U$  es la intensidad del haz atenuado, y  $\alpha$  es el ángulo mencionado.

Teniendo en cuenta que el láser disponible en el laboratorio está polarizado linealmente, se decidió implementar la regulación de su intensidad mediante la rotación de un polarizador ubicado en forma perpendicular al haz, como se muestra en la figura 12.

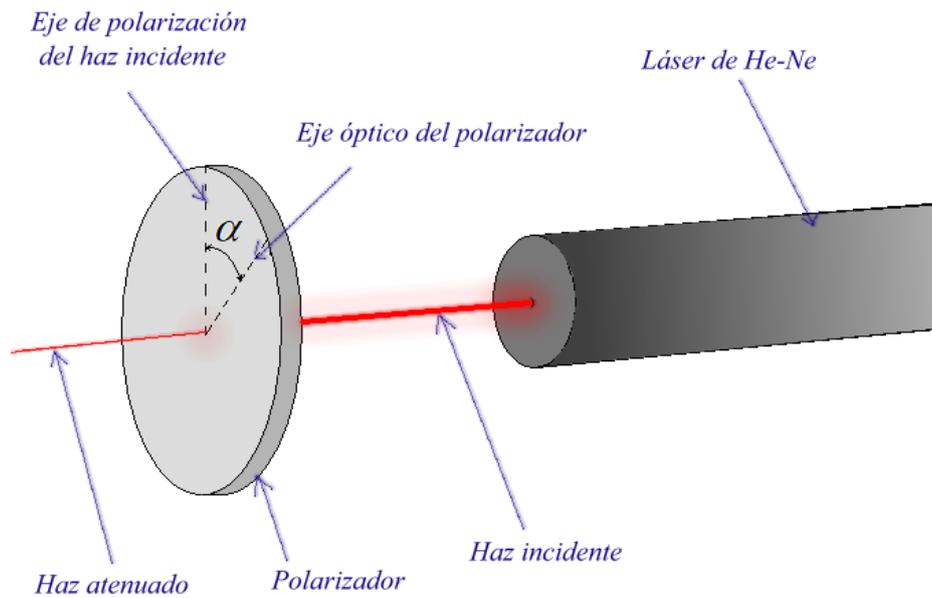


Figura 12: Regulación de la intensidad del haz

### 1.5. Modelo disponible en el laboratorio

En el laboratorio del SCL se encuentra disponible un láser de He-Ne con las siguientes especificaciones:

Modelo:	Melles Griot 05-LHP-991
Longitud de onda [nm] :	632.8
Potencia de salida [mW] :	10.00
Diámetro del haz [mm] :	$0.65 \pm 5\%$
Divergencia del haz [mRad] :	$1.24 \pm 5\%$
Voltaje de ignición [KVDC]	<10
Corriente de entrada [mA]:	$6,5 \pm 0.2$
Voltaje de operación [VDC]	$2640 \pm 100$
Longitud [mm]:	483,87
Diámetro [mm]:	44,45
Vida media [Horas]:	>20,000

Tabla 1: Características del láser disponible

## Capítulo 2. Detector de posición continuo (DPC)

### 2.1. Descripción general

Un DPC bidimensional consiste en un dispositivo similar a un fotodiodo común, pero que consta de 4 o 5 nodos, según sea del tipo Dúo-lateral o Tetra-lateral respectivamente. El material semiconductor intrínseco queda expuesto a la luz incidente. Esta genera pares electrón-hueco que son atraídos por los respectivos potenciales aplicados a los nodos. De esta manera se producen corrientes eléctricas cuyas magnitudes dependen de los siguientes factores:

1) De la intensidad del haz:

La cantidad de pares electrón-hueco generados es directamente proporcional a la cantidad de energía que incide en forma de luz, existiendo un valor límite luego del cual el dispositivo se satura.

2) De la distancia del *centroide* del haz respecto a los nodos:

Cuanto más cerca se encuentra de uno de los nodos, mayor es la corriente que circula por el mismo. Esto se debe a que al estar más cerca, los electrones no tienen tanto tiempo para recombinarse con los huecos antes de salir del dispositivo. Por el contrario, si el haz incide lejos de un nodo, menos electrones llegan a él. Cuando la posición del *centroide* coincide con el centro geométrico del detector, las corrientes son iguales.

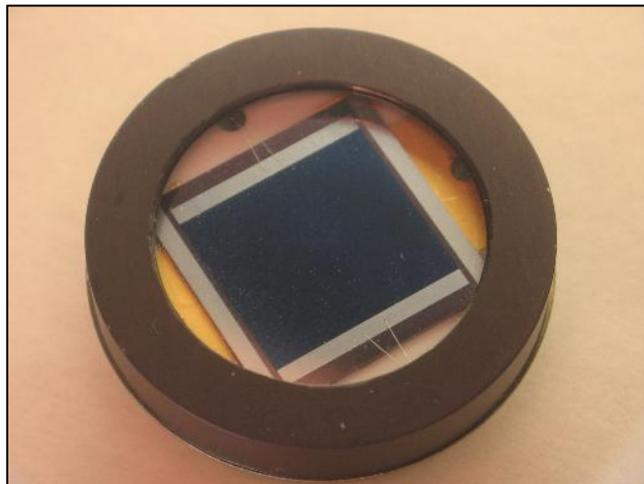


Ilustración 1: Detector de posición continuo bidimensional

## 2.2. Detectores del tipo Tetra-lateral y Dúo-lateral

- Tetra-lateral:

Este tipo de detector posee 5 nodos: uno común que cumple la función de ánodo, y otros 4 denominados cátodos.

La figura 13 muestra el esquema y un modelo formado por 4 diodos con el ánodo común que representan las junturas.

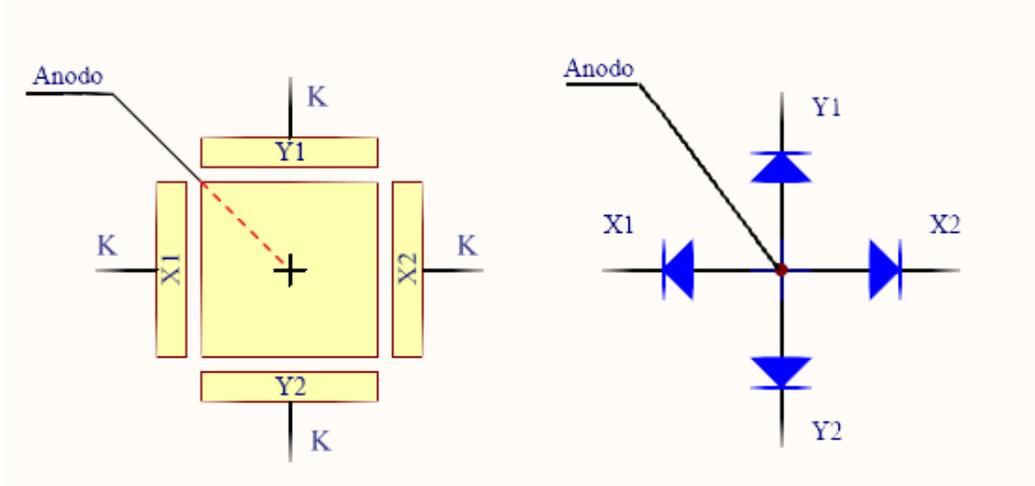


Figura 13: Modelo de un DPC Tetra-lateral

Para polarizarlo se aplica un potencial negativo al ánodo respecto a los cátodos, dejando a las junturas en polarización inversa, como se muestra en la figura 14. De esta manera, se generan cinco corrientes: cuatro ingresantes por los cátodos ( $I_d$ ) y una saliente por el ánodo ( $I_a$ ), que corresponde, aproximadamente, a la suma de las anteriores.

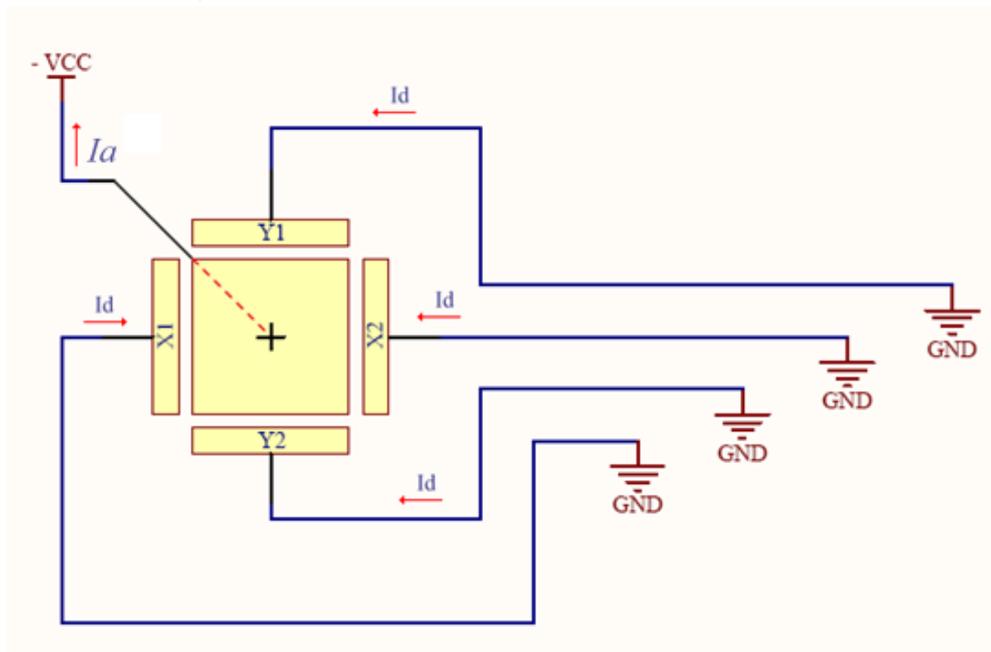


Figura 14: Polarización de un DPC Tetra-lateral

- Dúo-lateral:

A diferencia del anterior, éste detector posee 4 nodos. Dos de ellos offician de ánodos y los dos restantes de cátodos, dispuestos como se muestra en la figura 15 en la que además se incluye el modelo con diodos.

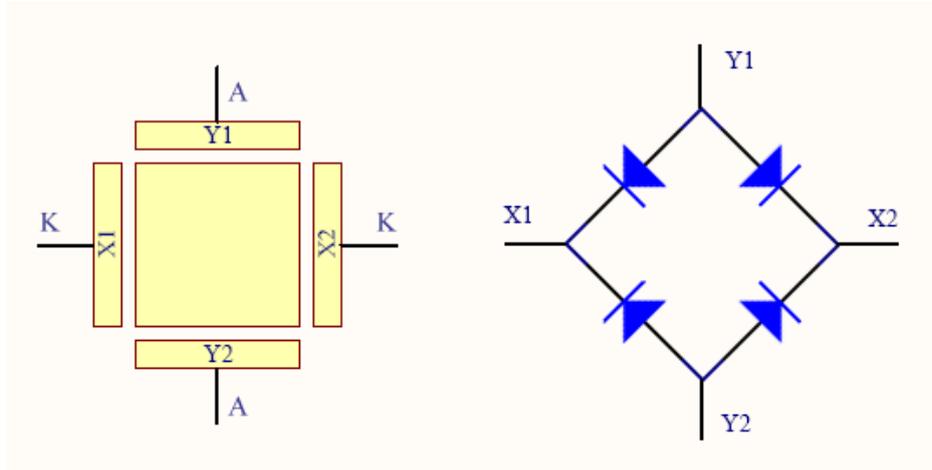


Figura 15: Modelo de un DPC Dúo-lateral

Para polarizar las junturas en inversa es necesario aplicar potenciales negativos y positivos a los ánodos y cátodos respectivamente. En este caso todos los nodos se encuentran sobre los laterales del detector y existen cuatro corrientes: dos entrantes y dos salientes (figura 16).

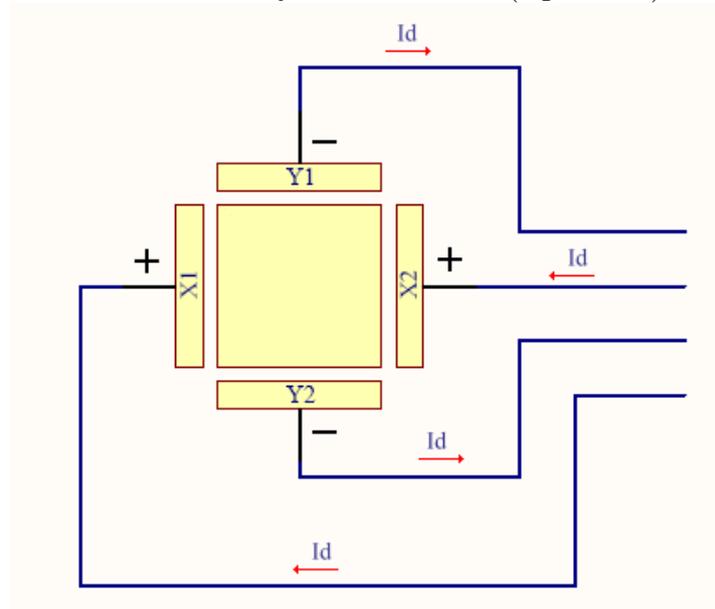


Figura 16: Polarización de un DPC Dúo-lateral

### *Observación:*

En ambos tipos de detector, la simetría de los potenciales aplicados a los nodos hace que las corrientes correspondientes a uno de los ejes sean, idealmente, independientes de las correspondientes al otro. Esto quiere decir que al desplazarse el *centroide* del haz en dirección paralela a uno de los ejes, las corrientes que circulan por los nodos correspondientes al otro eje se mantienen aproximadamente invariantes.

### 2.3. Características principales de un DPC

- **Responsividad:** Es la relación entre la intensidad de corriente que se genera y la potencia incidente, por lo tanto tiene unidades de A/W.
- **Área activa.**
- **Dimensiones.**
- **Resolución:** Menor cambio en la posición que es posible detectar.
- **Máxima densidad de potencia:** Potencia incidente por unidad de área que el fabricante recomienda para el óptimo funcionamiento del dispositivo.
- **V<sub>Bias</sub>:** Tensión de polarización.
- **Corriente oscura:** Corriente generada cuando no incide luz de ningún tipo. Esta corriente se debe a la agitación térmica de los materiales que componen al dispositivo, por el hecho de no encontrarse a 0° K.
- **Respuesta espectral:** Muestra la variación de la *responsividad* en función de la longitud de onda del haz incidente.

### Condiciones óptimas de trabajo

Se definen en función de la densidad de potencia que incide sobre la superficie activa del detector. Las hojas de datos especifican un valor máximo para esta densidad que asegura un funcionamiento óptimo. Cuando se excede dicho valor, una gran cantidad de energía se concentra en un área pequeña, pudiendo perderse linealidad en la respuesta, e incluso dañar al dispositivo.

En el presente trabajo se buscará siempre utilizar los detectores en las condiciones óptimas, regulando la intensidad del haz incidente como se describe en el Capítulo 1.

### Características de los DPC disponibles en el laboratorio

- Modelo: SC-10D – Tetra-lateral

*Responsividad:*

- mínima 0,35 A/W
- típica 0,42 A/W

Área activa: 103 mm<sup>2</sup>

Dimensiones: 10,16 x 10,16 mm

Máxima densidad de potencia: 10 mW/cm<sup>2</sup>

Resolución: 0,00254 mm

V<sub>Bias</sub>: hasta -15 V

Corriente oscura:

- típica 0,025 μA
- máxima 0,250 μA

Respuesta espectral:

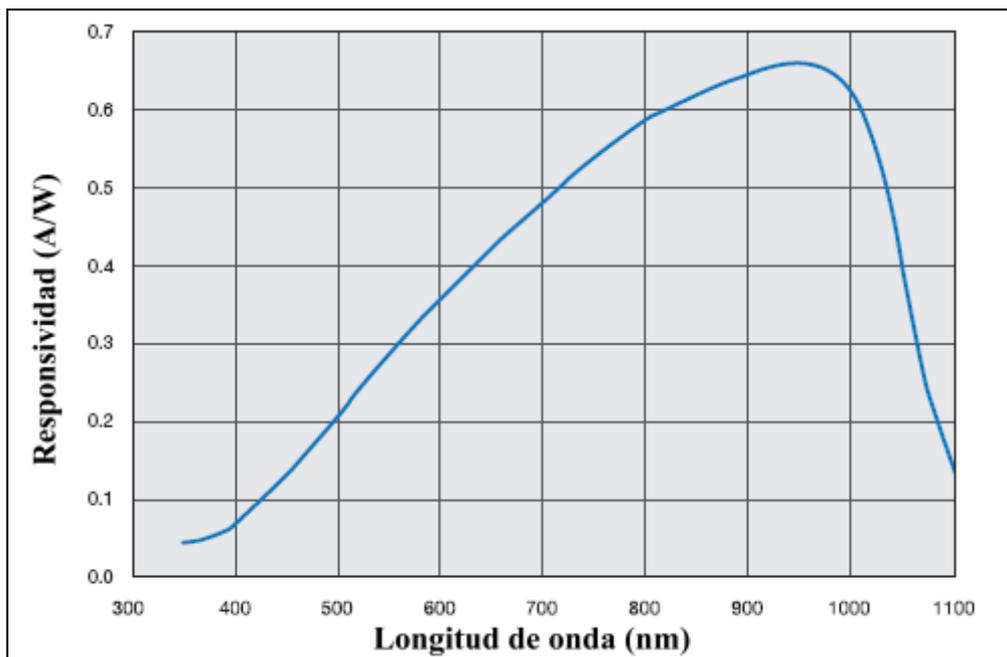


Figura 17: Respuesta espectral típica del modelo SC-10D

- Modelo: DL-10 – Dúo-lateral

*Responsividad:*

- mínima 0,3 A/W
- típica 0,4 A/W

Área activa: 100 mm<sup>2</sup>

Dimensiones: 10 x 10 mm

Máxima densidad de potencia: 1 mW/cm<sup>2</sup>

Resolución: 0,00254 mm

V<sub>Bias</sub>: -5 V

Corriente oscura:

- típica 500 nA
- máxima 5000 nA

Respuesta espectral:

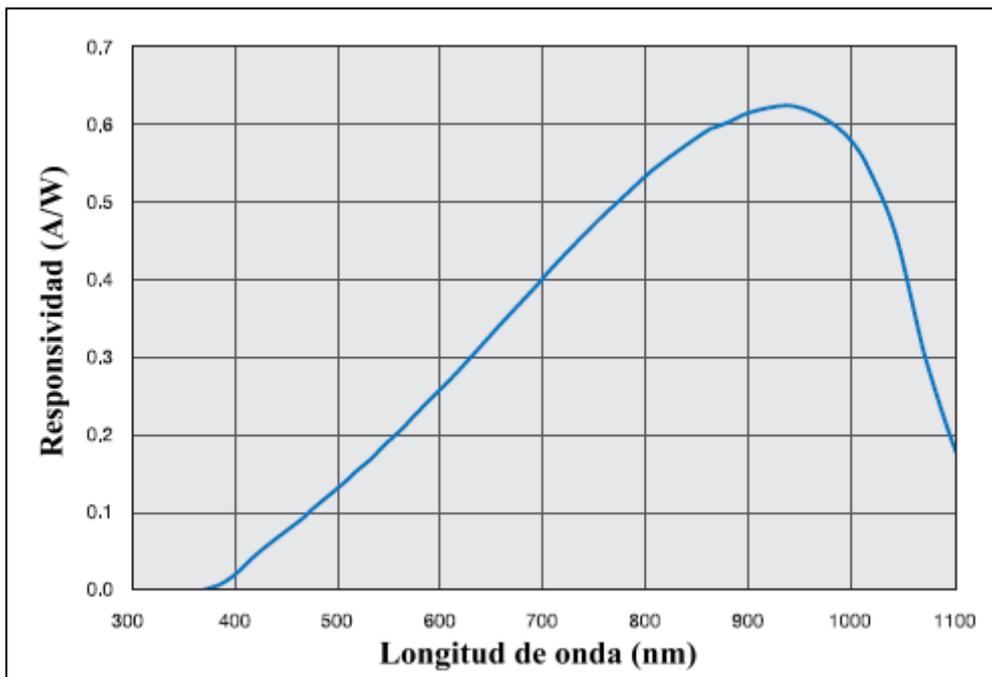


Figura 18: Respuesta espectral típica del modelo DL-10

## 2.4. Obtención de las coordenadas del *centroide* del haz incidente sobre un DPC

En la figura 19 se muestra un DPC y se indican sus cuatro nodos de salida.

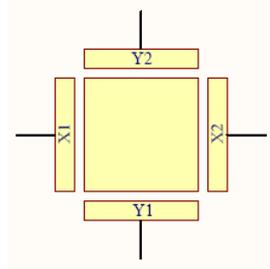


Figura 19

Al incidir el haz de luz láser sobre la superficie activa, estos nodos entregan corrientes cuyos valores están relacionados con las coordenadas XY del *centroide* del mismo, respecto al centro geométrico del detector. Las corrientes, denominadas  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $Y_1$  e  $Y_2$ , varían en función de la proximidad del haz a los bordes del detector de forma exponencial. La figura 20 muestra cualitativamente la variación de las corrientes  $X_1$  y  $X_2$ .

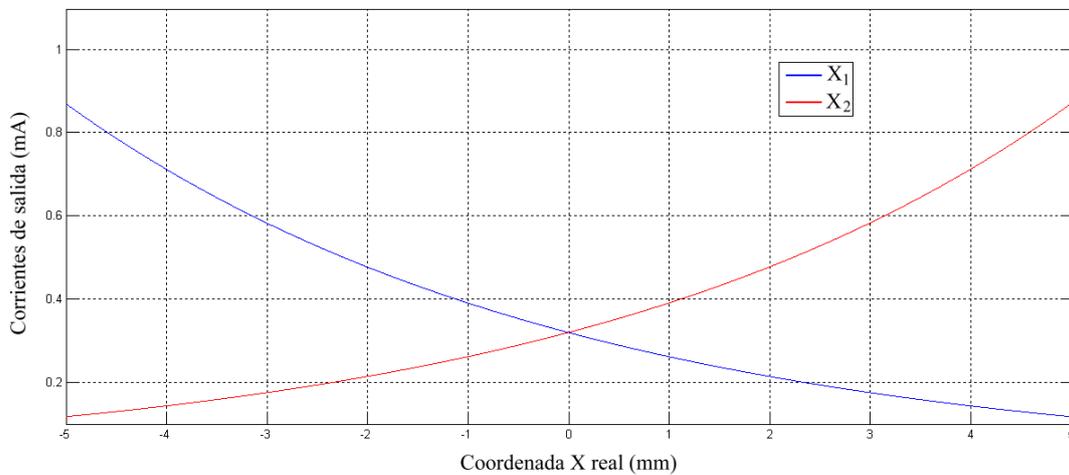


Figura 20

Para determinar las coordenadas del *centroide* del haz se aplica el siguiente algoritmo:

$$X_u = \frac{(X_2 - X_1)}{(X_2 + X_1)}$$

$$Y_u = \frac{(Y_2 - Y_1)}{(Y_2 + Y_1)}$$

De esta manera se logra independizar las coordenadas obtenidas de la intensidad de la luz, ya que ésta afecta a todas las corrientes por igual.

El subíndice  $u$  indica que los resultados están normalizados y varían entre  $\pm 1$  (coordenadas unitarias).

Las coordenadas que se obtienen siguen la forma de una tangente hiperbólica, que puede aproximarse a una recta en la zona central del detector, aumentando la alinealidad en las cercanías de los bordes. Es por esta razón que el fabricante asegura una alinealidad menor al 10% en el 75% del rango. En la figura 21 se muestra el resultado de aplicar el algoritmo a las corrientes  $X_1$  y  $X_2$ .

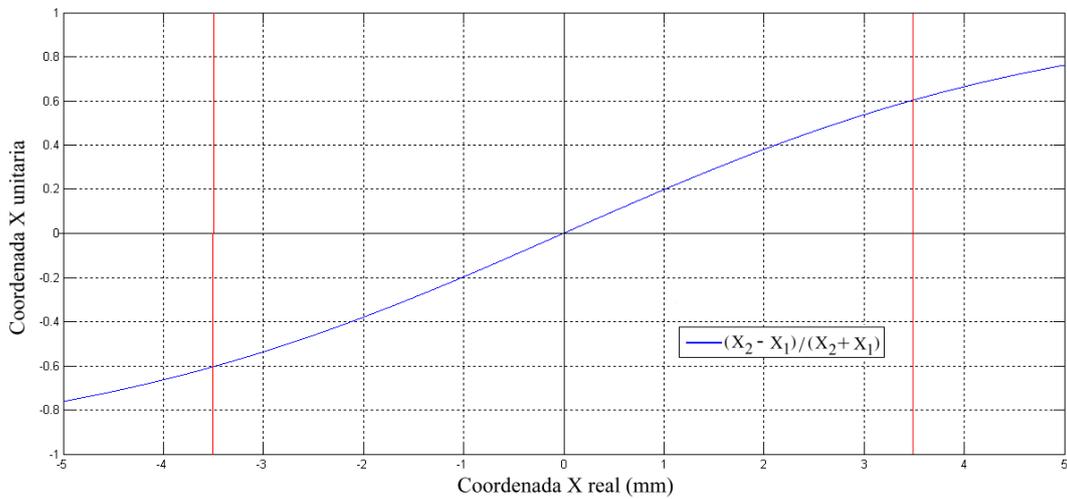


Figura 21

La zona comprendida entre las líneas rojas verticales es la parte del rango donde la función se considera lineal, según las especificaciones que brinda el fabricante.

Las curvas correspondientes al eje Y son análogas a las anteriores.

## Capítulo 3.

### Placa adquiridora de datos NI-USB6009

En éste capítulo se presenta la placa adquiridora NI-USB6009 de National Instruments disponible en el laboratorio y elegida para realizar la actualización del SAR. Primero se indican sus características principales, relevantes al problema en cuestión y luego se describen los ensayos que permitieron verificar algunas de sus especificaciones.

#### 3.1. Descripción general

Se trata de un dispositivo de bajo costo apto para la adquisición de datos, que se comunica con la PC a través del puerto USB. A continuación se describen los aspectos más importantes de la placa, mientras que el Anexo IV se encuentran las hojas de datos completas.



Ilustración 2: Placa adquiridora NI-USB6009

El siguiente software se incluye junto con el dispositivo:

- NI-DAQmx driver software
- Measurement & Automation Explorer configuration utility
- LabVIEW Signal Express LE

La empresa desarrolladora National Instruments recomienda utilizar los siguientes programas para el manejo de la placa:

- LabVIEW
- LabVIEW Signal Express
- LabWindows™ /CVI
- Measurement Studio

El entorno de programación LabVIEW se utilizó en el presente trabajo para desarrollar tanto programas auxiliares que permitieron llevar a cabo algunos ensayos, como el programa de aplicación del SODP. En el Anexo I se encuentra una descripción de dicho entorno.

### *Características principales:*

- 8 entradas analógicas, de 14 bits y 48 kS/s. Modos *Differential* (Diferencial) y *Single-ended* (Terminación simple).
- 2 salidas analógicas de 12 bits.
- 12 líneas de entrada/salida digitales.
- Contador de 32 bits, 5 MHz.
- Trigger digital.
- Alimentación a través del puerto USB.

## **3.2. Entradas analógicas**

### *i. Especificaciones afines:*

- Exactitud absoluta: 14,7 mV (valor típico) en el modo *Single-ended*, rango de  $\pm 10$  V.
- Tipo de *conversor*: De aproximaciones sucesivas.
- Cantidad: 8 en modo *Single-ended* o 4 en modo *Differential*.  
Seleccionables por software.
- Resolución: 14 bits en modo *Differential* y 13 bits en modo *Single-ended*.
- Máxima velocidad de muestreo: 48 kS/s al trabajar con un único canal. 42 kS/s al trabajar con múltiples canales.
- Buffer de entrada: FIFO (First-In-First-Out) de 512 Bytes.
- Timing resolution (Resolución temporal): 41,67 ns
- Timing Accuracy (Exactitud temporal): 100 ppm de la frecuencia de muestreo
- Rango de tensión:
  - Modo *Single-ended*:  $\pm 10$  V
  - Modo *Differential*:  $\pm 20$  V,  $\pm 10$  V,  $\pm 5$  V,  $\pm 4$  V,  $\pm 2,5$  V,  $\pm 2$  V,  $\pm 1,25$  V,  $\pm 1$  V
- Working Voltage (Tensión de trabajo):  $\pm 10$  V
- Impedancia de entrada: 144 k $\Omega$
- Protección contra sobretensión:  $\pm 35$  V

*ii. Terminales de entrada*

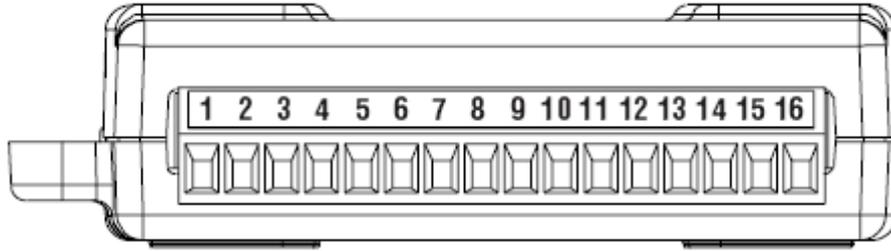


Figura 22: Puerto analógico de la placa

La figura 22 es una vista lateral de la placa, donde se observa el puerto analógico. En la tabla 2 se muestra la asignación de los terminales de entrada del dispositivo.

Terminal	Modo <i>Single-ended</i>	Modo <i>Differential</i>
1	GND	GND
2	AI 0	AI 0 +
3	AI 4	AI 0 -
4	GND	GND
5	AI 1	AI 1 +
6	AI 5	AI 1 -
7	GND	GND
8	AI 2	AI 2 +
9	AI 6	AI 2 -
10	GND	GND
11	AI 3	AI 3 +
12	AI 7	AI 3 -
13	GND	GND
14	AO 0	AO 0
15	AO 1	AO 0
16	GND	GND

Tabla 2

*AI: Analog Input (Entrada analógica)*

*AO: Analog Output (Salida analógica)*

*GND: Ground (Tierra)*

### iii. Circuito de entrada analógica

La figura 23 muestra los bloques que componen al circuito de entrada:

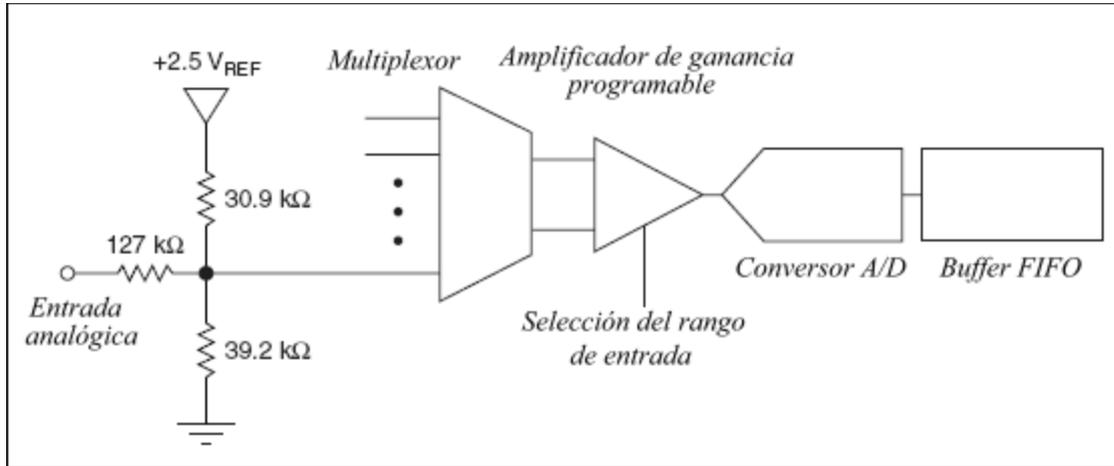


Figura 23

Un multiplexor a la entrada selecciona un canal a la vez para realizar una conversión. Luego, un amplificador de ganancia programable provee ganancias de 1, 2, 4, 5, 8, 10, 16 o 20 en el modo *Differential*, y ganancia de 1 para el modo *Single-ended*. Esta ganancia se calcula automáticamente según el rango de voltaje seleccionado en la aplicación.

El *convertor* Analógico/Digital de aproximaciones sucesivas digitaliza la señal analógica de tensión, convirtiéndola en un código digital de 14 bits en modo *Differential*, y de 13 bits en modo *Single-ended*.

La placa puede adquirir señales de un único canal o de múltiples canales. Para asegurar que no se pierdan datos durante la adquisición, se almacenan en un *buffer* FIFO de 512 Bytes.

#### *iv. Modos de conexión de las entradas*

##### *Modo Differential:*

Se utiliza para adquirir señales diferenciales, que son aquellas que se miden entre dos nodos, independientemente de sus valores respecto a tierra. La figura 24 muestra la conexión de una señal de este tipo.

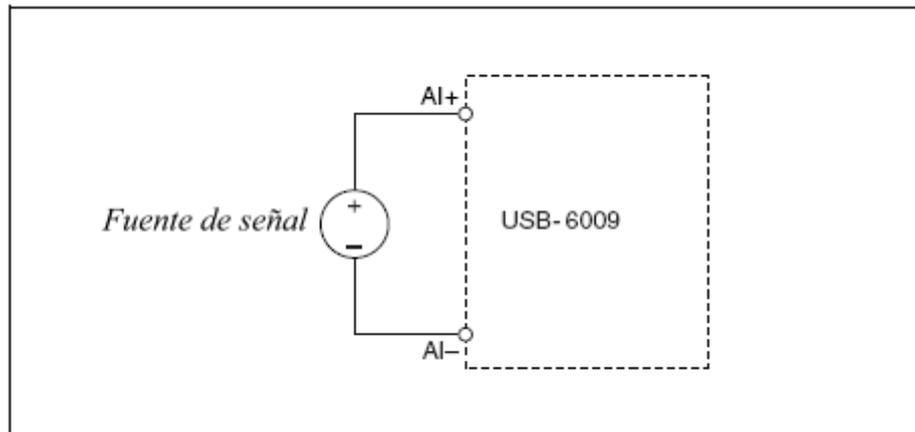


Figura 24: Conexión de una señal diferencial

##### *Modo Single-ended:*

Se utiliza para adquirir señales de terminación simple, que son aquellas cuyo uno de sus nodos está vinculado a tierra. La figura 25 muestra la conexión de una señal de este tipo.

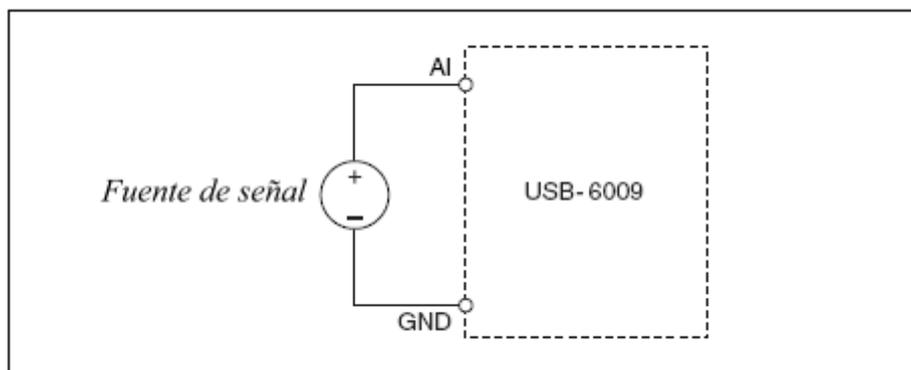


Figura 25: Conexión de una señal de terminación simple

### 3.3. Pruebas

#### 3.3.1. Caracterización del dispositivo

##### *Objetivos generales:*

- Verificar que la tensión de saturación de entrada del dispositivo se encuentra por encima del valor nominal del rango con un margen aceptable.
- Verificar que el tiempo entre muestras para la máxima frecuencia de muestreo se corresponda con el especificado en las hojas de datos.
- Verificar que el dispositivo tenga la capacidad necesaria para adquirir señales en las condiciones más exigentes.

##### *Procedimiento general:*

En el entorno de programación LabVIEW, se desarrolló un programa llamado “Voltímetro.vi” que utiliza la placa para adquirir señales de tensión aplicadas a sus entradas analógicas. El programa permite seleccionar el o los canales, la frecuencia de muestreo y el número de muestras a tomar.

Una vez adquiridas, las muestras son presentadas gráficamente en pantalla y opcionalmente pueden ser almacenadas en un archivo con extensión *lvm* para su posterior procesamiento. En el Anexo II se encuentra el código del programa.

Para aplicar las señales a la entrada se utilizó un generador de funciones Goldstar FG-8002 y, para hacer las verificaciones correspondientes, se observaron simultáneamente en un osciloscopio Hewlett Packard 54600B.

##### *a) Determinación del nivel de saturación*

Se aplicó una señal sinusoidal al canal ai0 aumentando su amplitud hasta observar en pantalla el recorte producido por la saturación que predican las hojas de datos del dispositivo.

Es necesario aclarar que, debido a que el generador de señales utilizado no provee amplitudes suficientemente grandes como para alcanzar el nivel de saturación, se agregó una tensión continua de *offset* a la señal, obligando a realizar el ensayo en dos instancias: una para determinar el límite positivo, y otra para el límite negativo.

**Resultados:**

Las siguientes figuras muestran claramente el recorte que se produce en una señal sinusoidal cuya amplitud excede el rango de entrada ( $\pm 10$  V). En la figura 26 se observa el nivel de saturación positivo y en la figura 27 el negativo.

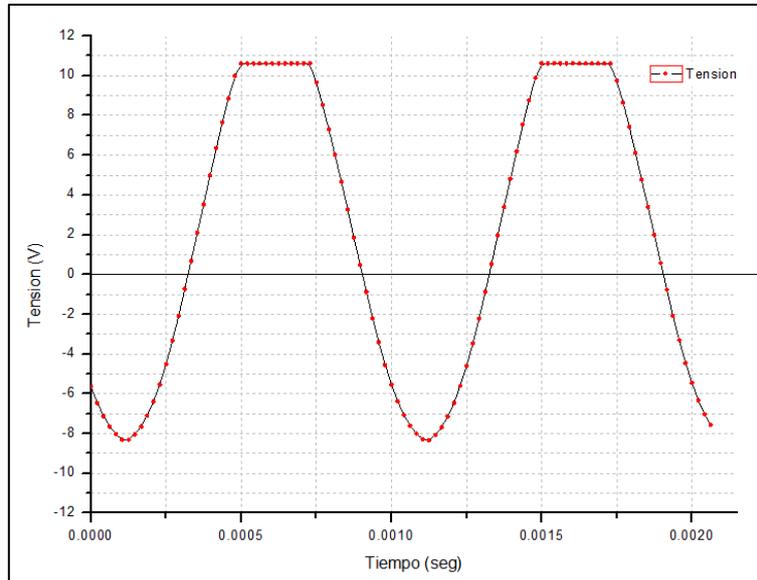


Figura 26

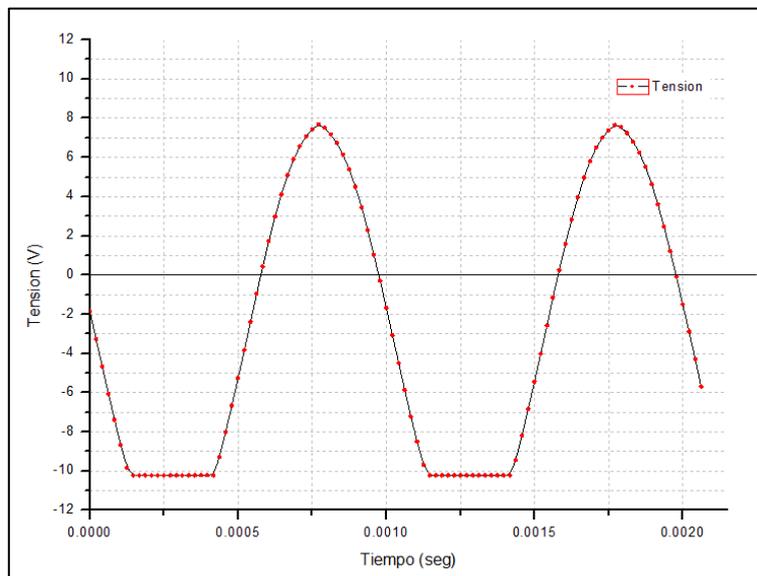


Figura 27

En los archivos generados con cada medición, se encontraron las siguientes indicaciones del dispositivo al superarse el rango de entrada:

- Tensión de saturación positiva: 10,613 V
- Tensión de saturación negativa: -10,221 V

**Observación:**

En el peor de los casos, la tensión de saturación de la entrada del dispositivo se encuentra un 2,21% por encima de la tensión nominal que especifica el rango de entrada.

**b) Verificación del tiempo entre muestras**

En las hojas de datos de la placa, se especifica una velocidad de muestreo máxima de 48000 Muestras/s. El tiempo entre muestras correspondiente a dicha velocidad es de 20,833  $\mu$ s, valor que se verificó procediendo de la siguiente manera:

- Se registró una señal sinusoidal de amplitud cercana a los 10 V y frecuencia 1 kHz, de manera que la cantidad de muestras por período obtenidas a la máxima velocidad de muestreo permitiera reconstruirla. Se configuró el programa de adquisición para tomar muestras a dicha velocidad y almacenarlas en un archivo para luego tener acceso a ellas.
- Se midió el período de la señal en el osciloscopio ( $T_{osc}$ ).
- Llamando  $T_{adq}$  al período de la señal muestreada, el tiempo entre muestras se obtuvo dividiendo  $T_{osc}$  por el número de muestras obtenidas en  $T_{adq}$ , como indica la siguiente ecuación y se muestra gráficamente en la figura 28.

$$Tiempo\ entre\ muestras = \frac{T_{osc}}{N^{\circ}\ de\ muestras/T_{adq}}$$

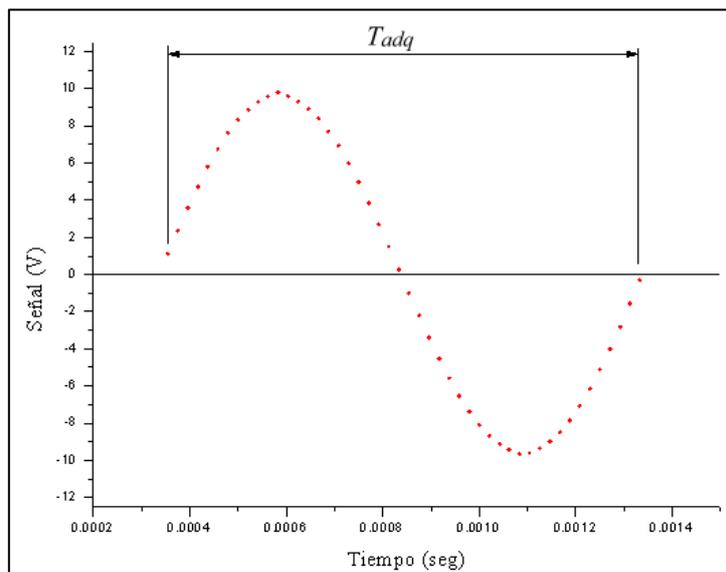


Figura 28

**Resultados:**

Nº de muestras	T <sub>osc</sub> [ms]	Tiempo entre muestras [µs]
48± 1	1,000± 0,001	20,833± 0,455

Tabla 3

**Observación:**

El tiempo entre muestras determinado experimentalmente coincide con el valor teórico con una incertidumbre del 2,18%. Este resultado es aceptable teniendo en cuenta el método que se utilizó para obtenerlo.

**c) Verificación del slew rate****Objetivo:**

Al adquirir señales desde más de un canal, el multiplexor de entrada de la placa intercala muestras de uno y otro. Si en dos canales sucesivos se encuentran aplicadas señales de valores extremos y polaridades opuestas, puede suceder que el *convertor* A/D<sup>1</sup> no sea capaz de adquirirlas correctamente e indique valores inferiores, distorsionándolas. La característica que determina dicha capacidad se denomina *slew rate*.

El objetivo de este ensayo es verificar que el *slew rate* del dispositivo le permite adquirir alternadamente una señal de máximo valor positivo y una de máximo valor negativo en el menor tiempo posible, es decir a la máxima velocidad, sin distorsionarlas significativamente.

**Procedimiento:**

Se seleccionaron los canales ai0 y ai4 de la placa y se utilizó una versión modificada del programa de adquisición, llamada “Voltímetro 2.vi”, que muestra en un único gráfico las señales de los dos canales, además de indicar sus valores medios. En el Anexo II se encuentra el código en LabVIEW de dicho programa.

El ensayo se realizó en dos instancias: una en condiciones de requerimiento nulo de *slew rate*, y otra con requerimiento máximo. En ambas se aplicaron tensiones continuas, de nivel cercano al máximo y polaridades opuestas en los dos canales, y se realizó la adquisición de 100 muestras de cada una a la máxima velocidad posible. Las diferencias entre los dos casos se describen a continuación.

<sup>1</sup> Para ver el diagrama de bloques del circuito de entradas analógicas, remitirse a la figura 23.

- 1) **Adquisición separada:** Primero se registraron todas las muestras del canal ai0 y luego todas las del canal ai4. En éstas condiciones, el *slew rate* requerido es nulo ya que la tensión presente en la entrada del *convertor* A/D no cambia durante la adquisición de las 100 muestras.
- 2) **Adquisición alternada:** Se tomaron las muestras alternando entre uno y otro canal. De ésta manera, la tensión presente a la entrada del *convertor* A/D cambia entre la máxima positiva y la máxima negativa cada vez que el multiplexor conmuta entre canales, requiriendo el máximo *slew rate* del dispositivo.

Se calculó el valor medio de la tensión medida en cada canal en ambos casos para realizar una comparación. A continuación se muestran los resultados.

### Resultados:

En la figura 29 se presentan algunas de las muestras obtenidas de manera alternada de ambos canales, en función del tiempo.

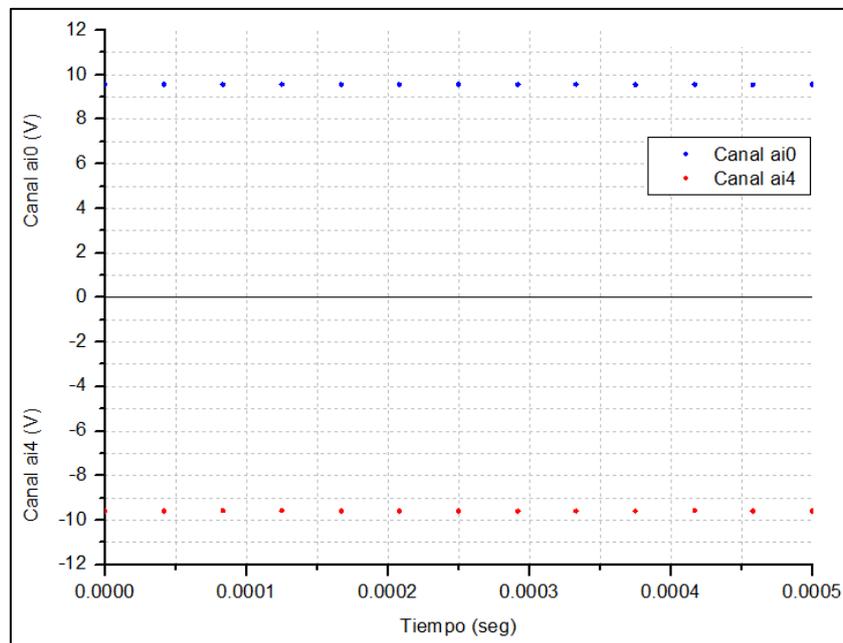


Figura 29

En la tabla 4 se resumen los resultados obtenidos con las muestras de cada canal.

Canal	Adquisición [V]	
	Separada	Alternada
ai0	$9,582 \pm 0,006$	$9,565 \pm 0,004$
ai4	$-9,596 \pm 0,005$	$-9,592 \pm 0,004$

Tabla 4

### *Observación:*

Los valores medios de las tensiones adquiridas de manera alternada son ligeramente menores a los obtenidos cuando la adquisición se hace en forma separada. Esta diferencia no se debe solamente al *slew rate* del dispositivo. Existen otros factores que también influyen en las mediciones, por ejemplo las fluctuaciones del generador de tensión utilizado entre una y otra instancia. Sin embargo, los apartamientos son del orden del 0,2% para el canal ai0 y del 0,05% para el canal ai4, valores considerados aceptables, teniendo en cuenta la estabilidad de la fuente de señal que empleará el sistema (cambios menores al 2%, como se explica en el Capítulo 6)

### *Conclusiones de la caracterización:*

- Existe un margen de seguridad aceptable entre la tensión nominal y la de saturación, a la entrada del dispositivo.
- Cumple con el tiempo entre muestras especificado en las hojas de datos.
- Tiene el *slew rate* suficiente para adquirir señales en las condiciones más exigentes de manera aceptable.

### 3.3.2. Contraste con un instrumento patrón

Con el objetivo de comparar el funcionamiento del dispositivo con el de un instrumento conocido y confiable, se realizó el registro simultáneo de una señal sinusoidal con ambos y se contrastaron los datos obtenidos.

Se tomó como instrumento patrón al osciloscopio Hewlett Packard 54600B disponible en el laboratorio, y se utilizó el canal ai0 de la placa adquiridora, seleccionando el número de muestras a tomar de manera que pudiera observarse con claridad un período completo de la señal aplicada.

En tres instancias, se emplearon distintas amplitudes de la señal de entrada: una aproximada a la nominal del rango y las dos restantes dentro del mismo. La frecuencia de la señal, en cambio, se mantuvo igual para los tres casos.

Para realizar el contraste se obtuvo en cada caso la función sinusoidal que mejor ajusta las muestras adquiridas y se compararon sus parámetros con los observados en el osciloscopio.

#### *Resultados:*

Los gráficos de las figuras 30, 31 y 32 representan las muestras obtenidas al adquirir las señales antes mencionadas. En la figura 30 se observa la señal de amplitud máxima (señal 1), en la figura 31 una de amplitud intermedia (señal 2), y en la figura 32 una de pequeña amplitud (señal 3).

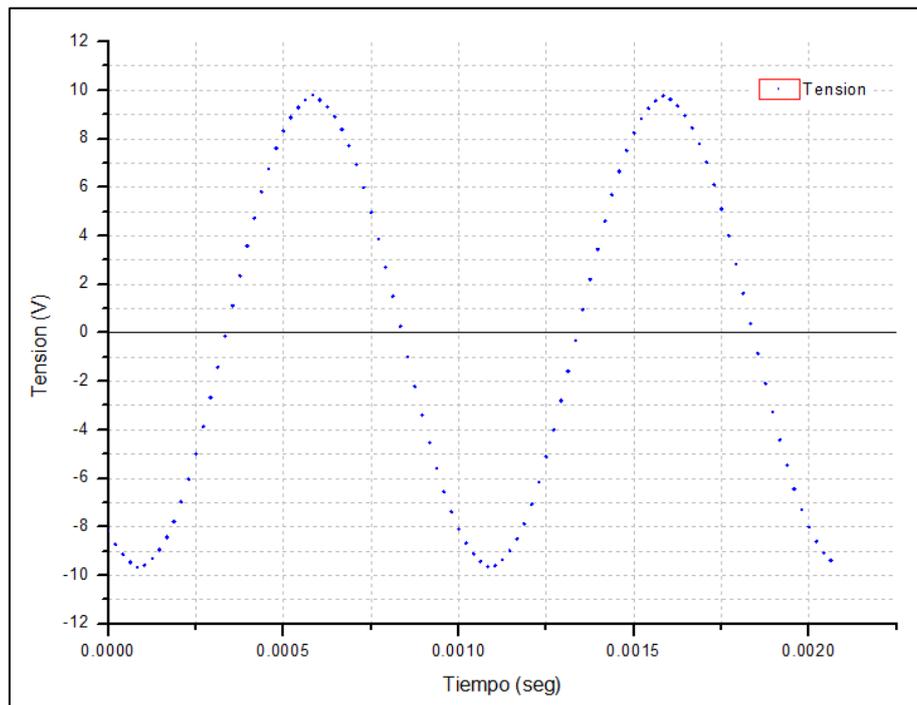


Figura 30: Señal 1

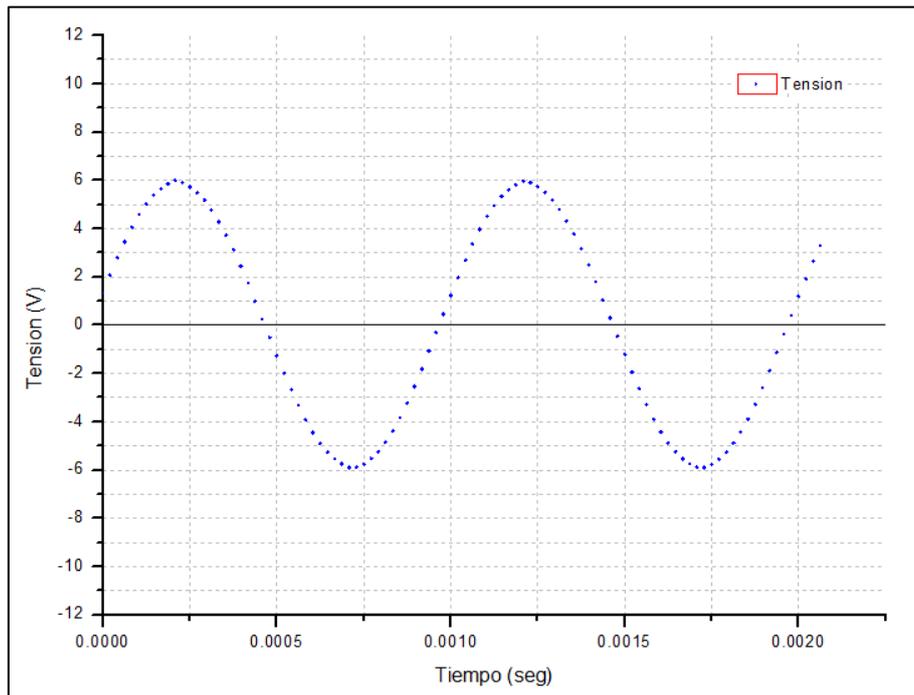


Figura 31: Señal 2

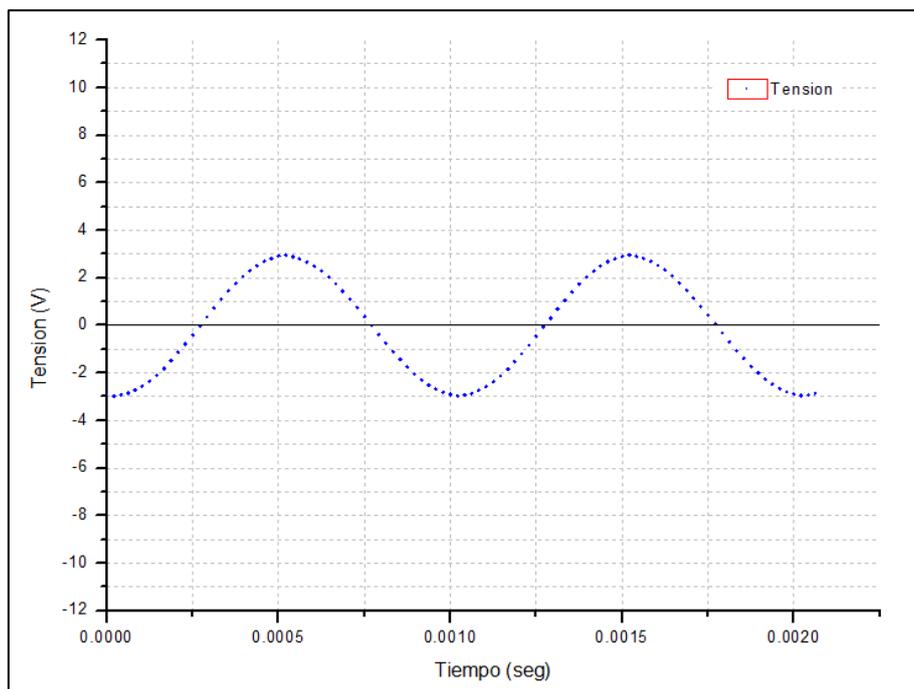


Figura 32: Señal 3

**Contraste:**

Para cada caso, la curva de ajuste<sup>2</sup> obtenida responde a la siguiente ecuación:

$$y(t) = y_0 + A \cdot \sin\left(\frac{2\pi t}{T} + \varphi\right)$$

Donde la amplitud A [V] y el período T [ms] son los parámetros de interés.

En la tabla 5 se comparan dichos parámetros con los medidos en el osciloscopio en cada caso.

	A [V]		T [ms]	
	Osciloscopio	Ajuste	Osciloscopio	Ajuste
señal 1	9,844± 0,156	9,622± 0,009	1,000± 0,001	1,0021± 0,0003
señal 2	6,000± 0,062	5,881± 0,005	1,003± 0,002	1,0023± 0,0002
señal 3	3,000± 0,031	2,922± 0,003	1,002± 0,002	1,0027± 0,0002

Tabla 5

**Conclusión:**

Dentro del rango de tensiones de trabajo, la amplitud de la señal ajustada difiere en menos del 3% de la observada en el osciloscopio, mientras que el período se aparta menos del 0,2%. En base a estos resultados, se concluye que las indicaciones del dispositivo en estudio son confiables y aceptables para el proyecto.

<sup>2</sup> Por razones de claridad, las curvas de ajuste no se graficaron.

## Capítulo 4.

### Circuito de acondicionamiento de señal

Se utiliza para adaptar las señales de corriente provenientes de los DPC a las entradas del dispositivo adquiridor de datos descrito en el Capítulo 3. Para ello es necesario convertirlas en señales de tensión con un nivel adecuado para ocupar la mayor parte del rango de entrada del dispositivo y obtener así una mayor resolución.

A continuación se repite el diagrama de bloques del sistema completo, destacando el que se presenta en este capítulo.

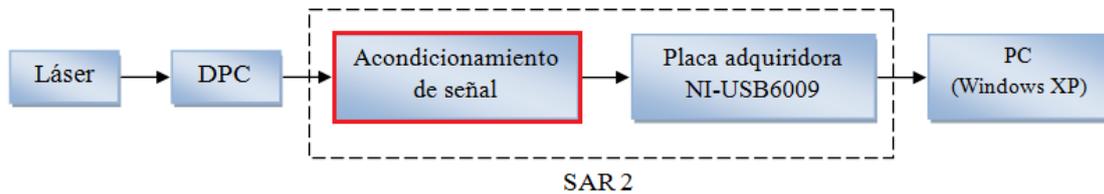


Figura 33

#### 4.1. Conversión de corriente a tensión. Amplificador de trans-impedancia.

En la figura 34 se muestra un amplificador operacional (AO) configurado como amplificador de trans-impedancia, de manera que la corriente de entrada se transforme en una tensión de salida mediante una impedancia en el lazo de realimentación.

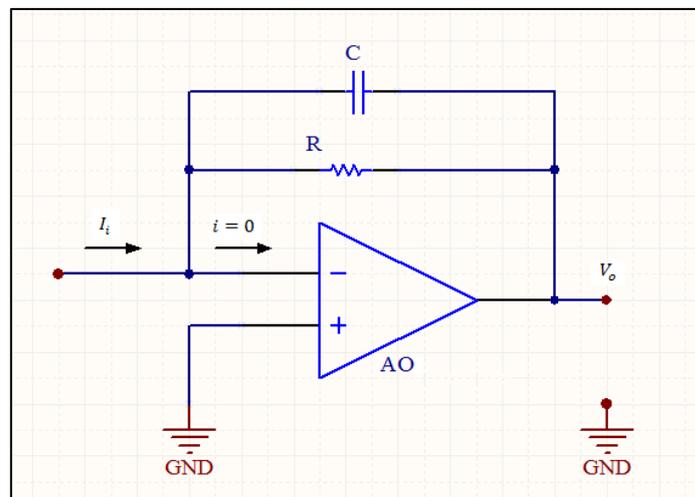


Figura 34

**Función de transferencia:**

Se configura un AO para establecer una “tierra virtual” en su entrada negativa y de esta forma polarizar la juntura del DPC, conectada a dicha entrada, con tensión constante. Debido a la alta impedancia de entrada del AO, la corriente  $I_i$  proveniente del detector se deriva al lazo de realimentación del circuito, provocando una tensión  $V_o$  proporcional a la misma.

En el dominio de Laplace

$$V_o(s) = -I_i(s) \cdot \frac{R \cdot \frac{1}{sC}}{R + \frac{1}{sC}} \rightarrow \frac{-V_o(s)}{I_i(s)} = \frac{R}{1 + sCR}$$

$$s = j2\pi f \rightarrow \frac{-V_o}{I_i} = \frac{R}{1 + j2\pi fCR}$$

El capacitor C en el lazo de realimentación actúa como un filtro que limita el ancho de banda, para no amplificar el ruido de altas frecuencias. A continuación, en la figura 35, se muestra un diagrama de Bode donde puede observarse el efecto de aumentar el valor de C.

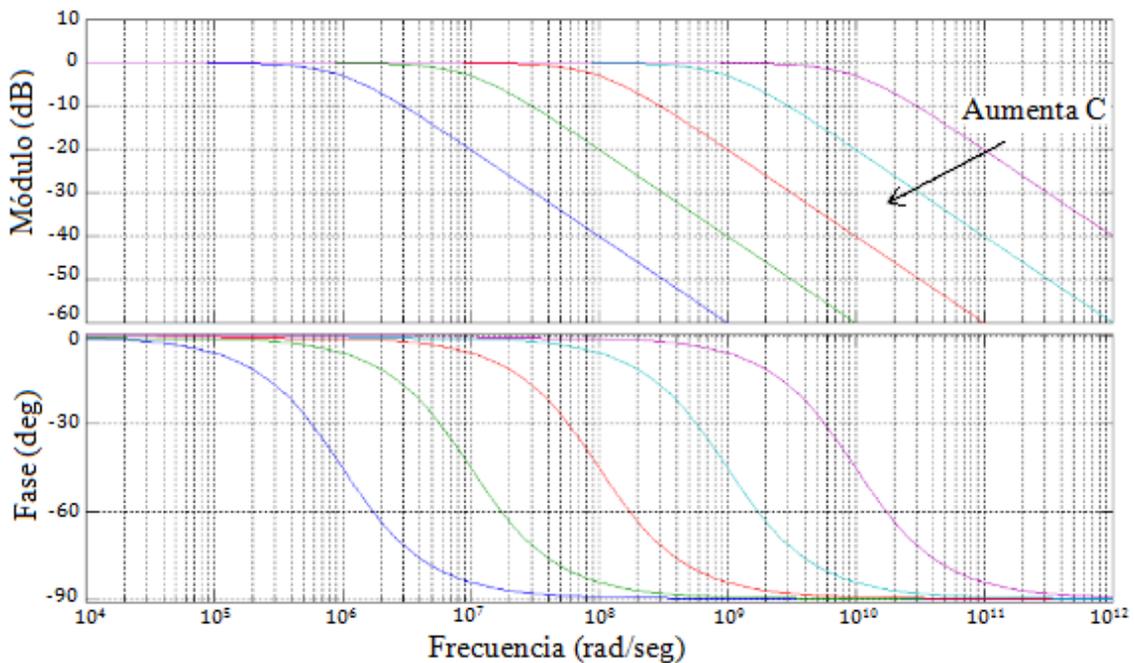


Figura 35: Diagrama de Bode – Parámetro C

## 4.2. Etapas de diseño

El circuito de acondicionamiento de señal consiste básicamente en un amplificador de trans-impedancia para cada canal de los DPC. Para diseñarlo es necesario tener en cuenta cómo son las señales de entrada y qué requisitos deben cumplir las señales de salida. En base a éstas características, se seleccionaron los componentes más adecuados y se implementó un circuito que permite utilizar alternativamente detectores Dúo-lateral y Tetra-lateral.

### 4.2.1. Requisitos. Señales de entrada y de salida

Las señales de entrada provienen de dos DPC con cuatro canales cada uno y tienen las siguientes características:

- Son señales de corriente que guardan una relación con la intensidad del haz de luz láser y su posición sobre el detector.
- Valor máximo esperado: La corriente máxima que circulará por cada canal será de 64  $\mu\text{A}$  idealmente. Los ensayos que permitieron determinar dicho valor se encuentran en el Anexo III.
- Frecuencia máxima: Está limitada a 10 kHz por el ancho de banda de los detectores.
- Mínima variación apreciable:

Es el mínimo cambio apreciable en la señal de entrada y puede estimarse utilizando los siguientes datos del detector:

- Resolución: 2,5  $\mu\text{m}$ .
- Rango útil: aproximadamente 8000  $\mu\text{m}$ .

$$\rightarrow \frac{2,5 \mu\text{m}}{8000 \mu\text{m}} \times 64 \mu\text{A} = 0,02 \mu\text{A}$$

Las señales de salida del circuito deben estar acondicionadas para conectarse a las entradas de la placa NI-USB6009, cumpliendo los siguientes requisitos:

- Deben ser señales de tensión unipolares referenciadas a una tierra común, conocidas como señales RSE (Referenced Single-Ended).
- Rango: 0 a 10 V o 0 a -10 V.
- Frecuencia máxima:

La placa puede tomar muestras a una velocidad de hasta 48000 muestras por segundo. Teniendo en cuenta el teorema de Nyquist, la máxima frecuencia de señal no debería superar los 24 kHz al trabajar con un solo canal. Como cada detector entrega cuatro señales, éste valor se reduce a 6 kHz al trabajar con un detector y a 3 kHz al trabajar con dos.

Sin embargo, el circuito de acondicionamiento de señal debe tener un ancho de banda que aproveche al máximo el de los detectores (10 kHz), previendo la posibilidad de utilizar una placa con mayor velocidad de muestreo en el futuro.

- Variación mínima apreciable:

Al adquirir señales RSE, el *convertidor* Analógico/Digital de la placa utiliza 13 bits. Si además uno de ellos se emplea para indicar el signo, quedan 12 bits para expresar el valor adquirido. En el rango de  $\pm 10$  V esto implica un bit menos significativo (LSB por sus siglas en inglés) del siguiente valor:

$$LSB = \frac{20 V}{2^{12}} = 4,88 \text{ mv}$$

Este es el mínimo cambio en la señal de salida que la placa podrá apreciar idealmente.

### 4.2.2. Propuesta inicial

En las hojas de datos de los DPC se propone un par de circuitos de aplicación que permiten acondicionar las señales y obtener directamente las coordenadas XY del haz incidente. En uno de ellos se utilizan detectores del tipo Tetra-lateral y en el otro Dúo-lateral.

*Configuración Tetra-lateral:*

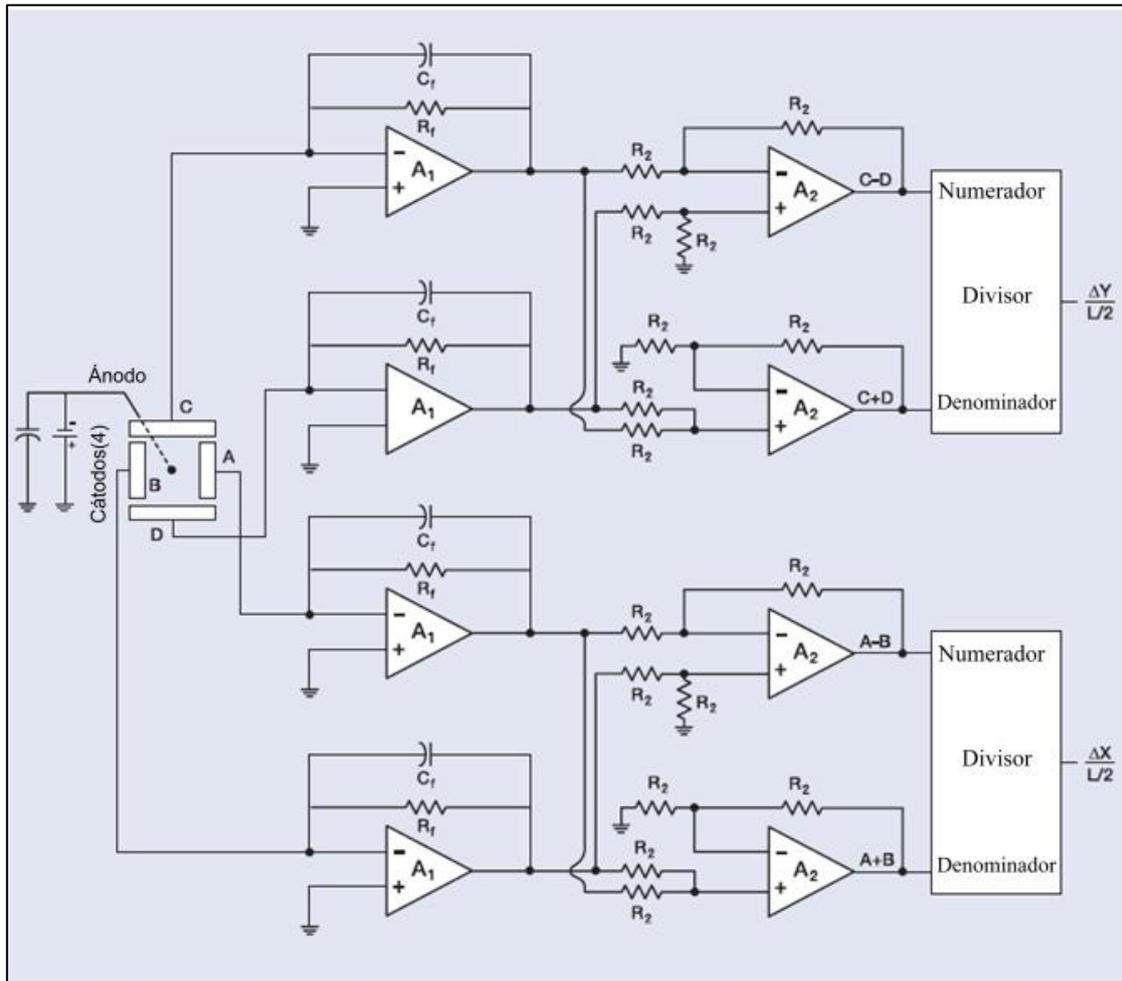


Figura 36: Circuito propuesto para un DPC Tetra-lateral

A continuación se explicará por partes el circuito de la figura 36.

En la figura 37 se muestra un detector del tipo Tetra-lateral, el cual tiene un ánodo común y cuatro cátodos. A, B, C y D son las señales de corriente provenientes de los mismos.

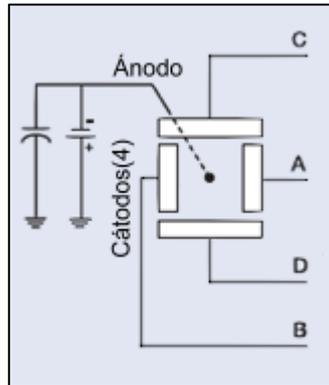


Figura 37

Luego pueden diferenciarse dos etapas:

La primera realiza la conversión de corriente a tensión, como se describiera al principio de este capítulo. En la figura 38 se muestra la correspondiente a uno de los ejes de coordenadas, el eje vertical.

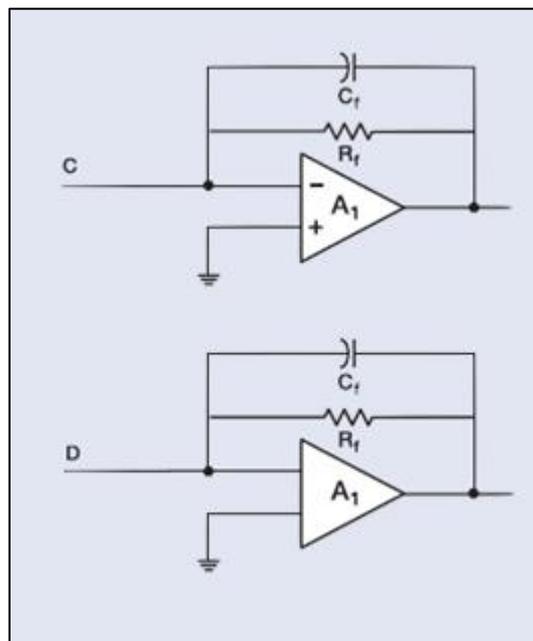


Figura 38

La segunda aplica un algoritmo a las tensiones obtenidas con el fin de obtener las coordenadas del *centroide* del haz, como se observa en la figura 39.

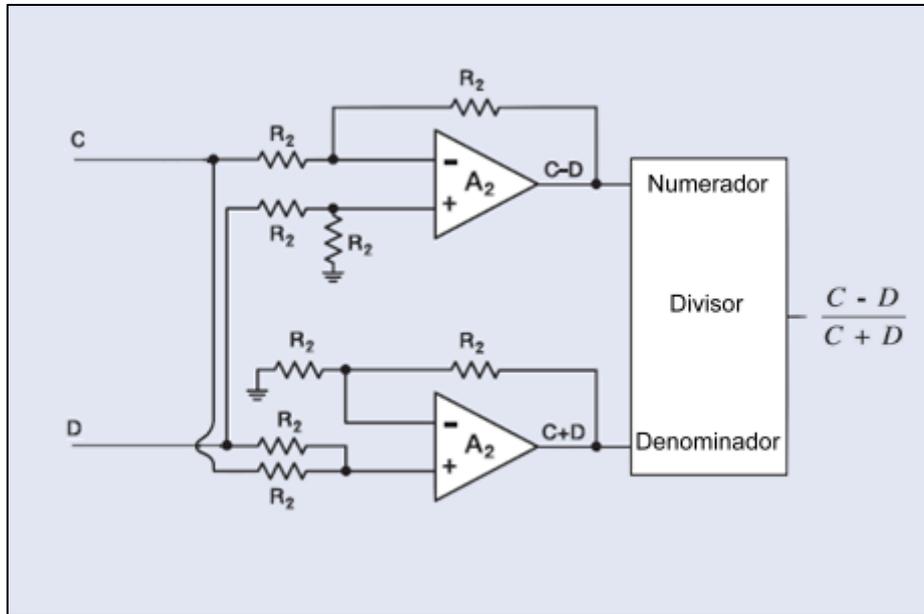


Figura 39

El circuito para el par de nodos correspondiente al eje restante es idéntico. Las coordenadas XY del *centroide* del haz se obtienen como sigue:

$$X = \frac{A - B}{A + B}$$

$$Y = \frac{C - D}{C + D}$$

*Configuración Dúo-lateral:*

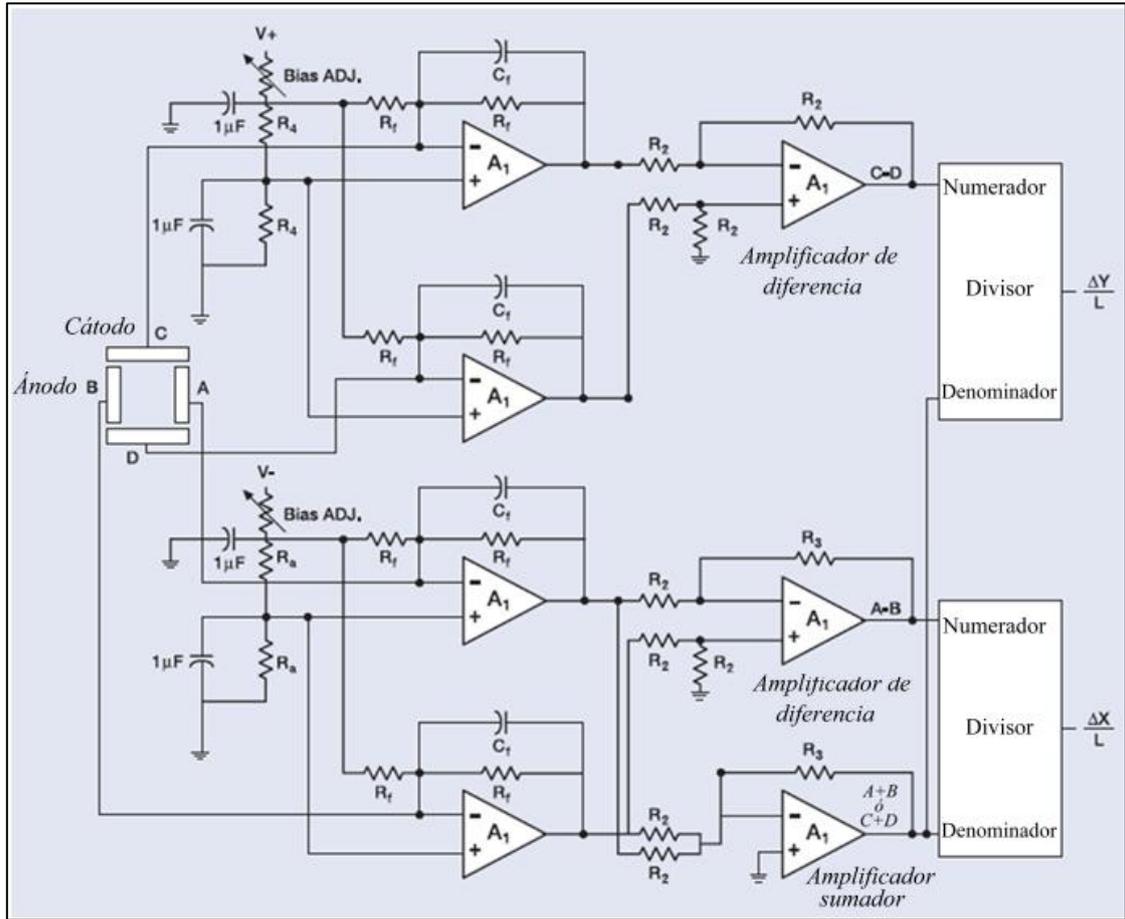


Figura 40: Circuito propuesto para un DPC Dúo-lateral

Un detector del tipo Dúo-lateral tiene un par de cátodos correspondientes a un eje y un par de ánodos correspondientes al otro, como puede verse en la figura 41.

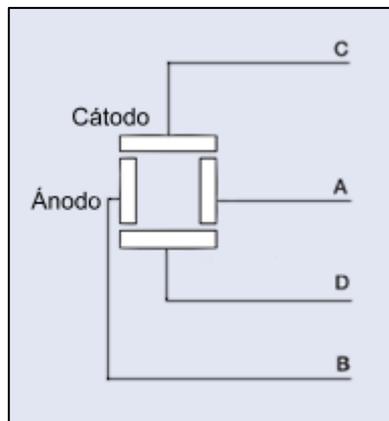


Figura 41

Para polarizar este tipo de detectores se requieren tensiones positivas en los cátodos y negativas en los ánodos. Los divisores resistivos a la entrada de la primera etapa proporcionan la tensión de referencia con la polaridad requerida en cada caso. Se utilizan resistores variables, aquí llamados Bias ADJ, para un ajuste fino de dicha tensión y los capacitores de  $1\ \mu\text{F}$  para derivar cualquier perturbación a tierra, manteniéndola estable (Figura 42).

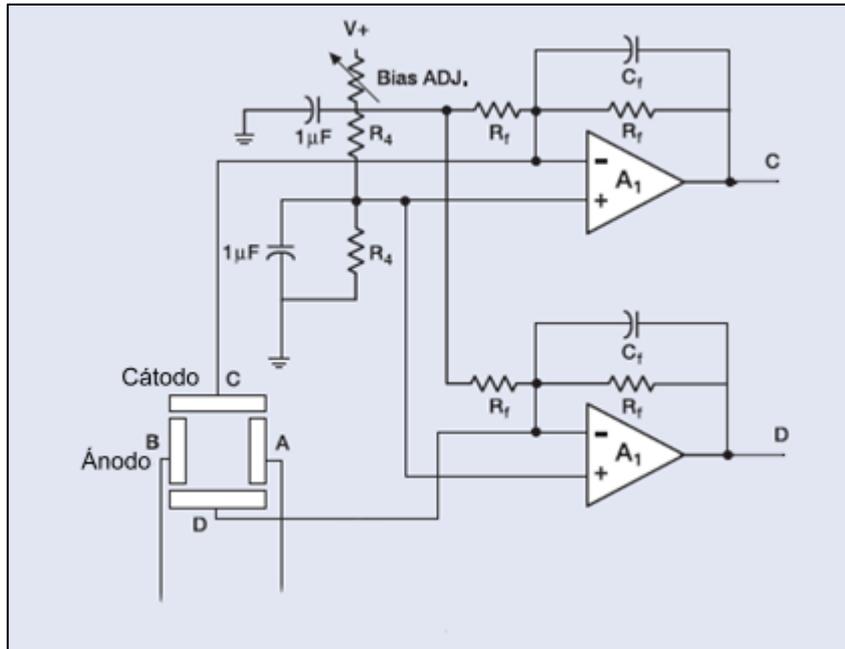


Figura 42

Debido a que en esta configuración, a diferencia de la anterior, la referencia es distinta de tierra, la tensión a la salida en ausencia de señal es aproximadamente la mitad de la de alimentación y esto reduce el rango de la señal de salida.

Las etapas de conversión de corriente a tensión y el algoritmo son análogos a las del circuito correspondiente a los detectores Tetra-lateral.

### 4.2.3. Modificaciones

Se decidió realizar algunas modificaciones a los circuitos propuestos para adecuarlos a las necesidades del proyecto:

- Desarrollar un único circuito que permita utilizar ambos tipos de detector, aunque, debido a que el funcionamiento óptimo de los mismos se alcanza en condiciones distintas de potencia incidente, se decidió optimizar el funcionamiento de uno de ellos, el Tetra-lateral, y que el Dúo-lateral funcione aceptablemente, aunque no en su punto óptimo. Para optimizar el funcionamiento de estos últimos se requeriría una ganancia 10 veces mayor que para los Tetra-lateral debido a la diferencia entre las densidades de potencia óptima.
- Aplicar el algoritmo a las señales digitalizadas, una vez que se encuentran en la PC y no de manera analógica como se propone, para no degradarlas e introducir menos ruido. De esta manera, el nuevo diseño puede utilizar una sola etapa en lugar de dos, simplificando el circuito.
- En la configuración Dúo-lateral, lograr que la tensión de salida resulte nula en ausencia de señal para aprovechar el rango de 0 a 10 V de la placa adquiridora.
- A diferencia del sistema preexistente, el nuevo no requiere una regulación electrónica de la ganancia ya que la misma se implementa mediante instrumentos ópticos en etapas anteriores.

### 4.2.4. Definición de los rangos de trabajo

Con el fin de lograr un funcionamiento óptimo en cada etapa del sistema, se definieron los siguientes rangos de trabajo para las señales que conciernen al circuito de acondicionamiento.

- Amplitudes de corriente de entrada: hasta 64  $\mu\text{A}$ , porque es el valor máximo esperado según los ensayos realizados.
- Amplitudes de tensión a la salida: hasta  $\pm 10\text{ V}$ , para utilizar la mayor parte del rango de entrada de la placa adquiridora y obtener así la mayor resolución posible.
- Frecuencias de hasta 10 kHz, tanto a la entrada como a la salida, para aprovechar el ancho de banda de los DPC.

#### 4.2.5. Elección de los componentes

Para la elección de los amplificadores a utilizar se tuvieron en cuenta las siguientes características y requisitos:

##### **La alimentación:**

Dado que se requieren señales de salida de valor nominal  $\pm 10$  V, y considerando que los AO saturan cuando sus tensiones de salida se aproximan a 1 o 2 V de la de alimentación, el valor de ésta última debe ser cuanto menos de  $\pm 12$  V, y preferentemente menor a  $\pm 15$  V para evitar el sobrecalentamiento.

##### **Tensión de *offset* de entrada $V_{os}$ :**

Es la tensión continua de entrada requerida para obtener una tensión nula en la salida del amplificador, cuando la señal de entrada y las corrientes de polarización de entrada son nulas.

##### **Corriente de polarización (Bias) de entrada $I_B$ :**

Es la corriente media que circula por las entradas del operacional en ausencia de señal.

##### **Corriente de *offset* $I_{os}$ :**

Es la diferencia de corriente entre las dos entradas del operacional que hace que su salida tome el valor cero.

A continuación se presentan los cálculos realizados para definir los requisitos correspondientes a la tensión  $V_{os}$  y las corrientes  $I_B$  e  $I_{os}$ .

En la figura 43 se muestra un amplificador de trans-impedancia en continua incluyendo las corrientes de polarización, tensión y corriente de *offset*:

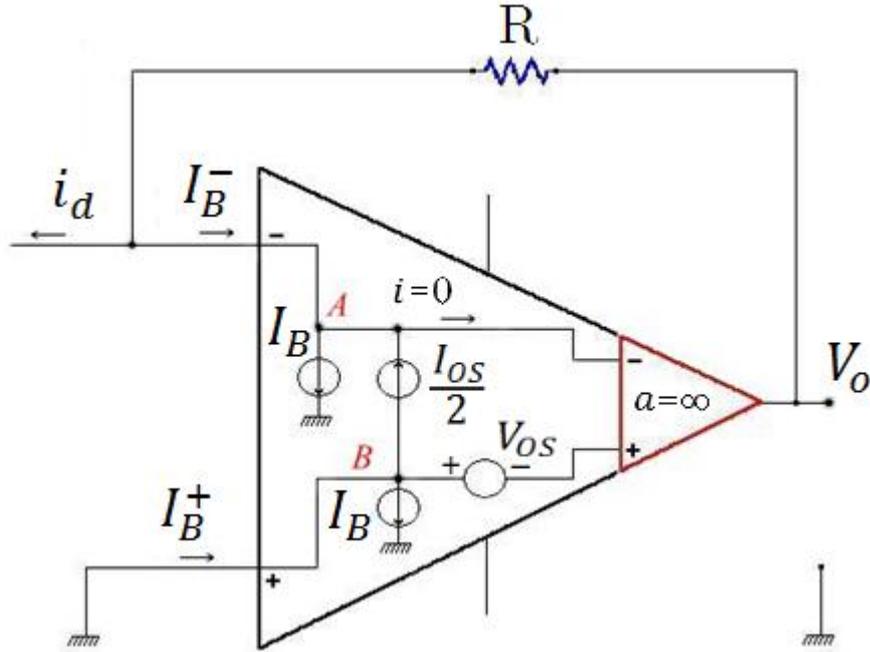


Figura 43: Amplificador operacional no ideal

Donde:

$$i_d = \text{señal proveniente del DPC}$$

$$I_{os} = (I_B^+ - I_B^-)$$

$$I_B = \frac{(I_B^+ + I_B^-)}{2}$$

En el nodo A

La corriente de entrada del operacional ideal (resaltado con color rojo) es  $i = 0$ . Si se suman con sus respectivos signos las corrientes de los generadores  $\frac{I_{os}}{2}$  e  $I_B$  resulta:

$$\frac{I_{os}}{2} - I_B = \frac{(I_B^+ - I_B^-)}{2} - \frac{(I_B^+ + I_B^-)}{2} = \frac{-2I_B^-}{2} = -I_B^-$$

Por lo tanto, para que se cumpla la ecuación de nodos en A, resulta necesaria una corriente entrante de valor  $I_B^-$  como se muestra en la figura 43.

En el nodo B

De la misma manera, si en B se suman con sus respectivos signos las corrientes de los generadores que llegan a él:

$$-\frac{I_{os}}{2} - I_B = -\frac{(I_B^+ - I_B^-)}{2} - \frac{(I_B^+ + I_B^-)}{2} = \frac{-2I_B^+}{2} = -I_B^+$$

Debe existir por lo tanto una corriente de valor  $I_B^+$  entrante al nodo B, como se muestra en la figura 43.

Para ver cómo afectan estas no idealidades a la señal de salida  $V_o$  se aplica el principio de superposición y resulta:

$$V_o = I_d \cdot R - V_{os} - I_B^- \cdot R$$

Se definió  $R=150 \text{ k}\Omega$  por ser éste el valor comercial más cercano al necesario para obtener una tensión de salida máxima de 10 V.

La menor variación apreciable de la señal  $I_d$  de entrada es de  $0,02 \text{ }\mu\text{A}$ , por lo tanto se traduce a la salida como una tensión de valor:

$$I_d \cdot R = 3 \text{ mV}$$

Para no perder resolución, se estableció que la tensión de *offset* y la caída de tensión generada por la corriente de polarización  $I_B$  sean por lo menos 3 veces menores que la señal a la salida:

$$V_{os} \leq \frac{I_d \cdot R}{3} = 1 \text{ mV}$$

$$I_B^- \cdot R \leq \frac{I_d \cdot R}{3} \rightarrow I_B^- \leq \frac{I_d}{3} = 0,0066 \text{ }\mu\text{A}$$

### Tensión y corriente de ruido:

El ruido que introduce el propio amplificador operacional puede ser modelado como una fuente de tensión de ruido  $En$  y una fuente de corriente de ruido  $In$  a la entrada de un amplificador ideal (sin ruido).

Ya que la cantidad de ruido depende del ancho de banda considerado, en las hojas de datos se suele indicar una densidad en  $\frac{nV}{\sqrt{Hz}}$  y  $\frac{pA}{\sqrt{Hz}}$  que permiten hallar los valores *rms*. Luego, haciendo algunas hipótesis puede estimarse el valor pico.

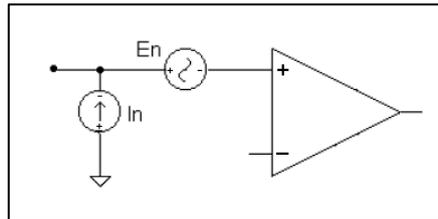


Figura 44

En el ancho de banda de trabajo, debe cumplirse que el valor pico del ruido sea por lo menos 3 veces menor que la señal.

Por lo tanto:

$$\begin{aligned} En &\leq 1 \text{ mV} \\ In &\leq 0,0066 \text{ } \mu\text{A} \end{aligned}$$

*Nota: Al ser los valores típicos de  $In$  muy pequeños, algunos fabricantes no lo indican en sus hojas de datos.*

### Ancho de banda:

La función de transferencia del amplificador de trans-impedancia es:

$$\frac{-V_o}{I_i} = Z = \frac{R}{(1 + j2\pi fRC)} = \frac{R}{(1 + j\frac{f}{\Delta f})}$$

Donde  $\Delta f = \frac{1}{2\pi RC}$  es el ancho de banda de -3 dB, es decir para el cual  $|Z|$  disminuye a  $\frac{1}{\sqrt{2}}$  veces su valor en continua (R).

El ancho de banda necesario para que la función de transferencia pueda ser considerada invariante en todo el rango de frecuencias de la señal de entrada se obtiene estableciendo que la variación máxima aceptable con respecto a su valor de continua no supere un cierto valor, por ejemplo el 1% (correspondiente a una ganancia del AO de 100 veces).

$$|Z| = \frac{R}{\sqrt{1^2 + \left(\frac{f}{\Delta f}\right)^2}} = 0,99 R \quad \rightarrow \quad \frac{1}{0,99} = \sqrt{1^2 + \left(\frac{f}{\Delta f}\right)^2}$$

$$\rightarrow \left(\frac{1}{0,99}\right)^2 - 1 = \left(\frac{f}{\Delta f}\right)^2 \quad \rightarrow \quad \Delta f = \frac{f}{\sqrt{\left(\frac{1}{0,99}\right)^2 - 1}}$$

Para  $f = 10$  kHz,  $\Delta f = 70,179$  kHz

Con este resultado se calcula el valor de capacidad requerido en el lazo de realimentación para filtrar el ruido de altas frecuencias:

$$\Delta f = \frac{1}{2\pi RC} \quad \rightarrow \quad C = \frac{1}{2\pi R \Delta f}$$

El valor de R previamente definido es 150 k $\Omega$ , resultando  $C \cong 15,1$  pF

Si el ancho de banda de -3 dB del amplificador es de un valor muy cercano al calculado, puede no ser práctico utilizar un capacitor en el lazo de realimentación ya que filtraría una pequeña cantidad de ruido en comparación con la que puede introducir un componente de tan pequeño valor.

En las hojas de datos de los AO suele indicarse el Producto Ganancia por Ancho de Banda (GBP por sus siglas en inglés). Como se mencionara anteriormente, en este caso se requiere una ganancia de 100 veces, por lo tanto resulta:

$$GBP = 100 \times 70,179 \text{ kHz} = 7,0179 \text{ MHz}$$

***Slew rate:***

Es la máxima velocidad de cambio de la tensión de salida que el amplificador es capaz de entregar sin distorsionar la señal.

Si la señal de salida es

$$V_o = A \sin(2\pi ft)$$
$$\rightarrow \frac{dV_o}{dt} = 2\pi f A \cos(2\pi ft)$$
$$\text{si } t = 0, \quad SR = 2\pi f A \left[ \frac{V}{s} \right] = \frac{2\pi f A}{10^6} \left[ \frac{V}{\mu s} \right]$$

Para  $A=10$  V y  $f=10000$  Hz, se obtiene  $SR= 0,628$  V/ $\mu$ s

En resumen, el amplificador operacional debe cumplir los siguientes requisitos:

- Alimentación  $\geq 12$  V
- GBP  $\geq 7,0179$  MHz

A la entrada:

- $V_{os} \leq 1$  mV
- $I_B^- \leq 6,6$  nA
- $E_n \leq 1$  mV
- $I_n \leq 6,6$  nA

A la salida:

- $V_o \text{max} = 10$  V
- $SR \geq 0,628 \frac{V}{\mu s}$

Se decidió la utilización de circuitos integrados cuádruples, en vez de simples o dobles, debido a la naturaleza propia del dispositivo a desarrollar, que incluye el tratamiento de cuatro señales de idénticas características. En este marco, al encontrarse los amplificadores integrados en el mismo elemento físico, la incidencia de los distintos factores de degradación (temperatura, ruido, etc.) es la misma para todas las señales mencionadas. Además, de ésta manera puede utilizarse un integrado para cada *monóculo*, con el fin de hacerlos independientes.

La siguiente es una lista de los posibles dispositivos a utilizar:

	Numero de amplificadores por integrado	V <sub>os</sub> [μV]	I <sub>B<sup>-</sup></sub> [pA]	GBP [MHz]	Slew Rate [V/μs]	Vcc-Vee [V]	Ruido E <sub>n</sub> [μV]
OP462	4	25	258x10 <sup>3</sup>	15	13	2,7 a ±6	2,69
OP484	4	250	55x10 <sup>3</sup>	4,25	4	3 a ±18	1,10
OP413	4	275	675x10 <sup>3</sup>	3,4	1,2	4 a ±18	2,55
OP4177	4	15	400	1,3	0,7	±2,5 a ±15	2,40
AD8625	4	50	47,5	5	5	±2,5 a ±13	4,53
AD8664	4	50	0,2	4	3,5	5 a 16	3,40
AD8643	4	50	0,25	3,5	3	±2,5 a ±13	7,78
ADA4000-4	4	200	4	5	20	±5 a ±18	4,53
AD8513	4	80	22	8	20	±5 a ±15	9,62
OP467	4	200	145x10 <sup>3</sup>	28	170	±5 a ±15	1,70
OP482	4	200	2,5	4	9	±5 a ±15	10,18
AD713	4	300	35	4	20	±5 a ±15	12,73
AD8674	4	20	2x10 <sup>3</sup>	10	4	±5 a ±15	1,07
ADA4004-4	4	40	40x10 <sup>3</sup>	12	2,7	±5 a ±15	9,90

Tabla 6

Luego de analizar las hojas de datos, la lista se redujo a dos circuitos integrados: AD8674 y AD8513. Ambos cumplen con los requisitos, pero el precio del AD8674 es ligeramente mayor (USD 19,90 frente a USD 19,15 del AD8513), y tiene un menor margen en el valor de la corriente I<sub>B<sup>-</sup></sub>. Por lo tanto se optó por la compra del AD8513.

#### 4.2.6. Ensayo en una placa de pruebas

Antes de continuar con el diseño del circuito, se realizó un ensayo con el amplificador seleccionado, para verificar el correcto funcionamiento en los rangos de amplitudes y frecuencias de trabajo.

En una placa de pruebas se montó un circuito integrado AD8513 y se realimentaron los cuatro amplificadores que contiene para formar cuatro amplificadores de trans-impedancia. Para no limitar el ancho de banda, en este primer ensayo no se incluyó el capacitor en el lazo de realimentación. De ésta manera puede decidirse luego si resulta necesaria su inclusión.

Se alimentó al circuito integrado (CI) mediante una fuente auxiliar de ±12 V, 1 A disponible en el laboratorio y para generar una corriente de entrada ficticia se utilizó un generador de señales sinusoidales en serie con una resistencia. La figura 45 muestra un esquema del montaje. En el Anexo IV se encuentran las hojas de datos del AD8513 con detalles de su esquema interno y de los pines.

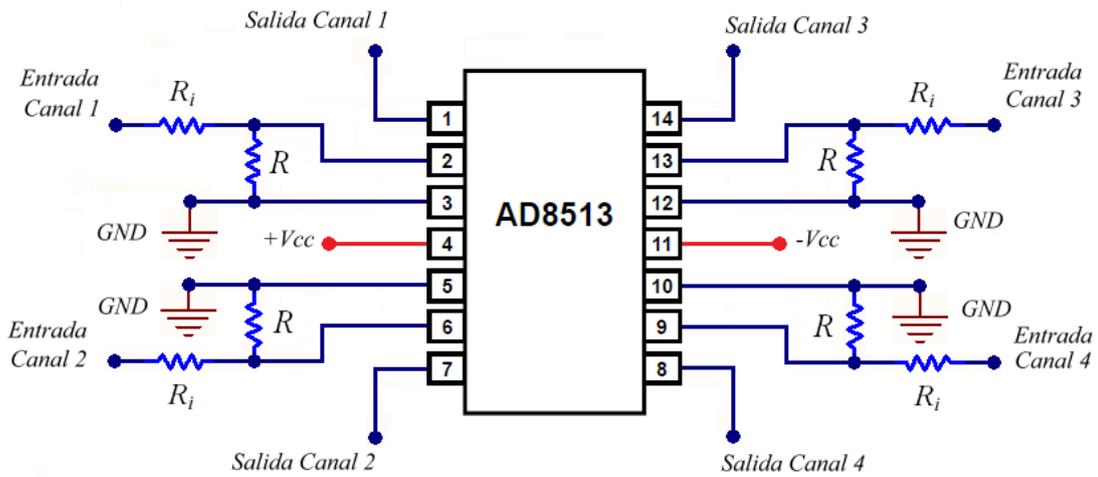


Figura 45: Esquema del montaje en una placa de pruebas

Mediante un osciloscopio se midieron las tensiones de entrada y de salida para luego obtener la trans-impedancia de la siguiente manera:

$$|Z| = \frac{V_o}{I} = \frac{V_o}{\frac{V_i}{R_i}} = \frac{V_o}{V_i} \cdot R_i$$

$R_i = (27,1 \pm 2,5) \text{ k}\Omega =$  Resistencia de entrada, en serie con el generador.

$V_i =$  Tensión que entrega el generador.

$V_o =$  Tensión a la salida del amplificador.

El valor teórico de la trans-impedancia está definido por la resistencia R del lazo de realimentación, y medido en continua con un óhmetro digital es:

$$R = (150,3 \pm 1,9) \text{ k}\Omega$$

Las mediciones se efectuaron para distintas frecuencias y para tres niveles de intensidad de señal a la entrada: 50%, 75%, y 100% del valor máximo esperado (64  $\mu\text{A}$ ).

A continuación se presentan los resultados obtenidos para uno de los canales elegido al azar y al cual se denominó Canal 3 por su ubicación en el chip.

Intensidad de entrada	Frecuencia	Trans-Impedancia
50%	f [Hz]	Z [kΩ]
	10,30	148,45 ±4,33
	99,75	149,56 ±4,37
	1003	149,78 ±4,49
	10040	149,54 ±4,37
75%	f [Hz]	Z [kΩ]
	10,05	147,84 ±3,75
	100,20	148,89 ±3,77
	1005	149,05 ±3,79
	10040	148,87 ±3,78
100%	f [Hz]	Z [kΩ]
	10,00	147,95 ±3,73
	100,50	148,87 ±3,75
	1005	149,10 ±3,76
	10075	149,09 ±3,76

Tabla 7: Resultados del Canal 3

Siendo el caso de intensidad máxima el más exigente para el dispositivo, en la figura 46 se muestran gráficamente sólo los valores medidos correspondientes a éste, así como la recta horizontal que mejor se ajusta a los mismos, con el fin de analizar la linealidad.

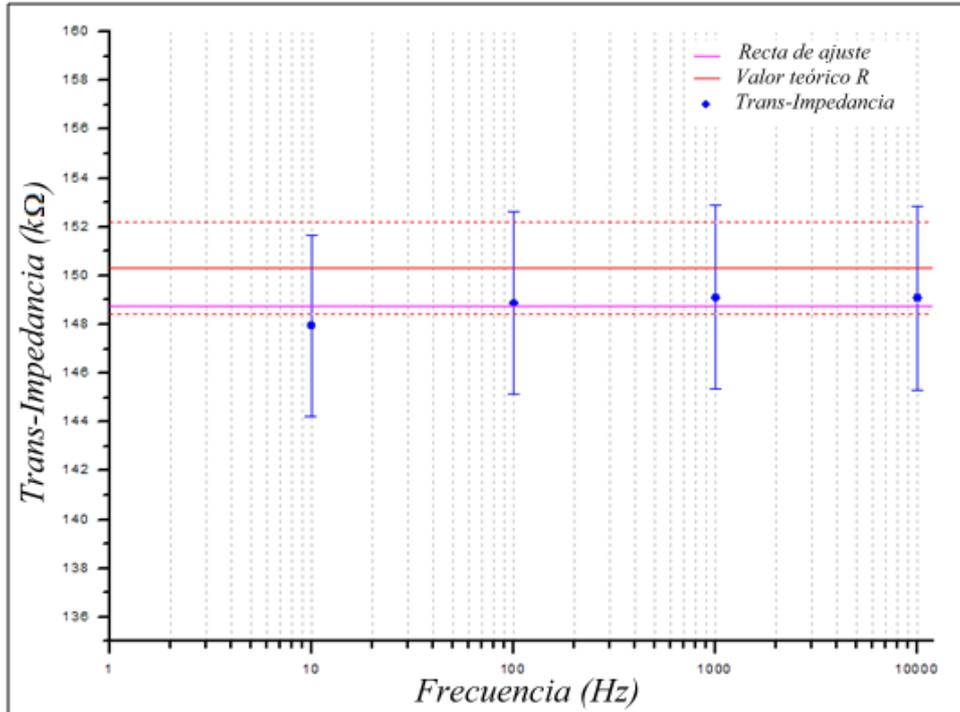


Figura 46: Canal 3 - Intensidad de entrada 100%

Datos de la recta de ajuste:

Intersección con el eje vertical: 148,75 kΩ

Máximo apartamiento de los valores medidos:

- Absoluto: -0,80 kΩ
- Porcentual: -0,54%

Haciendo la hipótesis de que los cuatro canales se comportan de manera similar, las mediciones sobre los tres restantes se realizaron sólo con una señal de entrada de intensidad nominal (64  $\mu$ A). Los correspondientes gráficos y resultados del ajuste se encuentran en el Anexo III.

### **Conclusiones:**

En todos los casos, los valores obtenidos presentan una respuesta que puede considerarse lineal, teniendo en cuenta que el mayor apartamiento respecto de una recta horizontal es menor al 0,6%.

Además se observa que respecto del valor esperado o teórico, los medidos son sistemáticamente inferiores. Estas desviaciones sistemáticas se atribuyen a la impedancia de entrada del amplificador operacional, que no es infinita, por lo tanto una parte de la corriente se deriva a tierra a través

de ella y no circula por el lazo de realimentación, generando una tensión de salida inferior a la que debiera.

Durante la realización del ensayo se observó que el ancho de banda del amplificador en la configuración implementada resulta muy cercano al de las señales con las que se pretende trabajar, por lo que se decidió no limitarlo mediante un capacitor en la implementación final.

Los resultados del ensayo fueron considerados aceptables y por lo tanto se decidió utilizar el AD8513 para implementar el circuito de acondicionamiento de señal.

#### 4.2.7. Diagrama esquemático y circuito impreso

Para el diseño del circuito se utilizó el programa Altium Designer 6, que es una plataforma integrada de diseño de sistemas electrónicos con herramientas que permiten abarcar la totalidad de las etapas, desde la creación del diagrama esquemático hasta obtener los archivos para la fabricación del circuito impreso.

##### *Descripción:*

El circuito de acondicionamiento de señal puede dividirse en dos sub-circuitos que funcionan de manera independiente, compartiendo sólo la alimentación. Se los denominó *Monóculo 1* y *Monóculo 2* debido a que cada uno contiene los cuatro canales que provee un DPC. Dos canales corresponden al eje X, y dos al eje Y.

En cada canal se implementó un amplificador de trans-impedancia con una ganancia fija de valor tal que al circular la corriente estimada como máxima, la tensión a la salida resulte próxima a 10V.

El circuito completo consta de ocho canales: X11, X12, Y11, Y12, X21, X22, Y21, Y22

La nomenclatura de los canales es la siguiente:

- X ó Y indica el eje del detector al cual corresponde.
- El primer subíndice indica el monóculo al cual pertenece.
- El segundo subíndice indica el sentido (1 negativo, 2 positivo).
- El usuario tiene la posibilidad de utilizar detectores del tipo Tetra-lateral o Dúo-lateral en cada monóculo. Para ello se incluyeron *jumpers* (puentes) que conectan o desconectan partes del circuito según los requerimientos de cada detector.

Gracias a la simetría que tiene cada monóculo, alcanza con analizar las dos configuraciones de un par de canales correspondientes a uno de los ejes.

El diagrama esquemático completo se encuentra en el Anexo IV debido a su gran tamaño.

En la figura 47 se muestran los canales X11 y X12 del *Monóculo 1*:

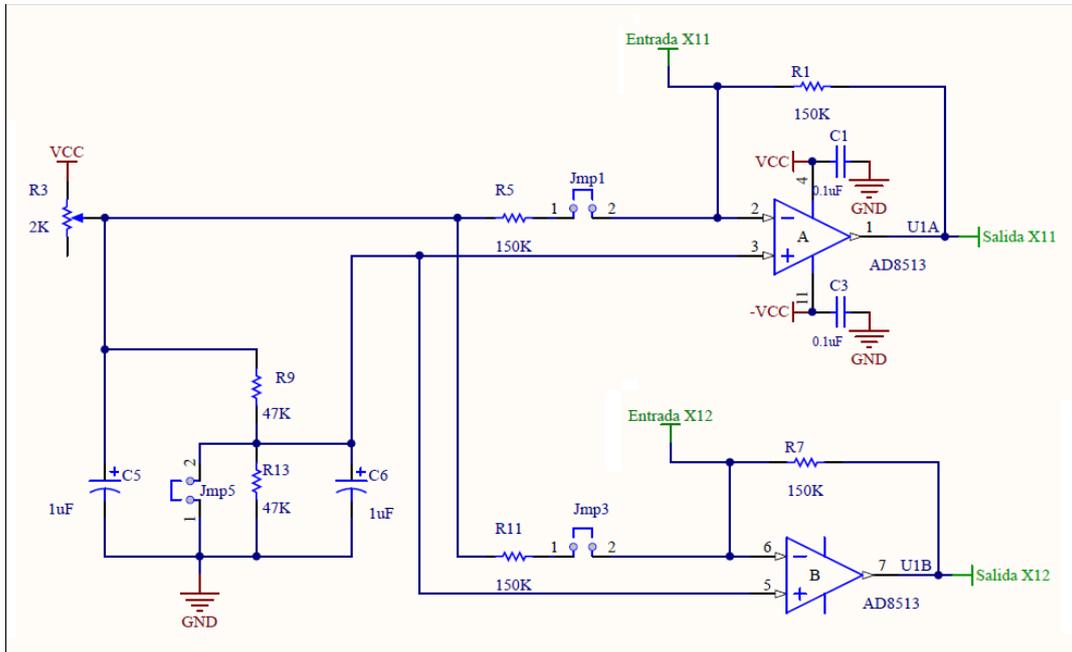


Figura 47

Para utilizar detectores del tipo Tetra-lateral, los *jumpers* Jmp1 y Jmp3 deben estar abiertos, mientras que Jmp5 debe estar cerrado, de manera que el circuito resultante es el siguiente.

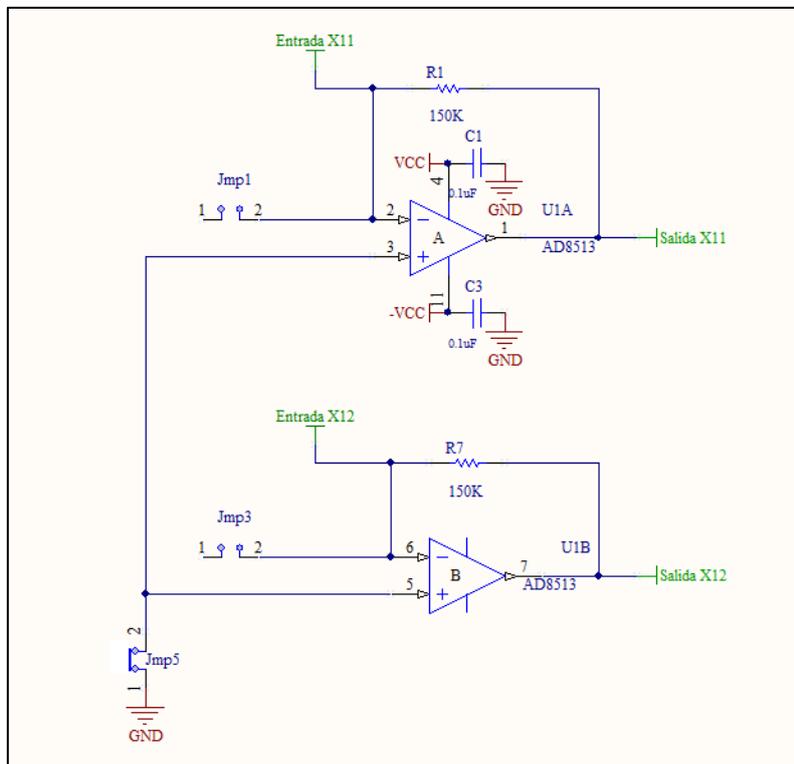


Figura 48

En la figura 48 se observa que las entradas no inversoras de los operacionales quedan conectadas a tierra y los cátodos del detector se polarizan a través de la “tierra virtual”. El ánodo del detector, que es común, se conecta a  $-VCC$  por medio de una conexión externa al circuito.

Para utilizar detectores del tipo Dúo-lateral, los *jumpers* Jmp1 y Jmp3 deben estar cerrados, mientras que Jmp5 debe estar abierto, resultando el circuito de la figura 49.

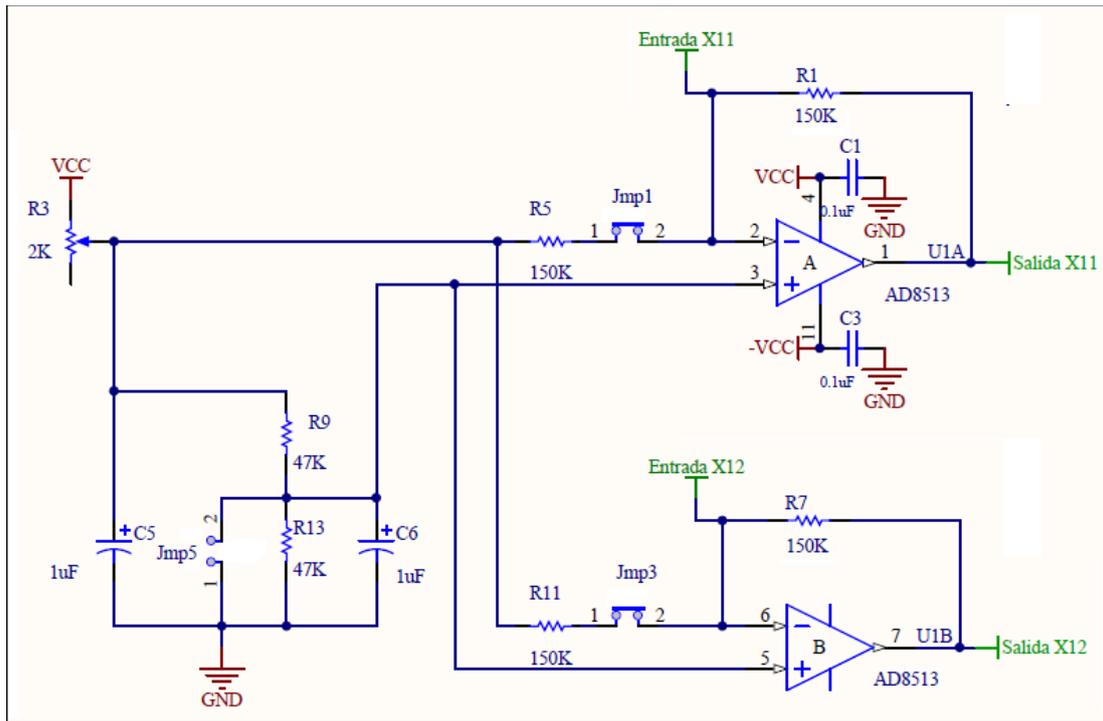


Figura 49

En éste caso, un divisor resistivo coloca una tensión igual a  $\frac{VCC}{2}$  en las entradas no inversoras de los operacionales. Además, para cada canal, se utiliza una resistencia de igual valor a la del lazo de realimentación conectada a  $VCC$  para inyectar una corriente que produzca una caída de tensión a través del lazo igual a  $\frac{VCC}{2}$ . De ésta manera, la salida del amplificador en ausencia de señal es de 0 V.

El potenciómetro R3 provee un ajuste fino de la tensión de referencia, y su inclusión será definida más adelante.

Los canales Y11 e Y12 del *Monóculo 1* son iguales, con la única diferencia de que las tensiones de polarización de la configuración Dúo-lateral son negativas debido a que estos canales corresponden a los ánodos del detector.



### 4.3. Ensayos en circuito impreso

Una vez montado el circuito impreso, se realizaron ensayos de carácter cualitativo con el fin de verificar que se sigan cumpliendo las características observadas durante los ensayos en la placa de pruebas y encontrar fallas o inconvenientes.

Previamente se hicieron las siguientes hipótesis:

- La etapa de transducción de corriente es la misma en las dos configuraciones (Dúo-lateral y Tetra-lateral), por lo tanto no es necesario probar el funcionamiento de ambas.
- Los cuatro canales de un mismo CI se comportan de manera muy similar, y pueden ser considerados iguales.
- El circuito posee dos CI, pero los ensayos se realizan sobre uno debido a la confiabilidad del fabricante.

#### *Procedimiento:*

Se alimentó al circuito con la misma fuente auxiliar de 12 V, 1 A utilizada en ensayos anteriores.

En un canal elegido al azar, se efectuaron mediciones de la tensión de salida al aplicar una señal ficticia de corriente, que simuló la entrega por un DPC.

Las mediciones se realizaron para distintas frecuencias, y para niveles de intensidad de señal de entrada correspondientes al 50% y 100% del valor máximo esperado (64  $\mu$ A).

Con los valores medidos en cada caso se calculó la trans-impedancia, cuyo valor teórico está dado por la resistencia colocada en el lazo de realimentación de cada canal y es:

$$R = (150,0 \pm 1,5) \text{ k}\Omega$$

A continuación, en la tabla 8, se presentan los resultados obtenidos para el canal X11.

Intensidad de entrada	Frecuencia	Trans-Impedancia
50%	f [Hz]	Z [kΩ]
	10,03	147,37 ±7,43
	99,60	147,87 ±7,46
	997,5	147,74 ±7,13
	10100	147,79 ±8,33
100%	f [Hz]	Z [kΩ]
	10,08	147,61 ±4,45
	100,10	147,84 ±4,75
	1006	147,80 ±5,01
	9990	147,78 ±4,27

Tabla 8: Resultados correspondientes al Canal X11

Las figuras 51 y 52 muestran gráficamente los valores obtenidos, y la recta horizontal que mejor se ajusta a los mismos en cada caso:

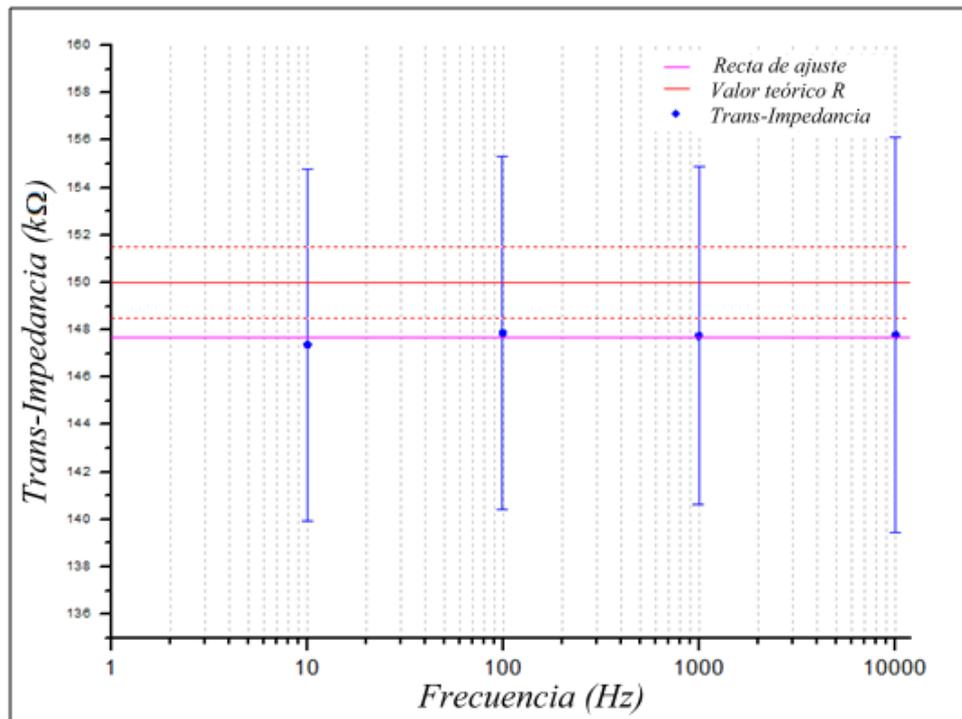


Figura 51: Canal X11 - Intensidad de entrada 50%

Datos de la recta de ajuste:

Intersección con el eje vertical: 147,69 kΩ

Máximo apartamiento de los valores medidos:

- Absoluto: -0,32 kΩ
- Porcentual: -0,22%

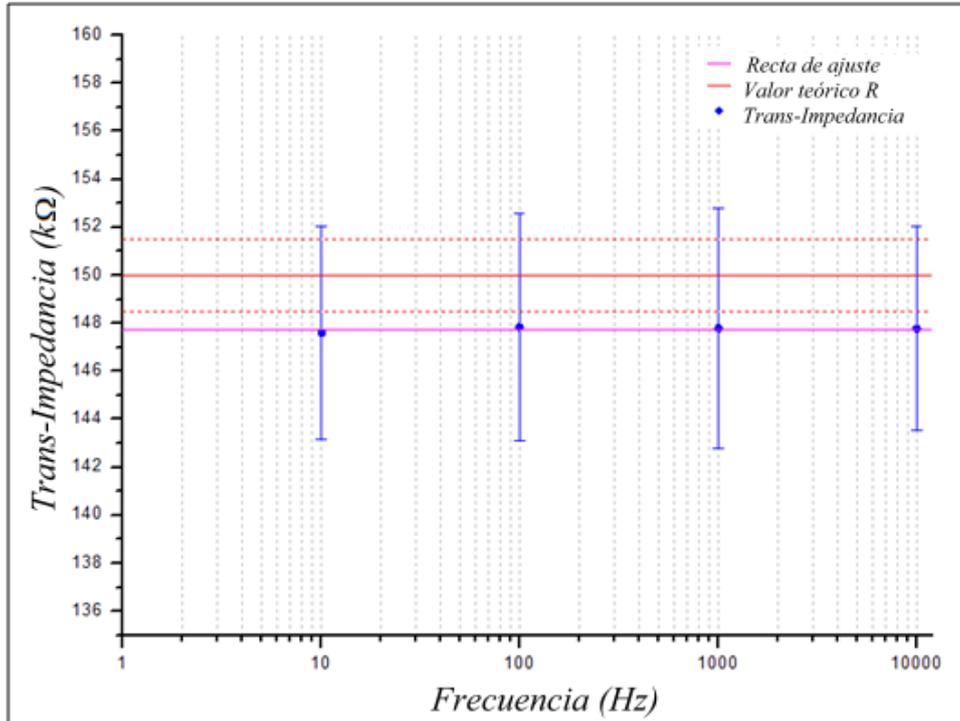


Figura 52: Canal X11 - Intensidad de entrada 100%

Datos de la recta de ajuste:

Intersección con el eje vertical: 147,75 kΩ

Máximo apartamiento de los valores medidos:

- Absoluto: -0,14 kΩ
- Porcentual: -0,09%

Las mediciones sobre los restantes canales del monóculo se realizaron únicamente con una señal de entrada de intensidad nominal (64 μA). Los resultados obtenidos se encuentran en el Anexo III.

*Conclusiones:*

Luego de montar el circuito impreso, las características de linealidad observadas durante el ensayo en la placa de pruebas se mantienen aceptables. Incluso se nota una mejoría ya que la desviación máxima respecto de la recta de ajuste se redujo a menos de 0,25%.

Se decidió no incluir en el circuito final los potenciómetros para ajuste fino de la tensión de referencia, debido a la poca incidencia que tiene un ajuste tan fino en la tensión de salida.

Los resultados del ensayo fueron aceptables, cumpliendo cualitativamente con las expectativas.

## 4.4. Fuente de alimentación

### 4.4.1. Requerimientos

Las hojas de datos del AD8513 predicen un consumo aproximado de 2 mA por amplificador para valores de alimentación de  $\pm 12$  V y a una temperatura  $T_A$  de 25 °C.

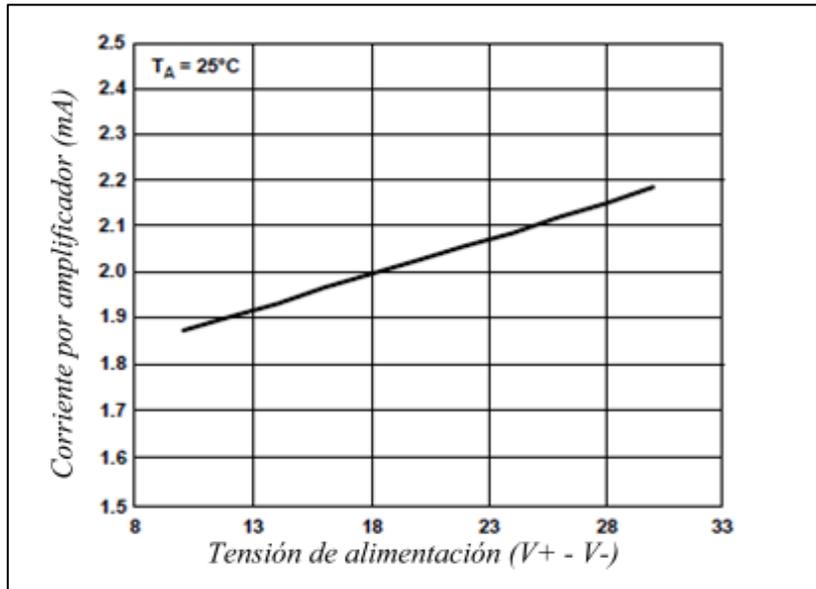


Figura 53

Como cada circuito integrado contiene cuatro amplificadores, demandará en teoría 8 mA. Para verificar dicho valor se decidió realizar un ensayo que permitiera medirlo. Teniendo en cuenta que no es crítico conocer el consumo con demasiada exactitud, se efectuaron mediciones sobre algunas partes del circuito, que permitieran luego estimar el consumo del circuito completo como se explica a continuación.

- 1) Se midió el consumo de un solo CI con su divisor resistivo y en ausencia de señal, obteniéndose los siguientes resultados:
  - Fuente positiva: 8,690 mA
  - Fuente negativa: 8,695 mA

2) Se repitió la medición, aplicando una señal de máxima amplitud y frecuencia de 6 kHz en un solo canal. Al hacer la diferencia con las mediciones anteriores, se obtuvo el consumo de un canal:

- Fuente positiva: 0,11 mA
- Fuente negativa: 0,09 mA

3) Cada monóculo consta de 4 canales, por lo tanto al sumar el consumo de un CI sin señal más 4 veces el de un canal se obtiene:

- Fuente positiva:  $(8,690 \text{ mA} + 4 \cdot 0,11 \text{ mA}) = 9,130 \text{ mA}$
- Fuente negativa:  $(8,695 \text{ mA} + 4 \cdot 0,09 \text{ mA}) = 9,055 \text{ mA}$

4) El circuito completo, con sus 2 monóculos funcionando consumirá aproximadamente:

- Fuente positiva:  $(9,130 \text{ mA} \cdot 2) = 18,260 \text{ mA}$
- Fuente negativa:  $(9,055 \text{ mA} \cdot 2) = 18,110 \text{ mA}$

Para tener un margen de seguridad, previendo que el consumo podría llegar a ser un 10% mayor, se decidió que la fuente de alimentación deberá entregar  $\pm 12 \text{ V}$  y 20 mA.

#### 4.4.2. Diseño

Teniendo en cuenta los requerimientos antes definidos, se diseñó y construyó una fuente regulada de tensión, cuyo diagrama esquemático se muestra en la figura 54.

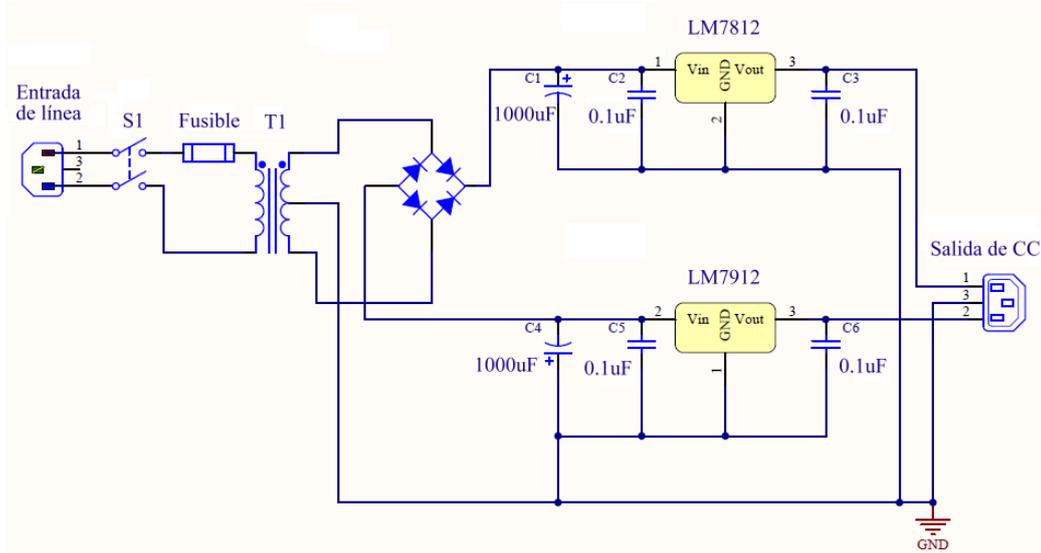


Figura 54: Fuente de alimentación – Diagrama esquemático

A la entrada, la tensión de línea se aplica a un transformador con punto medio cuyas salidas son de 12 V. Un puente de diodos se utiliza como rectificador de onda completa y luego un filtro capacitivo disminuye el *ripple*. Además se incluyeron dos reguladores integrados para tener a la salida tensiones reguladas de +12 V y -12 V. Los circuitos integrados que se utilizaron son:

- LM7812
  - Tensión de salida  $V_O = +12\text{ V}$
  - Corriente de salida  $I_O$ : Hasta 1 A
  - Regulación de carga:  $\Delta V_O = 12\text{ mV}$  ( $5\text{ mA} \leq I_O \leq 1,0\text{ A}$ )
- LM7912
  - Tensión de salida  $V_O = -12\text{ V}$
  - Corriente de salida  $I_O$ : Hasta 1,5 A
  - Regulación de carga:  $\Delta V_O = 15\text{ mV}$  ( $5\text{ mA} \leq I_O \leq 1,5\text{ A}$ )

En el Anexo IV se encuentra un extracto de las hojas de datos. Para obtener más información, se recomienda consultar los siguientes enlaces:

<http://www.fairchildsemi.com/>

<http://www.national.com/>

### 4.4.3. Ensayos

Luego de verificar el estado de los componentes por separado y montar el circuito, se realizaron los siguientes ensayos:

Medición de la tensión de salida en vacío:

- Positiva:  $(+12,18 \pm 0,07)$  V.
- Negativa:  $(-12,07 \pm 0,07)$  V.

Medición de la tensión de salida para distintos estados de carga:

Se utilizaron potenciómetros y resistores adecuados para disponer la corriente de carga entre los valores de 10 y 60 mA en pasos de 5 mA aproximadamente. Para cada estado de carga se registró el valor de tensión de la fuente correspondiente. A continuación se muestran en forma de tabla los resultados obtenidos para las fuentes positiva y negativa, respectivamente:

Fuente positiva		Fuente negativa	
Corriente de Carga [mA]	Tensión de salida [V]	Corriente de Carga [mA]	Tensión de salida [V]
10,0 $\pm$ 0,2	12,04 $\pm$ 0,07	-10,0 $\pm$ 0,2	-12,04 $\pm$ 0,07
15,1 $\pm$ 0,3	12,00 $\pm$ 0,07	-15,0 $\pm$ 0,3	-11,95 $\pm$ 0,07
20,3 $\pm$ 0,3	11,95 $\pm$ 0,7	-20,1 $\pm$ 0,3	-11,91 $\pm$ 0,07
25,6 $\pm$ 0,4	11,92 $\pm$ 0,07	-25,0 $\pm$ 0,4	-11,88 $\pm$ 0,07
30,8 $\pm$ 0,4	11,86 $\pm$ 0,07	-30,7 $\pm$ 0,4	-11,85 $\pm$ 0,07
34,0 $\pm$ 0,4	11,83 $\pm$ 0,07	-36,7 $\pm$ 0,5	-11,78 $\pm$ 0,07
39,1 $\pm$ 0,5	11,81 $\pm$ 0,07	-40,1 $\pm$ 0,5	-11,77 $\pm$ 0,07
45,8 $\pm$ 0,6	11,76 $\pm$ 0,07	-46,0 $\pm$ 0,6	-11,72 $\pm$ 0,07
50,2 $\pm$ 0,6	11,70 $\pm$ 0,07	-49,3 $\pm$ 0,6	-11,69 $\pm$ 0,07
57,0 $\pm$ 0,7	11,53 $\pm$ 0,07	-56,0 $\pm$ 0,7	-11,62 $\pm$ 0,07
60,1 $\pm$ 0,7	11,39 $\pm$ 0,07	-60,1 $\pm$ 0,7	-11,56 $\pm$ 0,07

Tabla 9

En las figuras 55 y 56 pueden observarse los gráficos de *Tensión de salida Vs Corriente de Carga* que caracterizan a la fuente diseñada.

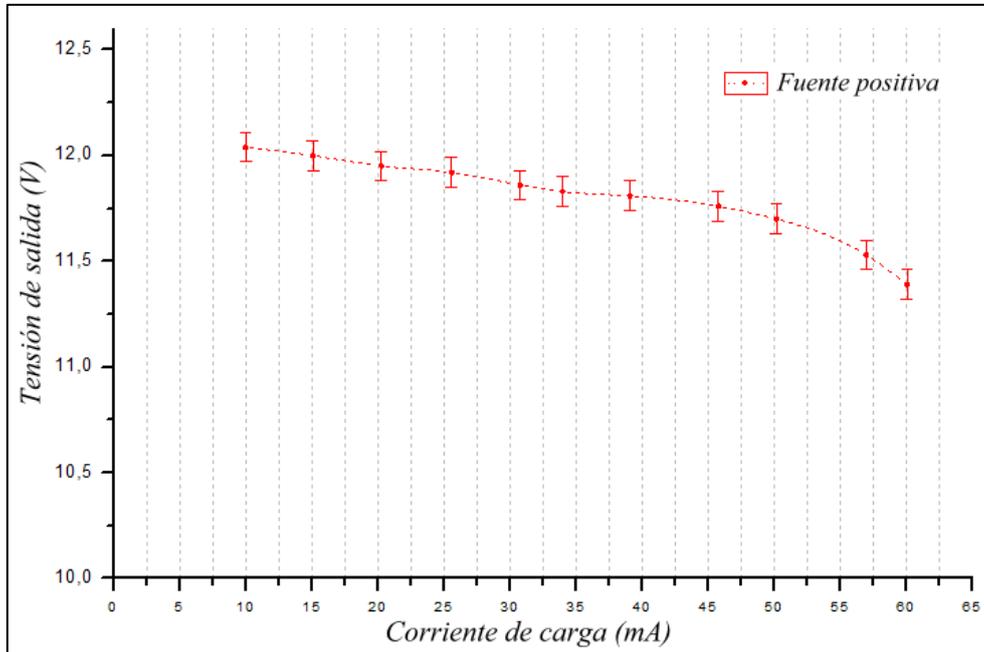


Figura 55

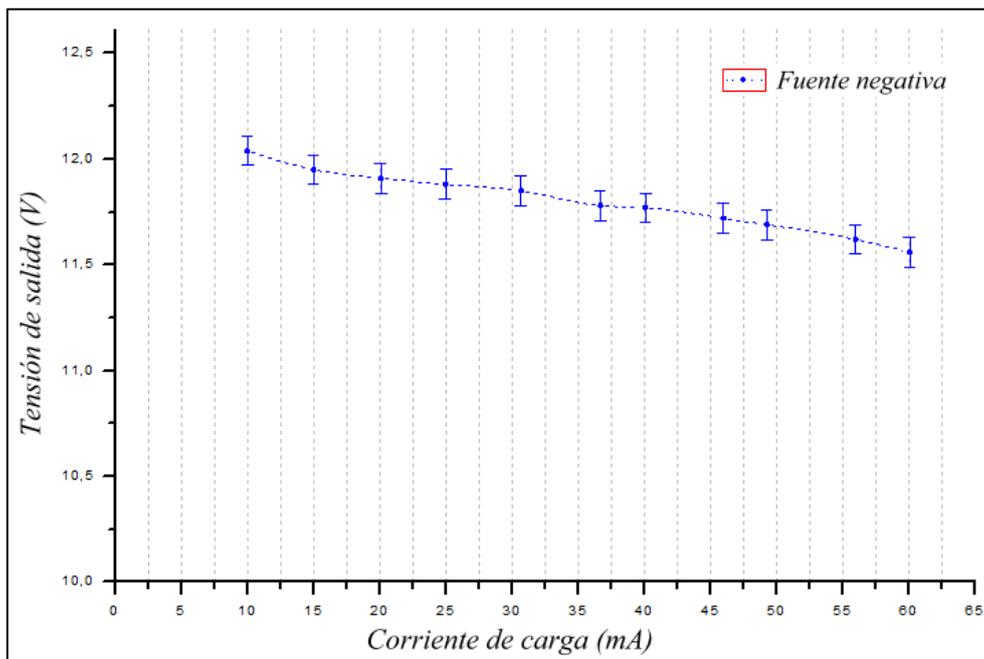


Figura 56<sup>3</sup>

<sup>3</sup> En el gráfico se muestran los valores absolutos de las tensiones y corrientes de la fuente negativa.

*Observación:*

Para corrientes de carga de 20 mA, en ambas fuentes la tensión a la salida disminuye menos del 1% del valor requerido por el circuito ( $\pm 12$  V), mientras que para un régimen de carga 3 veces más exigente la variación es del orden del 5%. Siendo estos valores aceptables, se concluye que la fuente de alimentación diseñada cumple con los requerimientos.

## Capítulo 5. Programa de aplicación

En este capítulo se describe el programa desarrollado para controlar el Sistema Adquiridor Remoto actualizado (SAR 2), con el fin de adquirir datos provenientes de un par de detectores de posición continuos.

Se explican, en forma general y conceptual, las acciones que realiza el programa, sin detallar el código fuente. En el Anexo I se describe el entorno de programación LabVIEW utilizado, y en el Anexo II se detallan algunas de las funciones empleadas, aquellas consideradas de mayor importancia.

Primero se presentan en forma general la pantalla principal y las diferentes opciones o aplicaciones disponibles para el usuario. Luego se explican cada una de estas aplicaciones por separado con la ayuda de diagramas explicativos.

## 5.1. Menú Principal

Es la pantalla principal del programa. Cuenta con botones para acceder a cada una de las aplicaciones disponibles en el sistema, un botón para acceder a la ayuda, uno para realizar una simulación, y otro para salir del programa. Estos botones se encuentran en la parte izquierda de la pantalla, mientras que a la derecha puede verse una imagen del dispositivo a modo de presentación, como muestra la figura 57.



Figura 57

Las aplicaciones mencionadas son:

- Acondicionamiento y Calibración.
- Observación.
- Registro de datos.

Al acceder a cualquiera de ellas se abre una nueva ventana, ocultándose la del **Menú Principal**.

## 5.2. Aplicaciones

A continuación se desarrollan conceptualmente las distintas aplicaciones disponibles para el usuario, utilizando diagramas de bloques donde se indican las operaciones que se llevan a cabo. Dado que muchas de estas operaciones se realizan en más de una aplicación, sólo se detallan la primera vez citadas.

En todas las aplicaciones el usuario se vincula con el sistema mediante dos presentaciones interactivas que se corresponden con las siguientes pantallas:

- De configuración.
- De aplicación.

### 5.2.1. Acondicionamiento y Calibración

En esta aplicación se guía al usuario para conseguir dos objetivos: acondicionar la señal y calibrar el dispositivo.

El primero consiste en obtener la intensidad de luz óptima de trabajo, como se describiera anteriormente en el Capítulo 1.

El segundo permite obtener los factores de conversión entre valores unitarios calculados a partir de las mediciones y unidades de longitud.

#### I. Pantalla de configuración

La figura 58 muestra una captura de esta pantalla, que consta de los siguientes controles:

- Un control selector para elegir el detector a utilizar.
- Un botón para comenzar la tarea.
- Un botón para volver al **Menú Principal**.

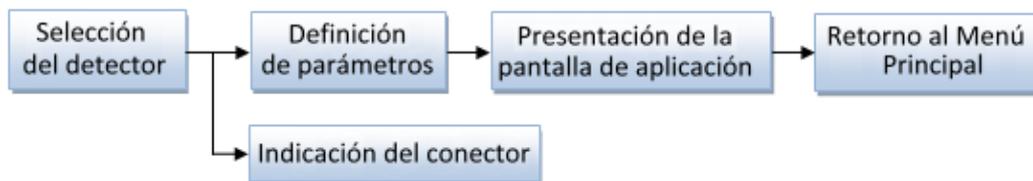


Figura 58

La imagen del frente del dispositivo, donde se resalta el conector correspondiente al detector seleccionado, se incluye en todas las pantallas de configuración.

### Implementación:

En esta instancia, el código del programa realiza las siguientes operaciones de manera transparente para el usuario:



### Detalles:

**Selección del detector:** Se realiza mediante el control dispuesto en el panel frontal. Las opciones disponibles son: *Monóculo 1* y *Monóculo 2*. Sólo puede seleccionarse una de ellas a la vez.

**Definición de parámetros:** Según el estado del selector, se establecen los valores de algunos parámetros que sirven de entradas para la próxima pantalla.

- Detector seleccionado: *Monóculo 1*, *Monóculo 2*.
- Canales físicos de la placa NI-USB6009: ai0, ai4, ai1, ai5 para el *Monóculo 1* y ai2, ai6, ai3, ai7 para el *Monóculo 2*.
- Nombres que se les asigna a los canales: X11, X12, Y12, Y11 y X21, X22, Y22, Y21 respectivamente.

**Indicación del conector:** Se modifica la imagen del panel frontal, resaltando el conector correspondiente al detector seleccionado.

**Presentación de la pantalla de aplicación:** Cuando se acciona el botón **Comenzar**, se oculta la pantalla de configuración, se muestra la de aplicación y se le transfieren los parámetros de entrada.

**Retorno al Menú Principal:** Si el usuario terminó de ejecutar la aplicación o si no desea hacerlo, puede accionar el botón correspondiente del panel frontal para volver a la pantalla del **Menú Principal**.

## II. Pantalla de Aplicación

La siguiente figura muestra una captura de esta pantalla.

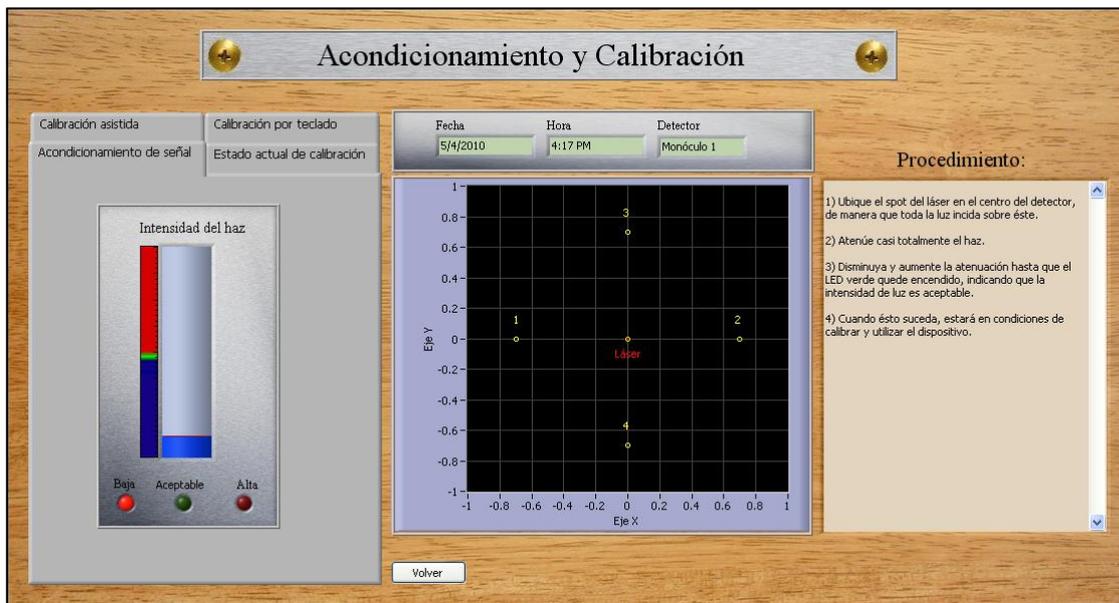
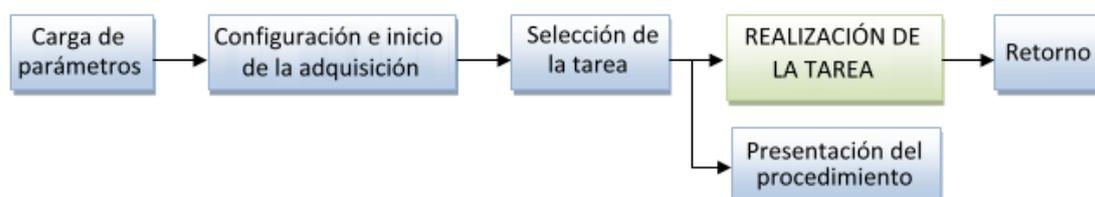


Figura 59

Su panel frontal, como muestra la figura 59, consta de:

- Un indicador de texto para mostrar el detector seleccionado.
- Un par de indicadores para la fecha y la hora actuales.
- Un selector del tipo pestaña para elegir la tarea a realizar. A su vez éste control contiene distintos controles e indicadores que se detallan más adelante.
- Un indicador de texto donde se presenta el procedimiento a seguir, que es diferente para cada tarea.
- Un indicador gráfico XY que se utiliza en algunas de las tareas.
- Un botón para volver a la pantalla de configuración.

**Implementación:**



**Detalles:**

**Carga de parámetros:** Se cargan los parámetros de entrada seleccionados en la pantalla de configuración.

**Configuración e inicio de la adquisición:** Utilizando los parámetros mencionados, se configura la placa NI-USB6009 para adquirir tensiones utilizando los canales y la velocidad de muestreo correspondientes. A continuación, se inicia la adquisición continua de datos y su almacenamiento en un *buffer circular* de entrada.

**Selección de la tarea:** Mediante el selector del panel frontal, el usuario elige una de las siguientes tareas a realizar.

1. Acondicionamiento de señal.
2. Estado actual de calibración.
3. Calibración asistida.
4. Calibración por teclado.

**Realización de la tarea:** El programa realiza la tarea seleccionada, permitiendo cambiarla por alguna de las otras propuestas o retornar a la pantalla de configuración, accionando el botón **Volver**.

**Presentación del procedimiento:** Se abre un archivo de texto que contiene el procedimiento de la tarea seleccionada y se muestra en el indicador de texto del panel frontal.

**Retorno:** Cuando el usuario acciona el botón **Volver**, se detiene la adquisición de datos, se cierra la pantalla de aplicación y vuelve a mostrarse la de configuración, permitiendo seleccionar otro detector o volver al **Menú Principal**.

*DETALLE: REALIZACIÓN DE LA TAREA*

1. Acondicionamiento de señal:

Al seleccionar esta tarea en el control de pestañas, se presentan los siguientes indicadores (figura 60):

- Un indicador del tipo “tanque” para la intensidad del haz.
- Tres LED para indicar la condición de aceptable o no de la misma.

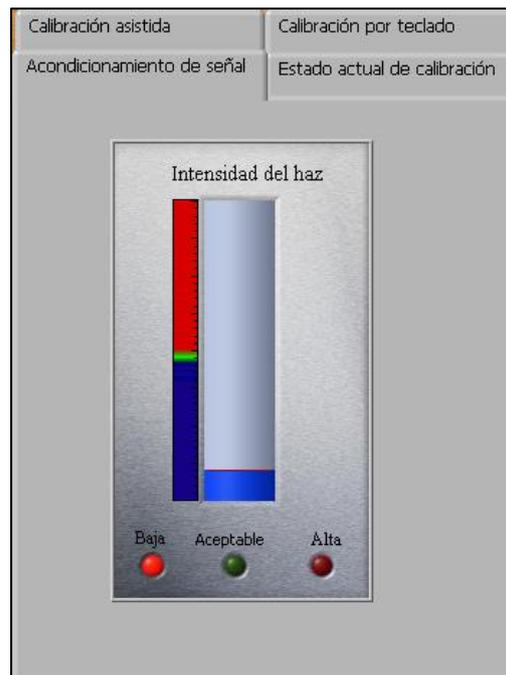
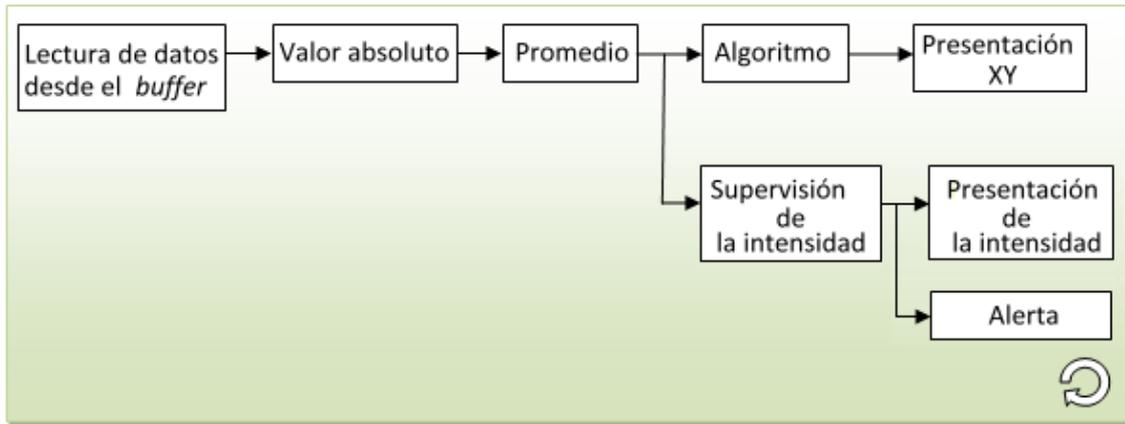


Figura 60

El código implementado consiste en un bucle repetitivo\* en el que se realizan las siguientes operaciones:



\*Los bloques que se ejecutan en forma repetitiva se indican con una flecha circular ubicada en la parte inferior derecha de los mismos.

**Detalles:**

**Lectura de los datos desde el buffer:** Se leen conjuntos de datos (paquetes) almacenados en el *buffer* de entrada a medida que éste se llena, a una velocidad tal que las muestras no se sobrescriban.

**Valor absoluto:** Se obtiene el valor absoluto de cada una de las muestras.

**Promedio:** Se promedian las muestras correspondientes a un mismo canal con el fin de obtener una visualización más estable, permitiendo posicionar el haz con mayor facilidad.

**Algoritmo:** Este bloque recibe las muestras de los cuatro canales de un detector y se encarga de obtener las coordenadas unitarias XY del *centroide* del haz que incide sobre el mismo, aplicando el siguiente algoritmo (ver Capítulo 2).

$$X_u = \frac{(Xp - Xn)}{(Xp + Xn)}$$

$$Y_u = \frac{(Yp - Yn)}{(Yp + Yn)}$$

Donde:

*Xp* = muestras correspondientes al eje X positivo.

*Xn* = muestras correspondientes al eje X negativo.

*Yp* = muestras correspondientes al eje Y positivo.

*Yn* = muestras correspondientes al eje Y negativo.

***Presentación XY:*** Se utiliza el indicador gráfico XY del panel frontal para representar, en cada instante, las coordenadas de salida del algoritmo, en valores unitarios. En el gráfico se resalta el centro del detector (coordenadas (0,0)) para que el usuario pueda centrar el haz, y de esta manera asegurar que toda la luz incida sobre el detector.

***Supervisión de la intensidad:*** Se ejecuta en paralelo, y tiene como objetivo obtener la intensidad del haz y determinar si se encuentra dentro del rango aceptable, por encima o por debajo (Ver Anexo II).

***Presentación de la intensidad:*** Se presenta el nivel de intensidad de luz incidente por medio del indicador del tipo “tanque” del panel frontal, que se llena hasta un nivel proporcional a la misma.

***Alerta:*** Según el resultado de la comparación, se enciende el LED correspondiente que indica si la intensidad es **Baja**, **Aceptable** o **Alta**, para que el usuario actúe en consecuencia, atenuando en mayor o menor medida el haz.

El procedimiento que se muestra en el indicador de texto del panel frontal durante la realización de la tarea es el siguiente:

- 1) Ubique el haz del láser en el centro del detector, de manera que toda la luz incida sobre éste.*
- 2) Atenúe casi totalmente el haz.*
- 3) Disminuya lentamente la atenuación hasta que el LED verde quede encendido, indicando que la intensidad de luz es aceptable.*
- 4) Cuando esto suceda, estará en condiciones de calibrar y utilizar el dispositivo.*

2. Estado actual de calibración:

Los factores de conversión de unidades permiten obtener las coordenadas del *centroide* en milímetros, ya que, como se explicara anteriormente, el algoritmo empleado devuelve coordenadas unitarias. El programa utiliza uno para el eje X y otro para el eje Y de cada detector. Estos factores se almacenan en archivos binarios con extensión LOG que además contienen la fecha y la hora de la última calibración.

Para facilitar el manejo de dichos archivos, existe uno para cada monóculo: *Monóculo 1.LOG* y *Monóculo 2.LOG*, ubicados en una de las carpetas de aplicación del programa.

Mediante ésta tarea, el usuario puede visualizar el contenido actual de los archivos de calibración para modificar o no los factores.

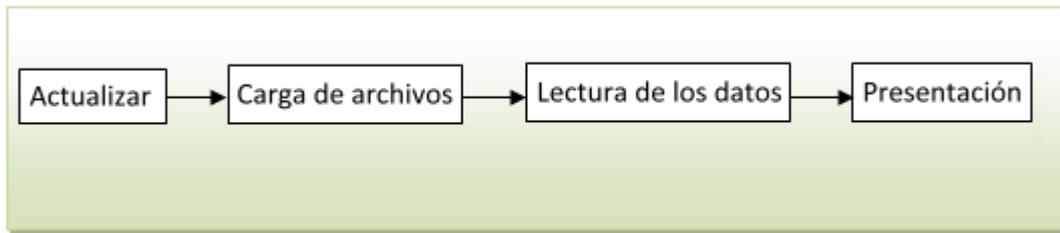
En la pantalla pueden observarse los siguientes controles e indicadores (figura 61):

- Un indicador de texto para el nombre del detector.
- Un indicador numérico para el factor del eje X.
- Un indicador numérico para el factor del eje Y.
- Un indicador para la fecha de la última calibración.
- Un indicador para la hora de la última calibración.
- Un botón **Actualizar**.



Figura 61

Las operaciones que se realizan pueden resumirse en el siguiente diagrama:



*Detalles:*

**Actualizar:** Cada vez que el usuario acciona el botón homónimo, se desencadena la secuencia de operaciones.

**Carga de archivos:** Se abre el archivo *.LOG* correspondiente al detector seleccionado.

**Lectura de los datos:** Se leen los datos del archivo binario y se separan los factores, la fecha y la hora.

**Presentación:** Los datos leídos se presentan en pantalla mediante los indicadores correspondientes.

El indicador de procedimiento del panel frontal muestra el siguiente texto:

*Los indicadores muestran los factores de conversión obtenidos durante la última calibración realizada, así como la fecha y hora de la misma.*

*Para actualizar los datos, presione el botón "Actualizar".*

*Para modificar los factores, utilice alguna de las pestañas de calibración.*

3. Calibración asistida:

Se guía al usuario en el procedimiento que permite calcular los factores de conversión de unidades y almacenarlos en los archivos correspondientes (Ver anexo II).

El programa requiere que se capturen las coordenadas unitarias de cuatro puntos específicos del detector (puntos 1, 2, 3 y 4). Estos puntos corresponden al 70% del rango en ambos ejes y se indican en el gráfico XY del panel frontal, como muestra la figura 59.

Para ello se incluyen los siguientes controles e indicadores (figura 62):

- Un control para seleccionar el punto a capturar.
- Un indicador numérico por cada punto para presentar las coordenadas capturadas.
- Un control por cada eje para ingresar el desplazamiento real.
- Un indicador numérico por cada eje para presentar el factor calculado.
- Un botón para guardar los datos.

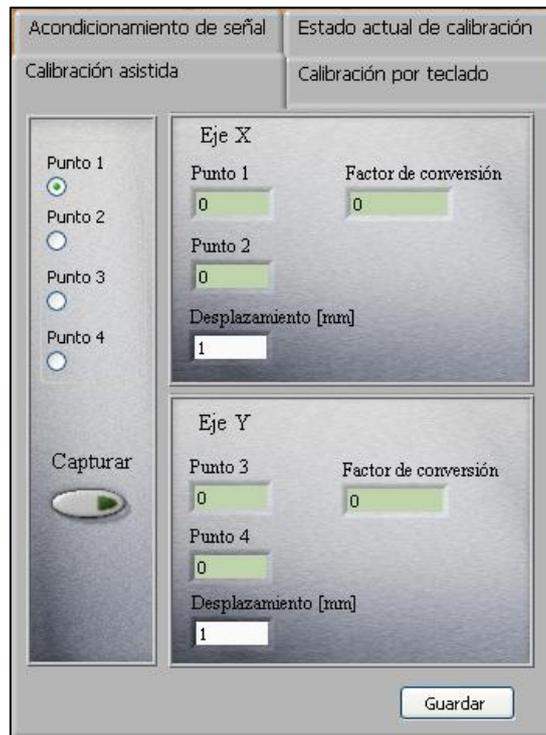
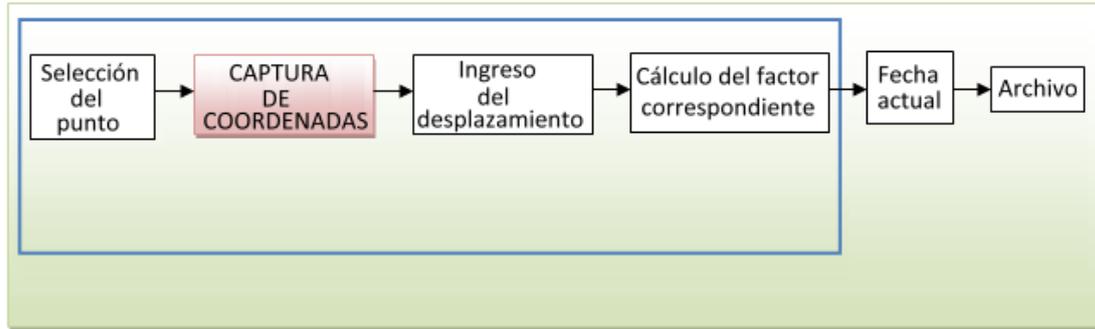


Figura 62

En esta instancia, el código del programa realiza las siguientes operaciones:



*Detalles:*

**Selección del punto:** Mediante el control selector del panel frontal, el usuario elige el punto que desea capturar.

**Captura de coordenadas:** Una vez que, utilizando el gráfico XY, ubicó el haz sobre el punto seleccionado, debe accionar el botón **Capturar** para que las coordenadas del punto sean almacenadas en los indicadores correspondientes.

**Ingreso del desplazamiento:** El usuario ingresa, a través de los controles del panel frontal, el desplazamiento que realizó entre los puntos capturados.

**Cálculo del factor correspondiente:** Con las coordenadas capturadas y el desplazamiento correspondiente, se calcula el factor de conversión para cada eje como sigue (Ver Anexo II):

$$\text{Factor eje } X = \frac{\text{desplazamiento } X(\text{mm})}{\text{coordenadas } (2) - \text{coordenadas}(1)}$$

$$\text{Factor eje } Y = \frac{\text{desplazamiento } Y(\text{mm})}{\text{coordenadas } (2) - \text{coordenadas}(1)}$$

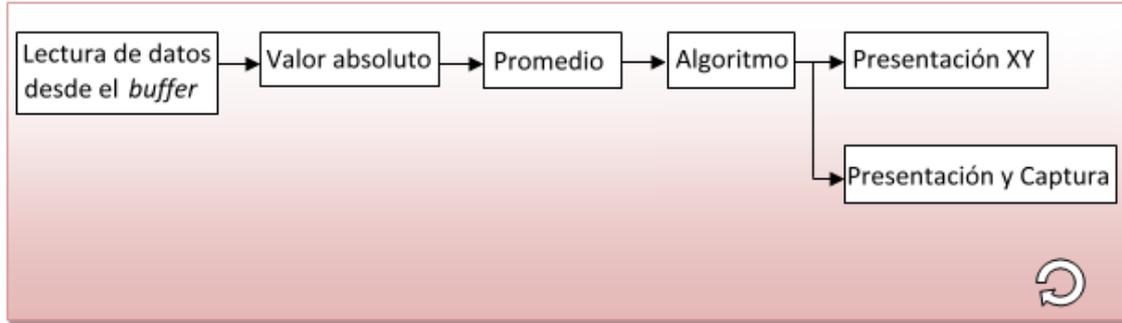
**Fecha actual:** Automáticamente se añaden a los factores calculados, la fecha y la hora actuales.

**Archivo:** Cuando el usuario acciona el botón **Guardar**, todos los datos se almacenan en el archivo binario correspondiente al detector seleccionado. Existen dos archivos: *Monóculo 1.LOG* y *Monóculo 2.LOG*, ubicados en una de las carpetas de aplicación del programa. Sólo se modificarán estos archivos si se acciona el botón.

*Aclaración:*

Los bloques enmarcados dentro del recuadro azul se ejecutan tantas veces como puntos se deseen capturar.

*DETALLE: CAPTURA DE COORDENADAS*



En el bucle se leen continuamente los datos desde el *buffer*, realizando las operaciones que se describieran antes, y presentando los resultados en el gráfico XY.

**Presentación y Captura:** Cuando el usuario acciona el botón **Capturar**, se almacenan en los indicadores del panel frontal las coordenadas unitarias del punto seleccionado.

El procedimiento que se muestra en este caso es el siguiente:

*Para calcular los factores de conversión de unidades debe capturar sucesivamente los puntos 1, 2, 3 y 4.*

- 1) Seleccione el punto que desea capturar.*
- 2) Ubique el haz en el punto correspondiente sobre el gráfico XY.*
- 3) Presione el botón "Capturar" para almacenar temporalmente las coordenadas unitarias del punto.*
- 4) Repita el procedimiento para los puntos restantes.*
- 5) Puede visualizar los factores calculados en los indicadores correspondientes.*
- 6) Si lo desea, puede modificar alguno de los puntos registrados, repitiendo el procedimiento de selección y captura.*
- 7) Ingrese los desplazamientos que realizó entre los puntos de un mismo eje en los controles correspondientes. Automáticamente se calcularán y presentarán los factores de conversión.*
- 8) Una vez que se hayan obtenido los valores definitivos, presione el botón "Guardar", de lo contrario no se guardarán los cambios.*

4. Calibración por teclado:

En el selector de pestañas se presentan dos controles numéricos en los cuales el usuario debe especificar los factores de conversión de unidades de cada eje, y un botón para guardarlos en los archivos correspondientes (figura 63).

Esta tarea resulta útil en aquellos casos en los que las condiciones de trabajo no permiten realizar una calibración asistida.

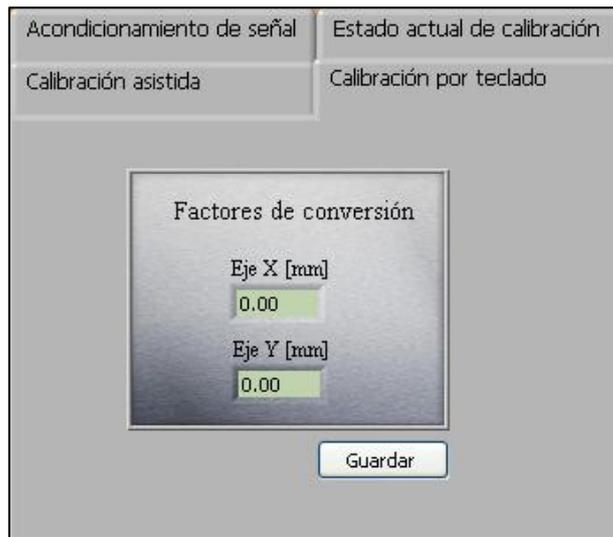
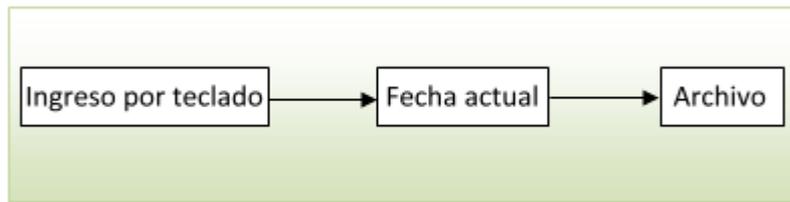


Figura 63

La secuencia de operaciones que se realiza es la siguiente:



*Detalles:*

**Ingreso por teclado:** El usuario ingresa los factores de conversión mediante los controles numéricos correspondientes.

**Archivo:** Cuando el usuario acciona el botón **Guardar**, todos los datos se guardan en el archivo binario correspondiente al detector seleccionado. De lo contrario, no son almacenados.

Procedimiento:

*Ingrese los factores de conversión y presione el botón "Guardar" para guardar los cambios.*

*Debe tener en cuenta que el valor de los factores por defecto es de 5mm por unidad para ambos ejes.*

### 5.2.2. Observación

Esta aplicación consiste en la presentación, en tiempo real, de la posición del *centroide* del haz sobre el DPC mediante un gráfico XY.

#### I. Pantalla de configuración

En la figura 64 se observa una captura de esta pantalla.

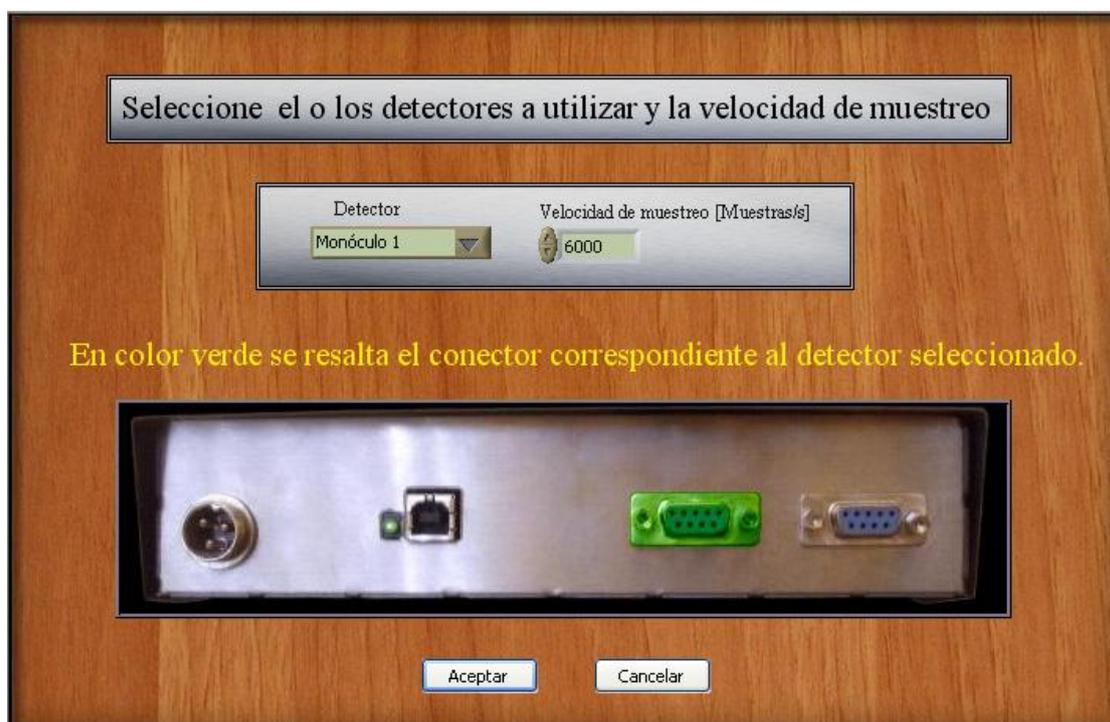
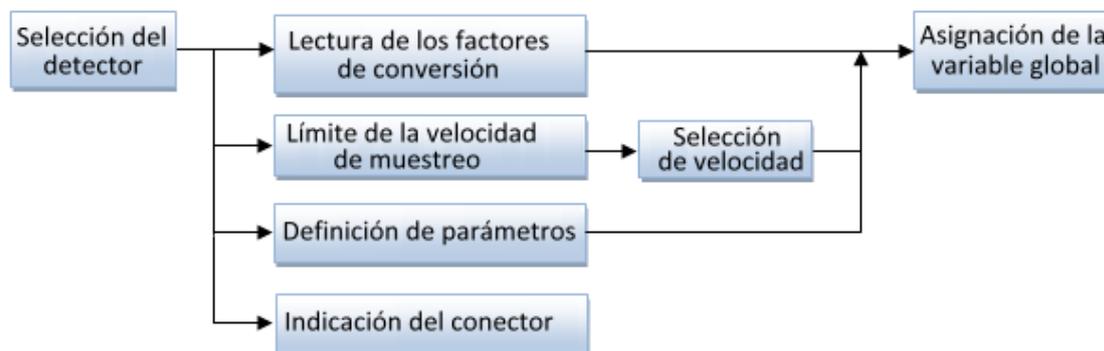


Figura 64

Su panel frontal consta de los siguientes controles e indicadores:

- Un control para seleccionar el o los detectores a utilizar.
- Un control para elegir la velocidad de muestreo.
- Una imagen del frente del dispositivo que resalta el conector del detector seleccionado.
- Un botón para aceptar la configuración actual y continuar hacia la próxima pantalla.
- Un botón para cancelar y volver al menú principal.

**Implementación:****Detalles:**

**Selección del detector:** Se realiza mediante el control del panel frontal. Las opciones disponibles son: *Monóculo 1*, *Monóculo 2*, y *Binóculo* (ambos).

**Lectura de los factores de conversión:** A partir de la selección, y de manera transparente al usuario, se leen los factores de conversión desde el archivo de calibración.

**Definición de parámetros:** Al mismo tiempo se definen los canales físicos de la placa NI-USB6009 y los nombres que se les asignará.

**Indicación del conector:** Se modifica la imagen del panel frontal, indicando el conector del detector seleccionado.

**Límite de la velocidad de muestreo:** Se limita la velocidad de muestreo a 12000 Muestras/s para un solo detector y 6000 Muestras/s para dos.

**Selección de velocidad:** El usuario selecciona la velocidad de muestreo mediante el control correspondiente.

**Asignación de la variable global:** Cuando se presiona el botón **Aceptar**, se almacenan en una *variable global*<sup>4</sup> los siguientes parámetros:

- Detector/es seleccionado/s.
- Velocidad de muestreo.
- Canales físicos.
- Nombres de los canales.
- Factores de conversión.

Estos parámetros son los de entrada para la pantalla siguiente.

<sup>4</sup> En Lab VIEW, una variable global puede contener uno o más datos del tipo numérico, carácter, booleano, etc.

## II. Pantalla de aplicación

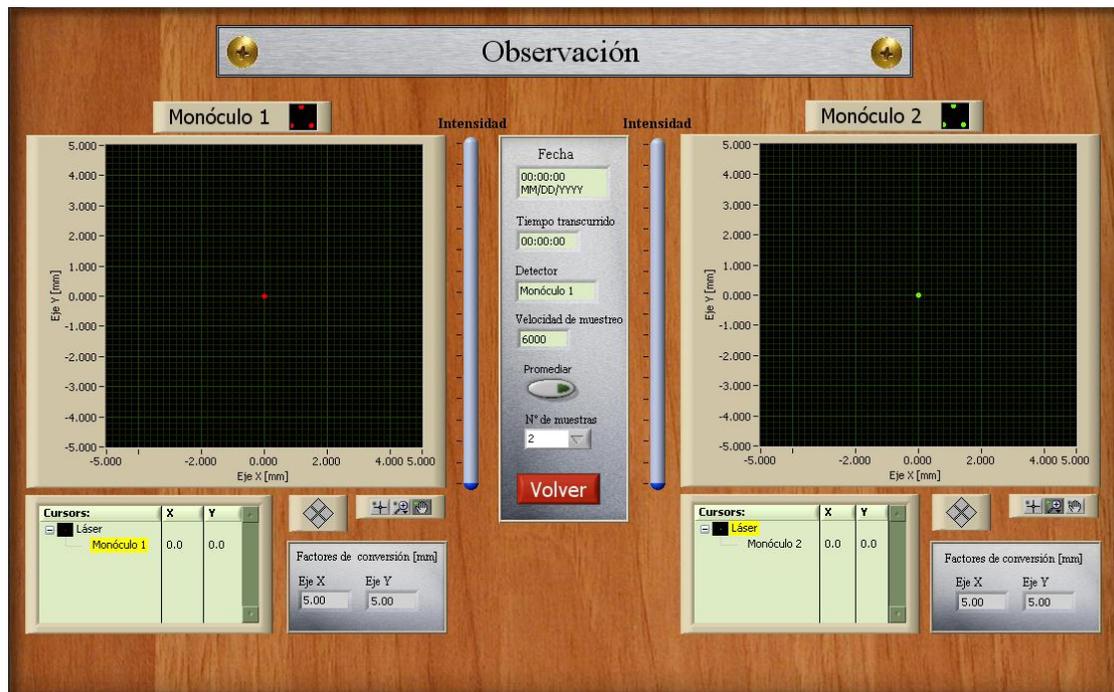


Figura 65

Como se observa en la figura 65, su panel frontal consta de los siguientes controles e indicadores:

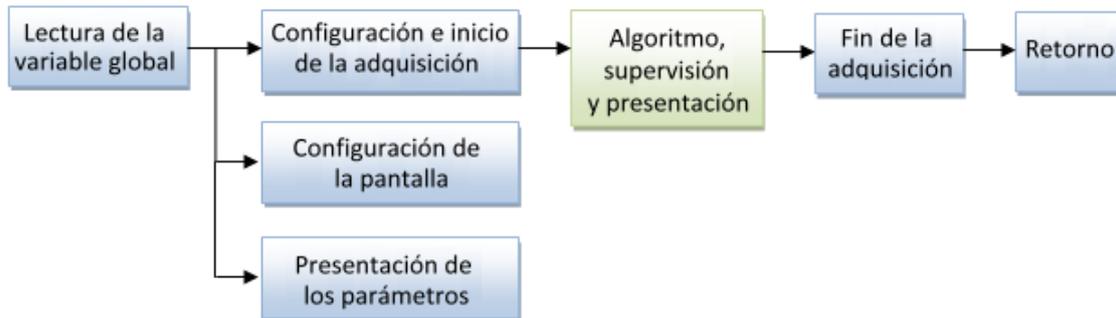
- Un gráfico XY para cada detector.
- Un indicador gráfico de intensidad de luz para cada detector.
- Un indicador para la fecha actual.
- Un indicador para el tiempo transcurrido desde el inicio de la tarea.
- Un indicador de texto para indicar el detector seleccionado.
- Cuatro indicadores numéricos para los factores de conversión (dos por cada detector).
- Un indicador numérico para la velocidad de muestreo.
- Un botón para activar el promedio de las muestras.
- Un control para seleccionar el número de muestras que se promedian.
- Un botón para volver al menú principal.

La figura 66 muestra más claramente algunos de los indicadores y controles mencionados.



Figura 66

**Implementación:**



**Detalles:**

**Lectura de la variable global:** Se cargan los parámetros seleccionados en la pantalla de configuración a través de la variable global.

**Configuración e inicio de la adquisición:** Utilizando los parámetros mencionados, se configura la placa NI-USB6009 para adquirir tensiones utilizando los canales y la velocidad de muestreo correspondientes. A continuación, se inicia la adquisición de datos y su almacenamiento en el *buffer* de entrada.

**Configuración de la pantalla:** Al mismo tiempo se define el tamaño de la pantalla, y se deshabilitan los indicadores correspondientes al detector que no se utilice.

**Presentación de los parámetros:** Se muestran en los indicadores del panel frontal, los parámetros de interés para el usuario (detector, velocidad de muestreo, factores de conversión, fecha, hora, y tiempo transcurrido).

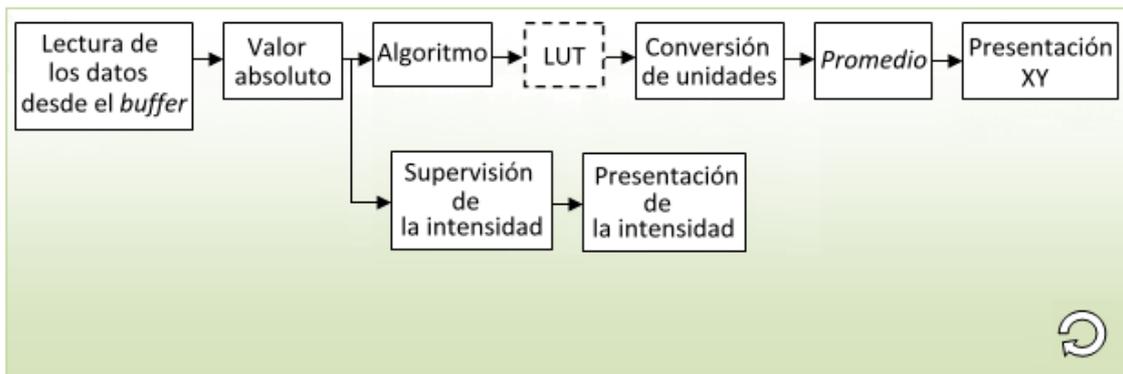
**Algoritmo, supervisión y presentación:** Es un bucle que se repite continuamente hasta que el usuario accione el botón **Volver**.

**Fin de la adquisición:** Cuando el usuario acciona el botón **Volver** del panel frontal, se detiene la adquisición de datos desde la placa NI-USB6009.

**Retorno:** Automáticamente se retorna a la pantalla del **Menú Principal**.

*DETALLE: ALGORITMO, SUPERVISIÓN Y PRESENTACIÓN*

En cada iteración del bucle se realizan las siguientes operaciones:



**Detalles:**

**LUT:** Consiste en una *Look Up Table* cuya función es obtener una respuesta lineal de los detectores para todo el rango de medición. La misma aún no ha sido implementada, pero constituye una futura optimización del sistema (Ver Anexo II).

**Conversión de unidades:** Se leen los factores de conversión desde el archivo de calibración correspondiente y se aplican a las coordenadas unitarias obtenidas mediante el algoritmo para obtener la posición en mm del *centroide* del haz.

**Promedio:** Según el estado del botón **Promediar** en el panel frontal, se efectúa el promedio de las muestras, con el fin de obtener una visualización más estable. Esta opción resulta útil en tareas que requieran determinar la posición del haz cuasi-estáticamente. El número de muestras a promediar puede seleccionarse mediante el control correspondiente en el panel frontal (2, 5, 10, 20, 50 o 100 muestras).

**Presentación XY:** Las coordenadas se presentan en pantalla mediante uno o dos gráficos XY. Estos gráficos tienen sus escalas graduadas en milímetros y poseen un indicador numérico donde se muestran instantáneamente las coordenadas del *centroide* del haz. Además permiten realizar zoom, desplazar la pantalla de visualización, agregar cursores y modificar las propiedades de los mismos (color, estilo, etc.). La figura 67 muestra uno de éstos indicadores gráficos.

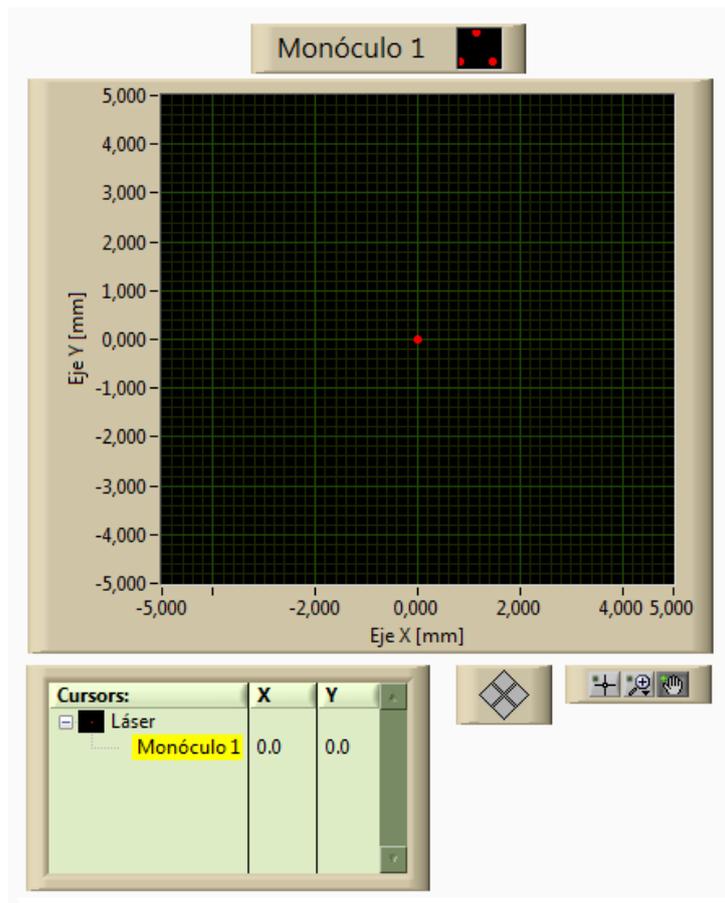


Figura 67

***Presentación de la intensidad:*** Un indicador por cada detector muestra en el panel frontal la intensidad del haz correspondiente. El color del indicador es verde cuando la intensidad está dentro del rango aceptable, azul si es baja, y rojo si es alta. De ésta manera se alerta al usuario cuando cambia significativamente la intensidad de luz de trabajo, por ejemplo al incidir el haz fuera del detector, o cuando un objeto se interpone entre éstos. La figura 68 muestra uno de éstos indicadores y sus posibles estados.

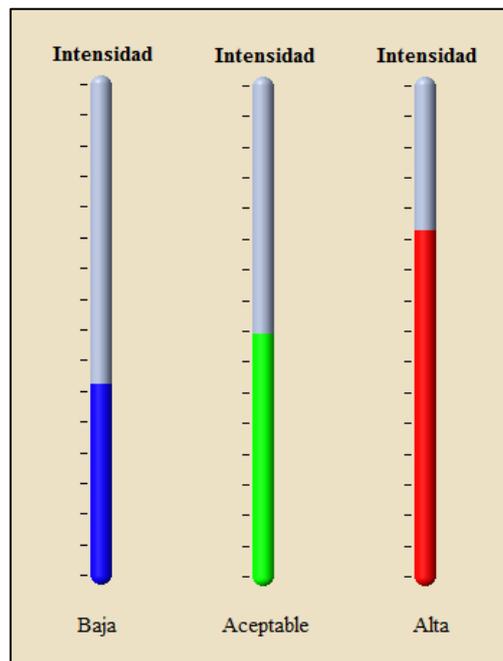


Figura 68

### 5.2.3. Registro

La tarea de registro es la que permite almacenar en archivos la posición del *centroide* del haz sobre el DPC en cada instante, para luego procesarla y obtener información específica sobre el fenómeno en estudio.

#### I. Pantalla de configuración

La figura 69 muestra una captura de esta pantalla.

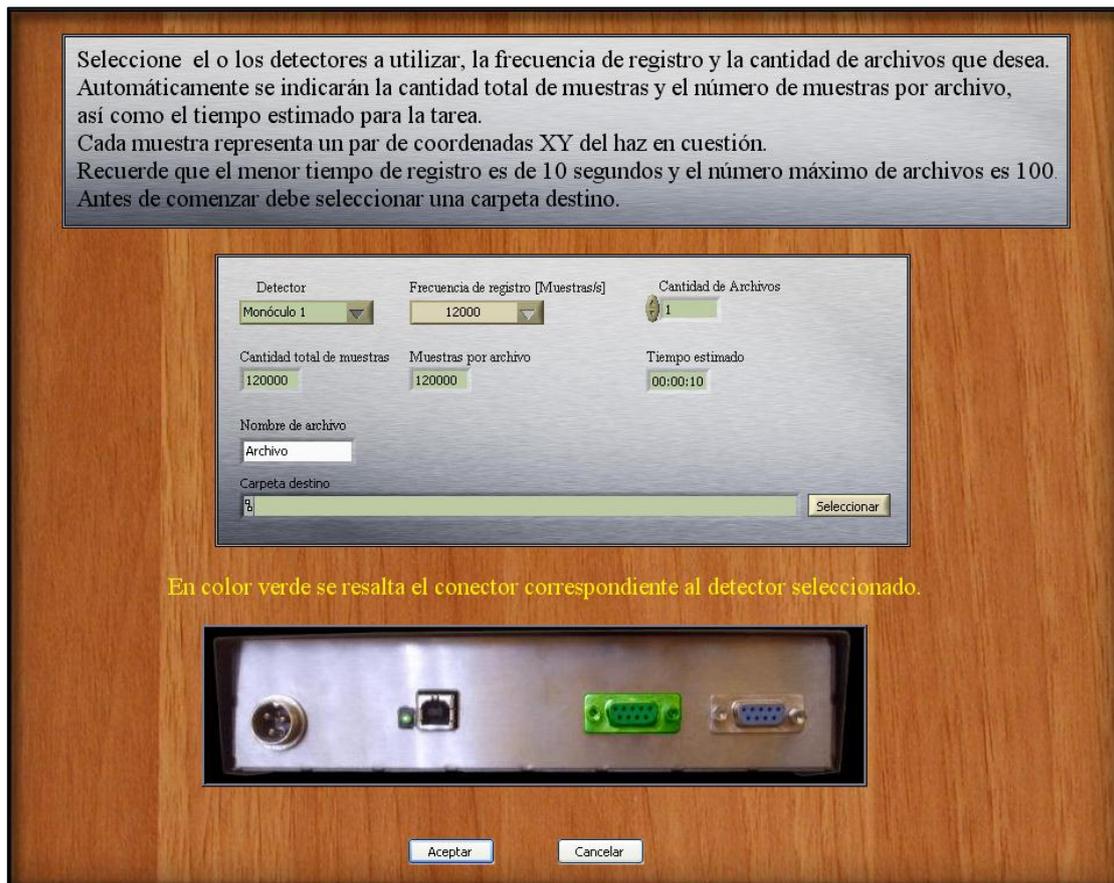


Figura 69

Su panel frontal consta de los siguientes controles e indicadores:

- Un control para seleccionar el o los detectores.
- Una imagen del frente del dispositivo que resalta el conector del detector seleccionado.
- Un control para seleccionar la velocidad de registro.
- Un control numérico para especificar la cantidad de archivos que se desea generar.
- Un indicador numérico para la cantidad total de muestras a registrar.
- Un indicador numérico de la cantidad de muestras por archivo.

- Un control para seleccionar la carpeta destino.
- Un control para seleccionar el nombre genérico de los archivos.
- Un indicador del tiempo estimado que requerirá la tarea.
- Un botón para aceptar la configuración actual y continuar hacia la próxima pantalla.
- Un botón para volver al **Menú Principal**.

En la figura 70 se muestra una ampliación de algunos de los controles e indicadores mencionados.

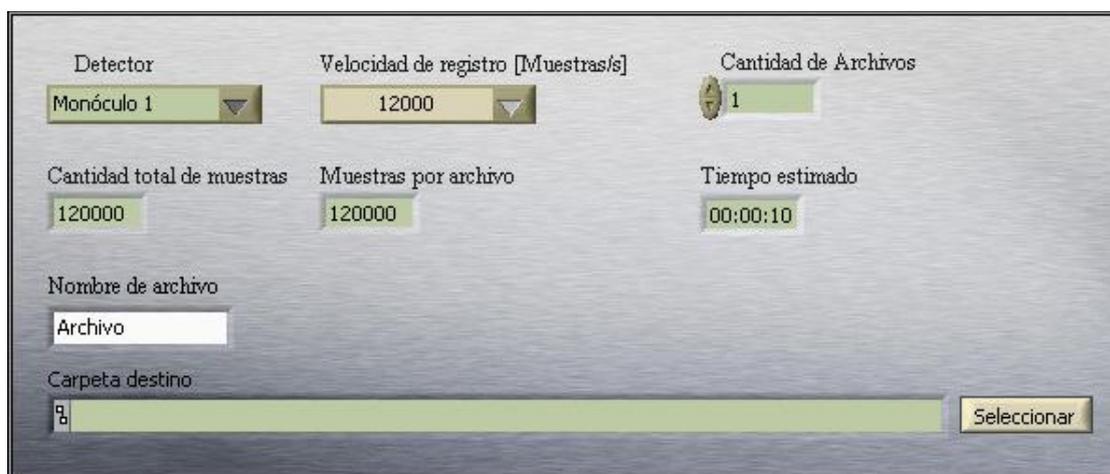


Figura 70

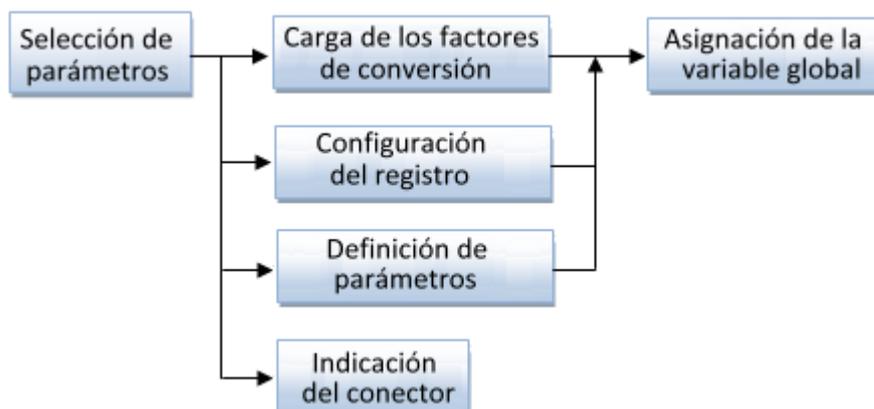
#### *Aclaraciones:*

La placa NI-USB6009 adquiere datos a la velocidad de muestreo, y los almacena en el *buffer* de entrada. De éste se leen “paquetes” de muestras de un tamaño determinado. Si en vez de registrar todas sólo se registra la última de cada paquete, el tiempo entre muestras registradas será mayor, o lo que es equivalente, la velocidad de registro será menor. La velocidad de registro, entonces, corresponde a la cantidad de muestras por segundo que se registran.

La relación entre la velocidad de muestreo y la velocidad de registro es el *factor de compresión* y es uno de los parámetros que se calcula antes de iniciar la aplicación.

Para facilitar la portabilidad de los archivos, se limitó el tamaño máximo de los mismos a 120000 muestras (pares de coordenadas).

El número máximo de archivos se limitó a 100, porque de ésta manera se alcanza la cantidad de muestras máxima que los usuarios a los cuales está destinado el SODP suelen procesar.

**Implementación:****Detalles:**

**Selección de parámetros:** Mediante los controles del panel frontal, el usuario selecciona el o los detectores, la frecuencia de registro, la cantidad de archivos, el nombre genérico de los mismos y la carpeta destino.

**Configuración del registro:** Se toman los parámetros seleccionados para calcular el tiempo estimado, la cantidad total de muestras, las muestras por archivo y el factor de compresión necesario para obtener la frecuencia de registro deseada. También se obtiene la ruta de acceso a la carpeta destino especificada. Todos los valores calculados se muestran a través de los respectivos indicadores.

**Definición de parámetros:** A partir de la selección del detector, y de manera transparente al usuario, se definen los canales físicos, los nombres que se les asignará y la velocidad de muestreo, que es la máxima disponible para cada caso.

**Asignación de la variable global:** Se almacenan en una variable global los siguientes parámetros

- Detector/es seleccionado/s.
- Velocidad de registro.
- Velocidad de muestreo.
- Factor de compresión.
- Canales físicos.
- Nombres de los canales.
- Factores de conversión.
- Ruta de acceso a la carpeta destino seleccionada.

## II. Pantalla de aplicación

La figura 71 muestra una captura de esta pantalla.

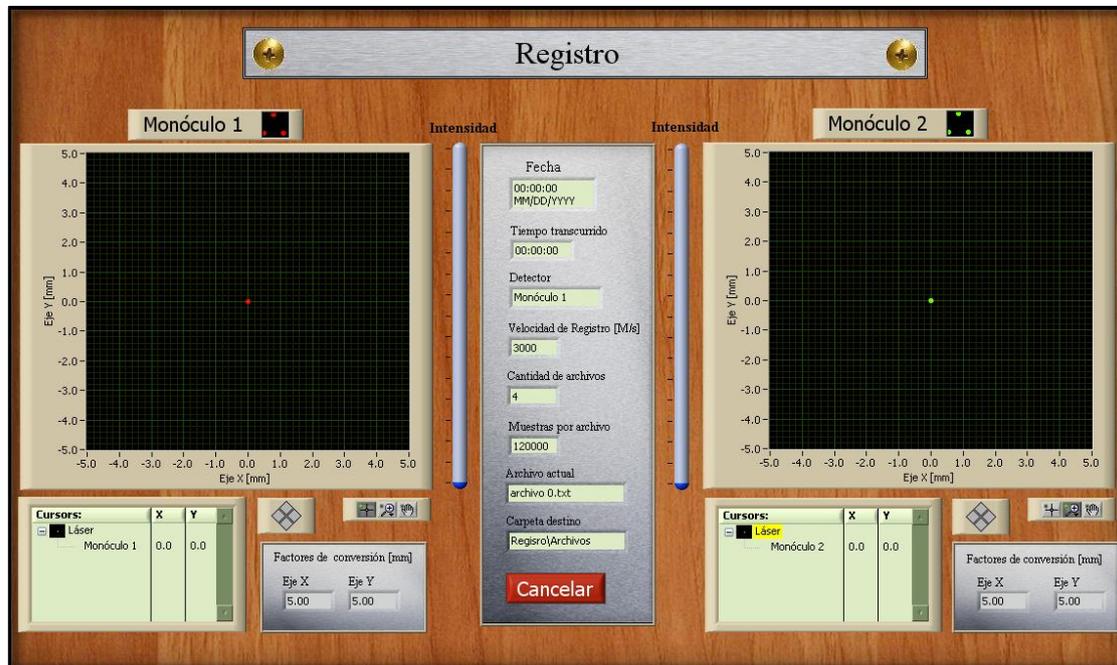


Figura 71

Su panel frontal es similar al correspondiente a la pantalla de observación, con el agregado de los siguientes indicadores:

- Velocidad de registro.
- Cantidad de archivos que se generarán.
- Cantidad de muestras por archivo.
- Nombre del archivo actual.
- Nombre de la carpeta destino.

La figura 72 muestra más claramente algunos de los indicadores y controles mencionados.

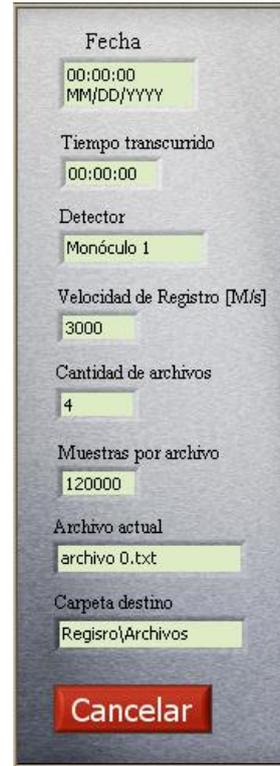
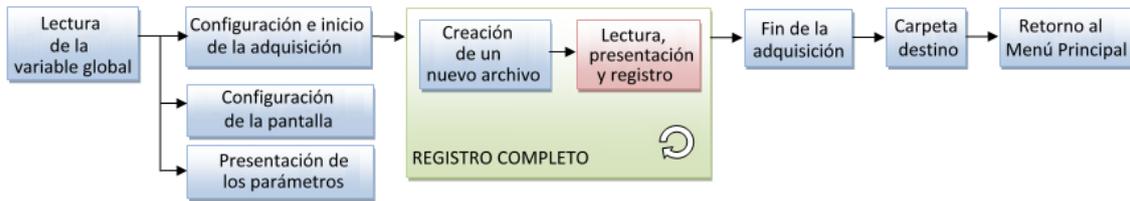


Figura 72

**Implementación:**

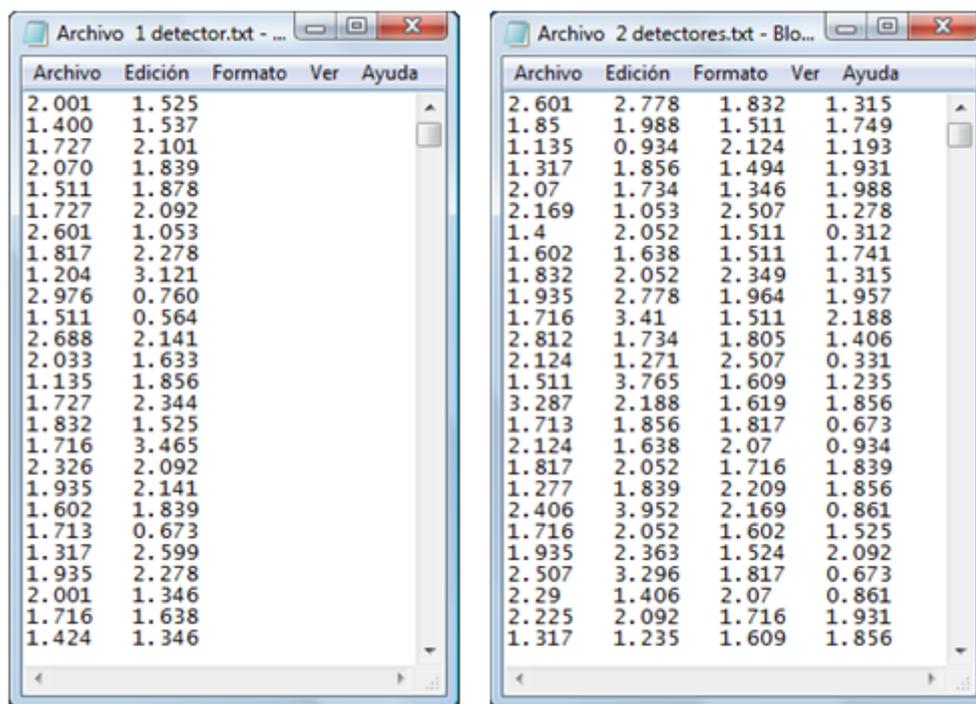


**DETALLE: REGISTRO COMPLETO:**

Se repite tantas veces como el número de archivos que se desee generar.

**Creación de un nuevo archivo:** Se crea un archivo de texto con el nombre genérico ingresado en el control correspondiente, y en la carpeta seleccionada. Al nombre se le añade un número que se incrementa a medida que se generan los archivos. Los archivos contienen dos columnas de datos por cada detector. La primera corresponde a la coordenada X y la segunda a la coordenada Y, del *centroide* del haz.

La figura 73 muestra el contenido de un par de archivos generados al utilizar uno y dos detectores.



Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda
2.001	1.525			
1.400	1.537			
1.727	2.101			
2.070	1.839			
1.511	1.878			
1.727	2.092			
2.601	1.053			
1.817	2.278			
1.204	3.121			
2.976	0.760			
1.511	0.564			
2.688	2.141			
2.033	1.633			
1.135	1.856			
1.727	2.344			
1.832	1.525			
1.716	3.465			
2.326	2.092			
1.935	2.141			
1.602	1.839			
1.713	0.673			
1.317	2.599			
1.935	2.278			
2.001	1.346			
1.716	1.638			
1.424	1.346			

Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda
2.601	2.778	1.832	1.315	
1.85	1.988	1.511	1.749	
1.135	0.934	2.124	1.193	
1.317	1.856	1.494	1.931	
2.07	1.734	1.346	1.988	
2.169	1.053	2.507	1.278	
1.4	2.052	1.511	0.312	
1.602	1.638	1.511	1.741	
1.832	2.052	2.349	1.315	
1.935	2.778	1.964	1.957	
1.716	3.41	1.511	2.188	
2.812	1.734	1.805	1.406	
2.124	1.271	2.507	0.331	
1.511	3.765	1.609	1.235	
3.287	2.188	1.619	1.856	
1.713	1.856	1.817	0.673	
2.124	1.638	2.07	0.934	
1.817	2.052	1.716	1.839	
1.277	1.839	2.209	1.856	
2.406	3.952	2.169	0.861	
1.716	2.052	1.602	1.525	
1.935	2.363	1.524	2.092	
2.507	3.296	1.817	0.673	
2.29	1.406	2.07	0.861	
2.225	2.092	1.716	1.931	
1.317	1.235	1.609	1.856	

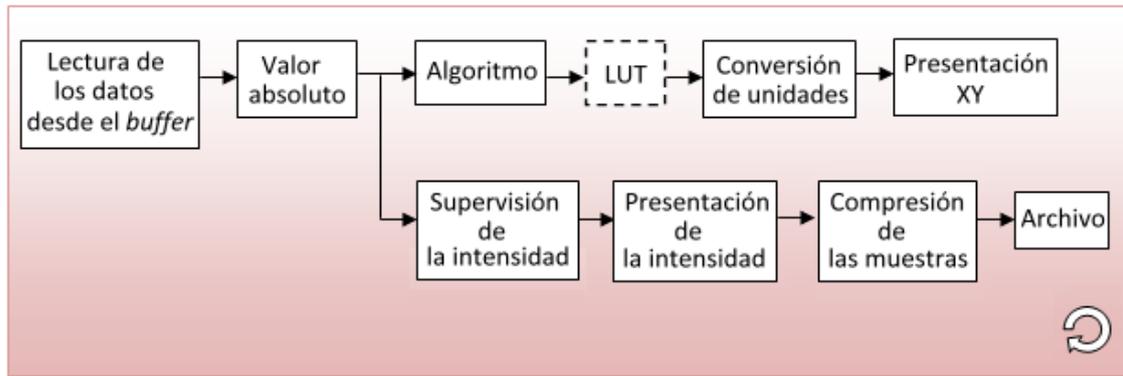
Figura 73

**Lectura, presentación y registro:** Es otro bucle que se repite y durante el cual se leen las muestras desde el *buffer* de entrada, se presentan en el gráfico correspondiente, y se almacenan en el archivo creado.

**Carpeta destino:** Se abre automáticamente la carpeta destino que contiene los archivos generados, permitiendo abrir uno de ellos.

**Retorno al Menú Principal:** Automáticamente se cierra la ventana de aplicación y se muestra la pantalla del **Menú Principal**.

*DETALLE: LECTURA, PRESENTACIÓN Y REGISTRO*



**Compresión de las muestras:** Utilizando el factor de compresión calculado en base a la velocidad de registro deseada, se selecciona la última muestra de los sucesivos bloques de datos que el mismo define. De esta forma, las velocidades de registro disponibles son las siguientes:

- Un solo detector: 12000, 6000, 4000, 3000, 2400 y 2000 M/s.
- Dos detectores: 6000, 3000, 2000, 1500, 1200, 1000 M/s.

**Archivo:** Cada 2 segundos, se añaden datos al archivo creado anteriormente. Cuando se completan 10 segundos de adquisición, el programa cierra el archivo y sale del bucle para crear uno nuevo si es necesario, o salir del bucle *REGISTRO COMPLETO* si se alcanzó el número de archivos definido en la pantalla de configuración.

#### 5.2.4. Simulación

En esta instancia, el programa realiza una presentación de datos generados de manera continua por software, simulando una adquisición y permitiendo ejecutar el programa para su presentación o entrenamiento de uso, sin la necesidad de contar con el dispositivo.

Los datos generados corresponden a un movimiento sinusoidal en ambos ejes de un *haz virtual*. Al interactuar con la pantalla, el usuario puede:

- Habilitar o no la generación de datos.
- Modificar la amplitud del desplazamiento en cada eje por separado.
- Modificar la frecuencia (única para ambos ejes).
- Aumentar o disminuir la amplitud del ruido.
- Simular la atenuación del haz virtual, la cual se manifiesta en el indicador de intensidad.
- Modificar los factores de conversión de unidades para observar su efecto en el gráfico XY.
- Promediar las muestras, tomando de a 2, 5, 10, 20, 50 o 100.

Para ello, se incluyen en su panel frontal los siguientes controles e indicadores, como se muestra en forma general en la figura 74, y se detalla en las figuras 75 y 76:

- Un gráfico XY
- Un botón para activar la generación de señal.
- Un control para aumentar o disminuir la amplitud del ruido.
- Dos controles numéricos para ingresar los factores de conversión.
- Dos controles para ingresar las amplitudes en X e Y de los desplazamientos del haz.
- Un control para ingresar la frecuencia.
- Un botón para activar el promedio de muestras.
- Un control selector para el número de muestras a promediar.
- Un control para aumentar o disminuir la atenuación del haz.
- Un indicador para la intensidad de luz incidente.
- Un botón para volver al **Menú Principal**.

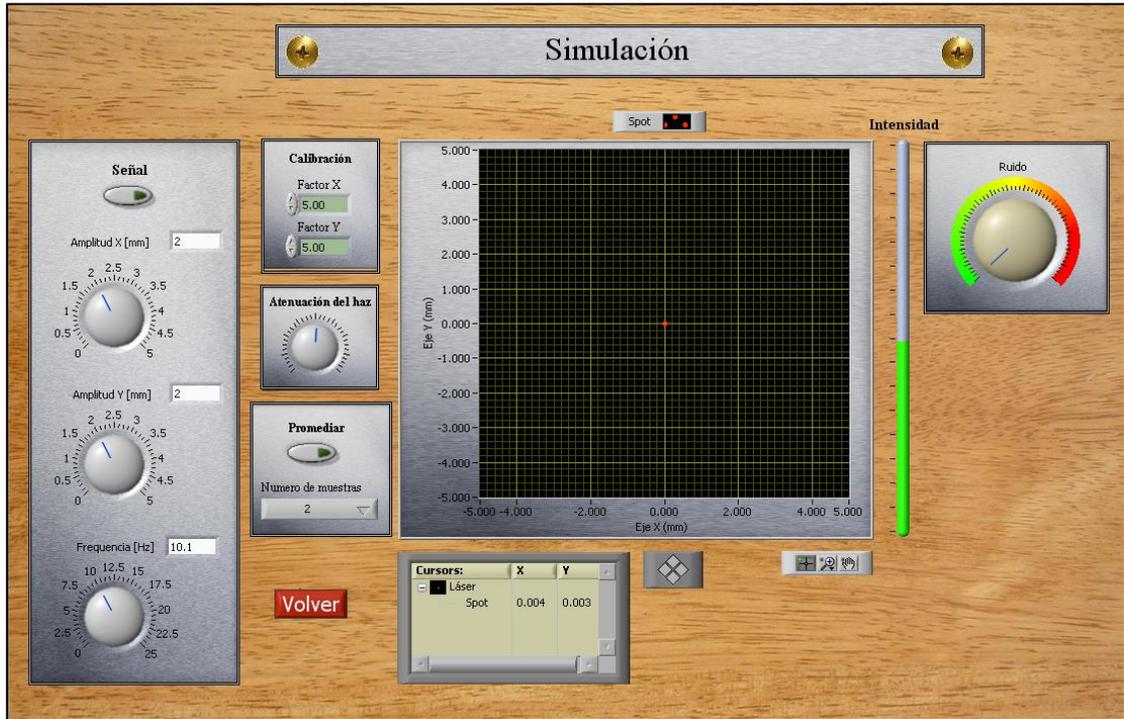


Figura 74

La figura 75 detalla los controles de la generación de señal, atenuación, calibración y promedio, mientras que la figura 76 muestra el control de amplitud del ruido



Figura 75

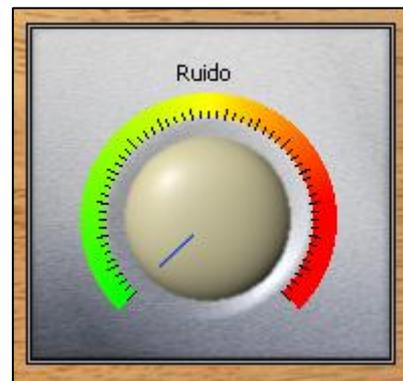
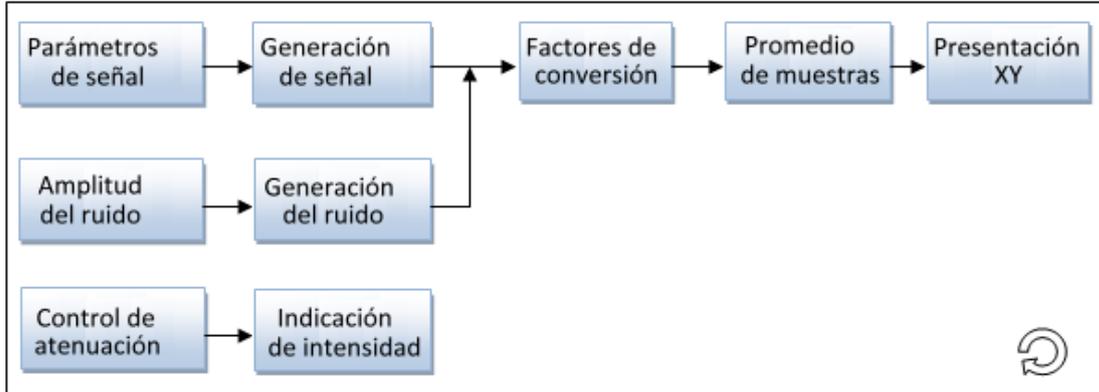


Figura 76

**Implementación:**

La simulación se ejecuta continuamente hasta que el usuario accione el botón **Volver**, en cuyo caso se retorna al **Menú Principal**.



**Detalles:**

**Parámetros de señal:** El usuario ingresa los parámetros de la señal que desea simular. Esta se compone de un desplazamiento sinusoidal en cada eje. Pueden configurarse las amplitudes, por separado, y la frecuencia, que es la misma para ambos.

**Generación de señal:** Mediante un botón en el panel frontal, se habilita la generación de señal.

**Amplitud del ruido:** Un control permite aumentar o disminuir la amplitud del ruido.

**Generación del ruido:** La generación de ruido, al contrario de la señal, no puede deshabilitarse. Para simular la ausencia de ruido, puede disminuirse hasta cero su amplitud.

**Factores de conversión:** Se multiplica el resultado de añadir el ruido a la señal, por los factores de conversión que el usuario ingresa mediante los controles del panel frontal.

**Promedio de muestras:** El botón **Promediar** habilita esta opción, pudiendo seleccionarse el número de muestras a promediar.

**Control de atenuación:** Un control en el panel frontal simula el aumento o disminución de la atenuación del haz.

***Indicación de intensidad:*** El indicador de intensidad simula la variación de la misma al modificar la atenuación, indicando si es aceptable o no, de manera análoga a los indicadores de intensidad de las aplicaciones anteriores.

### **5.3. Ayuda**

Al accionar el botón **Ayuda** del **Menú Principal**, se abre una página escrita en HTML que contiene enlaces hacia la documentación del sistema, que se encuentra en archivos con formato PDF. Existen dos tipos de documentación:

- Especificaciones técnicas: Describe las características del dispositivo completo.
- Guía del usuario: Explica, paso a paso, cómo utilizar las distintas aplicaciones del programa.

Esta documentación es básica y será ampliada a medida que los usuarios interactúen con el sistema, indicando los eventuales inconvenientes y proponiendo modificaciones para satisfacer sus necesidades.



## Capítulo 6. Integración final del sistema.

### 6.1. Ensayo integrador

Con el objetivo de verificar el correcto funcionamiento del sistema al integrar los módulos de hardware y software desarrollados previamente, se decidió realizar un ensayo integrador.

El mismo consiste en la observación y registro de desplazamientos cuasi-estáticos de un haz de luz láser, para ser comparados con aquellos medidos mediante un instrumento patrón.

El siguiente es un esquema simplificado del montaje implementado.

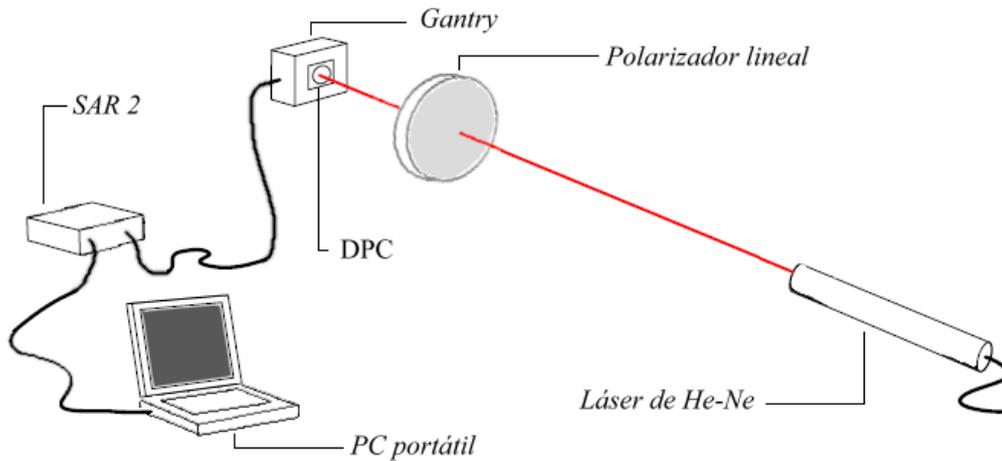


Figura 77

Detalles:

- Dispositivo láser: He-Ne Melles Griot 05-LHP-991
- Detector: SC-10D (Tetra-lateral)
- Distancia entre la fuente de señal y el detector: 2 m
- Regulación de la intensidad: Mediante un polarizador lineal
- Entrada del SAR 2: *Monóculo 1*
- PC portátil: Contiene el programa de aplicación desarrollado especialmente para el SODP.
- *Gantry*: Es el dispositivo que oficia de instrumento patrón. El mismo consiste en una herramienta de control numérico que permite, mediante un software adecuado, realizar y medir desplazamientos de su cabezal en los 3 ejes. En el esquema simplificado se representa únicamente dicho cabezal, al cual se fijó

el DPC para poder desplazarlo con precisión y contrastar los desplazamientos con los registrados mediante el SODP.

Especificaciones principales del instrumento patrón:

***Gantry***

**Modelo:** Techno Inc. HL325BM203213005

**Recorrido:**

- X: 1250 mm
- Y: 1030 mm

**Motores:** Paso a Paso

**Repetibilidad:**  $\pm 0,01$  mm

**Exactitud:**  $\pm 0,1$  mm /300 mm

**Máxima carga en el eje Z:** 22,7 kg

**Velocidad libre de carga:** 127 mm/s

**Fuerza de empuje en baja velocidad:** 91 kg

**Resolución:** 0,0125 mm

**Eje Z (Vertical)**

**Modelo:** Techno Inc. HL315BM512040005

**Recorrido:** 175 mm

**Motor:** Paso a Paso

**Repetibilidad:**  $\pm 0,01$  mm

**Exactitud:**  $\pm 0,1$  mm /300 mm

**Máxima carga:** 22,5 kg

**Velocidad libre de carga:** 127 mm/s

**Fuerza de empuje en baja velocidad:** 91 kg

**Peso:** 11,3 kg

**Resolución:** 0,0125 mm

Antes de proceder con el ensayo, se decidió realizar algunos registros previos de prueba, y al analizar los resultados obtenidos, se observó un fenómeno inesperado que motivó la realización de una experiencia distinta.

Dicho fenómeno consiste en la aparición de una señal aparentemente periódica y de procedencia, en principio, desconocida. A continuación se muestra uno de los gráficos obtenidos para la coordenada X del *centroide*.

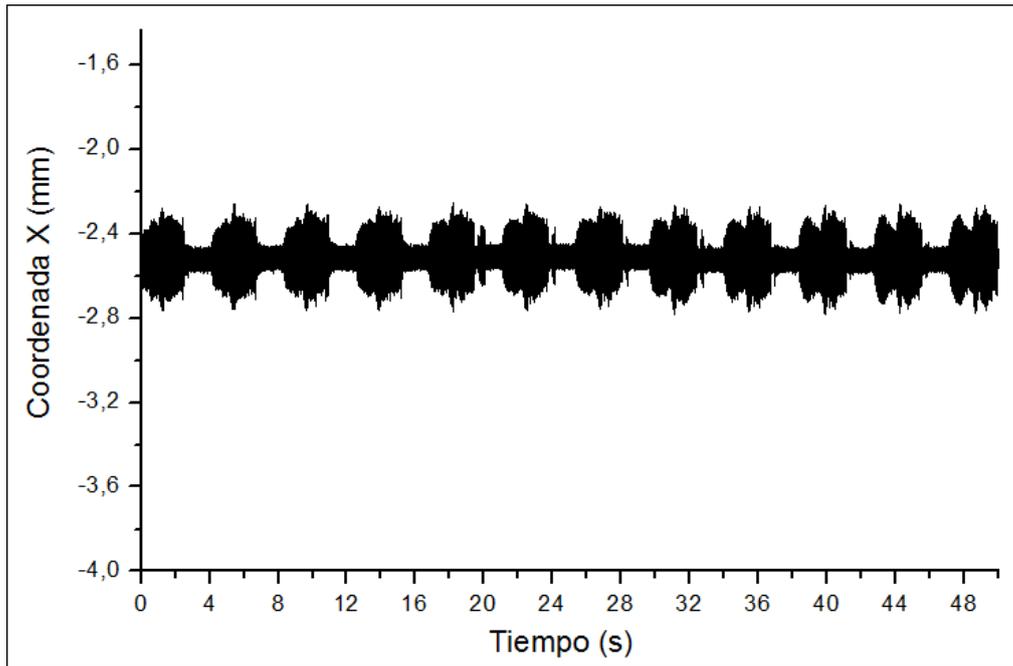


Figura 78

Con el fin de identificar el origen de dicha señal, se decidió monitorear simultáneamente las entradas del SAR 2 utilizando un osciloscopio.

La figura observada en instrumento se correspondía con la registrada por el SODP, es decir que las fluctuaciones estaban presentes en las señales antes de ingresar al dispositivo, en las etapas previas del sistema.

Una nueva prueba, consistente en obstruir el haz de manera que no incida sobre el DPC, fue determinante para llegar a una conclusión sobre origen del fenómeno. El osciloscopio mostró que al obstruir el haz, el fenómeno desaparece, observándose únicamente el ruido blanco del ambiente de trabajo. Por lo tanto se concluye que las fluctuaciones provienen del dispositivo láser utilizado como fuente de señal.

Los registros presentados corresponden a la coordenada X del *centroide* del haz incidente, y las fluctuaciones observadas deben interpretarse como movimientos de dicho *centroide* debidos a cambios en la distribución

de energía del haz. Los gráficos obtenidos para la coordenada Y resultan análogos a los mostrados.

De común acuerdo con los futuros usuarios del SODP, se decidió reemplazar el ensayo propuesto inicialmente por uno de comparación entre distintos dispositivos láser para determinar en qué condiciones se encuentran las fuentes de señal disponibles, constituyendo además un ejemplo de utilización del sistema desarrollado.

## 6.2. Comparación entre distintos dispositivos láser

Empleando el mismo montaje previsto para el ensayo integrador, se realizaron registros de las coordenadas del *centroide* de un haz de luz láser en 3 instancias, utilizando distintas fuentes de señal, con el fin de comparar el deterioro en la estabilidad de la señal debido al tiempo de uso de los dispositivos.

En todas las mediciones se acondicionó el haz previamente para que la densidad de potencia no supere la recomendada por el fabricante de los DPC y se utilizó la máxima velocidad de registro disponible en el sistema al utilizar un solo detector (12000 M/s).

Se utilizaron los siguientes dispositivos láser:

- He-Ne de 10 mW, Modelo Melles Griot 05-LHP-991, con más de *8000 hs* de uso, denominado láser MHU (Muchas Horas de Uso).
- He-Ne de idénticas características al anterior pero con menos de *3000 hs* de uso, denominado láser PHU (Pocas Horas de Uso).
- Estado sólido de 5 mW con menos de *3000 hs* de uso, denominado láser ES (Estado Sólido).

Las posiciones absolutas registradas difieren entre las 3 mediciones debido a que los haces no incidieron precisamente en el mismo lugar del detector, pero esto no interfiere con el ensayo, ya que se prioriza observar la variación de la posición al permanecer estático el dispositivo láser.

### 6.2.1. Registros de corta duración

En las condiciones antes mencionadas, se realizaron registros de 100 s de duración.

Los siguientes gráficos muestran los datos obtenidos correspondientes a la coordenada X del *centroide* del haz en cada instancia.

i. Láser MHU

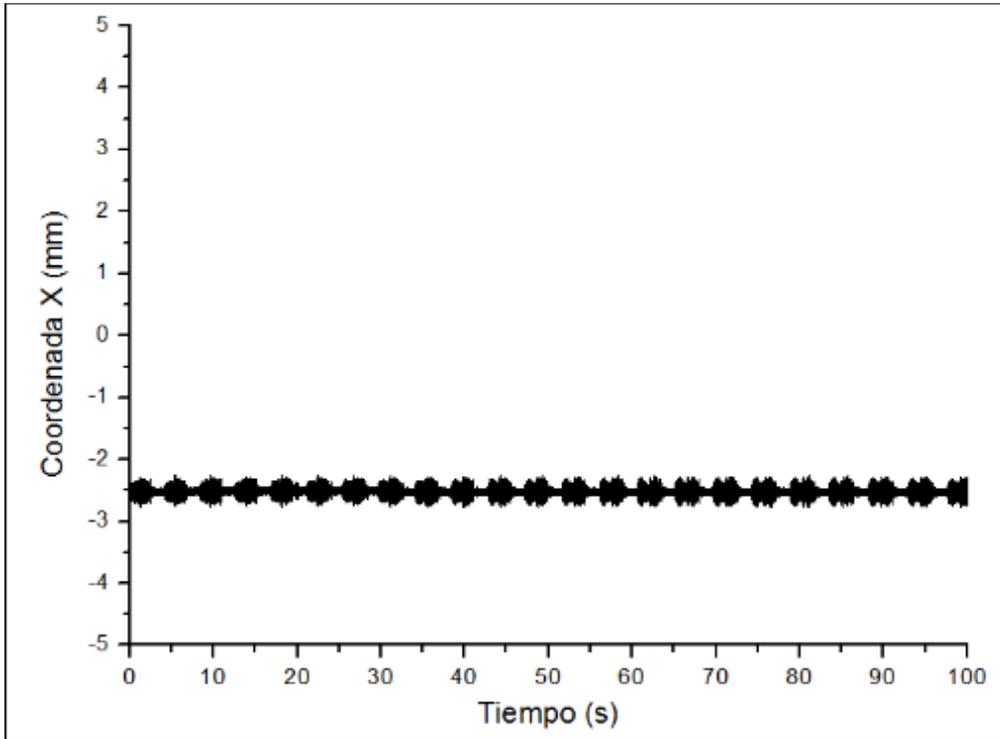


Figura 79: Coordenada X. Láser MHU

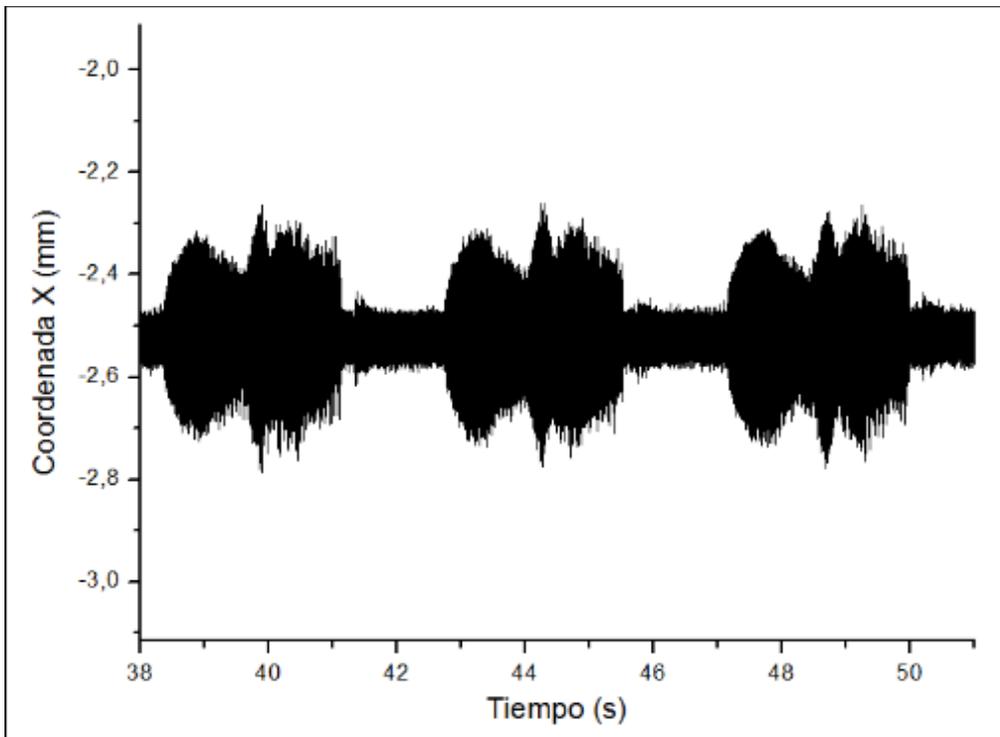


Figura 80: Coordenada X. Láser MHU (Zoom)

ii. Láser PHU

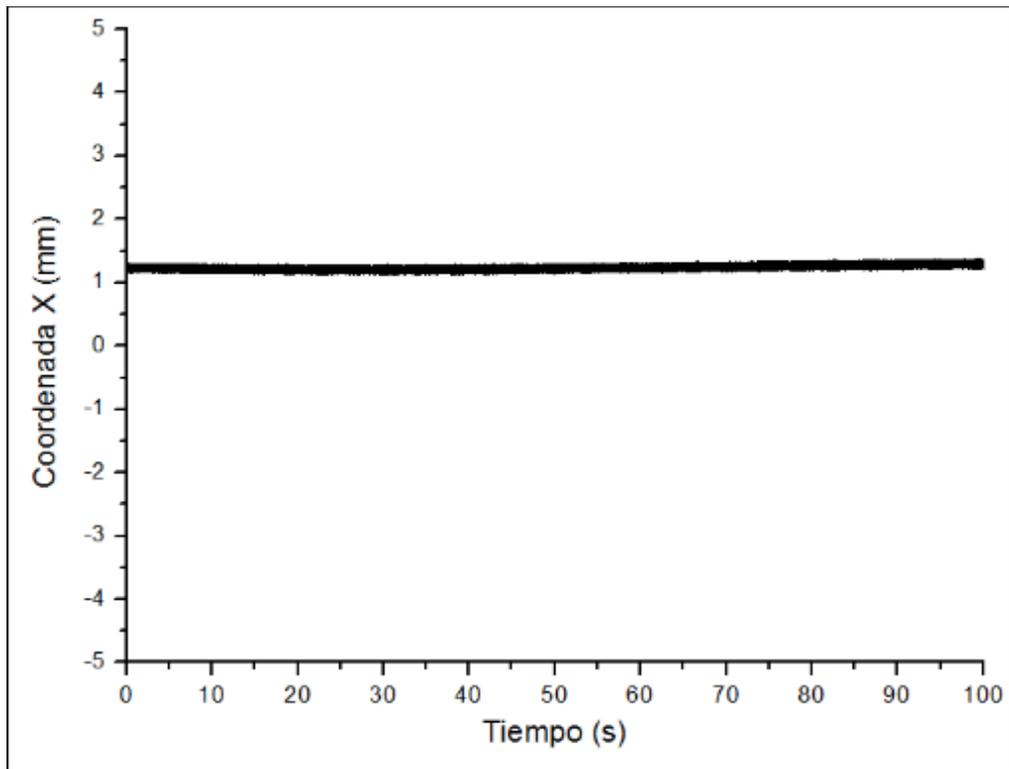


Figura 81: Coordenada X. Láser PHU

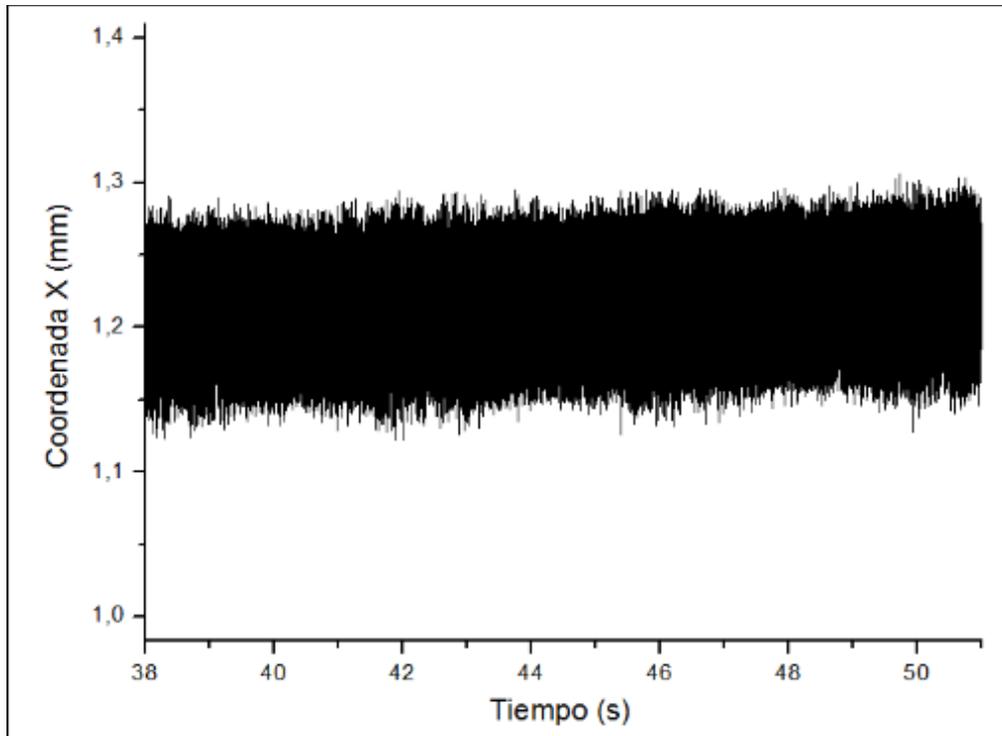


Figura 82: Coordenada X. Láser PHU (Zoom)

iii. Láser ES

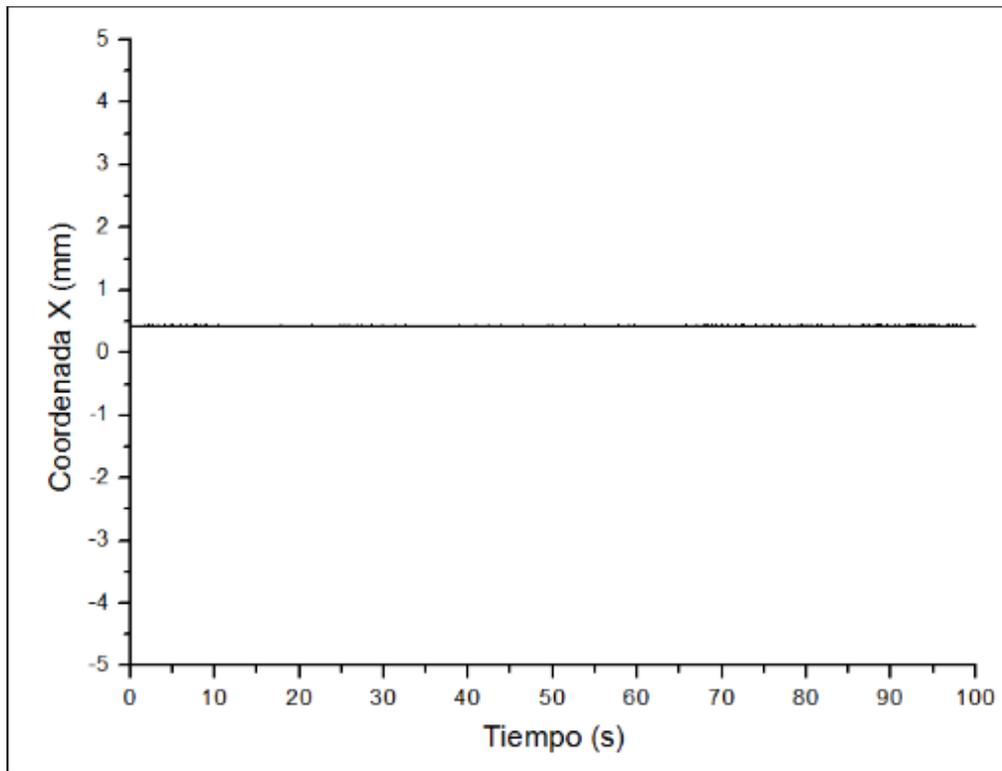


Figura 83: Coordenada X. Láser ES

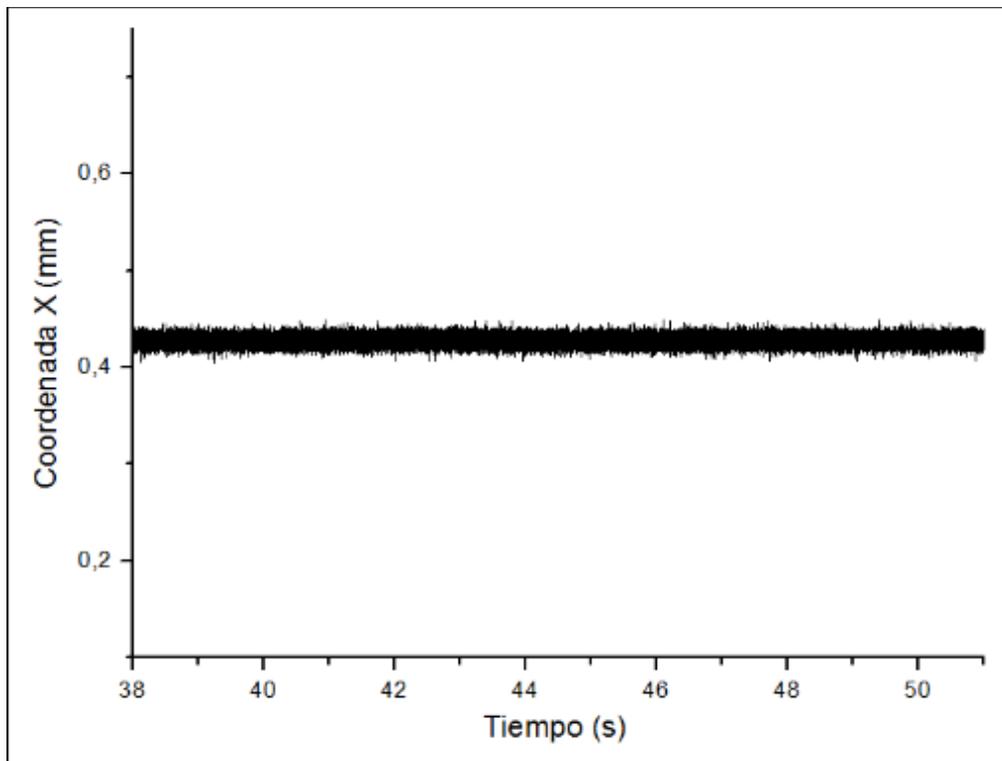


Figura 84: Coordenada X. Láser ES (Zoom)

**Observaciones:**

Los registros correspondientes al *centroide* del haz del láser MHU presentan grandes fluctuaciones periódicas, de hasta 540  $\mu\text{m}$ , mientras que las obtenidas con el láser PHU muestran una respuesta mucho más estable, con fluctuaciones casi imperceptibles y una dispersión máxima de alrededor de 200  $\mu\text{m}$ . Por otro lado, el láser ES es, de los tres dispositivos, el que presenta mejor comportamiento, sin fluctuaciones y con una dispersión del orden de los 40  $\mu\text{m}$ .

En las hojas de datos de los dispositivos de He-Ne, se especifica un cambio en el modo (Mode sweeping) menor al 2%. Debido a que, al cambiar el modo, cambia la posición del *centroide* dentro del haz, pueden corresponderse dichos parámetros.

Una variación del 100% en la posición del *centroide* implicaría un desplazamiento igual a un diámetro del haz, por lo tanto es necesario conocer el diámetro que, en teoría, tiene el haz al incidir sobre el DPC.

Para calcularlo, se recurre a otra de las especificaciones del dispositivo láser: la divergencia.

La divergencia de un haz electromagnético, como la luz láser, es una medida angular del incremento en el diámetro del mismo con respecto a la distancia desde la apertura óptica desde donde emerge.

Si se conoce el diámetro del haz en dos puntos separados ( $D_2$ ,  $D_1$ ), y la distancia ( $l$ ) entre dichos puntos, la divergencia del haz está dada por:

$$\text{Divergencia} = 2 \tan^{-1} \left( \frac{D_2 - D_1}{2l} \right)$$

Utilizando los siguientes datos del láser:

- Diámetro del haz (mm):  $0,65 \pm 5\% = D_1$
- Divergencia del haz (mrad):  $1,24 \pm 5\%$

Y para la distancia  $l = 2$  m, el diámetro del haz sobre la superficie del detector ( $D_2$ ) resulta:

$$D_2 = (4 \times \tan(\frac{1,24 \times 10^{-3}}{2})) + 0,65 \times 10^{-3} \text{ [m]}$$

$$D_2 \cong 0,00313 \text{ m} = 3130 \mu\text{m}$$

Tomando  $D_2$  como el 100% de variación en la posición del *centroide*, se observa que las dispersiones obtenidas con los láseres PHU y MHU (ambos de He-Ne), resultan del 6,4% y 17,3% respectivamente. La primera se mantiene en el orden de las especificadas, mientras que la segunda es casi 9 veces mayor. Este deterioro en la calidad de la señal se atribuye al envejecimiento del dispositivo con las horas de uso.

La dispersión obtenida con el láser ES no es comparable debido a que la estructura de éste es distinta, y no se cuenta con sus hojas de datos.

### 6.2.2. Registros de larga duración

Nuevamente se hicieron registros de la posición, pero esta vez durante períodos de 500 s, para observar la evolución del fenómeno en el tiempo.

#### i. Láser MHU

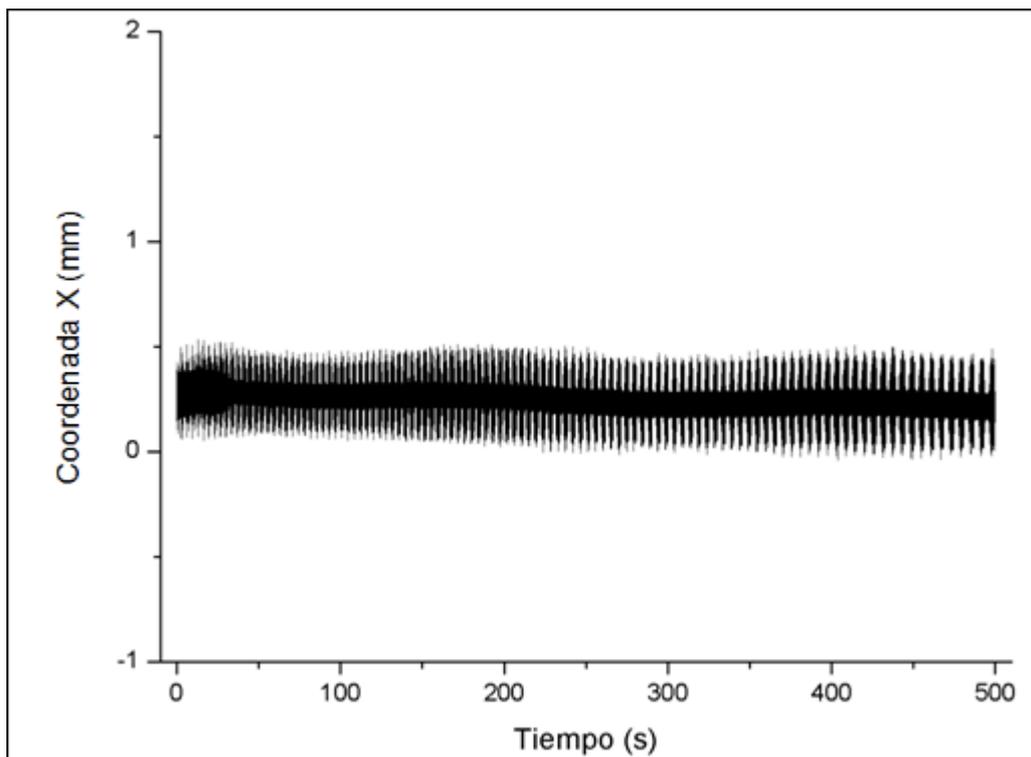


Figura 85: Ensayo largo. Láser MHU

ii. Láser PHU

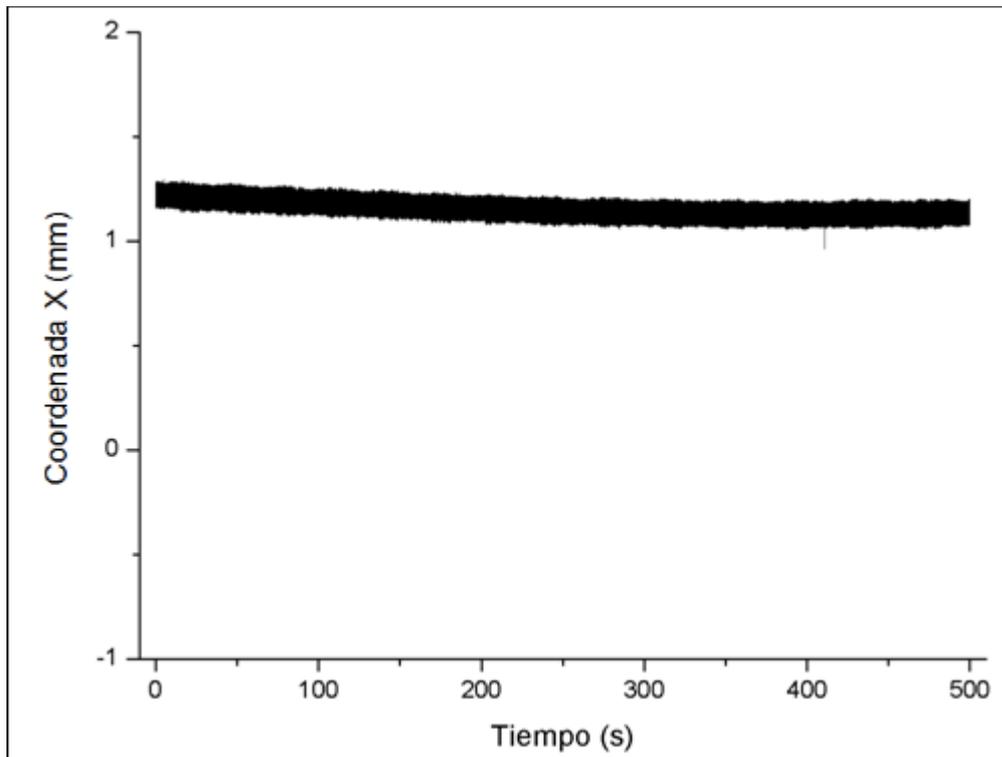


Figura 86: Ensayo largo. Láser PHU

iii. Láser ES

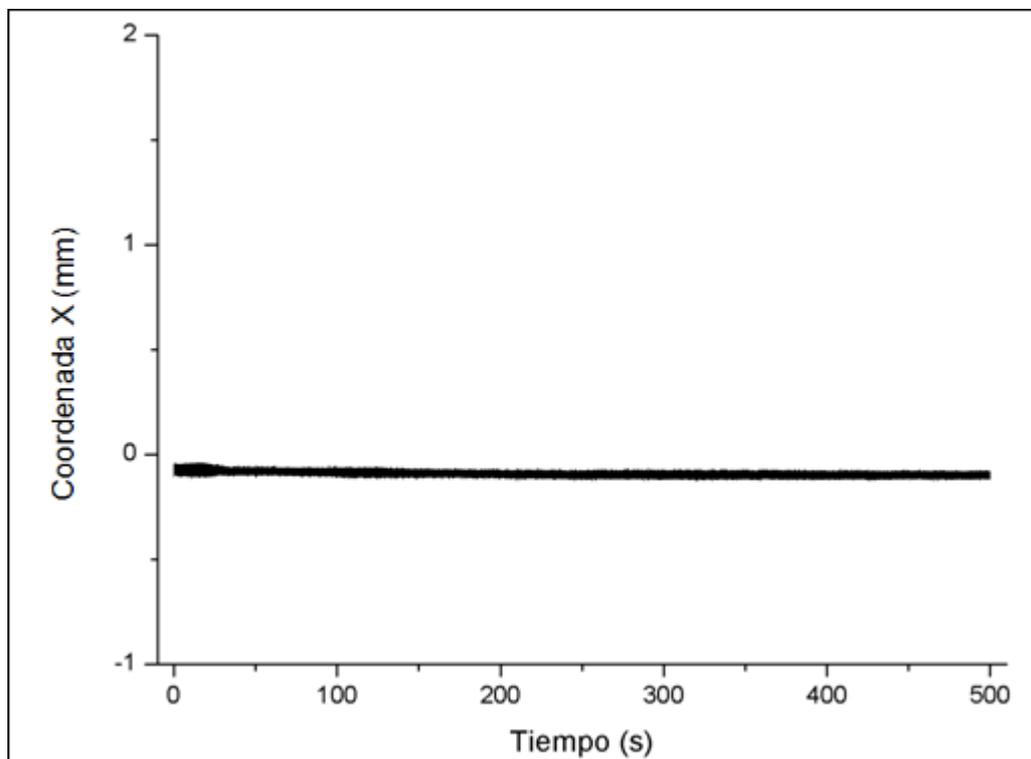


Figura 87: Ensayo largo. Láser ES

*Observaciones:*

Los registros del láser MHU muestran que el fenómeno se mantiene en el tiempo, aunque con una leve variación en la frecuencia con que aparecen las fluctuaciones. Los láseres PHU y ES siguen sin presentar anomalías.

**6.2.3. Conclusiones**

Gracias a las mejores prestaciones del SODP en comparación con las del sistema preexistente (velocidad de muestreo 15 veces mayor), pudieron observarse perturbaciones en la fuente de señal que antes habían permanecido ocultas.

Cabe acotar que, incluyendo el sistema en alguna de sus etapas, convertidores A/D y que estos al tomar muestras integran la señal, es esperable que, a mayor tasa de conversión, que implica menores tiempos de integración, se manifiesten dichas variaciones.

## CONCLUSIONES

Se realizó la actualización de un sistema opto-electrónico apto para la determinación continua de la posición, cumpliendo con los objetivos prefijados.

Entre las mejoras del sistema actual se destacan:

- Mayor velocidad de muestreo (hasta 12000 M/s para un solo detector, y hasta 6000 M/s para dos)
- Mayor resolución (12 bits + 1 para indicar el signo)
- Regulación de la intensidad de la fuente de señal
- Transmisión de los datos a través del puerto USB
- Compatibilidad con sistemas operativos actuales

Algunas de estas mejoras permiten observar características de la fuente de señal que no eran observables con el sistema anterior. Por ejemplo, a partir de la prestación del SODP, ha podido apreciarse el cambio en la calidad del haz de fuentes de He-Ne, con las horas de uso.

Por otro lado, el nuevo sistema resulta apto para registrar cambios en la posición del haz, de amplitudes del orden de los milímetros a frecuencias de hasta 6 kHz al utilizar un detector, y 3 kHz al utilizar dos. Esta situación, a la fecha, resulta impracticable en el laboratorio, en condiciones que puedan considerarse de comparación.

Todo esto impide verificar cuantitativamente las prestaciones del sistema. Sin embargo, los ensayos realizados a lo largo del trabajo, permiten su verificación cualitativa ya que, en estos términos, responde espacial y temporalmente, a los desplazamientos aplicados. Además, utilizando señales ficticias generadas en el laboratorio y que sí pueden considerarse como señales estables conocidas, es decir patrones, puede afirmarse que el sistema cumple también cuantitativamente, aunque con verificaciones simuladas, con los objetivos propuestos.

Se deja planteada para el futuro una optimización, consistente en la ampliación del rango lineal utilizando una *Look Up Table*, debido a que se requiere un relevamiento completo de las respuestas de los DPC para implementarla.

## Bibliografía

- Laser de helio-neón - Juan Israel Rivas Sánchez-- Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa. División de Ciencias Básicas e Ingeniería. Departamento de Física. Óptica Física.
- USB-6008/6009 User Guide and Specifications - © 2004–2005 National Instruments Corporation. [www.ni.com](http://www.ni.com)
- OSI Optoelectronics Catalog - OSI Systems Company – OSI Optoelectronics [www.osioptoelectronics.com](http://www.osioptoelectronics.com)
- LabVIEW™ User Manual - © 1992–2003 National Instruments Corporation. [www.ni.com](http://www.ni.com)
- LabVIEW™ Data Acquisition Basics Manual - © Copyright 1995, 2000 National Instruments Corporation. [www.ni.com](http://www.ni.com)
- Programación en LabVIEW - Monografía elaborada por Dr. Valery Moreno Vega y Msc. Adel Fernández Prieto para el curso de Instrumentación Virtual dictado dentro de la asignatura Automática III en la carrera de Automática de la Facultad de Ingeniería Eléctrica del ISPJAE.
- LabVIEW Entorno gráfico de programación. José Rafael Lajara Vizcaíno, José Pelegrí Sebastián - © MARCOMBO S.A. 2007, © ALFAOMEGA GRUPO EDITOR S.A. 2007.

## Anexo I

### Herramientas de programación. LabVIEW.

LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) es un entorno de programación gráfico para el diseño de sistemas de adquisición, instrumentación, control, análisis y presentación de datos.

A diferencia de otros sistemas de desarrollo comerciales que utilizan el lenguaje C o BASIC, LabVIEW emplea la programación gráfica o *lenguaje G* para crear programas basados en diagramas de bloques. Esto significa que se emplean iconos, y se apoya sobre símbolos gráficos en lugar de lenguaje escrito para construir las aplicaciones. Además se emplean términos e ideas familiares a científicos e ingenieros. Por ello resulta mucho más intuitivo que el resto de lenguajes de programación convencionales. Las posibilidades que presenta, sin embargo, son normalmente las mismas:

- Sentencias (gráficos) de control de flujo y repetitivas.
- Posibilidad de declaración de variables.
- Modularidad a través de la creación de funciones. Trabajo con los eventos y propiedades de los controles y variables.
- Incluye bibliotecas de funciones extendidas para cualquier tarea de programación.
- Basado en objetos pero no permite nuevas declaraciones.
- Mecanismos de conexión con lenguaje C y C++ y DLL.

Algo muy característico de LabVIEW es su extensa biblioteca de funciones especializada en la adquisición, acceso a buses de campo, procesamiento matemático y procesamiento de señales:

- Tarjetas de adquisición de datos.
- Bus GPIB.
- Entrada/Salida (puerto serie y paralelo). Arquitectura VISA.
- Análisis de señales.
- Almacenamiento de datos.
- Comunicación (TCP-IP, UP y otros).
- Matemáticas.

Algunas de las ventajas que proporciona el empleo de LabVIEW se resumen en las siguientes:

- Es muy intuitivo y fácil de aprender, reduciendo el tiempo de desarrollo.
- Dota de gran flexibilidad al sistema, permitiendo cambios y actualizaciones tanto del hardware como del software.
- Es a la vez compatible con herramientas de desarrollo similares, y puede trabajar con programas de otra área de aplicación (como por ejemplo Matlab), incorporando aplicaciones escritas en otros lenguajes.
- El sistema está dotado de un compilador gráfico para lograr la máxima velocidad de ejecución posible.
- Da la posibilidad a los usuarios de crear soluciones completas y complejas.
- Con un único sistema de desarrollo se integran las funciones de adquisición, análisis y presentación de datos.

### *Aplicaciones de LabVIEW*

LabVIEW tiene su mayor aplicación en sistemas de medición, como monitoreo de procesos y aplicaciones de control, laboratorios para clases en universidades y procesos de control industrial. LabVIEW es muy utilizado en procesamiento digital de señales (wavelets, FFT, Total Distorsion Harmonic TDH), procesamiento en tiempo real de aplicaciones biomédicas, manipulación de imágenes y audio, automatización, diseño de filtros digitales, generación de señales, entre otras, etc.

### *Programación gráfica con LabVIEW*

Los programas desarrollados mediante LabVIEW se denominan *Instrumentos Virtuales (VIs)*, porque su apariencia y funcionamiento imitan los de un instrumento real. Sin embargo son análogos a las funciones creadas con los lenguajes de programación convencionales. Los *VIs* tienen una parte interactiva con el usuario denominada “*panel frontal*” y otra parte de código fuente o “*diagrama de bloques*”, y aceptan parámetros procedentes de otros *VIs*. Las *paletas* contienen las opciones que se emplean para crear y modificar los *VIs*.

A continuación se describen el *panel frontal*, el *diagrama de bloques* y las *paletas*:

### Panel frontal

Se trata de la interfaz gráfica del VI que permite interactuar con el usuario. Esta interfaz recoge las entradas procedentes del usuario y representa las salidas proporcionadas por el programa. Un *panel frontal* está formado por una serie de botones, pulsadores, potenciómetros, gráficos, etc. Cada uno de ellos puede estar definido como un *control* o un *indicador*.

- Los controles son aquellos elementos que pasan datos al diagrama de bloques desde el panel frontal por entrada desde el teclado o con el mouse, simulan los dispositivos de entrada de datos del VI.
- Los indicadores son aquellos elementos que pasan datos al panel frontal desde el diagrama de bloques para ser visualizados en la pantalla, ya sean datos adquiridos o resultados de alguna operación. Simulan los dispositivos de salida del VI.

En la figura 88 se muestra el panel frontal, incluyendo algunos controles e indicadores a modo de ejemplo.

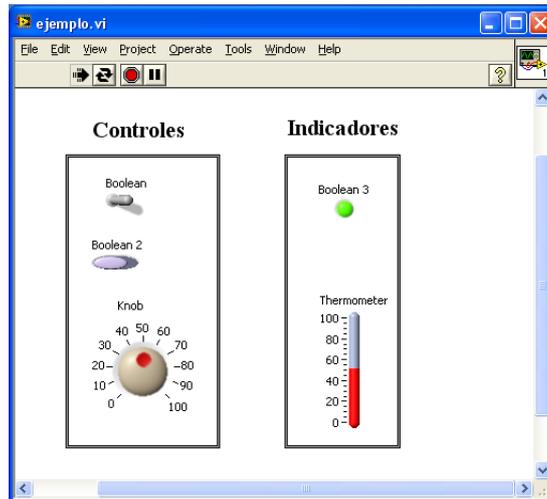


Figura 88: Panel Frontal

A los controles e indicadores se les puede cambiar el tamaño, la forma, y la posición, y cada uno tiene un menú en el cual se pueden cambiar varios atributos o seleccionar diferentes opciones.

Además cada control o indicador que se utiliza en la interfaz tiene una representación en el *diagrama de bloques* o panel de código.

Diagrama de bloques

El *diagrama de bloques* constituye el código fuente del VI. Es donde se realiza la implementación del programa del VI para controlar o realizar cualquier procesado de las entradas y salidas que se crearon en el *panel frontal*. Incluye *funciones* y *estructuras* integradas en las librerías que incorpora LabVIEW.

En el *lenguaje G* las *funciones* y las *estructuras* son nodos elementales representados mediante íconos. Son análogas a los operadores o librerías de funciones de los lenguajes convencionales.

Cuando se coloca un control o indicador en el *panel frontal*, LabVIEW coloca un terminal correspondiente al mismo en el *diagrama de bloques*. Este terminal desaparece solo cuando se borra el control o indicador.

El *diagrama de bloques* se construye conectando los distintos objetos entre sí, como si se tratara de un circuito. Los cables unen terminales de entrada y salida con los objetos correspondientes, y por ellos fluyen los datos.

No se permite enlazar dos terminales fuentes ni dos terminales destinos, pero si se permite enlazar un terminal fuente a varios terminales destino.

En la figura 89 se muestra el diagrama de bloques correspondiente al panel frontal de la figura 88.

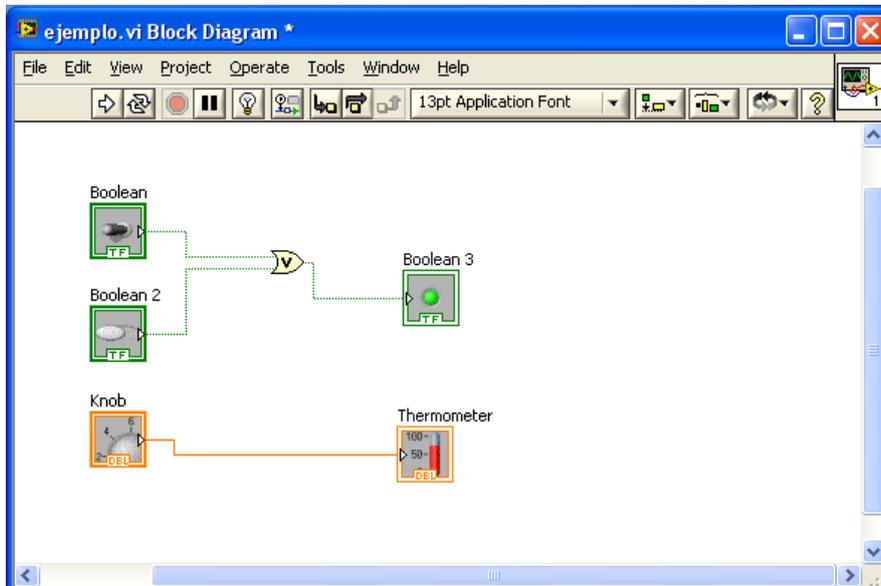


Figura 89: Diagrama de bloques

### Paletas

Las *paletas* de LabVIEW proporcionan las herramientas que se requieren para crear y modificar tanto el *panel frontal* como el *diagrama de bloques*. Existen las siguientes paletas:

- 1) Paleta de herramientas (Figura 90): Contiene las herramientas necesarias para editar y depurar los objetos tanto del *panel frontal* como del *diagrama de bloques*.



Figura 90: Paleta de herramientas

- 2) Paleta de controles (Figura 91): Se utiliza únicamente en el *panel frontal*. Contiene todos los *controles* e *indicadores* que se emplearán para crear la interfaz del *VI* con el usuario.

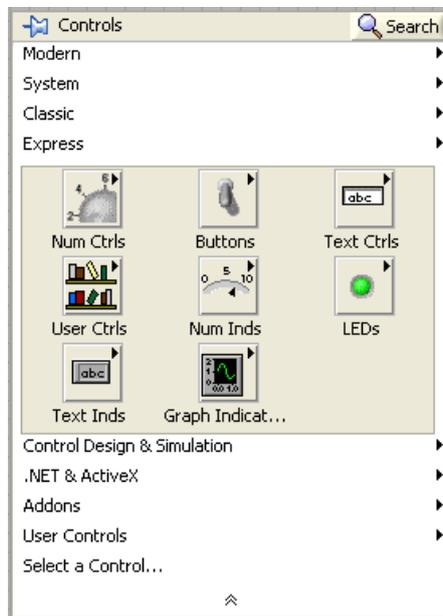


Figura 91: Paleta de controles

- 3) Paleta de funciones (Figura 92): Se emplea en el diseño del *diagrama de bloques*. La *paleta de funciones* contiene todos los objetos que se utilizan en la implementación del programa del *VI*, ya sean funciones aritméticas, de entrada/salida de señales, entrada/salida de datos a

archivos, adquisición de señales, temporización de la ejecución del programa, etc. Las *estructuras*, similares a las declaraciones causales y a los bucles en lenguajes convencionales, ejecutan el código que contienen en forma condicional o repetitiva (bucle *for*, *while*, *case...*)



Figura 92: Paleta de funciones

### Flujo de Datos

Al diseñar el programa de forma gráfica, se hace visible una programación orientada al flujo de datos, donde se tiene una interpretación de los datos también de forma gráfica, por ejemplo un dato booleano se caracteriza por ser una conexión verde. Cada cable tiene un color o un estilo diferente, lo que diferencia unos tipos de datos de otros.

En la figura 93, se muestran algunos ejemplos de los tipos de datos más utilizados.

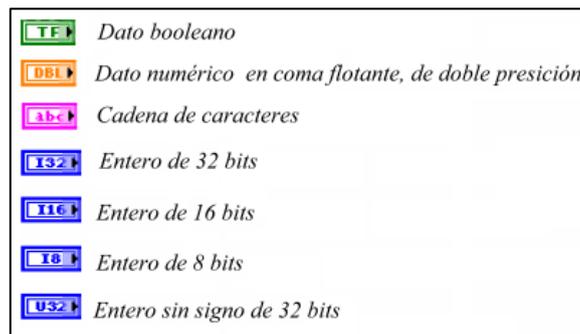


Figura 93: Tipos de datos más utilizados en LabVIEW

A continuación se muestran algunos controles e indicadores, con sus correspondientes conexiones para apreciar la diferencia de los cables por los que fluyen distintos tipos de datos.

En las siguientes figuras se muestran tres controles e indicadores agrupados de distinta forma: simple, en un *array* (arreglo) de una dimensión, y en un arreglo de dos dimensiones. Se observa que los cables que los interconectan tienen distinto espesor en cada caso. En la figura 94 los datos que manejan son números enteros de 8 bits, en la figura 95 son números en coma flotante y doble precisión, y en la figura 96 son *strings* (cadenas de caracteres).

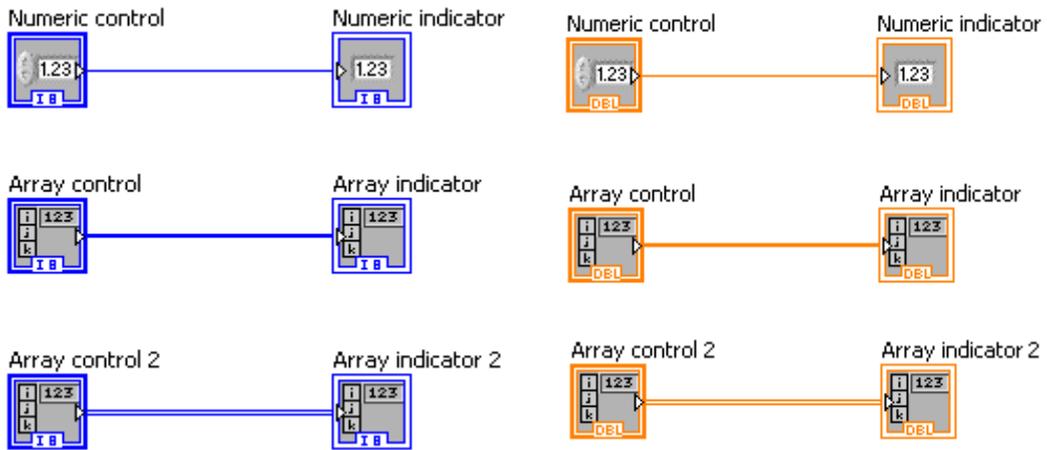


Figura 94

Figura 95

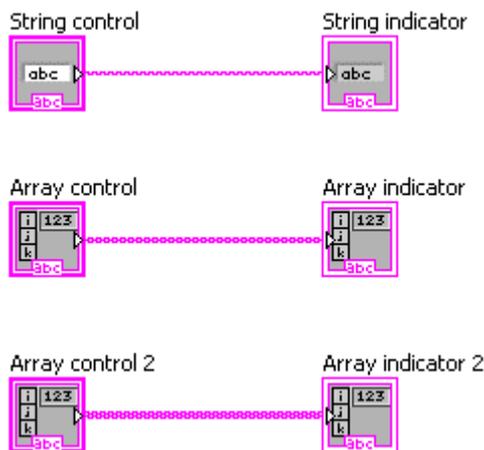


Figura 96

Por último, en la figura 97 se observan un control booleano y un control del tipo clúster (que puede contener controles de cualquiera de los tipos antes mencionados), y sus correspondientes indicadores.

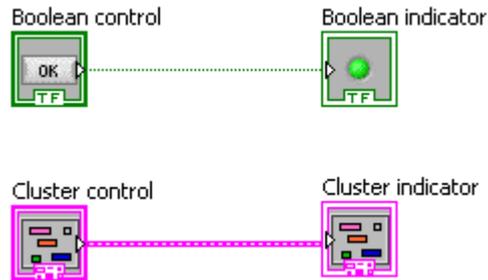


Figura 97

Además, el flujo de datos muestra la ejecución secuencial del programa. Un bloque o nodo no se inicia hasta no tener información en todas sus variables de entrada o que los bloques predecesores hayan terminado de ejecutarse. Debido al lenguaje gráfico el compilador con que cuenta LabVIEW es más versátil ya que sobre el mismo código de programación se puede ver fácilmente el flujo de datos, así como su contenido.

## Anexo II

# Desarrollo de programas específicos para ensayos, y detalles del programa general

### Contenido:

1. Programas específicos utilizados para las pruebas de la placa NI-USB6009
2. Detalles del programa general
  - 2.1. Factores de conversión
  - 2.2. Optimización: LUT
  - 2.3. Detalle de funciones

## 1. Programas específicos utilizados para las pruebas de la placa NI-USB6009

Programa: Voltímetro.vi

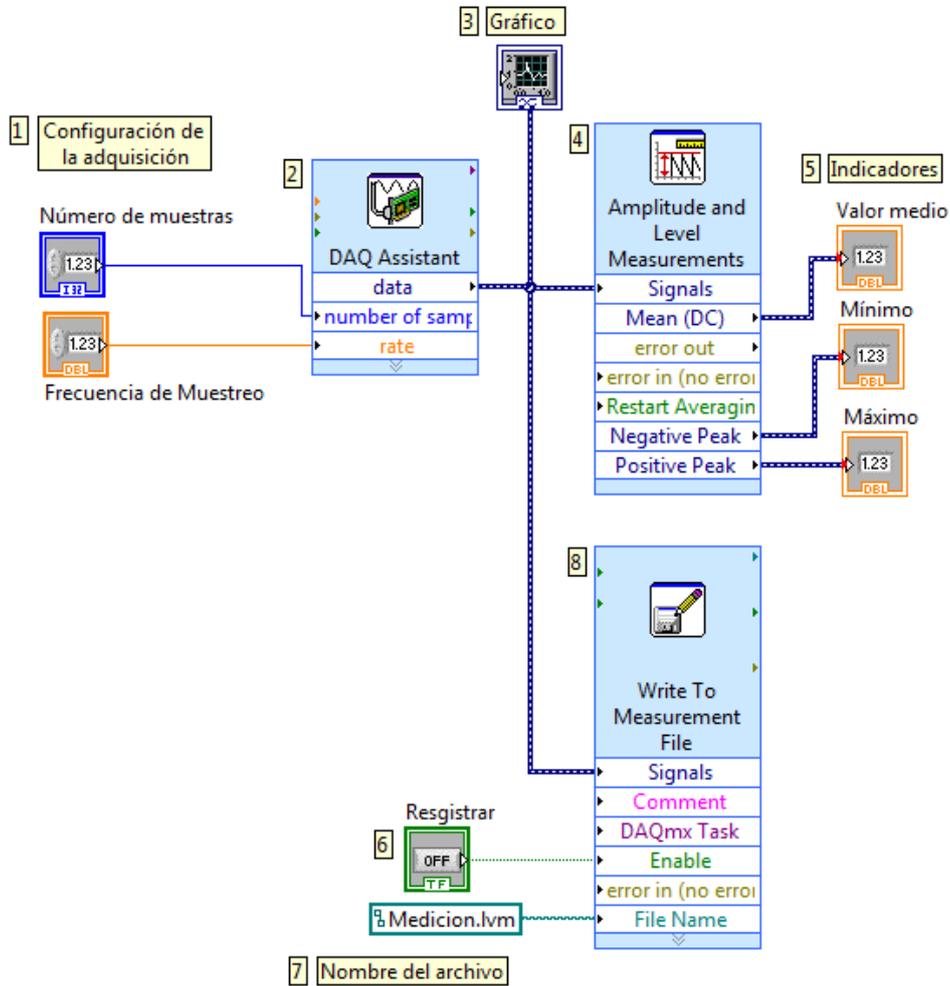


Figura 98: Voltímetro.vi - Diagrama de bloques

- 1. Configuración de la adquisición:** Mediante un par de controles del panel frontal, se ingresan el número de muestras a tomar y la frecuencia de muestreo.
- 2. DAQ Assistant:**
- 3. Gráfico:** Muestra gráficamente en el panel frontal la señal adquirida.
- 4. Amplitude and level Measurements:** Obtiene el valor medio, pico positivo y pico negativo de la señal.
- 5. Indicadores:** Muestran en el panel frontal los valores obtenidos.

6. **Registrar:** Es un control del tipo botón para habilitar el registro de datos.
7. **Nombre del archivo:** Es el nombre del archivo *lvm* donde se guardan los datos.
8. **Write to Measurement File:** Es el *VI* encargado de crear el archivo antes especificado, añadirle los datos y cerrarlo al finalizar.

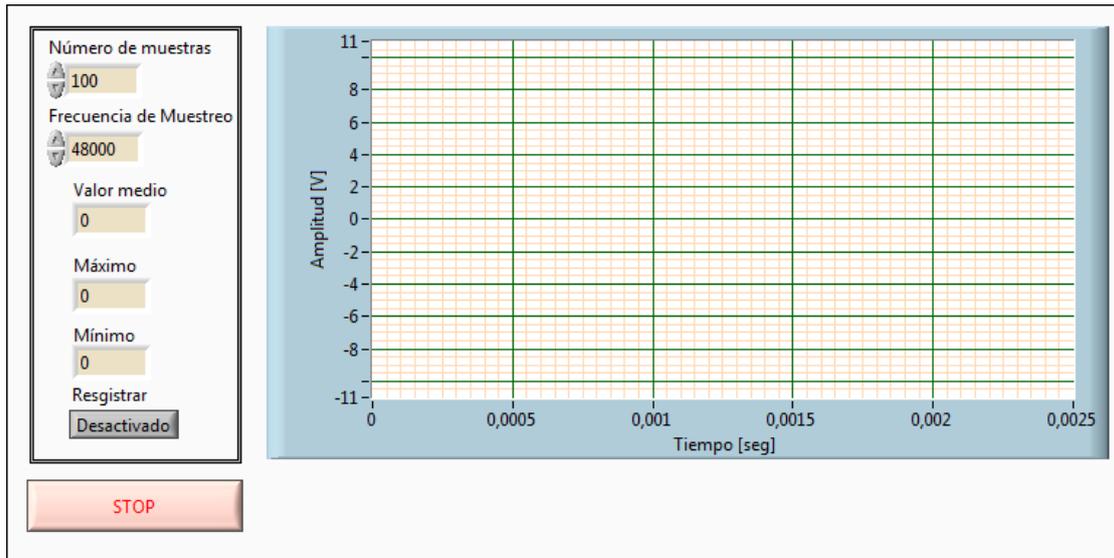


Figura 99: Voltímetro.vi - Panel frontal

Programa: Voltímetro 2.vi

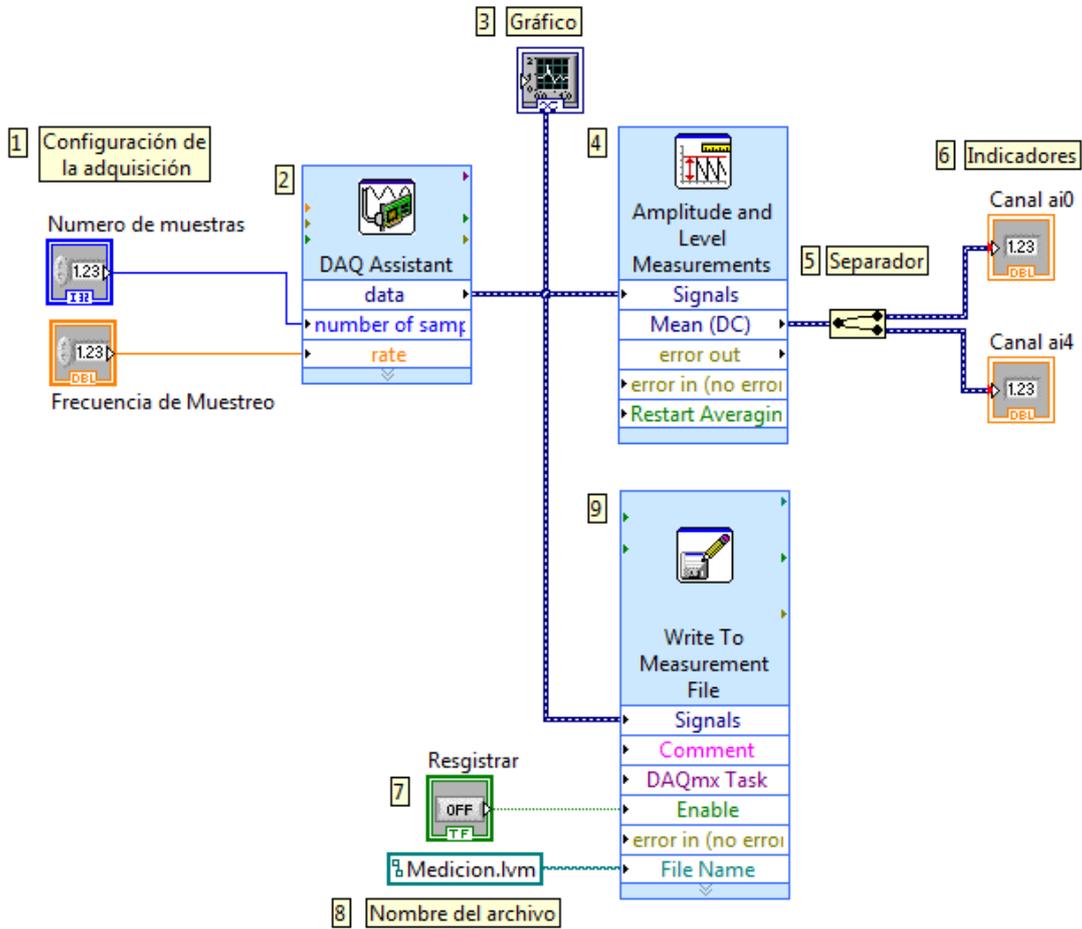


Figura 100: Voltímetro 2.vi - Diagrama de bloques

1. Configuración de la adquisición.
2. DAQ Assistant.
3. Gráfico.
4. *Amplitude and level Measurements.*
5. *Separador.*
6. Indicadores.
7. Registrar.
8. Nombre del archivo.
9. Write to Measurement File.

Diferencias con el programa *Voltímetro.vi*:

**Amplitude and level Measurements:** En éste caso, obtiene los valores medios de las tensiones provenientes de dos canales.

**Separador:** Separa las señales correspondiente a los canales ai0 y ai4.

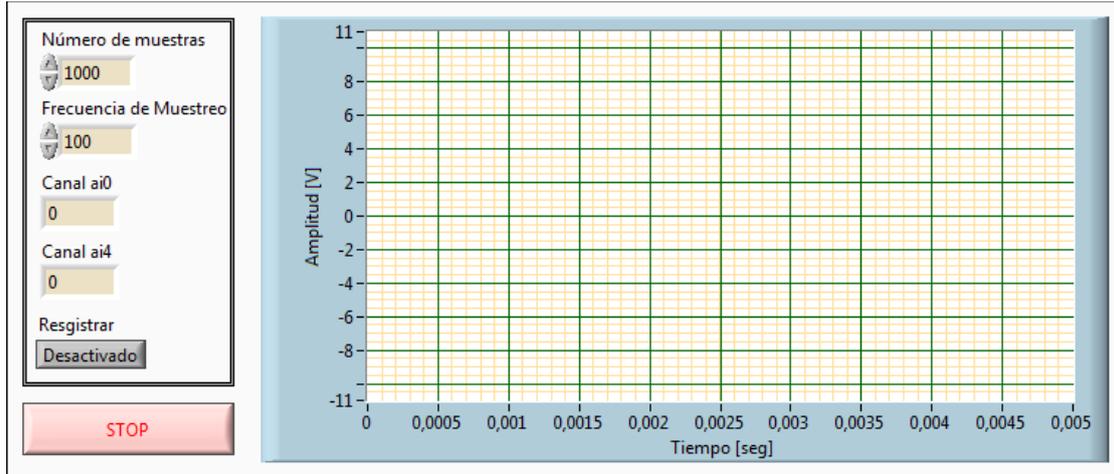


Figura 101: Voltímetro 2.vi - Panel frontal

Programa: Voltímetro 3.vi

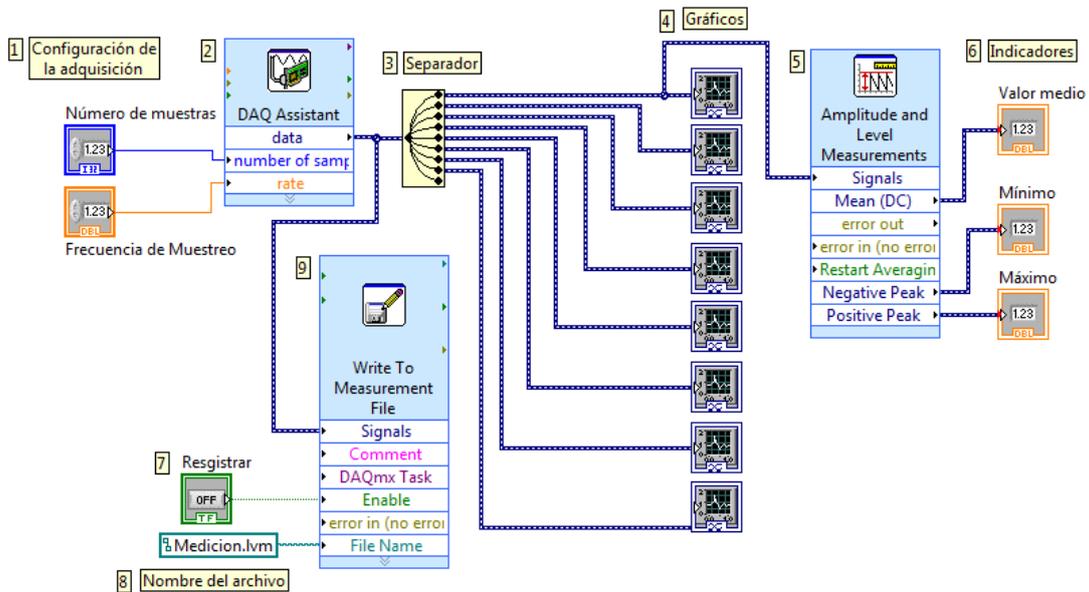


Figura 102: Voltímetro 3.vi - Diagrama de bloques

1. Configuración de la adquisición.
2. DAQ Assistant.
3. *Separador.*
4. Gráficos:
5. *Amplitude and level Measurements.*
6. Indicadores.
7. Registrar.
8. Nombre del archivo.
9. Write to Measurement File.

Diferencias con el programa *Voltímetro 2.vi*:

***Separador:*** En éste caso, separa las señales provenientes de los 8 canales para presentarlas en gráficos distintos.

***Amplitude and level Measurements:*** Obtiene el valor medio, pico positivo y pico negativo de la señal proveniente del canal ai0.

*No se muestra el panel frontal debido a su gran tamaño, pero vale aclarar que es igual al correspondiente al programa *Voltímetro.vi*, con un gráfico para cada canal.*

## 2. Detalles del programa general

### 2.1. Factores de conversión

Los factores de conversión, uno por cada eje, indican la relación que existe entre los desplazamientos reales del haz, medidos en unidades de longitud, y los desplazamientos unitarios obtenidos mediante el algoritmo.

Para el cálculo del factor correspondiente a uno de los ejes, se requieren las coordenadas unitarias de un par de puntos ubicados sobre el mismo y en los extremos de su rango lineal (aproximadamente el 70% del mismo). Por lo tanto, para cada detector, se necesitan las coordenadas de cuatro puntos, denominados 1, 2, 3, y 4, como se muestra en la figura 103.

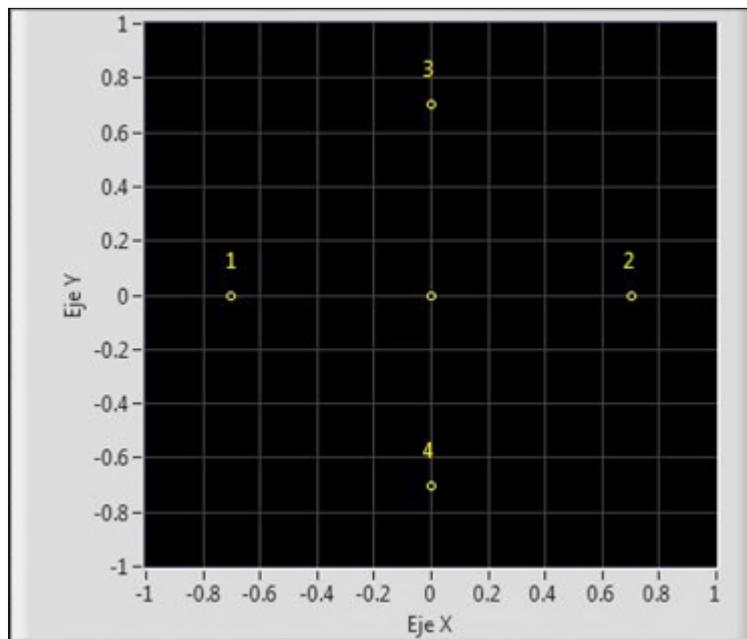


Figura 103

Conociendo el desplazamiento real y su correspondiente valor unitario, entre los dos puntos de un mismo eje, los factores de conversión se obtienen de la siguiente manera:

$$\text{Factor eje X} = \frac{\text{desplazamiento real X(mm)}}{\text{desplazamiento unitario X}} = \frac{\text{desplazamiento real X(mm)}}{\text{coordenadas (2)} - \text{coordenadas(1)}}$$

$$\text{Factor eje Y} = \frac{\text{desplazamiento real Y(mm)}}{\text{desplazamiento unitario Y}} = \frac{\text{desplazamiento real Y(mm)}}{\text{coordenadas (3)} - \text{coordenadas(4)}}$$

Dentro de la aplicación de **Acondicionamiento y Calibración**, existen dos tareas disponibles para definir el valor de estos factores:

- Calibración asistida.
- Calibración por teclado.

En la primera, el usuario debe obtener las coordenadas unitarias de los puntos antes mencionados, y luego introducir por teclado los desplazamientos en mm que realizó. Los factores se calculan automáticamente y pueden visualizarse antes de ser almacenados en un archivo.

En la segunda, directamente debe introducir por teclado los factores que desee, teniendo en cuenta que los valores típicos se encuentran en torno a 5 mm por unidad.

## 2.2. Optimización: LUT

Con el fin de optimizar el sistema en el futuro, se plantea la implementación de un bloque de software adicional encargado de obtener una respuesta lineal en la totalidad del rango del detector DPC. Para ello, deberá recibir las coordenadas unitarias resultantes del algoritmo, y asignarles los valores que las ubiquen sobre una recta de pendiente uno.

La figura 104 muestra, cualitativamente, la respuesta actual y la respuesta optimizada, resultante de aplicar el procedimiento mencionado.

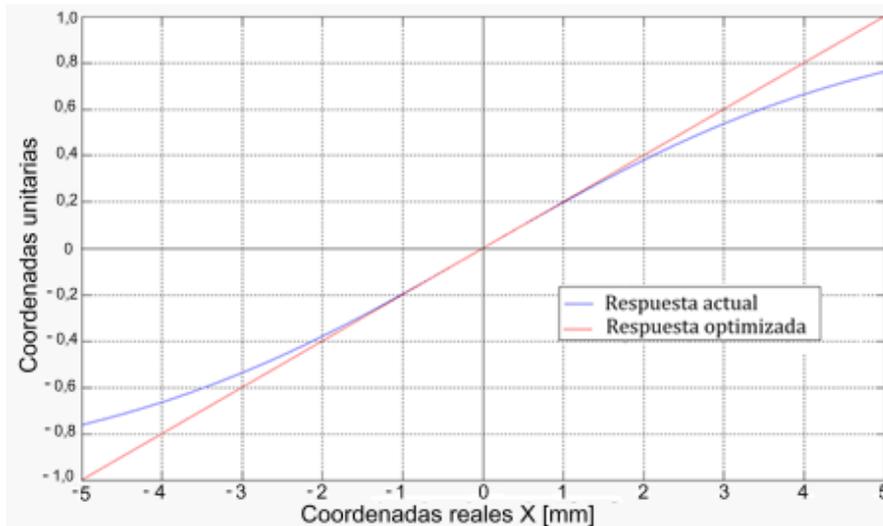


Figura 104

LabVIEW cuenta entre sus librerías con la función *Look Up Table* (LUT), para cumplir dicho objetivo.

Para utilizarla es necesario conocer la mayor cantidad posible de puntos de la respuesta no lineal a la cual se aplicará. Por lo tanto, esta función se implementará una vez que se haya relevado la respuesta de los detectores por completo y esto escapa a los objetivos planteados para el desarrollo del dispositivo en el presente trabajo final.

### 2.3. Detalle de funciones

En esta sección se describen algunas de las funciones utilizadas en la implementación del programa de aplicación del SODP. Debido a la complejidad del código, fue necesario separarlas del contexto para describir su funcionamiento.

#### Configuración de pantalla

Este conjunto de bloques se encarga de configurar la apariencia de la pantalla, estableciendo su tamaño y posición.

Nota:

En la configuración de pantalla intervienen tres elementos: la ventana, el panel y el *pane*.

En la sección de propiedades del VI, se seleccionó la opción de centrar la ventana en la pantalla. El panel es el que contiene los elementos (controles, indicadores, etc.), mientras que *pane* se a la parte visible del mismo.

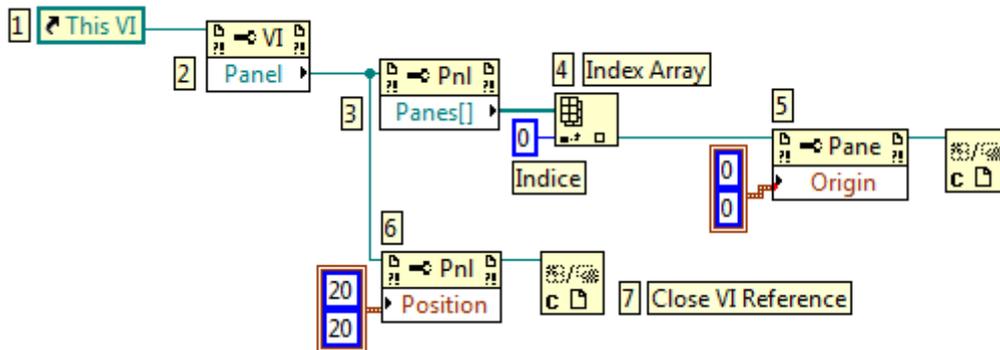


Figura 105

1. **This VI:** Crea una referencia al VI actual.
2. **VI Panel:** Dentro del VI, actúa sobre las propiedades del panel.
3. **Panel Panes:** Devuelve un arreglo con todos los *panes* del panel.
4. **Index Array:** Selecciona un elemento del arreglo.
5. **Pane Origin:** Define el origen del *pane* dentro de la ventana (0,0).
6. **Panel Position:** Define la posición con respecto al origen, del último elemento visible del panel frontal, en píxeles (20,20).
7. **Close VI Reference:** Cierra la referencia al VI actual.

## Adquisición de datos

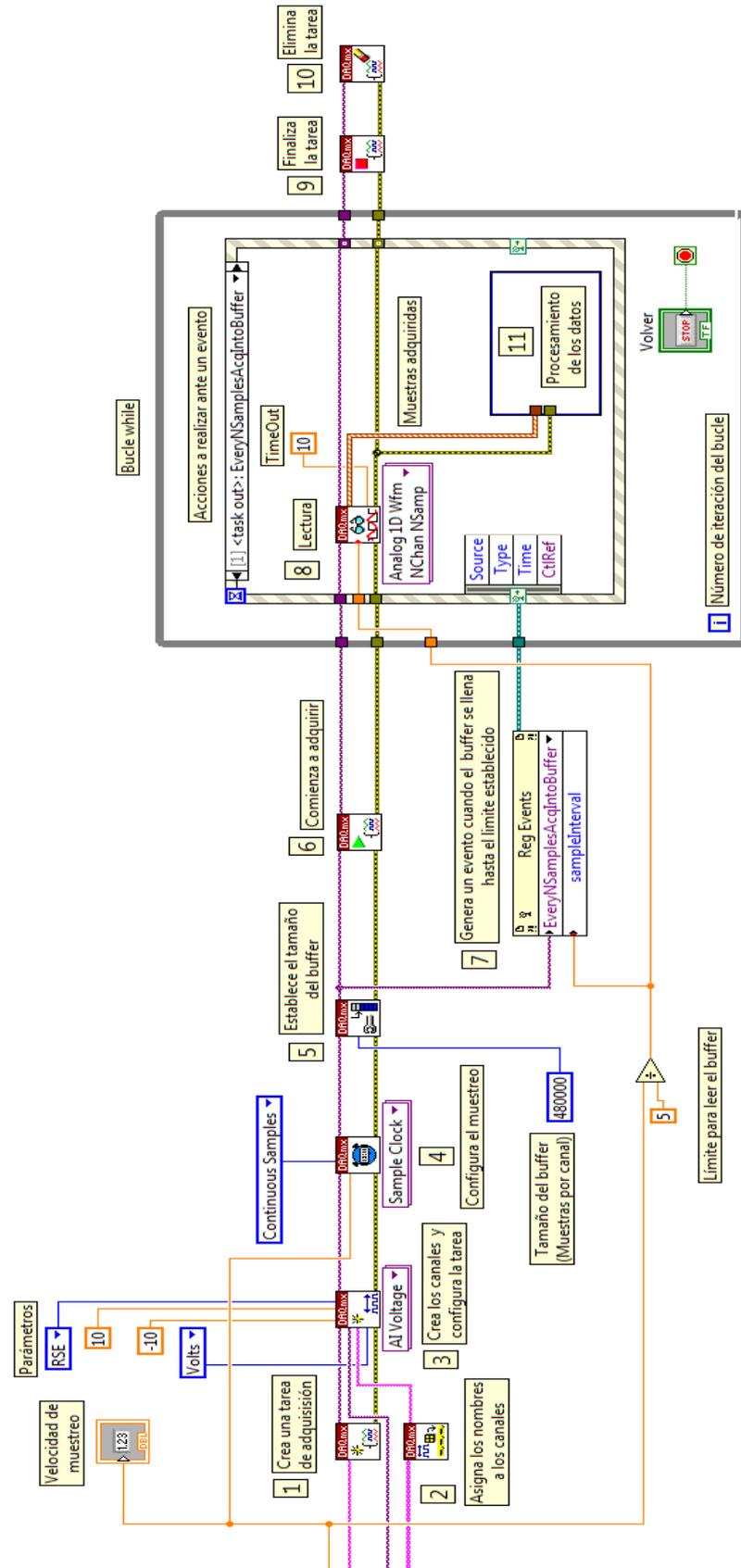


Figura 106

1. **DAQmx Create Task:** Crea una tarea de adquisición.
2. **DAQmx Flatten Channel String:** Asigna los nombres a los canales.
3. **DAQmx Create Virtual Channel:** Crea los canales para adquirir o generar señales con los siguientes parámetros:
  - **AI Voltage:** Tensiones analógicas de entrada.
  - **Unidades:** Volts.
  - **Valor mínimo:** -10 V.
  - **Valor máximo:** 10 V.
  - **Configuración de entrada:** RSE (*Referenced Single Ended*).
4. **DAQmx Timing (Sample Clock):** Define la fuente de clock, la frecuencia de muestreo y el número de muestras a adquirir:
  - **Sample Mode:** Continuous samples (Adquisición continua).
  - **Velocidad de muestreo:** (12000 M/s).
5. **DAQmx Configure input buffer:** Establece el tamaño del *buffer* de entrada.
  - **Tamaño del Buffer:** 480000 muestras por canal.
6. **DAQmx Start Task:** Comienza a adquirir muestras hacia el *buffer*.
7. **Register for events:** Ejecuta el código correspondiente cuando se genera un evento.
  - **Every N samples Acq Into Buffer:** Genera un evento cada vez que el número de muestras adquiridas en el *buffer* es igual a N.
  - **Sample interval:** Es el número N límite para generar el evento. (En éste caso *Velocidad de muestreo/5*).
8. **DAQmx Read:** Lee los datos desde el *buffer* de entrada.
  - **Number of samples per channel:** Cantidad de muestras por canal que lee cada vez (*Velocidad de muestreo/5*).
  - **TimeOut:** Tiempo límite que espera para leer.
  - **Analog 1D Wfm Nchan Nsamp:** Adquiere N muestras desde N canales, cada uno de los cuales es una forma de onda en un arreglo de 1 dimensión.
9. **DAQmx Stop Task:** Detiene la tarea de adquisición, volviendo al estado previo a **DAQmx Start Task**.
10. **DAQmx Clear Task:** Elimina la tarea y libera los recursos. Para comenzar nuevamente una tarea es necesario volver a crearla.

11. **Procesamiento de los datos:** Se realizan las funciones de algoritmo, presentación en pantalla, registro de datos, etc., específicas de la aplicación que se esté ejecutando.

## Supervisión de la intensidad

Como se menciona en el Capítulo 2, las condiciones óptimas de trabajo se refieren a la densidad de potencia del haz incidente. El fabricante de los detectores recomienda que ésta no supere los  $10 \text{ mW/cm}^2$ .

Para conocer el estado de la intensidad del haz incidente, con el fin de regularla mediante un polarizador lineal, se decidió recurrir a una indicación indirecta de la misma.

Mediante un ensayo descrito en el Anexo III, se determinó que la corriente total que entrega un DPC en las condiciones de trabajo óptimas, es de  $128 \mu\text{A}$ . Por lo tanto, luego de la amplificación de trans-impedancia, cuya ganancia aproximada es de  $150 \text{ k}\Omega$ , la suma de los módulos de las tensiones correspondientes a los cuatro nodos del detector debe ser de  $19,2 \text{ V}$ . Este valor puede considerarse invariante, siempre y cuando todo el haz incida sobre la superficie sensible del detector.

El procedimiento para verificar las condiciones de intensidad en cada instante consiste en:

- Adquirir las tensiones correspondientes a los cuatro nodos de un detector.
- Obtener sus valores absolutos.
- Sumarlos.
- Verificar que el resultado se aproxime a  $19,2 \text{ V}$  contemplando las fluctuaciones espurias.

Con este fin, se implementó el bloque denominado “*Supervisión de la intensidad*”, que informa acerca de la intensidad del haz mediante cuatro señales:

- Baja.
- Aceptable.
- Alta.
- Valor de tensión obtenido, proporcional a la intensidad.



Figura 107

El bloque de la figura 106 utiliza una función desarrollada en LabVIEW, llamada Alarma.vi y que se describe a continuación.

### Alarma.vi

Se encarga de verificar en todo momento que la intensidad de luz se encuentre dentro del rango aceptable. Para ello, utiliza las muestras de los cuatro canales correspondientes a un mismo detector y, haciendo la hipótesis de que en el rango de trabajo la suma de las corrientes que entrega un DPC se mantiene invariante siempre y cuando todo el haz incida sobre la superficie activa, realiza la suma de las tensiones adquiridas, proporcionales a las mismas, y compara el resultado con un par de valores de referencia que se definieron previamente teniendo en cuenta las condiciones óptimas de trabajo.

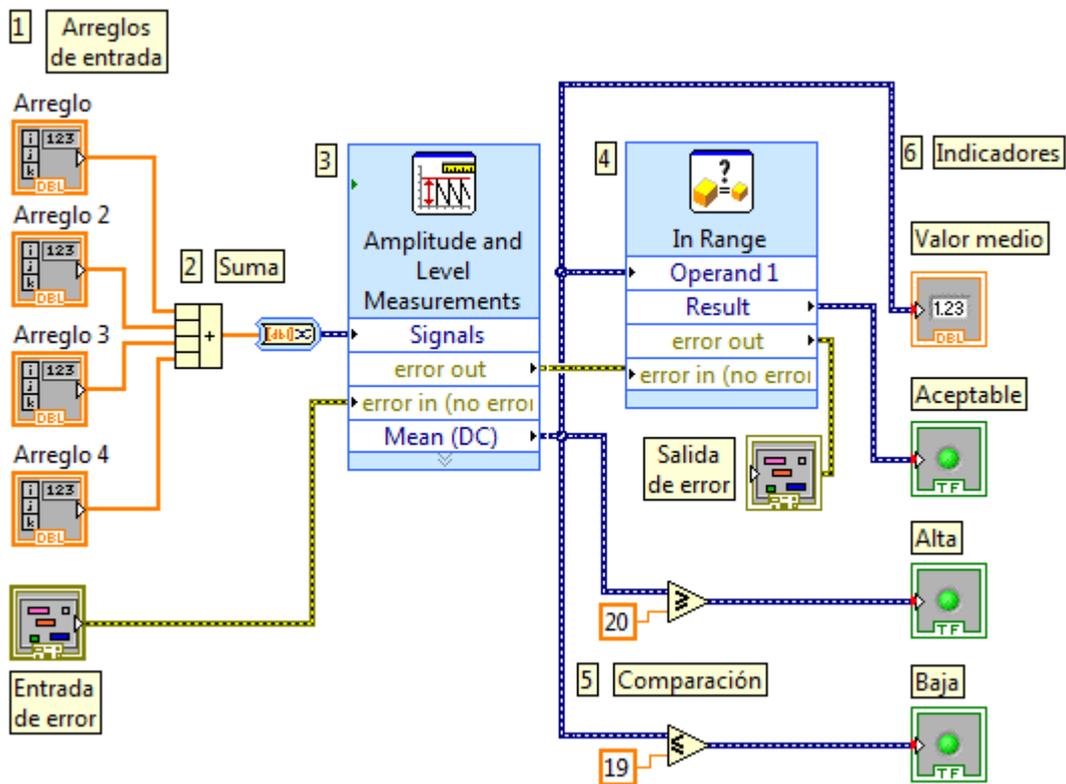


Figura 108

1. **Arreglos de entrada:** paquetes de muestras en forma de arreglos (1, 2, 3, 4), provenientes de un mismo detector.
2. **Suma:** Efectúa la suma de las cuatro muestras de cada instante.
3. **Amplitude and Level Measurements:** Calcula el valor medio de la suma obtenida.

4. **In Range:** Verifica si el valor medio calculado se encuentra en el rango entre 19 y 20 V (**Acceptable**).
5. **Comparación:** Se realiza para determinar si el valor medio calculado se encuentra por encima o por debajo de 19 y 20 V respectivamente (**Baja o Alta**).
6. **Indicadores:** Representan las señales de salida de la función e indican el valor medio calculado, que es proporcional a la intensidad de luz incidente, y el resultado de la comparación de dicho valor con los de referencia.



1. Según el valor de **Selección del detector**, se realizan las operaciones sobre 8 o 4 canales.
2. Se separan los canales y se transforman en arreglos.
3. Se obtiene el módulo de cada una de las muestras.
4. Se aplica el algoritmo a las cuaternas de muestras, para obtener un par de coordenadas unitarias por detector.
5. Simultáneamente, se verifica el estado de la intensidad de luz mediante la función “**Alarma.vi**”.

### Conversión de unidades

Obtiene las coordenadas del *centroide* del haz en mm al multiplicar las coordenadas unitarias resultantes del algoritmo por los factores de conversión calculados durante la última calibración.

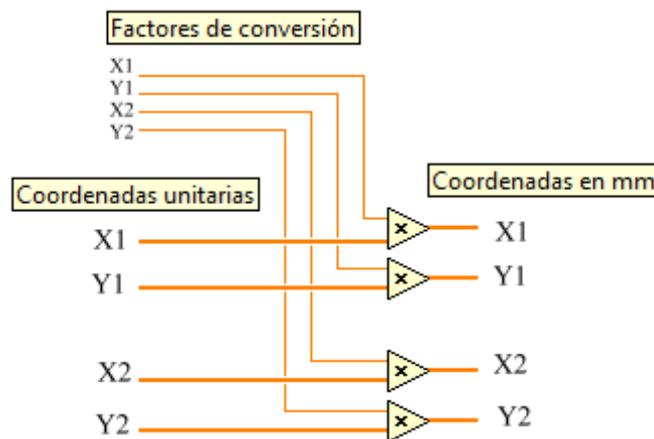


Figura 110

## Presentación XY

Realiza la presentación de los puntos cuyas coordenadas se obtuvieron previamente.

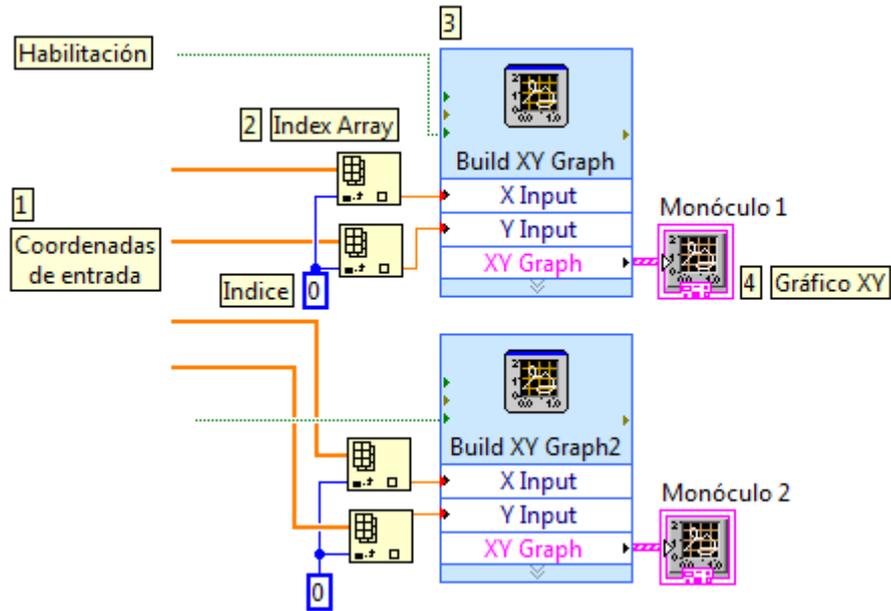


Figura 111

1. **Coordenadas de entrada:** Son 4 arreglos (dos por detector) de 1 dimensión, que contienen las coordenadas obtenidas.
2. **Index Array:** Es una función que selecciona el elemento del arreglo que indica **Indice**. De esta manera se toma un elemento de cada arreglo correspondiente a un detector para formar un par de coordenadas XY.
3. **Build XY Graph:** Es una función que construye un gráfico XY con el par de coordenadas que se le pasen a sus entradas.
4. **Gráfico XY:** Es un indicador ubicado en el panel frontal que muestra al usuario un gráfico con los ejes X e Y, y un punto con las coordenadas correspondientes.

## Parámetros de observación

Se leen los parámetros seleccionados en la pantalla de configuración a través de la variable global llamada “*Parámetros observación.vi*”.

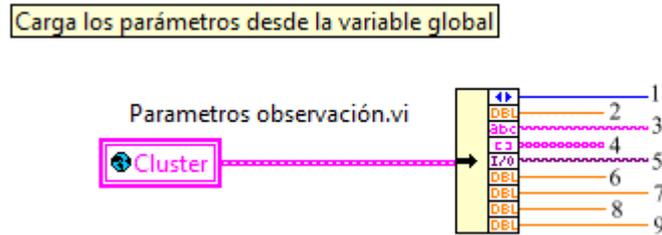


Figura 112

1. **Detector seleccionado:** *Monóculo 1, Monóculo 2, Binóculo.*
2. **Velocidad de muestreo:** Hasta 12000 M/s (*Monóculo*) y hasta 6000 M/s (*Binóculo*). Pasos de 1000 M/s.
3. **Nombre de la tarea:** Observación.
4. **Nombres de los canales:** X11, X12, Y11, Y12 (*Monóculo 1*); X21, X22, Y21, Y22 (*Monóculo 2*).
5. **Canales físicos:** ai0, ai4, ai1, ai5 (*Monóculo 1*); ai2, ai6, ai3, ai7 (*Monóculo 2*).
6. **Factor X1:** Factor de conversión de unidades correspondiente al eje X del *Monóculo 1*.
7. **Factor Y1:** Factor de conversión de unidades correspondiente al eje Y del *Monóculo 1*.
8. **Factor X2:** Factor de conversión de unidades correspondiente al eje X del *Monóculo 2*.
9. **Factor Y2:** Factor de conversión de unidades correspondiente al eje Y del *Monóculo 2*.

## Promedio

Efectúa el promedio de las muestras adquiridas, permitiendo seleccionar la cantidad de muestras que se promedian.

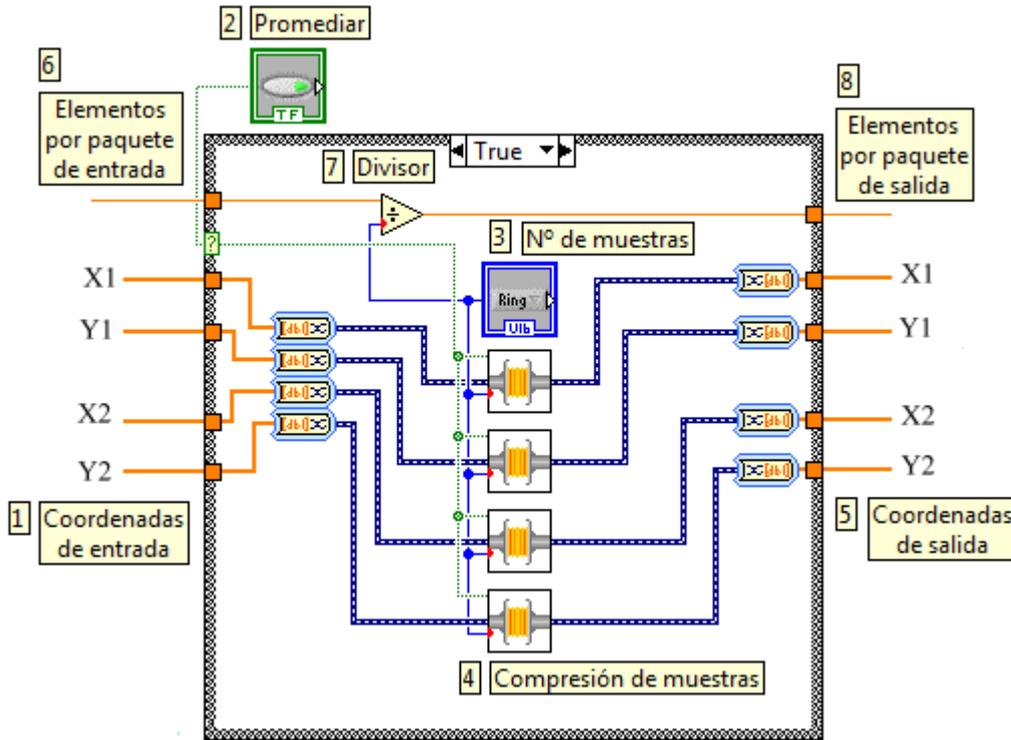


Figura 113

1. **Coordenadas de entrada:** Son arreglos de 1 dimensión cuyos elementos son las coordenadas obtenidas mediante el algoritmo, afectadas por los factores de conversión de unidades.
2. **Promediar:** Es un control del panel frontal que habilita o no el promedio de las muestras.
3. **Nº de muestras:** Es un control numérico del panel frontal mediante el cual se selecciona el número de muestras a promediar.
4. **Compresión de muestras:** Es la función que efectúa el promedio antes mencionado.
5. **Coordenadas de salida:** Son arreglos que contienen las coordenadas promedio correspondientes al haz incidente en cada detector.
6. **Elementos por paquete de entrada:** Es el número de elementos de cada arreglo de entrada.
7. **Divisor:** Es una función que efectúa la división dos datos numéricos conectados a sus entradas.

- Elementos por paquete de salida:** Es el número de elementos de cada arreglo de salida, obtenido al dividir el **Elementos por paquete de entrada** por el número de muestras a promediar.

### Parámetros de registro

Se leen los parámetros seleccionados en la pantalla de configuración a través de la variable global llamada “*Parámetros registro.vi*”.

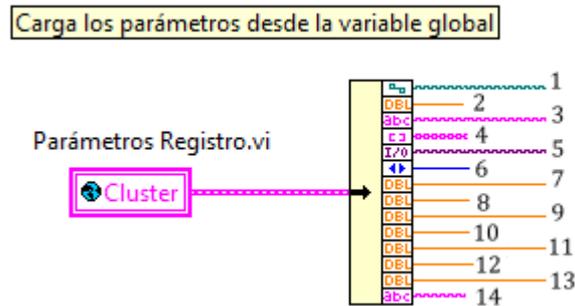


Figura 114

- Ruta de acceso a la carpeta destino.**
- Velocidad de muestreo:** 12000 M/s (*Monóculo*), 6000 M/s (*Binóculo*).
- Nombre de la carpeta destino:** Seleccionada por el usuario.
- Nombres de los canales:** X11, X12, Y11, Y12 (*Monóculo 1*); X21, X22, Y21, Y22 (*Monóculo 2*).
- Canales físicos:** ai0, ai4, ai1, ai5 (*Monóculo 1*); ai2, ai6, ai3, ai7 (*Monóculo 2*).
- Detector seleccionado:** *Monóculo 1*, *Monóculo 2*, *Binóculo*.
- Cantidad de archivos:** 1 a 100.
- Cantidad de muestras por archivo.**
- Factor de compresión:** 1, 2, 3, 4, 5, ó 6.
- Factor X1:** Factor de conversión de unidades correspondiente al eje X del *Monóculo 1*.
- Factor Y1:** Factor de conversión de unidades correspondiente al eje Y del *Monóculo 1*.
- Factor X2:** Factor de conversión de unidades correspondiente al eje X del *Monóculo 2*.
- Factor Y2:** Factor de conversión de unidades correspondiente al eje Y del *Monóculo 2*.
- Nombre de archivo:** Seleccionado por el usuario.

## Almacenamiento de datos

Se utilizan las siguientes funciones para almacenar los datos en un archivo de texto.

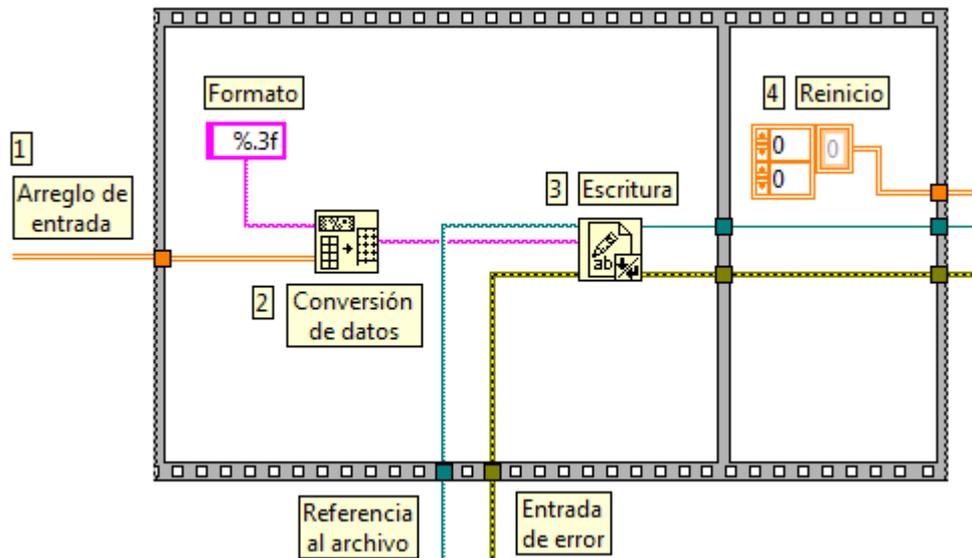


Figura 115

1. **Arreglo de entrada:** Es un arreglo que contiene las coordenadas XY correspondientes a los haces incidentes sobre uno o dos detectores.
2. **Conversión de datos:** Convierte los datos numéricos en una tabla de texto para almacenarlos en un archivo con extensión *txt*.
3. **Escritura:** Escribe los datos en el archivo correspondiente a la referencia conectada en su entrada.
4. **Reinicio:** Reinicia el arreglo de entrada, para que pueda recibir nuevos datos.



## Anexo III

### Ensayos y resultados complementarios

En esta sección se encuentran aquellos ensayos y resultados que por su extensión no se incluyeron en el capítulo correspondiente para simplificar la lectura.

#### Contenido:

1. Ensayos sobre la fuente de señal.
  - 1.1. Distribución de la potencia del haz.
  - 1.2. Medición de la corriente total en las condiciones óptimas de trabajo.
2. Resultados de los ensayos sobre el AD8513.
  - 2.1. Ensayo previo en una placa de pruebas.
  - 2.2. Ensayo en circuito.

## 1. Ensayos sobre la fuente de señal

Con el fin de obtener información sobre el haz de luz que se empleará como fuente de señal en el sistema, se realizaron dos ensayos utilizando un DPC como instrumento de medición.

Midiendo la corriente total que entrega un detector puede obtenerse la potencia absorbida del haz incidente, mediante la *responsividad*, que es una característica del detector que las relaciona.

Se utilizó este método para medir indirectamente la potencia del haz de luz láser y así obtener algunas características necesarias para el diseño del circuito de acondicionamiento de señal.

A continuación se describe el montaje general utilizado para los dos ensayos, luego las diferencias se detallan en los correspondientes procedimientos.

### Montaje:

Para simplificar el montaje se utilizó un DPC Tetra-lateral (SC-10D), ya que en este modelo la corriente que circula a través del ánodo corresponde, idealmente, a la suma de las cuatro corrientes de cátodo restantes, es decir a la corriente total generada.

Se implementó un *pinhole*, constituido por una tapa oscura que sólo permite el paso de luz a través de un pequeño orificio hacia el detector de manera que el área del haz que incide sobre el DPC resulte suficientemente pequeña como para considerar que la distribución de potencia en ella es uniforme (Figura 116).

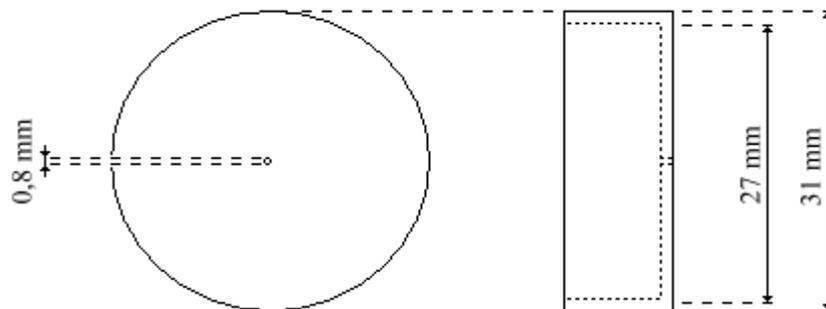


Figura 116

Se fijó el *pinhole* al DPC de manera que el orificio coincida con el centro del mismo y se montó el conjunto *pinhole-DPC* sobre un “Gantry” controlado a través una PC que permite realizar, entre otros, el movimiento

en un plano perpendicular al eje de incidencia del haz y medir los desplazamientos utilizando un software apropiado.

Se colocó el láser de He-Ne de 10 mW disponible en el laboratorio a una distancia conocida y de manera que incida sobre el DPC a través del *pinhole*, y se desplazó a éstos últimos sobre un plano perpendicular al haz, registrando los valores de corriente de ánodo entregada (Figura 117).

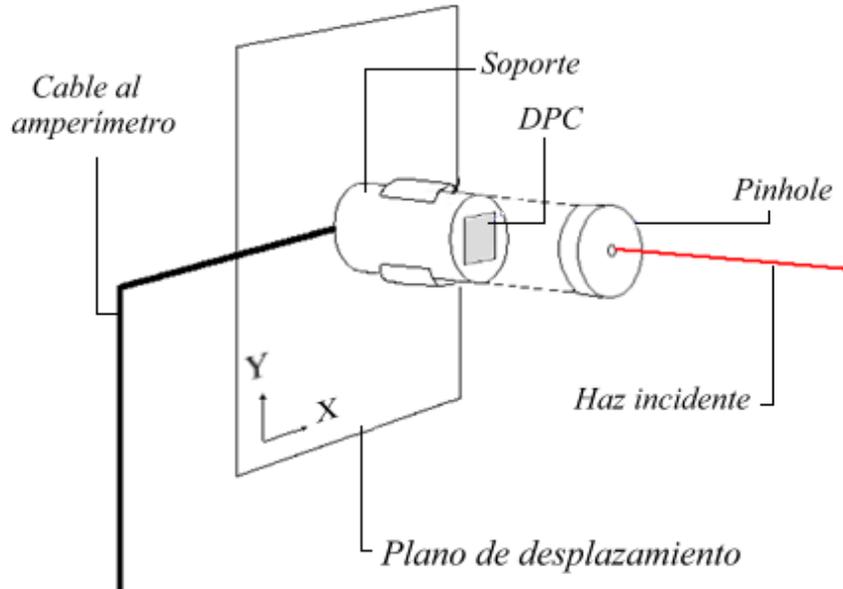


Figura 117

Para polarizar al DPC se utilizó un montaje auxiliar en una placa de pruebas que únicamente cumple la función de disponer las tensiones correspondientes en los nodos del detector y permitir la circulación de corriente, la cual se midió en este caso con un *Multímetro* digital Wavetek DM25XT.

### 1.1. Distribución de la potencia del haz

Considerando “señal” al haz de luz láser y “ruido” a la luz ambiente de fondo, que también llega al detector, sería deseable trabajar con la mayor relación señal/ruido posible, es decir que el ruido sea despreciable frente a la señal. Para lograrlo, podría pensarse en aumentar la potencia del haz incidente, pero debe tenerse en cuenta que el fabricante de los DPC recomienda no superar una densidad de potencia de  $10 \text{ mW/cm}^2$  porque es el valor con el que consigue su funcionamiento óptimo.

En los láseres convencionales que se utilizan en el laboratorio, la potencia del haz no se distribuye uniformemente sino de forma *gaussiana*,

concentrándose en el centro del haz y aumentando de ésta manera la densidad en dicha región. El objetivo de este ensayo es verificar cualitativamente la distribución de potencia sobre el plano de trabajo del DPC y obtener la densidad en cada punto para decidir si es necesario atenuar el haz con el fin de lograr las condiciones óptimas de trabajo.

### *Procedimiento*

Se colocó el láser a una distancia conocida  $L$  del conjunto *pinhole-DPC*. Para definir un área de trabajo en el plano perpendicular al haz, se desplazó dicho conjunto hasta encontrar el punto de mayor intensidad, que es aquel en el que la corriente indicada en el amperímetro es máxima. Luego se apartó el conjunto de dicho punto hasta que la corriente registrada correspondiera sólo a la luz de fondo (ruido), en las direcciones X e Y.

Se definió entonces un área de trabajo de 12x12 mm centrada en el punto de mayor intensidad y dividida en pasos de 0,6 mm en ambos ejes, obteniéndose  $20 \times 20 = 400$  puntos de medición. La figura 118 muestra el área de trabajo definida.

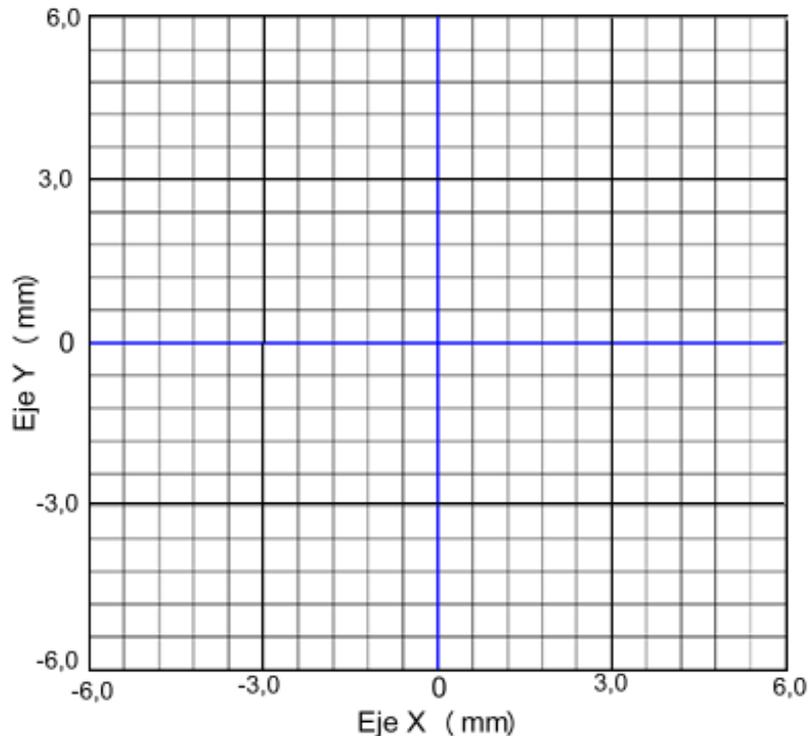


Figura 118

Desplazando punto por punto el conjunto, se registraron los valores de corriente entregada para, luego obtener la distribución de la densidad de potencia sobre el DPC como sigue:

Siendo la corriente de ánodo registrada  $I_a$  [ $\mu\text{A}$ ], mediante la *responsividad* del detector ( $R = 0,35 \text{ A/W}$ ) se obtuvo la potencia  $P$  [ $\text{mW}$ ].

$$P = \frac{I_a \cdot 10^{-6}}{0,35 \cdot 10^{-3}} \quad [\text{mW}]$$

Y la densidad de potencia, al dividir la potencia por el área del *pinhole* ( $A = 0,005026 \text{ cm}^2$  para un diámetro de 0,8 mm).

$$DP = \frac{P}{0,005026} \quad [\text{mW/cm}^2]$$

La experiencia se realizó dos veces para observar cómo varía la distribución de la densidad de potencia en función de la distancia entre el láser y el detector.

### **Resultados:**

A continuación, en las figuras 119 y 120, se muestran gráficamente los valores calculados a partir de las mediciones, y una superficie que se ajusta a los mismos.

Densidad de potencia sobre la superficie del detector:

Ruido de fondo ( $\mu\text{A}$ )	Responsividad (A/W)	Área del pinhole ( $\text{cm}^2$ )	Distancia L (m)
0,30	0,35	0,005026	1,70

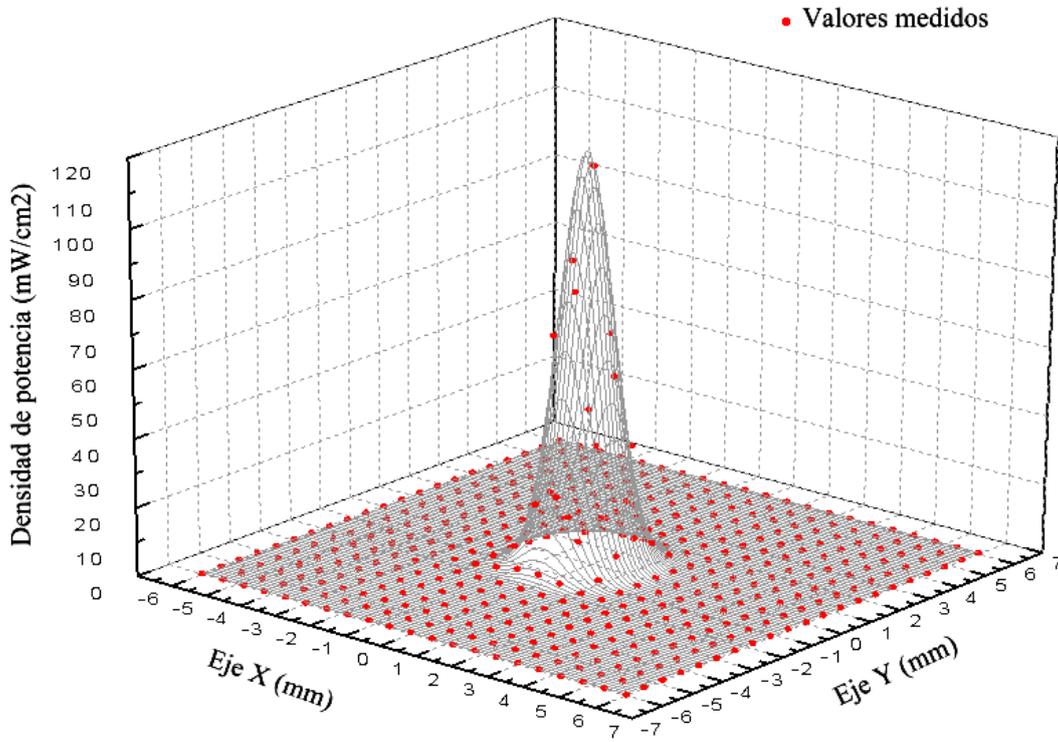


Figura 119

Superficie de ajuste:

Ecuación: 
$$z = z_0 + A \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-x_c}{w_1}\right)^2 - \frac{1}{2}\left(\frac{y-y_c}{w_2}\right)^2}$$

$$Z_0 = 0,43517 \text{ mW/cm}^2$$

$$A = 119,03756 \text{ mW/cm}^2$$

$$x_c = -0,11672 \text{ mm}$$

$$w_1 = 0,58593 \text{ mm}$$

$$y_c = -0,09375 \text{ mm}$$

$$w_2 = 0,62377 \text{ mm}$$

$$\text{Valor máximo} = Z_0 + A = 119,47273 \text{ mW/cm}^2$$

Densidad de potencia sobre la superficie del detector a 2 L:

Ruido de fondo ( $\mu\text{A}$ )	Responsividad (A/W)	Área del <i>pinhole</i> ( $\text{cm}^2$ )	Distancia L (m)
0,30	0,35	0,005026	3,40

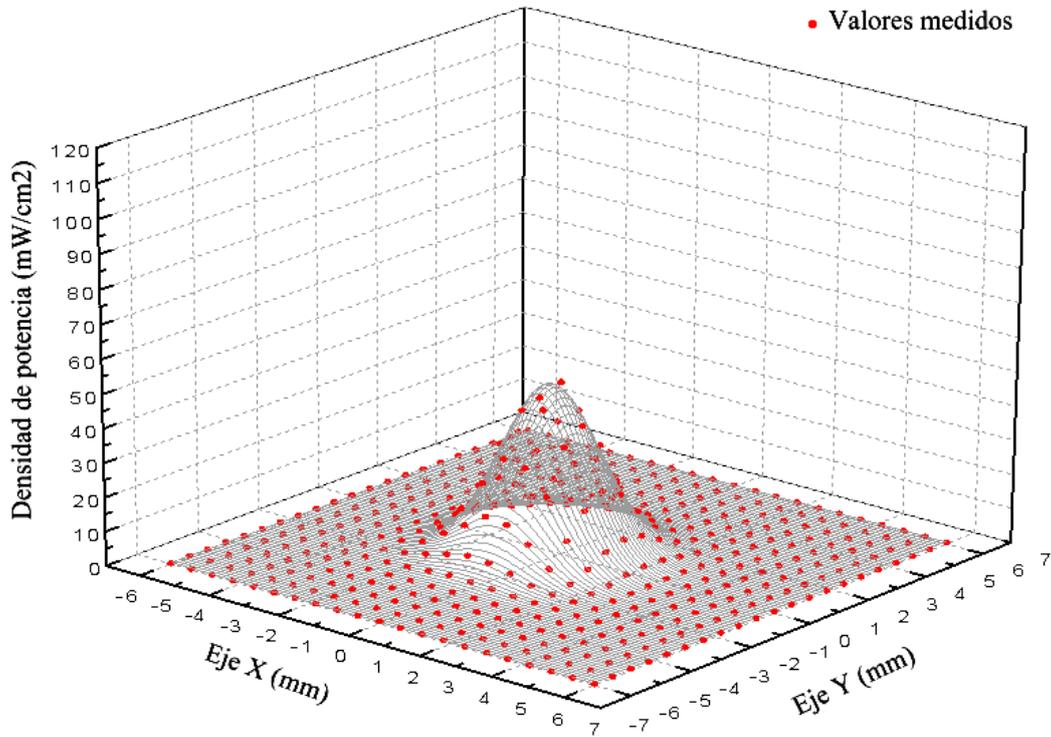


Figura 120

Superficie de ajuste:

Ecuación: 
$$z = z_0 + A \cdot e^{\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{x-x_c}{w1}\right)^2 - \frac{1}{2} \left(\frac{y-y_c}{w2}\right)^2\right)}$$

$Z_0 = 0,47518 \text{ mW/cm}^2$

$A = 49,16016 \text{ mW/cm}^2$

$x_c = -0,20931 \text{ mm}$

$w1 = 1,09656 \text{ mm}$

$y_c = -0,12304 \text{ mm}$

$w2 = 1,0806 \text{ mm}$

Valor máximo =  $Z_0 + A = 49,63534 \text{ mW/cm}^2$

### *Conclusión del ensayo:*

El ajuste muestra que la distribución, tanto de la potencia como de su densidad sobre el detector, efectivamente tiene forma *gaussiana*, haciéndose más ancha y menos pronunciada a medida que aumenta la distancia entre el láser y el dispositivo.

Además se observa que a la distancia de 3,40 m, la densidad de potencia en el centro de la distribución todavía excede el valor recomendado. Por lo tanto es necesario atenuar el haz para utilizar los detectores en su punto óptimo.

### **1.2. Medición de la corriente total en las condiciones óptimas de trabajo**

El objetivo del ensayo es medir la corriente total generada en las condiciones óptimas para determinar la corriente máxima que circulará por cada nodo del DPC. Este dato es necesario para fijar un valor de ganancia para el circuito de acondicionamiento de señal.

En una aproximación, la corriente total generada se divide en dos componentes: una correspondiente al par de nodos del eje vertical, y otra correspondiente al par del eje horizontal. A su vez, cuando el haz incide en el extremo de uno de los ejes, la corriente que circula a través del nodo más próximo aumenta, disminuyendo la que circula a través del nodo opuesto. En otras palabras, cada componente se reparte entre un par de nodos.

Puede pensarse entonces que la máxima corriente que circulará a través de un nodo del DPC corresponde a la mitad de la corriente total, cuando la correspondiente al nodo opuesto sea, idealmente, nula. Esto no se cumple estrictamente, pero es una buena aproximación teórica que permite definir una corriente máxima y fijar así la ganancia del circuito.

### *Procedimiento:*

Se utilizó el montaje antes descrito, con la inclusión de un dispositivo que permite regular la intensidad del haz incidente. El mismo consiste en un polarizador lineal montado sobre un soporte de diseño propio que permite rotarlo libremente y, mediante marcas, estimar el ángulo rotado, es decir la atenuación (Figura 121).

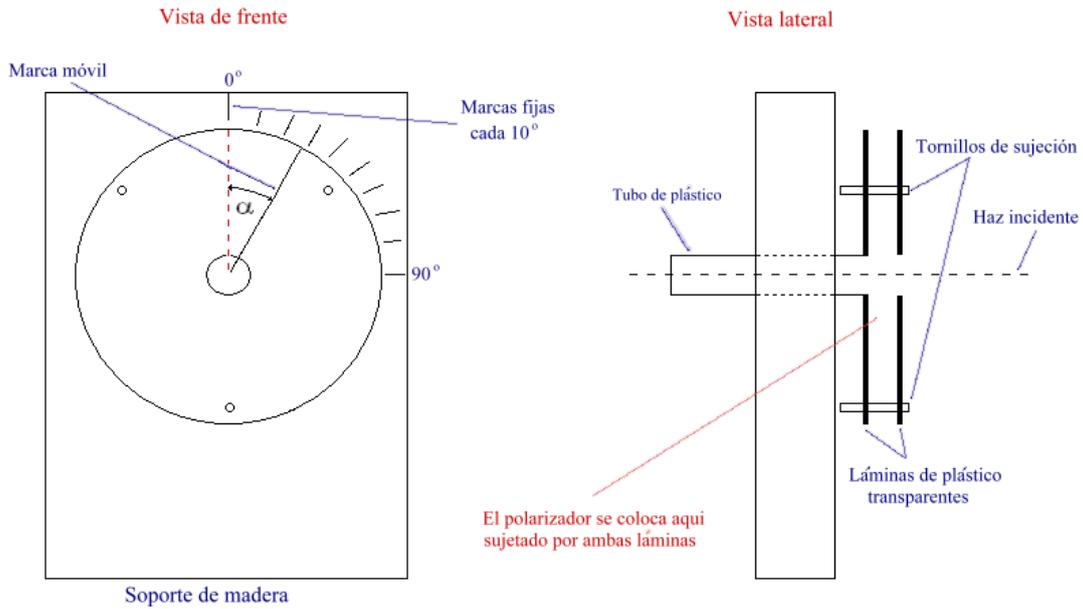


Figura 121

\*La imagen es sólo ilustrativa.

Se desplazó el conjunto *pinhole-DPC* en un plano perpendicular al haz incidente hasta encontrar el punto de mayor densidad de potencia, que es aquel en el cual la corriente de ánodo es máxima. Una vez ubicado dicho punto, se redujo la atenuación del haz hasta conseguir el valor de corriente correspondiente a las condiciones óptimas de trabajo, denominado. “Corriente de ánodo óptima” ( $I_{ao}$ ). A continuación se quitó el *pinhole* para que todo el haz incida sobre el detector y se midió la corriente debida a la totalidad de la luz incidente.

Para calcular el valor  $I_{ao}$  se procede de la siguiente manera:

Primero se obtiene la potencia incidente en las condiciones óptimas ( $P_o$ ), mediante la densidad de potencia óptima ( $DP_o=10 \text{ mW/cm}^2$ ) y el área del *pinhole* ( $A=0,005026 \text{ cm}^2$  para un diámetro de 0,8 mm)

$$P_o = DP_o \times A = 10 \text{ mW/cm}^2 \times 0,005026 \text{ cm}^2$$

$$P_o = 0,05026 \text{ mW}$$

Luego, utilizando la *responsividad* del detector ( $R = 0,35 \text{ A/W}$ ), la corriente de ánodo óptima ( $I_{ao}$ ) resulta:

$$I_{ao} = P_o \times R = 0,05026 \text{ mW} \times 0,35 \text{ A/W} \times \frac{10^6}{10^3}$$

$$I_{ao} = 17,59 \text{ } \mu\text{A}$$

*Resultados:*

La corriente total, medida en las condiciones óptimas de trabajo, resultó de 128  $\mu\text{A}$ . Por lo tanto, por cada par de nodos correspondientes a un eje cartesiano del DPC circulará la mitad, es decir 64  $\mu\text{A}$ .

## 2. Resultados de los ensayos sobre el AD8513

### 2.1. Ensayo en una placa de pruebas

Las mediciones se efectuaron para distintas frecuencias y para tres niveles de intensidad de señal a la entrada: 50%, 75%, y 100% del valor máximo esperado (64  $\mu\text{A}$ ).

A continuación se muestran los resultados obtenidos para el Canal 3.

Intensidad de entrada	Frecuencia	Trans-Impedancia
50%	f [Hz]	Z [k $\Omega$ ]
	10,30	148,45 $\pm$ 4,33
	99,75	149,56 $\pm$ 4,37
	1003	149,78 $\pm$ 4,49
	10040	149,54 $\pm$ 4,37
75%	f [Hz]	Z [k $\Omega$ ]
	10,05	147,84 $\pm$ 3,75
	100,20	148,89 $\pm$ 3,77
	1005	149,05 $\pm$ 3,79
	10040	148,87 $\pm$ 3,78
100%	f [Hz]	Z [k $\Omega$ ]
	10,00	147,95 $\pm$ 3,73
	100,50	148,87 $\pm$ 3,75
	1005	149,10 $\pm$ 3,76
	10075	149,09 $\pm$ 3,76

Tabla 10: Resultados correspondientes al Canal 3

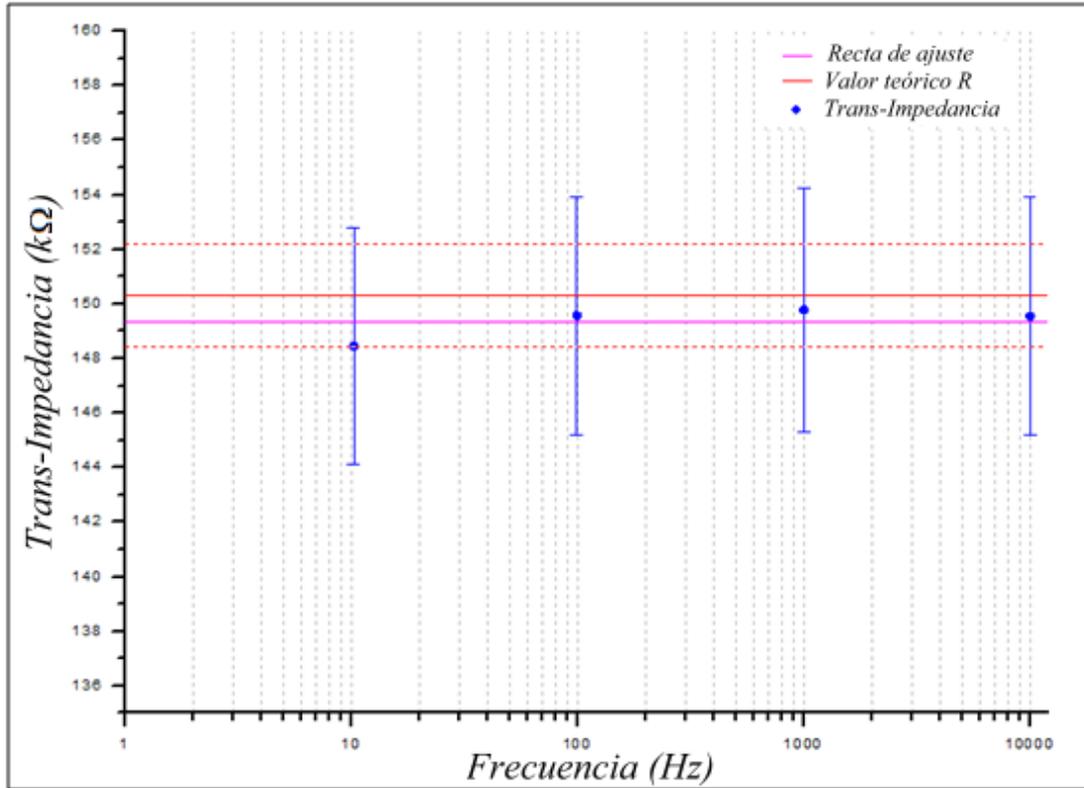


Figura 122: Canal 3 - Intensidad de entrada 50%

Datos de la recta de ajuste:

Intersección con el eje vertical: 149,32 kΩ

Máximo apartamiento de los valores medidos:

- Absoluto: -0,88 kΩ
- Porcentual: -0,59%

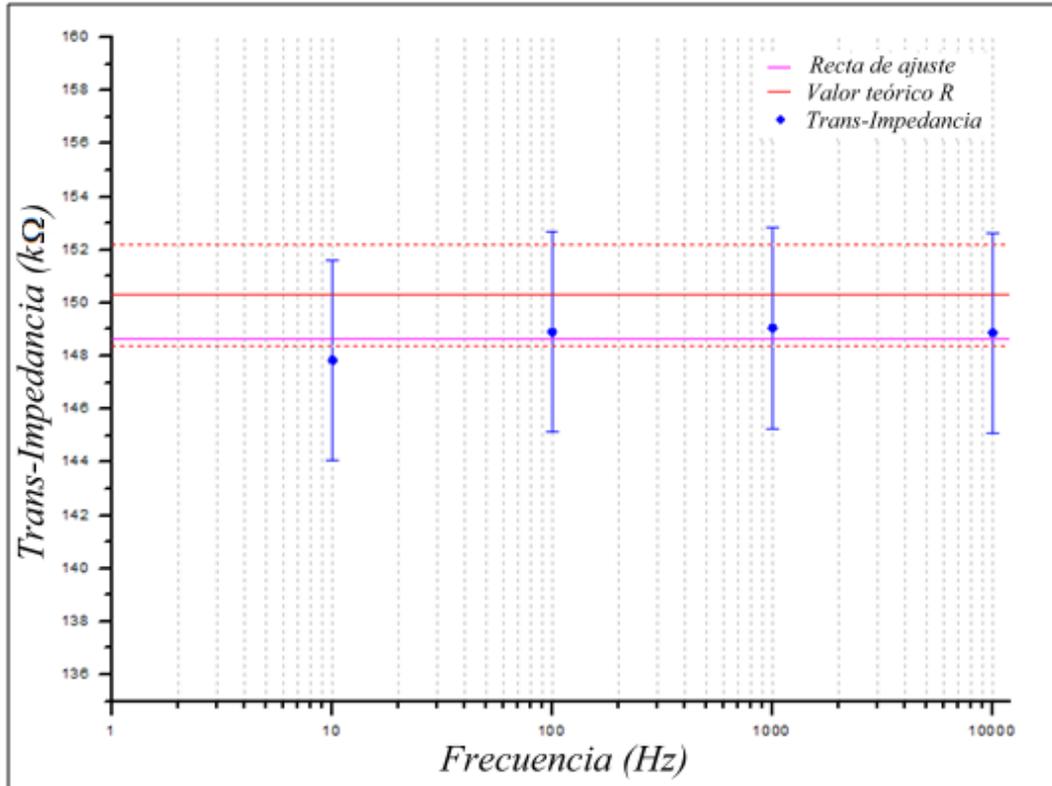


Figura 123: Canal 3 - Intensidad de entrada 75%

Datos de la recta de ajuste:

Intersección con el eje vertical: 148,66 kΩ

Máximo apartamiento de los valores medidos:

- Absoluto: -0,82 kΩ
- Porcentual: -0,55%

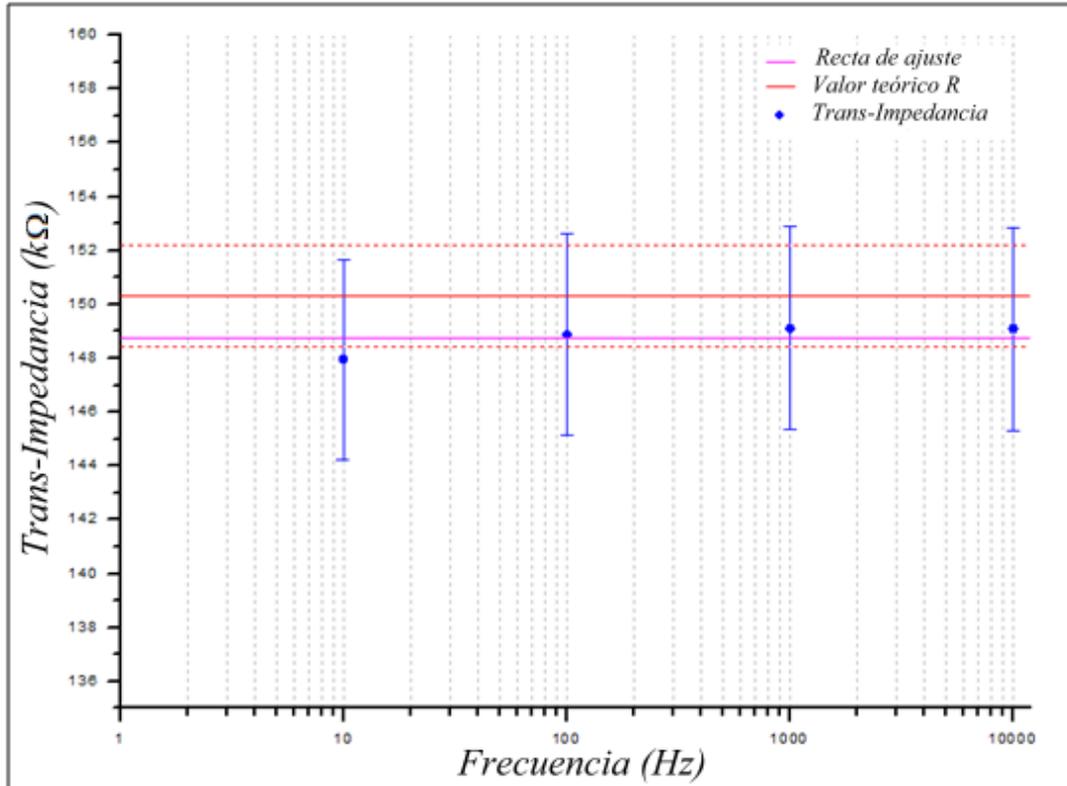


Figura 124: Canal 3 - Intensidad de entrada 100%

Datos de la recta de ajuste:

Intersección con el eje vertical: 148,75 kΩ

Máximo apartamiento de los valores medidos:

- Absoluto: -0,80 kΩ
- Porcentual: -0,54%

Las mediciones sobre los restantes canales se realizaron sólo con una señal de entrada de intensidad nominal. A continuación se presentan los resultados.

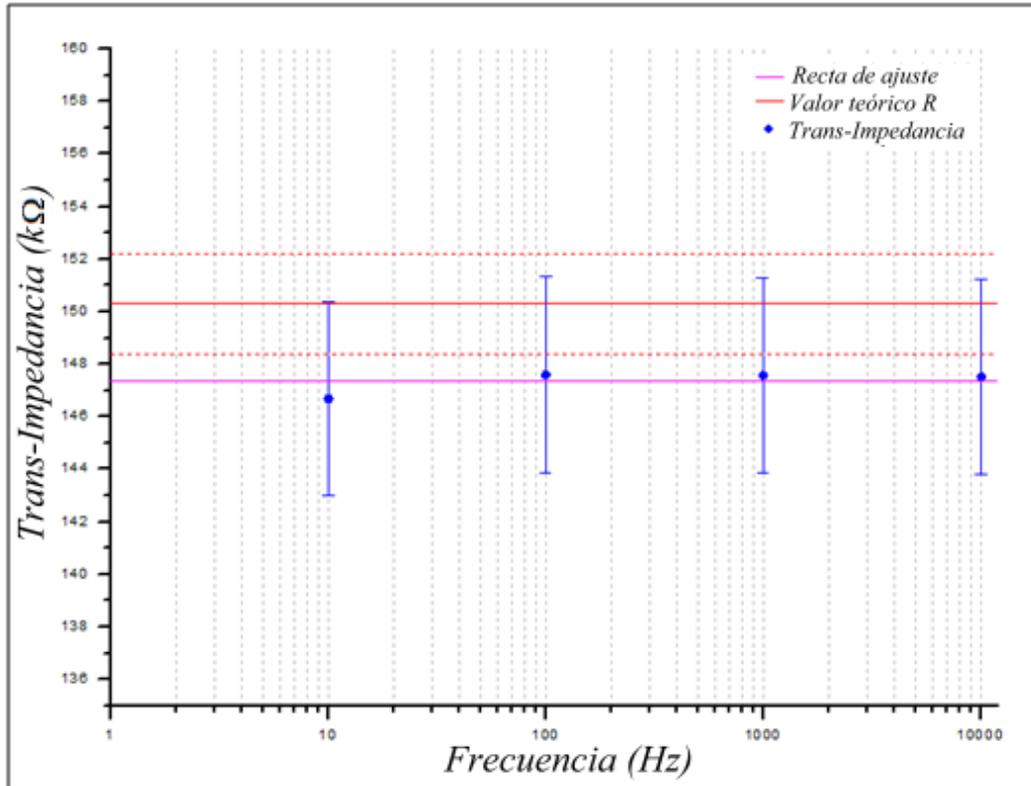


Figura 125: Canal 1- Intensidad nominal

Datos de la recta de ajuste:

Intersección con el eje vertical: 147,34  $k\Omega$

Máximo apartamiento de los valores medidos:

- Absoluto: -0,66  $k\Omega$
- Porcentual: -0,45%

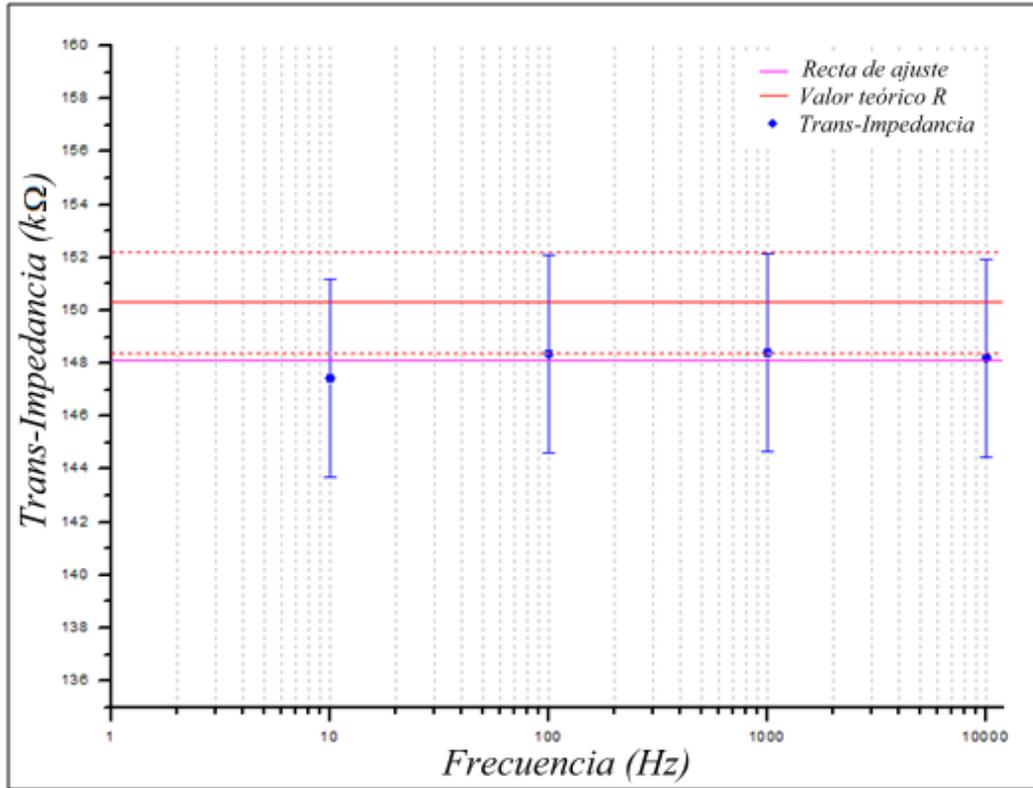


Figura 126: Canal 2 – Intensidad nominal

Datos de la recta de ajuste:

Intersección con el eje vertical: 148,10 kΩ

Máximo apartamiento de los valores medidos:

- Absoluto: -0,67 kΩ
- Porcentual: -0,45%

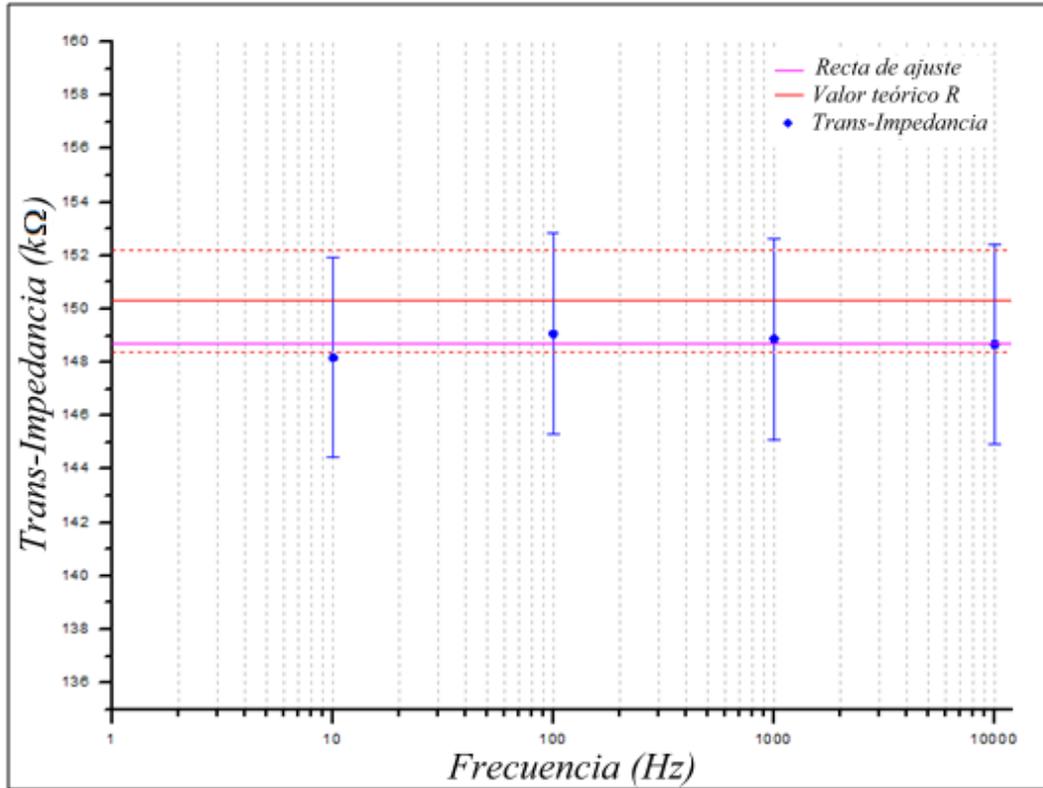


Figura 127: Canal 4 – Intensidad nominal

Datos de la recta de ajuste:

Intersección con el eje vertical: 148,69 kΩ

Máximo apartamiento de los valores medidos:

- Absoluto: -0,52 kΩ
- Porcentual: -0,35%

## 2.2. Ensayos en circuito impreso

Las mediciones se efectuaron para distintas frecuencias, y para niveles de intensidad de señal a la entrada correspondientes al 50% y 100% del valor nominal.

El valor teórico de la trans-impedancia es:

$$R = (150,0 \pm 1,5) \text{ k}\Omega$$

A continuación se presentan los resultados obtenidos para el canal X11:

Intensidad de entrada	Frecuencia	Trans-Impedancia
50%	f [Hz]	Z [kΩ]
	10,03	147,37 ±7,43
	99,60	147,87 ±7,46
	997,5	147,74 ±7,13
	10100	147,79 ±8,33
100%	f [Hz]	Z [kΩ]
	10,08	147,61 ±4,45
	100,10	147,84 ±4,75
	1006	147,80 ±5,01
	9990	147,78 ±4,27

Tabla 11: Resultados correspondientes al Canal X11

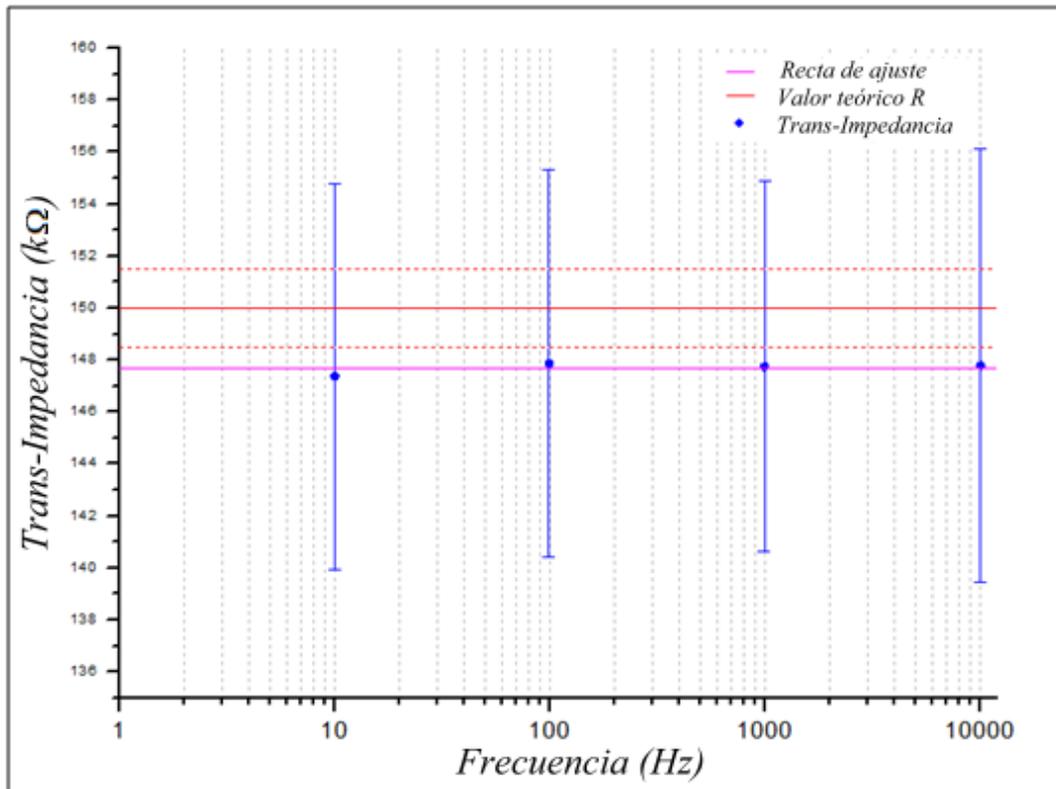


Figura 128: Canal X11 – Intensidad de entrada 50%

Datos de la recta de ajuste:

Intersección con el eje vertical: 147,69  $k\Omega$

Máximo apartamiento de los valores medidos:

- Absoluto: -0,32  $k\Omega$
- Porcentual: -0,22%

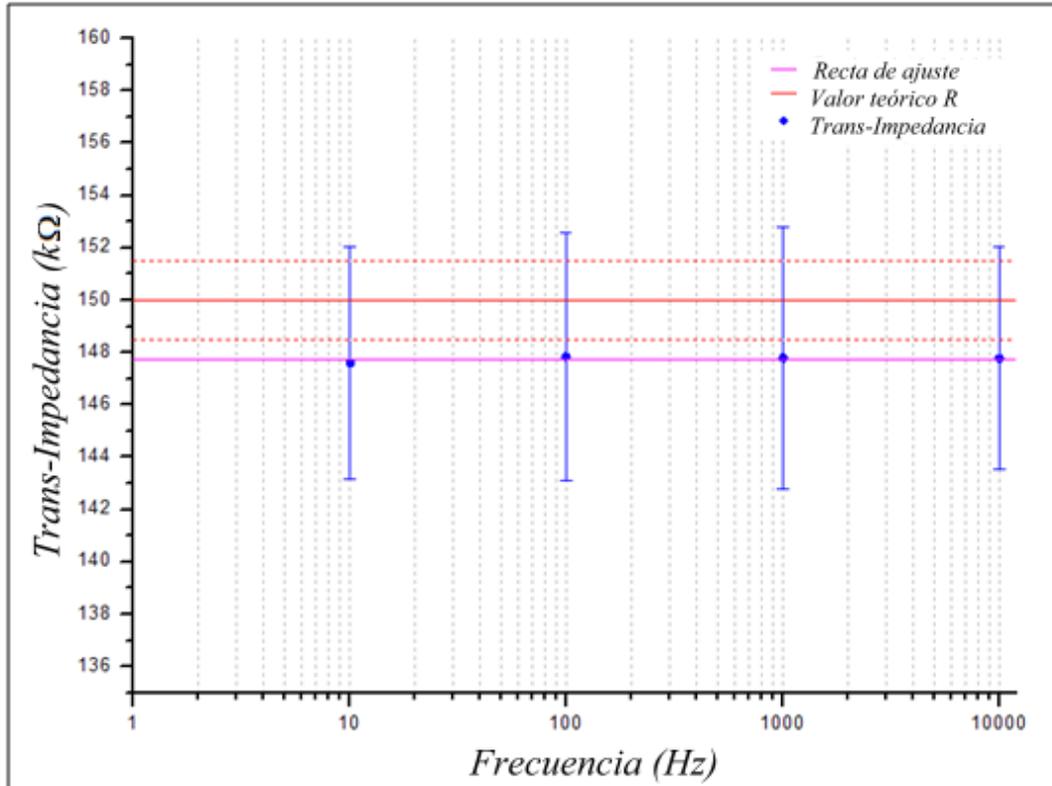


Figura 129: Canal X11 – Intensidad de entrada 100%

Datos de la recta de ajuste:

Intersección con el eje vertical:  $147,75 k\Omega$

Máximo apartamiento de los valores medidos:

- Absoluto:  $-0,14 k\Omega$
- Porcentual:  $-0,09\%$

Las mediciones sobre los restantes canales se efectuaron únicamente con una señal de entrada de intensidad nominal. Los resultados se muestran a continuación.

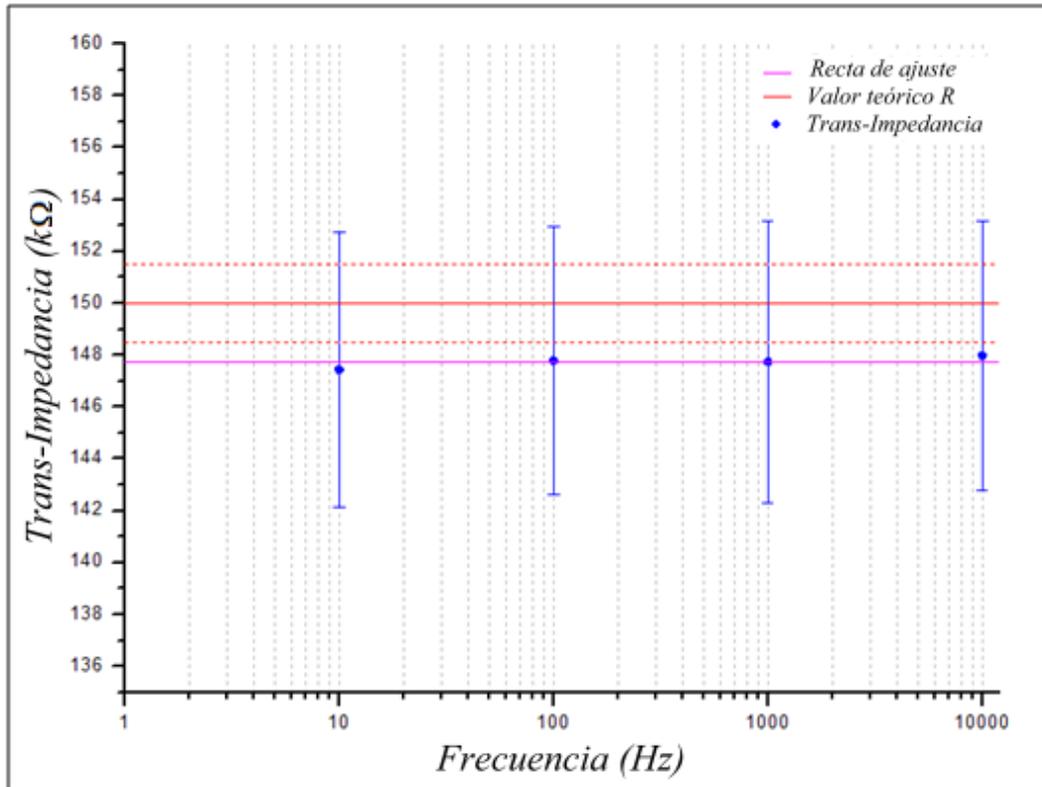


Figura 130: Canal X12 – Intensidad nominal

Datos de la recta de ajuste:

Intersección con el eje vertical: 147,74 kΩ

Máximo apartamiento de los valores medidos:

- Absoluto: -0,30 kΩ
- Porcentual: -0,20%

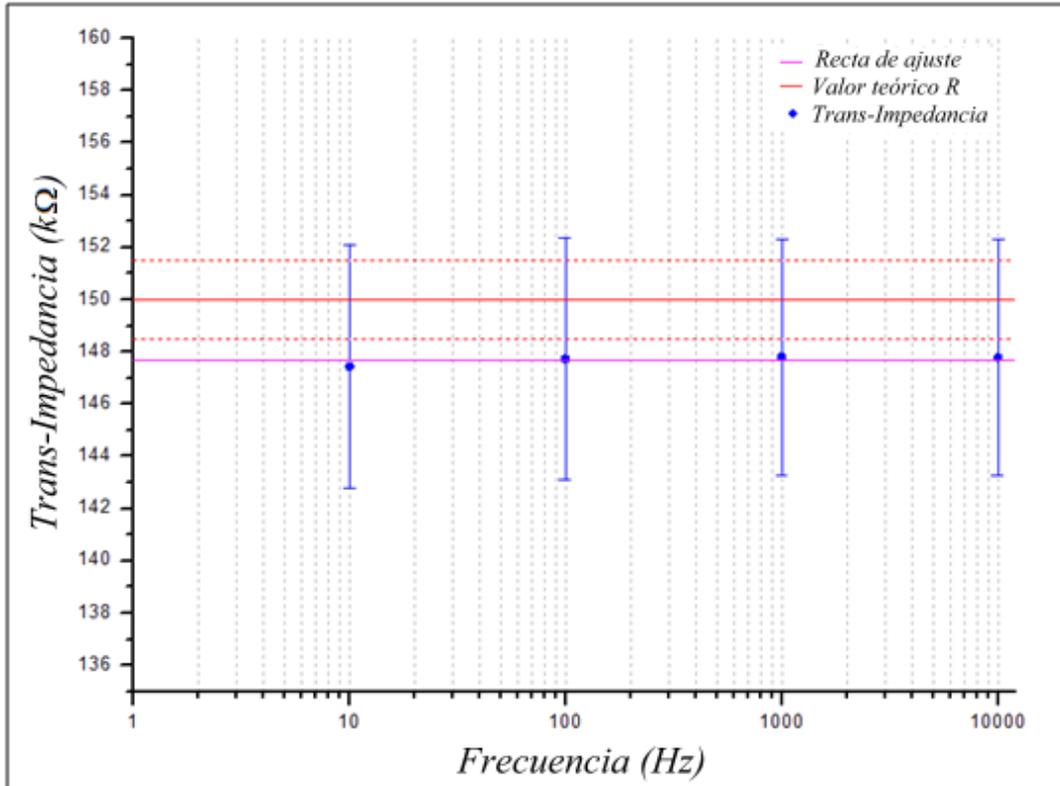


Figura 131: Canal Y11 – Intensidad nominal

Datos de la recta de ajuste:

Intersección con el eje vertical: 147,70 kΩ

Máximo apartamiento de los valores medidos:

- Absoluto: -0,26 kΩ
- Porcentual: -0,18%

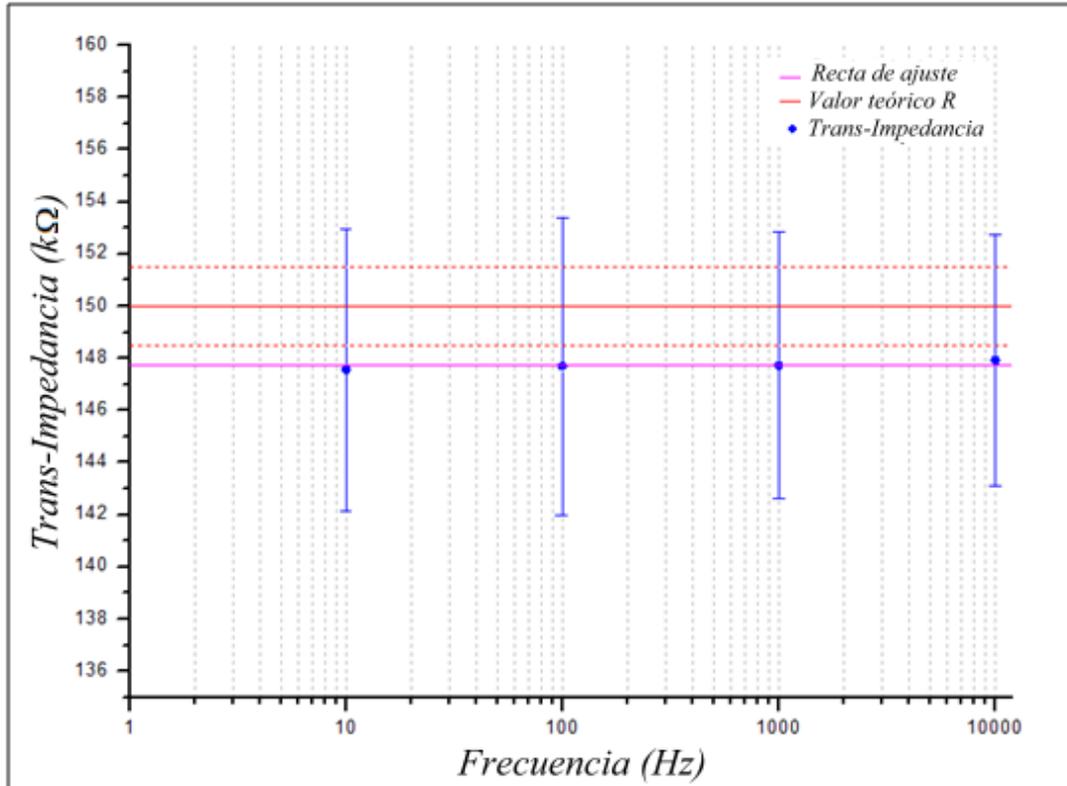


Figura 132: Canal Y12 – Intensidad nominal

Datos de la recta de ajuste:

Intersección con el eje vertical: 147,74 kΩ

Máximo apartamiento de los valores medidos:

- Absoluto: -0,19 kΩ
- Porcentual: -0,13%



## **Anexo IV**

### **Información técnica: Instrumentos de laboratorio, planos, esquemas y hojas de datos**

Contenido:

1. Instrumentos de laboratorio
2. Planos y esquemas
  - 2.1. Gabinete contenedor
  - 2.2. Circuito de acondicionamiento de señal
3. Hojas de datos

## 1. Instrumentos de laboratorio

### *Multímetro digital Wavetek DM25XT*



Ilustración 3

### **Especificaciones generales**

Presentación Visual: LCD de 3 1/2 dígitos, 1999 cuentas

Indicadores de función y de unidades

Indicación de polaridad: Automática, positiva implícita, negativa indicada

Ajuste de cero: Automático

Indicación de sobrecarga: “OL”

Indicación de “pila baja”: + - (Cambie la pila inmediatamente)

Frecuencia de refresco de la lectura: 2.5 veces/segundo, nominal

Temperatura de funcionamiento: 0 a 50 °C, 0 a 70% H.R.

Temperatura de almacenamiento: -20 a 60 °C, 0 a 80% H.R., sin pila.

Medio Ambiente: Interior, altitud 2000 m

Alimentación: Pila normal de 9 V

Apagado automático: Tras 60 minutos sin cambios de función o escala

Dimensiones (Alto x Ancho x Profundidad): 183x79x38 mm

## **Especificaciones eléctricas**

Valores de precisión a 23 °C  $\pm$ 5 °C, H.R. <75%

### **Tensión CC**

Escalas: 200 mV; 2, 20, 200, 1000 V

Precisión, todas esc.:  $\pm$  (0.5% lect. +1 dígito)

Resolución, escala 200 mV: 100 mV

Impedancia de entrada: 10 M $\Omega$

Rechazo modo normal (50-60 Hz): >60 dB

Rechazo modo común (hasta 1000 VCC: >120 dB)

Protección sobrecarga,

Escala 200 mV: 350 VCAef/500 VCC < (15 segundos)

Otras escalas: 750 VCAef/1000 VCC.

**Tensión CA** (50-1000 Hz). Precisión aplicable solamente a señales de entrada sinusoidales

Escalas: 200 mV; 2, 20, 200, 750 V

Precisión, todas las escalas

50-500 Hz:  $\pm$  (1% lect +4 dgt)

500 Hz-1 kHz:  $\pm$  (1.5% lect + 4 dgt)

Resolución, escala 200 mV: 100 mV

Impedancia de entrada: 10 M $\Omega$

Protección sobrecarga, escala 200 mV: 350 VCAef/500 VCC (15 segundos)

Otras escalas: 750 VCAef/1000 VCC.

### **Corriente CC**

Escalas: 200  $\mu$ A, 2, 20, 100 mA, 10 A

Resolución, escala 200  $\mu$ A: 100 nA

Precisión

Escalas 200  $\mu$ A - 100/200 mA:  $\pm$  (1.0% lect +1 dgt)

Escala 10 A:  $\pm$  (2.0% lect + 3 dgt)

Protección sobrecarga, fusible cerámico de actuación rápida

Entrada mA: 0.1 A/250 V

Entrada 10 A: 10 A/600 V

## Corriente CA

Escalas

200  $\mu\text{A}$ , 2, 20, 100 mA, 10 A

Resolución, escala 200  $\mu\text{A}$ : 100 nA

Precisión (50-500 Hz), escalas 200  $\mu\text{A}$  a 100/200 mA:  $\pm (1.5\% \text{ lect} + 4 \text{ dgt})$

Escala 10 A:  $\pm (2.5\% \text{ lect} + 4 \text{ dgt})$

Protección contra sobrecarga, fusible cerámico de actuación rápida

Entrada mA: 0.1 A/250 V

Entrada 10A: 10 A/600 V

## Resistencia

Escalas: 200  $\Omega$ ; 2, 20, 200 k $\Omega$ ; 2, 20 M $\Omega$

Resolución, escala 200  $\Omega$ : 100 m $\Omega$

Precisión, escalas

200  $\Omega$  a 2 M $\Omega$ :  $\pm (1.0\% \text{ lect} + 4 \text{ dgt})$

20 M $\Omega$ :  $\pm (2.0\% \text{ lect} + 4 \text{ dgt})$

2000 M $\Omega$ :  $\pm \{5.0\% (\text{LCD lect} - 10\text{dgt}) + 10 \text{ dgt}\}$

Protección contra sobrecarga, todas las escalas: 500 V CC o CA ef.

Tensión de circuito abierto,

Escalas 200  $\Omega$ , 2000 M $\Omega$ : 3.0 VCC típica.

Otras escalas: 0.3 VCC

## Osciloscopio digital HP54600B



Ilustración 4

### **Requerimientos de alimentación**

Rango de tensión de línea: 100 Vac a 240 Vac

Selección de la tensión de línea: Automática

Frecuencia de línea: 45 Hz a 440 Hz

Consumo máximo: 220 VA

**Dimensiones:** 172 mm (Altura) x 322 mm (Anchura) x 317 mm (Profundidad)

### **Condiciones Ambientales:**

#### **Temperatura**

Operación: -10 °C a +55 °C

Almacenamiento: -51 °C a + 71 °C

#### **Humedad**

Operación: 95% HR a 40 °C por 24 Hs

Almacenamiento: 90% HR a 65 °C por 24 Hs

#### **Altitud**

Operación: hasta 4,500 m

Almacenamiento: hasta 15,000m

**Resolución** 8 bits

**Sistema de presentación:**

Visualizador: TRC de 7 pulgadas

Resolución: 255 puntos verticales x 500 horizontales

Controles: Intensidad

Reticulado: Rejilla de 8 x10

**Acoplamiento de entrada:** DC, AC o tierra.

**Ancho de banda**

Acoplamiento DC: DC - 100 Mhz

Acoplamiento AC: 10 Hz - 100 Mhz

**Número de canales:** 2 (CH 1, CH 2)

**Sensibilidad:** 2 mV/div a 5 V/div

**Fuente de Trigger:** Canal 1, Canal 2, línea, o externa

**Exactitud de la ganancia en DC:**  $\pm 1.5\%$

**Tiempo de crecida:**  $<3.5$  ns

**Sistema Vertical:**

Bandwidth Limit:  $\sim 20$  MHz

Inversion: CH 1 and CH 2

CMRR:  $\sim 20$  dB @50 MHz

Rango Dinámico:  $\pm 8$  divisiones desde el centro de la pantalla

Impedancia de entrada:  $1\text{ M}\Omega$ ,  $\sim 13$  pf

Entrada máxima 400 V (DC + pico de AC)

**Funciones matemáticas:** CH 1 + o - CH 2

**Exactitud de los cursores:**

Cursor vertical simple:  $\pm 1.2\%$  del fondo de escala,  $\pm 0.5\%$  del valor de posición

Cursor vertical dual:  $\pm 0.4\%$  del fondo de escala

**Sistema Horizontal:**

Rango de la base de tiempos: 5 s/div a 2 ns/div

Exactitud Horizontal:  $\pm 0.01\%$

Resolución Horizontal: 100 ps

Exactitud del cursor ( $\Delta t$  y  $1/\Delta t$ ):  $\pm 0.01\% \pm 0.2\%$  del fondo de escala  
 $\pm 200$  ps

**Mediciones Automáticas (Continuamente actualizadas):**

Tensión:  $V_{avg}$ ,  $V_{rms}$ ,  $V_{pp}$ ,  $V_{top}$ ,  $V_{base}$ ,  $V_{min}$ , y  $V_{max}$

Tiempo: Frecuencia, Período, + Ancho, - Ancho, Ciclo de trabajo, Tiempo de crecida, y Tiempo de decrecida.

Cursores: Ubicados manual o automáticamente.

## Generador de funciones Goldstar FG-8002



Ilustración 5

### **General:**

Alimentación: AC 115/230 V, 50/60 Hz

Consumo: Aproximadamente 20 W

Dimensiones (mm): 210(Anchura) 76(Altura) 260(Profundidad)

Control de *offset* de CC.

**Rango de frecuencias:** 0.02 Hz a 2 MHz.

**Exactitud de frecuencia:**  $\pm 8\%$  del fondo de la escala de 2 MHz

**Formas de onda:** Sinusoidal, Triangular, Cuadrada, Rampa, salida TTL, Simetría variable para generar pulsos y diente de sierra.

**Sinusoidal:** Distorsión menor al 1% (0.2 Hz ~ 100 kHz)

**Onda Cuadrada:** Tiempo de crecida/decrecida: Menor a 100 ns

**Onda Triangular:** Alinealidad menor al 1% @100 kHz, y menor al 5% @2 MHz

### **TTL:**

Salida: Nivel TTL

Tiempo de crecida/decrecida: menor a 25 ns

### **Salida:**

Tensión de salida: 20 V<sub>p-p</sub> (Circuito abierto), 10 V<sub>p-p</sub> (50  $\Omega$  de carga)

Atenuador: hasta -20 dB

Impedancia:  $50 \Omega \pm 5\%$

## 2. Planos y esquemas

### 2.1. Gabinete contenedor

Con el objetivo de preservar la integridad de los circuitos, protegiéndolos de los efectos nocivos del ambiente y del ruido electromagnético, se diseñó un gabinete contenedor. El mismo tiene la capacidad para albergar tanto el circuito de acondicionamiento de señal, como la placa NI-USB6009 sin su carcasa.

Se utilizó una plancha de acero inoxidable de 3 mm de espesor y, con un sistema de corte láser industrial disponible en el laboratorio, se realizaron los cortes y agujeros necesarios.

Al diseñarlo, se tuvieron en cuenta los siguientes requerimientos:

- Un conector para la entrada de la alimentación, ya que la fuente es externa.
- Un conector DB9 para las señales provenientes de cada detector.
- Un orificio que permita acceder al conector USB de la placa
- Un orificio para el indicador LED de la placa.

El plano se realizó mediante el software de diseño AutoCAD 2008, y se muestra en la figura 133.

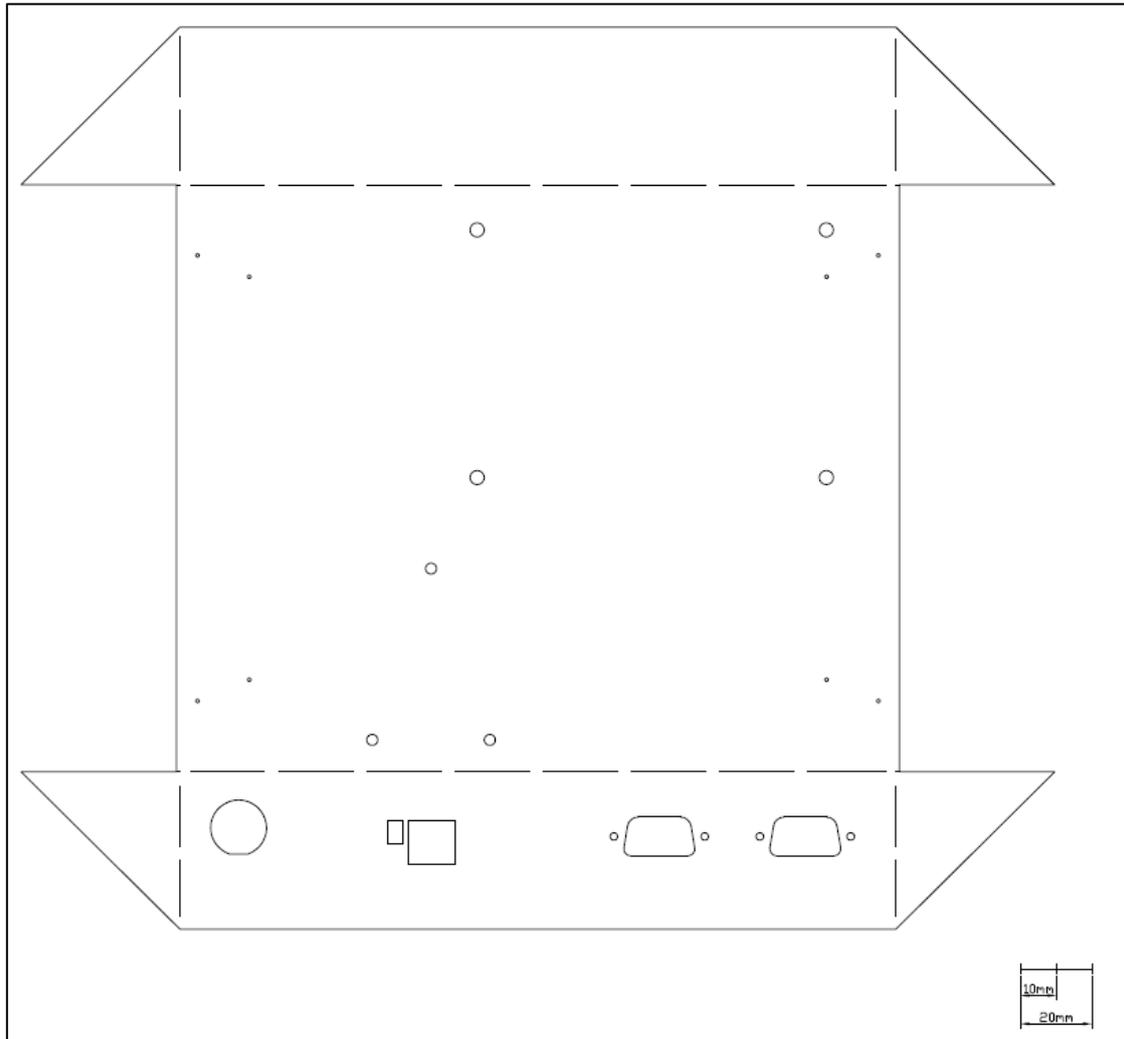


Figura 133

Las siguientes ilustraciones muestran el gabinete terminado, antes y después de colocarle los dispositivos electrónicos.

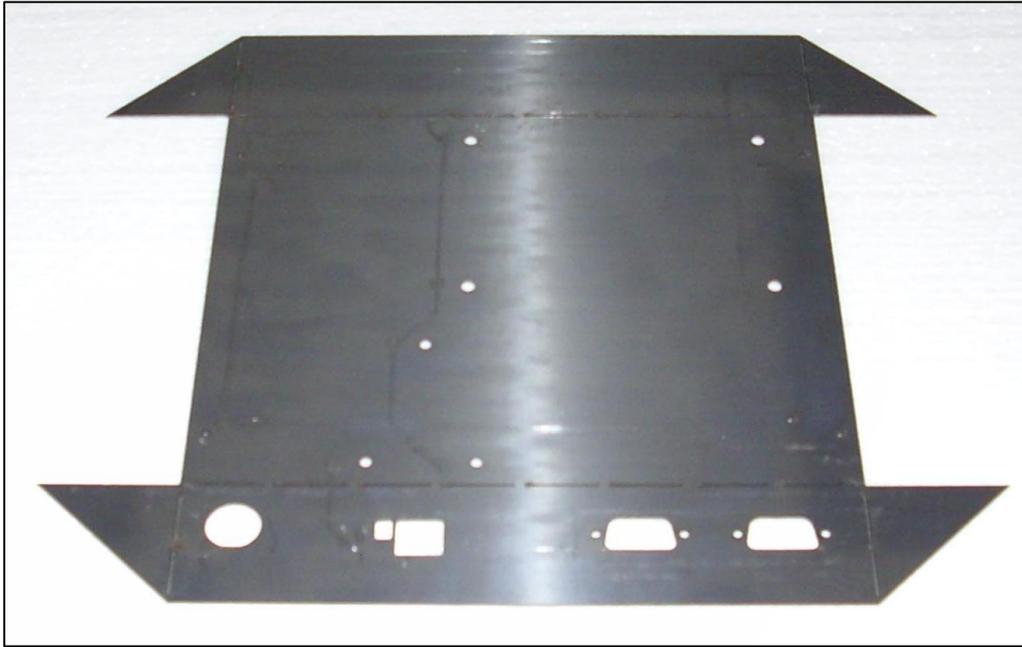


Ilustración 6



Ilustración 7

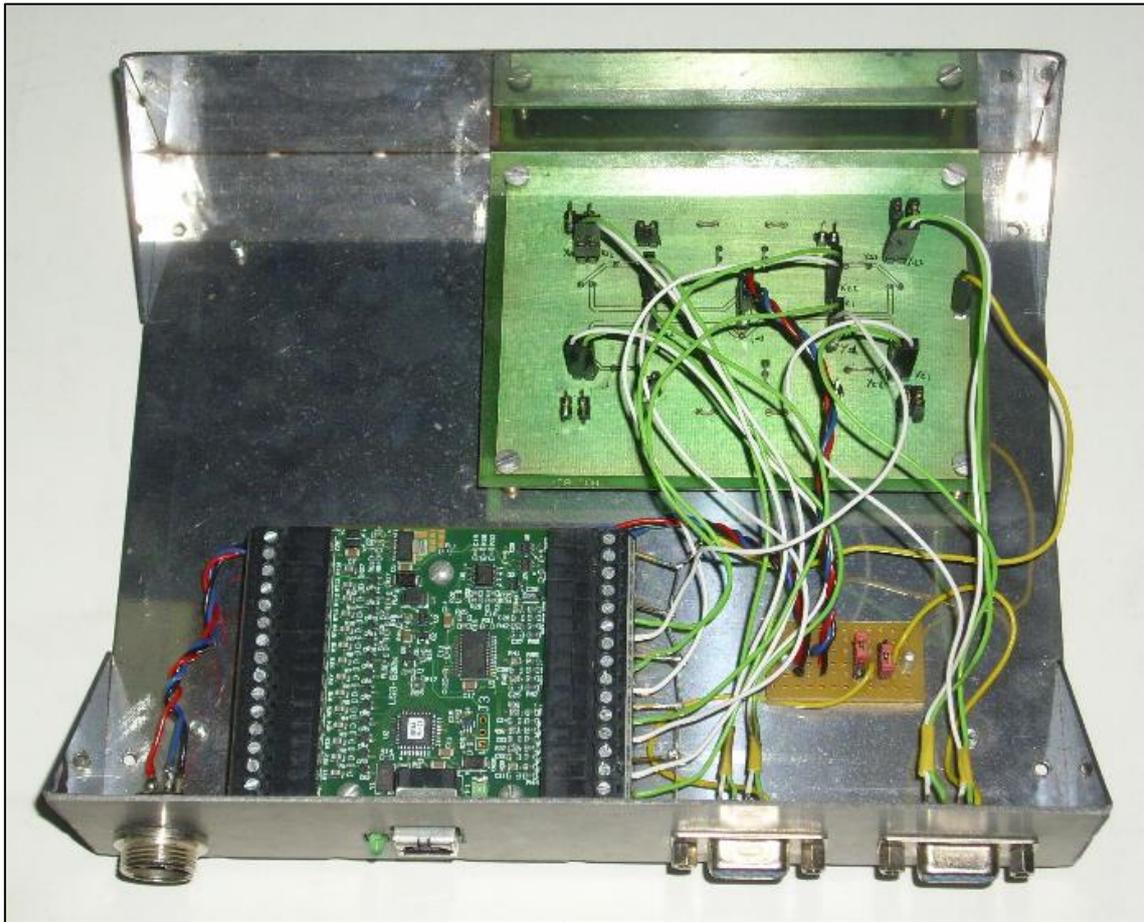


Ilustración 8

La ilustración 8 muestra el gabinete contenedor luego de ubicar el circuito de acondicionamiento de señal (parte superior derecha), la placa adquiridora NI-USB6009 sin su carcasa (parte inferior izquierda), los dos conectores de entrada DB9 y el de alimentación.



### 3. Hojas de datos

A continuación se incluyen las hojas de datos de los siguientes dispositivos y componentes:

- Láser de He-Ne Melles Griot 05-LHP-991
- Detector DL-10
- Detector SC-10D
- Placa adquiridora de datos NI-USB6009
- Amplificador Operacional AD8513
- Regulador de tensión LM7812
- Regulador de tensión LM7912