



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**

**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA ELECTRÓNICA  
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA ELECTRÓNICA  
OPCIÓN EN AUTOMATIZACIÓN**

**“Diseño de un Sistema de Adquisición de datos para un Fotodiodo de  
Avalancha APD con aplicaciones en Experimentos de Óptica  
Cuántica” \*\***

# **T E S I S**

Presentada para obtener el título de:  
**Maestro en Ciencias de la Electrónica, Opción en Automatización**

Presenta:

**Ing. Dany Ivan Martinez De La Cruz\***

CVU: 771716

Directores:

Dra. María Aurora Diozcora Vargas Treviño (BUAP) CVU: 22132

Dr. Fernando (BUAP) CVU: 10830

Dr. Víctor Manuel Velázquez Aguilar (UNAM) CVU: 19645

**Puebla, México**

**Noviembre 2018**

\*BECARIO CONACYT

\*\* TRABAJO FINANCIADO POR EL PROYECTO VIEP, BUAP Y PROYECTO PAPIIT-UNAM

**BUAP**®

# Agradecimientos

Agradezco a Dios, a mis padres; Elda, Eulogio, a mis hermanos; Heberth, Elba y Yarely, a mis abuelos; María Antonia y Domingo, por el apoyo durante estos años de vida.

Agradezco a la Facultad de Ciencias de la Electrónica de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla por brindarme la formación profesional.

Un agradecimiento a mi asesora, la Dra. María Aurora Diozcora Vargas Treviño, al Dr. Sergio Vergara Limón, por transmitir y compartir sus conocimientos, sus consejos y la paciencia del día a día para el desarrollo de la tesis.

Al Dr. Victor Manuel Velázquez Aguilar por compartir sus conocimientos de física cuántica, y sobre todo a la aportación económica en los componentes que conforman el dispositivo desarrollado.

A mis sinodales, ya que con sus comentarios, preguntas y correcciones en los avances de tesis, contribuyeron en el enriquecimiento de este trabajo.

A la Dra. Olga Guadalupe Félix Beltrán coordinadora de la MCEA.

A CONACYT por el apoyo económico brindado para solventar los gastos personales durante la maestría.

A mis profesores; la Dra. Amparo Dora Palomino Melino y el Dr. José Fernando Reyes Cortés por transmitir sus conocimientos, su trabajo y apoyo, durante mi estancia en la maestría.

A mis compañeros de generación de la MCEA por la ayuda que me brindaron en cualquier momento: Tomás, Luis, Martín, Oscar, Nelson, Concepción, Alejandro, Erik Reyes, Eric Javier.

A mi compañero Luis Ernesto por compartir sus conocimientos conmigo.

## **Dedicatoria:**

*Por sus consejos y su amor a mi abuelita  
María Antonia Díaz Magdalena y a mi mamá  
Elda de la Cruz Díaz por su paciencia.*

# Resumen

En el presente proyecto se presenta el diseño de un sistema de adquisición de datos para un fotodiodo de avalancha APD con aplicaciones en Experimentos de Óptica cuántica. El APD GSAPD9-500 de la empresa Shenzhen YiguDian Technology Co es el componente principal para el desarrollo del proyecto.

El fotodiodo de avalancha es un fotodiodo especial que trabaja en la región de ruptura en avalancha para obtener una amplificación de corriente interna. Los electrones separados se desplazan hacia la región de avalancha donde un campo electrostático elevado los acelera hasta una velocidad muy elevada. Cuando los electrones acelerados se recombinan o chocan hay una gran posibilidad de que se cree un nuevo par por ionización por impacto. El segundo par también se separa y estos nuevos electrones repiten el proceso. El proceso termina hasta que todos los portadores abandonan la región de avalancha.

Las aplicaciones de los fotodiodos de avalancha son; reflectometría óptica en el dominio del tiempo, LIDAR, espectroscopía de correlación de fotones, óptica adaptativa. Y en el modo de contador de fotones se tienen las siguientes aplicaciones; en la biomédica, espectroscopía de fluorescencia de una molécula, aplicaciones en el espacio y aplicaciones en el monitoreo de profundidad.

En el mercado se encuentra el detector SPACM-AQ4C de cuatro canales y el detector SPCM-AQR de un canal ambos de la empresa Perkin Elmer, el cual en su interior contiene el APD C30902 y por su alto costo lo hace un dispositivo difícil de obtener, debido a eso se desarrolla el detector APD GSAPD9-500.

Para que el fotodiodo de avalancha funcione correctamente es necesario que opere a una temperatura menor a la del medio ambiente. Así, se presenta el diseño y la implementación de un control de temperatura con celdas peltier para una temperatura deseada de 10 °C, incluyendo el diseño del circuito eléctrico de potencia y su implementación, el cual para cada fotodiodo de avalancha serán dos controles de temperatura, es decir dos lazos de control.

Debido a la generación aleatoria de pares electrón-hueco en la zona de multiplicación, el fotodiodo de avalancha genera mucho ruido y para eso se presenta la etapa de filtrado para atenuar la señal proveniente del fotodiodo de avalancha en un ancho de banda de 10.5 MHz a 12.5MHz, el cual lo compone nueve operacionales configurados como; filtro pasa altas, filtro pasa bajas, integrador y un comparador. Las piezas que conforman al prototipo se diseñaron en SolidWorks 16.0 y se imprimieron en una impresora 3D.

Finalmente se realiza el experimento de óptica cuántica; conteo de fotones en el laboratorio de óptica avanzada en la facultad de ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México, y se comparan las mediciones obtenidas del detector GSAPD9-500 y el detector SPCM-AQR. Se analizan las respuestas y se demuestra que detector es más eficiente.

# Índice general

Agradecimientos.....	ii
Dedicatoria: .....	iii
Resumen .....	iv
Introducción.....	xii
1. Descripción del Sistema .....	1
1.1 Diagrama a bloques .....	1
1.1.1  Detector óptico, fibra óptica, APD y Manejador.....	2
1.1.2  Módulo contador de fotones y PC.....	6
2. Diseño del detector .....	7
2.1 Fotodetectores semiconductores .....	7
2.2 Detector fotoconductor .....	10
2.3 Fotodiodo de unión PN .....	12
2.4 Fotodiodo PIN.....	18
2.5 Física del APD y modos de operación.....	20
2.5.1 Modo Geiger.....	22
2.6 Diagrama del circuito.....	24
2.7 Circuito impreso .....	29
2.8 Conclusiones .....	30
3. Sistema de enfriamiento para los APD.....	31
3.1 Celda Peltier.....	31
3.2 Caracterización de las celdas Peltier.....	32
3.3 Circuito de potencia y control para la emulación del medio ambiente.....	34
3.4 Circuito de potencia y control para la emulación de control del lado frío de la celda Peltier .....	38
3.4 Diseño de las piezas en SolidWorks .....	46
3.5 Resultados experimentales.....	48
3.6 Conclusiones .....	55
4. Caracterización del Fotodiodo de Avalancha.....	56
4.1 Caracterización del detector 1A354.....	56
4.1.1 Número de fotones en 1 $\mu$ s con detector 1A354. ....	60

4.1.2 Número de fotones en 100ns con detector 1A354.....	62
4.1.3 Número de fotones en 50ns con detector 1A354.....	63
4.2 Caracterización del detector 818-BB-21.....	65
4.3 Caracterización del APD GSAPD9-500.....	68
4.3.1 Número de fotones en 8ns con APD GSAPD9-500.....	71
4.3.2 Número mínimo de fotones en 8ns con APD GSAPD9-500.....	73
4.3.3 Etapa de filtro para el APD GSAPD9-500.....	75
4.4 Experimento de óptica cuántica: conteo de fotones.....	85
4.4.1 Detector APD GSAPD9-500.....	86
4.4.2 Detector SPCM-AQR.....	88
4.4 Conclusiones.....	89
Conclusiones Generales.....	90
Apéndice A. Ponencias a congresos.....	91
Apéndice B. Artículos.....	93
Apéndice C. Estancia.....	100
Constancia.....	100
Reporte de la estancia.....	101
Apéndice D. Manual de usuario.....	108
Descripción del hardware.....	108
Descripción del software.....	111
Instrucciones de uso.....	112
Apéndice E. TOEFL ITP.....	113
Bibliografía.....	114

# Índice de Figuras

Figura 0.1: A) Fotófono transmisor. B) Fotófono receptor. ....	xii
Figura 0.2: Efecto peltier. ....	xiv
Figura 0.3: Patente de un fotodiodo de avalancha 1972. ....	xv
Figura 0.4: Detector comercial desarrollado por la compañía canadiense RCA. ....	xv
Figura 0.5: Símbolo del Fotodiodo. ....	xvi
Figura 0.6: Reflectómetro en el dominio del tiempo GW550. ....	xvi
Figura 0.7: LIDAR de un puente en Big Sur California. ....	xvii
Figura 0.8: Dos ejemplos de dispersión dinámica de luz por partículas según sus tamaños relativos. ....	xvii
Figura 0.9: Planeta Neptuno a través del sistema de óptica adaptativa. ....	xviii
Figura 0.10: Módulo SPCM-AQR. ....	xix
Figura 0.11: Módulo SPCM-AQ4C. ....	xix
Figura 1.1: Diagrama general del sistema. ....	1
Figura 1.2: Diagrama general del sistema de manera simplificada. ....	2
Figura 1.3: VCSEL HFE4381-904. ....	2
Figura 1.4: Amplificador de transimpedancia. ....	3
Figura 1.5: Diagrama general del control de temperatura. ....	5
Figura 1.6: Tarjeta DE2. ....	6
Figura 2.1: Absorción directa en un semiconductor.[26]. ....	7
Figura 2.2: Absorción indirecta en semiconductores. ....	8
Figura 2.3: Curva de responsividad de un detector ideal. ....	9
Figura 2.4: Operación del detector fotoconductor. ....	10
Figura 2.5: Producción electrón-hueco. ....	11
Figura 2.6: Circuito típico para un detector fotoconductor. La luz causa un cambio en la resistencia del fotoconductor. ....	11
Figura 2.7: Fotodiodo sin potencial externo y sin iluminación. ....	12
Figura 2.8: Unión p-n de un fotodiodo bajo iluminación operado en el modo fotovoltaico. ....	13
Figura 2.9: Circuito común para usar un fotodiodo en modo fotovoltaico. ....	15
Figura 2.10: Respuesta voltaje-corriente de un fotodiodo bajo iluminación, el fotodiodo es operado en el modo fotovoltaico. ....	15
Figura 2.11: Fotodiodo bajo iluminación operado en el modo fotoconductor. ....	16
Figura 2.12: Circuito común para usar un fotodiodo en modo fotoconductor. ....	17
Figura 2.13: Respuesta voltaje-corriente de un fotodiodo bajo iluminación, donde el fotodiodo es operado en el modo fotoconductor. ....	18
Figura 2.14: Estructura de un fotodiodo PIN. ....	18
Figura 2.15: Fotodiodo PIN bajo iluminación y operado en el modo fotovoltaico. ....	19
Figura 2.16: Zonas del Fotodiodo de Avalancha APD. ....	20
Figura 2.17: Efecto Avalancha. ....	21
Figura 2.18: Detección del fotón en modo geiger, curva de probabilidad vs voltaje sobre $VBR$ ( $V_R > VBR$ ) a $22^\circ\text{C}$ . ....	23

Figura 2.19: Curva típica de cuentas oscuras vs temperatura con una eficiencia del 5% en la detección del fotón a 830 nm.....	23
Figura 2.20: Circuito eléctrico diseñado para el fotodiodo de avalancha. ....	24
Figura 2.21: Fotodiodo APD. ....	24
Figura 2.22: Respuesta de responsividad vs longitud de onda del fotodiodo.....	26
Figura 2.23: Respuesta de la fotocorriente vs polarización inversa del fotodiodo.....	26
Figura 2.24: Configuración de pines del fotodiodo de avalancha. ....	27
Figura 2.25: Convertidor DC-DC de la empresa XPEMCO. ....	28
Figura 2.26: Diagrama general de la fuente CD-CD. ....	28
Figura 2.27: Caracterización de la Fuente de alto voltaje. ....	29
Figura 2.28: Circuito eléctrico real.....	30
Figura 3.1: Diagrama de la estructura interna del efecto Peltier. ....	31
Figura 3.2: Celda Peltier de la empresa Hebei I.T. (Shanghai). ....	32
Figura 3.3: Control de temperatura del medio ambiente y lado frío de la celda peltier. ....	33
Figura 3.4: Sistema en lazo cerrado de control. ....	33
Figura 3.5: Asignación de pines del LM35. ....	34
Figura 3.6: Circuito eléctrico para la etapa de potencia. ....	34
Figura 3.7: Tarjeta electrónica para el control de temperatura. ....	35
Figura 3.8: Submenú entradas digitales.....	36
Figura 3.9: Submenú salidas digitales. ....	36
Figura 3.10: Submenú entradas analógicas. ....	37
Figura 3.11: Submenú salidas analógicas. ....	37
Figura 3.12: Software LabView 10.0 para la emulación del medio ambiente. ....	38
Figura 3.13: Tarjeta Sputnik 2.....	39
Figura 3.14: Etapa de potencia para el control de temperatura a través de corriente. ....	39
Figura 3.15: Circuito electrónico de potencia. ....	42
Figura 3.16: Tarjeta desarrollada.....	43
Figura 3.17: Diagrama de flujo para la programación en CCS Compiler. ....	45
Figura 3.18: Emulación de temperatura y control del lado frío de las celdas peltier. ....	46
Figura 3.19: Prototipo diseñado en SolidWorks.....	46
Figura 3.20: Prototipo físico.....	47
Figura 3.21: prototipo vista de manera interna.....	47
Figura 3.22: Celda Peltier a 6 volts de alimentación.....	48
Figura 3.23: Celda Peltier a 5 Volts de alimentación.....	48
Figura 3.24: Celda Peltier a 4 Volts de alimentación.....	49
Figura 3.25: Celda Peltier a 3 Volts de alimentación.....	49
Figura 3.26: Celda Peltier a 2 Volts de alimentación.....	50
Figura 3.27: Celda Peltier a 1 Volts de alimentación.....	50
Figura 3.28: Celda Peltier a 5 Volts de alimentación.....	51
Figura 3.29: Desempeño con 3 celdas Peltier.....	51
Figura 3.30: Desempeño con cuatro celdas Peltier.....	52
Figura 3.31: Desempeño con cinco celdas Peltier.....	53
Figura 3.32: Desempeño de un control de temperatura.....	54

Figura 3.33: Desempeño del primer detector. ....	55
Figura 4.1: Circuito eléctrico para caracterizas VCSEL. ....	56
Figura 4.2: Potencia óptica como función de la corriente eléctrica.....	59
Figura 4.3: Corriente eléctrica como función del voltaje. ....	59
Figura 4.4: Pulso generado vs respuesta del fotodiodo PIN a 1 $\mu$ s. ....	60
Figura 4.5: Respuesta del detector a un ancho de pulso de 100ns. ....	62
Figura 4.6: Respuesta del detector a un ancho de pulso de 50ns. ....	64
Figura 4.7: Circuito eléctrico de prueba del detector 818-BB-21. ....	65
Figura 4.8: Vista lateral del detector PIN 818-BB-21. ....	66
Figura 4.9: Respuesta de la punta óptica a un ancho de pulso de 1 $\mu$ s.....	67
Figura 4.10: Respuesta de la punta óptica a un ancho de pulso de 100ns. ....	67
Figura 4.11: Respuesta de la punta óptica a un ancho de pulso de 50ns. ....	68
Figura 4.12: Etapa de caracterización del APD.....	69
Figura 4.13: Voltajes de rupturas respecto a la temperatura del APD. ....	70
Figura 4.14: Respuesta del APD GSAPD9-500 a un ancho de pulso de 8ns. ....	72
Figura 4.15: Variación del voltaje en alto del generador de funciones arbitrarias. ....	74
Figura 4.16: Respuesta del APD con $V_H=1.3V$ a $10^\circ C$ . ....	74
Figura 4.17: Transformada de Fourier en $V_H=1.3V$ . ....	75
Figura 4.18: Circuito eléctrico de la etapa de filtrado de la señal del APD. ....	81
Figura 4.19: Circuito eléctrico amplificador sumador y comparador. ....	82
Figura 4.20: Respuesta del APD a un ancho de pulso de 100ns. ....	83
Figura 4.21: Respuesta del APD a un ancho de pulso de 50ns. ....	83
Figura 4.22: Respuesta del APD a un ancho de pulso de 8ns. ....	84
Figura 4.23: Señal de ruido del APD en ausencia de luz. ....	84
Figura 4.24: Diagrama de bloques del experimento de óptica cuántica. ....	85
Figura 4.25: Respuesta del APD GSAPD9-500 en el osciloscopio. ....	86
Figura 4.26: Respuesta del detector del APD GSAPD9-500 con incidencia de luz. ....	87
Figura 4.27: Respuesta del detector APD GSAPD9-500 sin incidencia de luz. ....	87
Figura 4.28: Respuesta del detector SPCM-AQR en el osciloscopio. ....	88
Figura 4.29: Respuesta del detector SPCM-AQR con incidencia de luz. ....	88
Figura 4.30: Respuesta del detector SPCM-AQR sin incidencia de luz. ....	89
Figura C.1: Etapa de filtro. ....	101
Figura C.2: Etapa de inducción del ruido y comparador. ....	102
Figura C.3: Circuito eléctrico para el detector 818-BB-21. ....	102
Figura C.4: A) Respuesta de la punta óptica a 1 $\mu$ s. B) Respuesta de la punta óptica a 500ns. ....	103
Figura C.5: A) Respuesta de la punta óptica a 100ns. B) Respuesta de la punta óptica a 50ns. ....	103
Figura C.6: Diagrama de bloques del experimento óptico. ....	104
Figura C.7: Respuesta del APD GSAPD9-500. ....	104
Figura C.8: Número de fotones del APD GSAPD9-500. ....	105
Figura C.9: Respuesta del APD GSAPD9-500 sin incidencia de luz.....	105
Figura C.10: Respuesta del detector SPCM-AQR. ....	106

Figura C.11: Número de fotones del detector SPCM-AQR. ....	106
Figura C.12: Respuesta del detector SPCM-AQR sin incidencia de luz. ....	107
Figura D.1: Fuente de voltaje. ....	108
Figura D.2: Gabinete de control de temperatura. ....	108
Figura D.3: Especificación de los cables de salida del control de temperatura. ....	109
Figura D.4: Gabinete de la etapa de filtro. ....	109
Figura D.5: Vista frontal del detector. ....	110
Figura D.6: Vista trasera del detector GSAPD9-500. ....	110
Figura D.7: Diagrama de flujo para la programación en CCS Compiler. ....	111

# Índice de Tablas

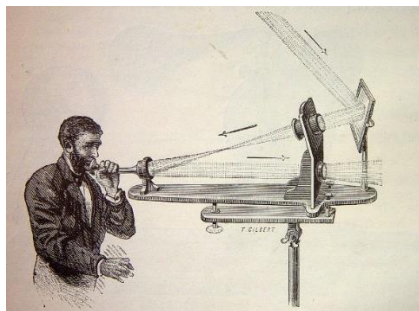
Tabla 2.1: Valores típicos de los detectores. ....	22
Tabla 2.2: Valores absolutos del fotodiodo de avalancha. ....	25
Tabla 2.3: Especificaciones del fotodiodo GSAPD-500. ....	25
Tabla 2.4: Pines de la fuente de voltaje CD-CD.....	28
Tabla 3.1: Especificaciones de la celda Peltier Hebei I. T. (Shanghai).....	32
Tabla 4.1: Caracterización de los VCSEL: TST-M85A426-2H y HFE4381-904.....	58
Tabla 4.2: Especificaciones del detector PIN 818-BB-21.....	66
Tabla 4.3: Obtención de parámetros para mínimos cuadrados.....	71
Tabla 4.4: Especificaciones del LASER R30991.....	85

# Introducción

La tecnología avanza rápidamente y a cada momento nos sorprende con nuevas técnicas de diseño y medición. Un dispositivo de los más utilizados por sus características es la computadora, la cual está en constante evolución; por lo tanto, poco a poco incrementa su velocidad y capacidad de almacenamiento. El desarrollo de instrumentos controlados por computadora está permitiendo automatizar procesos de caracterización y medición de diferentes sistemas usados en diversas áreas del conocimiento.

Para lograr la comunicación entre la fuente óptica y el fotodiodo de avalancha se utiliza la fibra óptica como medio de comunicación. Las fibras ópticas son filamentos generalmente en forma cilíndrica, que consiste en un núcleo de vidrio y un revestimiento de vidrio o plástico.

El científico británico Alexander Graham Bell, en 1880, experimentó con un aparato al que llamó fotófono, ver figura 0.1. El fotófono era un dispositivo formado con espejos y detectores de selenio, que transmitía ondas sonoras sobre un rayo de luz. Ese fotófono era muy malo, no confiable y no tenía aplicación práctica [1].



A)



B)

Figura 0.1: A) Fotófono transmisor. B) Fotófono receptor.

En 1930, J. L. Baird, científico inglés, y C. W. Hansell, de Estados Unidos, obtuvieron patentes para barrer y transmitir imágenes de televisión a través de cables de fibra no recubierta. En esa época, la mayoría de las personas consideraban a la óptica de fibras más como juguete o como una gracia de laboratorio y, en consecuencia, no fue sino hasta principios de la década de 1950 que se hicieron avances sustanciales en el campo de las fibras ópticas [2].

En 1951, A. C. S. van Heel de Holanda, y H. H. Hopkins y N. S. Kapany de Inglaterra experimentaron con transmisión de luz a través de *haces* de fibras. Sus estudios condujeron

al desarrollo del *fibroscopio flexible*, que se usa mucho en el campo de la medicina, Kapany fue quien acuñó el término “fibra óptica” en 1956 [2].

En 1958, Charles H. Townes, de Estados Unidos, y Arthur L. Schawlow, de Canadá, presentaron un trabajo donde describían cómo era posible usar emisión estimulada para amplificar las ondas luminosas (láser) y las microondas (másér) [3].

En 1970, Kapron, Keck y Maurer, de Corning Glass Works en Corning, New York, desarrollaron una fibra óptica con pérdidas menores que 2 dB/km. Fue el gran avance necesario para permitir los sistemas prácticos de comunicaciones con fibra óptica [3].

A fines de la década de 1970 y principios de la década de 1980, el refinamiento de los cables ópticos, y el desarrollo de fuentes luminosas y detectores de alta calidad y económicos abrió la puerta al desarrollo de sistemas de comunicaciones de alta calidad, alta capacidad, eficientes y económicos, con fibra óptica [3].

A fines de la década de 1980 las pérdidas en las fibras ópticas se redujeron hasta 0.16dB/km.

A mediados de la década de 1990, las redes ópticas para voz y datos eran lugar común en Estados Unidos y en gran parte del mundo.

Las comunicaciones a través de cables de fibra óptica de vidrio o de plástico tiene varias ventajas abrumadoras sobre las comunicaciones que usan instalaciones convencionales de cable *metálico* o *coaxial*. Las ventajas de los sistemas de fibra óptica son; mayor capacidad de información debido al ancho de banda de hasta 10 GHz, la inmunidad a la diafonía, la inmunidad al ambiente, duran más. Sus desventajas son; la resistencia menor en comparación a los cables coaxiales, costos de interconexión, las herramientas especiales para empalmar y reparar cables, y equipos especiales de prueba para hacer medidas rutinarias [3].

El *láser* (de *light amplification by stimulated emission of radiation*, amplificación de luz por emisión estimulada de radiación) es un dispositivo opto-electrónico capaz de emitir luz monocromática, coherente y confinada en un haz no divergente, fue inventado en 1960. La potencia relativamente alta de salida del láser, su alta frecuencia de operación y su capacidad de portar un ancho de banda extremadamente grande, lo hacen ideal para sistemas de comunicaciones de gran capacidad. La invención del láser aceleró mucho los esfuerzos de investigación en comunicaciones de fibra óptica, aunque no fue sino hasta 1967 que K. C. Kao y G. A. Bockham, del Standard Telecommunications Laboratory de Inglaterra propusieron un medio nuevo de comunicaciones, usando cables de fibra revestida.

Los láseres de semiconductor son los más utilizados en la actualidad y de acuerdo a su geometría se dividen en: láser de emisión lateral y láser de emisión vertical. Para el desarrollo del proyecto se utilizó el VCSEL.

El VCSEL (Láser de Emisión de Superficie con Cavidad Vertical) es un diodo semiconductor microláser que emite luz en un haz cilíndrico verticalmente de la superficie de una oblea fabricada, y ofrece significantes ventajas cuando es comparado al láser de emisión de borde usado actualmente en la mayoría de los dispositivos de comunicación con fibra óptica [4].

El primer VCSEL reportado fue en 1965 por Ivars Melngailis a una longitud de onda de 5.2 $\mu$ m [5].

En 1979 el mayor trabajo del VCSEL fue realizado por Soda, Iga, Kitahara y Suematsu, el VCSEL fue desarrollado a 1300 nm de longitud de onda y el material utilizado fue de GaInAsP/InP en la región activa [6]. Desde 1992 se comercializaron VCSEL a 980 nm, 850 nm y 780 nm.

Las ventajas del VCSEL son: bajo consume de potencia, modulación de alta velocidad con baja corriente, barato de fabricar y versátil por su tamaño reducido, opera en un único modo longitudinal, etc. Sus aplicaciones son; en comunicaciones ópticas, principalmente como emisores en sistemas de comunicaciones de alta velocidad en redes de área local y redes de media distancia., en el almacenamiento de datos, en ratones ópticos, sensores, etc.

Los inicios de las celdas peltier fue en 1821 con el científico Alemán Thomas Johann Seebeck descubrió que si los dos polos de un circuito eléctrico consistentes en dos metales distintos soldados estaban a diferentes temperaturas, producían una desviación en una aguja magnética, como si se hubiese sometido a la acción de un imán, este efecto fue bautizado como efecto seebeck.

En 1834 el físico francés Jean Charles Athanase Peltier descubrió el efecto inverso, observó que al pasar una corriente por un circuito constituido por dos metales distintos soldados, aparecía un gradiente de temperatura, el llamado efecto peltier, ver Figura 0.2.

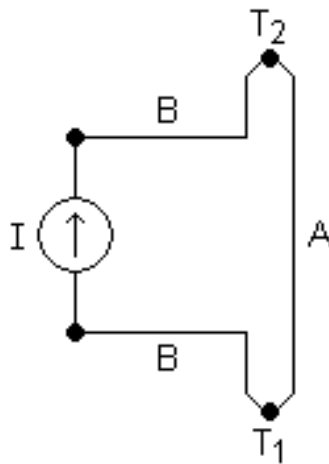


Figura 0.2: Efecto peltier.

En 1838 Emily Lenz descubrió que la dirección de la corriente condicionaba la naturaleza del sistema, entregar o quitar calor.

Este interesante fenómeno se mantuvo reducido a algunas aplicaciones hasta ahora, época en que se comienza a utilizar sus posibilidades con más frecuencia. Las aplicaciones más comunes son en la refrigeración de sistemas electrónicos como láseres u otros elementos de alta precisión que deben estar a temperaturas constantes, aunque también se pueden encontrar en objetos domésticos simples como neveras portátiles. Con estos dispositivos se obtiene un

control de temperatura simple y fiable sin necesidad de complejos sistemas constituidos por bombas de calor o compresores.

Las primeras referencias a la interacción entre la luz y los materiales semiconductores datan de la segunda mitad del siglo XIX, el primer experimento de algo parecido a un fotodiodo tuvo lugar en 1939, cuando el ingeniero Russell Shoemaker Ohl demostró el efecto de la luz sobre una unión rectificadora formada accidentalmente en una barra de germanio [7].

Pioneros en el desarrollo del estado sólido en la detección de un solo fotón fue realizado en los años 1960's en la compañía RCA por McIntyre [8] y en el laboratorio de investigación Shockley por Haitz [9]. Los fotodiodos de avalancha operados en el modo lineal y Geiger en los años sesenta y principios de los años setentas tuvieron un campo activo de experimentación e investigación teórica [10]. En 1972 fue patentado en Japón el detector de un solo fotón de estado sólido con diseño diferente, ver Figura 0.3 [11].

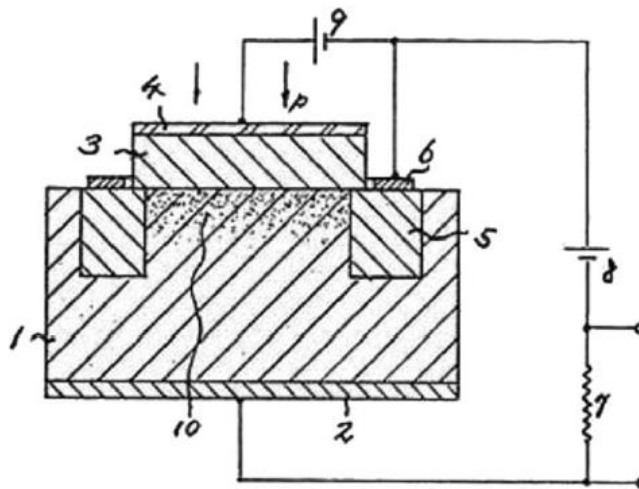


Figura 0.3: Patente de un fotodiodo de avalancha 1972.

En 1987 salió a la venta el primer módulo comercial SPCM-100 contador de fotones utilizando un fotodiodo de avalancha en modo Geiger, ver Figura 0.4.



Figura 0.4: Detector comercial desarrollado por la compañía canadiense RCA.

El fotodiodo es un dispositivo semiconductor con una unión P-N o estructura P-I-N (i = material intrínseco), donde la luz es absorbida en una región de deplexión y generando una fotocorriente. Como dispositivos pueden ser muy compactas, rápidas, altamente lineal, y exhibiendo una eficiencia cuántica alta (por ejemplo, genera casi un electrón por incidencia de fotón), y un alto rango dinámico, siempre que sean operados en combinación con dispositivos electrónicos adecuados. Un dispositivo particular sensible es el fotodiodo de avalancha, que a veces se emplea para el conteo de un solo fotón [12]. En figura 0.5 se muestra el símbolo eléctrico del fotodiodo.

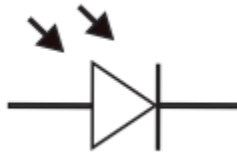


Figura 0.5: Símbolo del Fotodiodo.

Las aplicaciones típicas de los fotodiodos son:

- Reflectometría óptica en el dominio del tiempo OTDR (Optical Time Domain Reflectometry). Es una técnica de medición empleada con frecuencia para caracterizar y evaluar el estado de enlaces de fibra óptica [13], ver Figura 0.6.
- 



Figura 0.6: Reflectómetro en el dominio del tiempo GW550.

- LIDAR (Laser Imaging Detection and Ranging). La tecnología LIDAR es resultado de la integración de las tecnologías GPS, Unidad de Medición Inercial y sensor láser, se utiliza para la colecta de datos de altitud. Estos datos sirven para definir la superficie del terreno y generar Modelos Digitales de Elevación (MDE). El levantamiento LIDAR tiene ventajas sobre la captura con métodos convencionales:

requiere de mínimo control geodésico en tierra, los datos tienen una mayor densidad y una mayor precisión, ver Figura 0.7 [14].

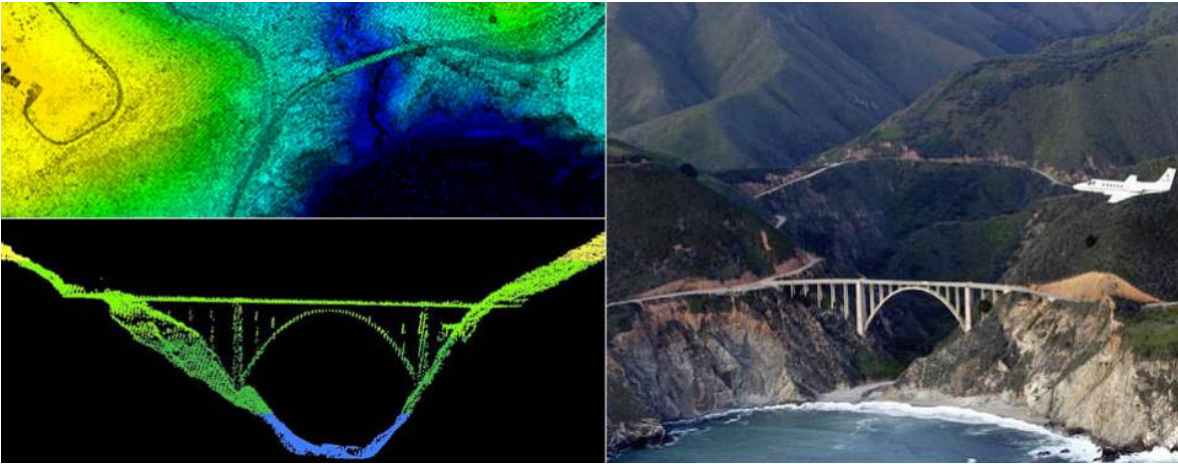


Figura 0.7: LIDAR de un puente en Big Sur California.

- Espectroscopia de Correlación de Fotones o dispersión dinámica de luz o dispersión cuasi-elástica de luz. es una técnica no invasiva y bien establecida para medir el tamaño y distribución de tamaño de moléculas y partículas típicamente en la región submicrométrica, y con la última tecnología, inferiores a 1 nm, ver Figura 0.8 [15].
- 

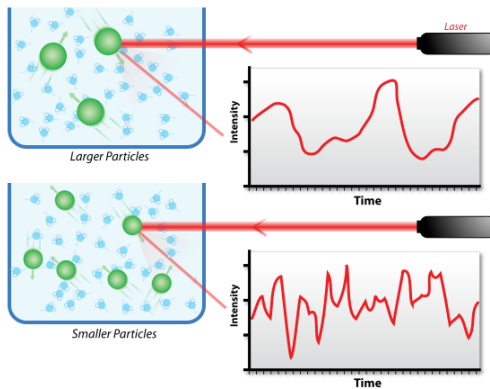


Figura 0.8: Dos ejemplos de dispersión dinámica de luz por partículas según sus tamaños relativos.

- Observación astronómica, por ejemplo, Óptica adaptativa. El cual es una técnica que permite, mediante el uso de óptica deformable, corregir gran parte de los defectos introducidos por la atmósfera terrestre en las imágenes observadas con un telescopio, ver Figura 0.9 [16].

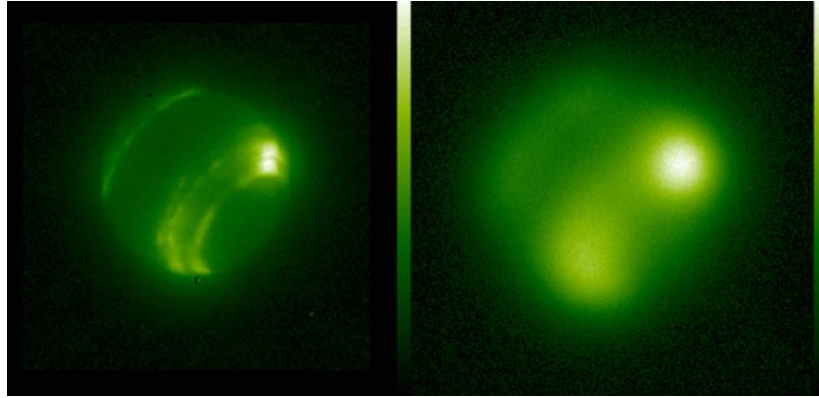


Figura 0.9: Planeta Neptuno a través del sistema de óptica adaptativa.

- Conteo de fotones. Como contador de fotones se tienen las siguientes aplicaciones: en la biomédica [17], espectroscopia de fluorescencia de una molécula [18], aplicaciones en el espacio [19] y en aplicaciones en el monitoreo de profundidad [20].

El fotodiodo de avalancha es un fotodiodo especial que trabaja en la región de ruptura en avalancha para obtener una amplificación de corriente interna. Los electrones separados se desplazan hacia la región de avalancha donde un campo electrostático elevado los acelera hasta una velocidad muy elevada. Cuando los electrones acelerados se recombinan o chocan hay una gran posibilidad de que se cree un nuevo par por ionización por impacto. El segundo par también se separa y estos nuevos electrones repiten el proceso. El proceso termina hasta que todos los portadores abandonan la región de avalancha. De esta forma puede generarse un número considerable de portadores por la absorción de un solo fotón. El fotodiodo de avalancha puede considerarse como el equivalente en estado sólido de un fototubo multiplicador. Se fabrican con rendimientos cuánticos de 100 a 1 GHz, y potencias equivalentes de ruido de  $10^{12} \text{ W}(\text{Hz}^{1/2})$ . Como su respuesta espectral es similar a la de los fotodiodos y fototransistores, son probablemente los más rápidos, los más sensibles y los de banda más ancha entre los fotodetectores disponibles. Sus desventajas; entre ellas está que la ganancia es sensible a la temperatura; microplasma o pequeñas zonas de ruptura; el ruido aumenta más rápidamente que la ganancia a la señal, y existen problemas de polarización debido a la dependencia de la ganancia.

El fotodetector comercial SPCM-AQ4C de la empresa PerkinElmer, es un módulo de conteo de un fotón de un canal en un rango de longitud de onda de 400nm a 1060nm, ver Figura 0.10. La salida de cada canal es un pulso TLL, emite un pulso mínimo de 2.5V con una carga de  $50 \Omega$ , cada pulso corresponde a la detección de un fotón. Sus características son: eficiencia de detección del fotón @ 650nm: típico 65%, diámetro de área activa:  $175 \mu\text{m}$ ., voltaje de alimentación: 5V., corriente de alimentación: 0.5 A., cuentas oscuras: 500 counts/segundo, dimensiones (ancho x alto x largo): 2.75 in x 1.32 in x 5 in y tiene un conector FC para fibra óptica [21].



Figura 0.10: Módulo SPCM-AQR.

El fotodetector comercial SPCM-AQ4C de la empresa PerkinElmer, es un módulo de conteo de un fotón de cuatro canales en un rango de longitud de onda de 400nm a 1060nm, ver Figura 0.11. Cada canal es independiente de los otros. La salida de cada canal es un pulso TTL de 4.5 V (a una carga de 50  $\Omega$ ), cada pulso corresponde a la detección de un fotón. Sus características son: eficiencia de detección del fotón @ 650nm: típico 90%, área activa: 175 $\mu$ m., voltaje de alimentación: 5V., corriente de alimentación: 0.20 A., eficiencia cuántica mayor a 60% a 650nm., 4 canales, conteo oscuro: 500 counts/segundo, dimensiones (ancho x alto x largo): 5.2 in x 1.34 in x 6 in [22].



Figura 0.11: Módulo SPCM-AQ4C.

Debido a que el fotodiodo de avalancha tiene muchas aplicaciones en la vida real, y que es uno de los dispositivos más utilizados en el mundo de la instrumentación electrónica como detector optoelectrónico, en este proyecto se diseñará un sistema de adquisición de datos para un fotodiodo de avalancha (APD) y será empleado principalmente en el experimento cuántico como contador de fotones. Además, la importancia del desarrollo del sistema radica en el alto costo del fotodetector comercial SPCM-AQ4C de la empresa Perkin Elmer, y ser la única empresa reconocida a nivel mundial en fabricar estos fotodetectores.

Por lo tanto, la importancia en el presente proyecto radica en un control de temperatura constante y evitar que se dispare el fotodiodo de avalancha con cualquier señal no deseada, además el bajo precio de las celdas peltier, lo hacen un control óptimo.

El objetivo general del presente trabajo es: desarrollar un sistema de adquisición de datos para un fotodiodo de avalancha APD con aplicaciones en experimentos de óptica cuántica.

Los objetivos particulares son:

- ✓ Estudio de la teoría de los fotodiodos de avalancha APDs.
- ✓ Diseñar la electrónica necesaria para obtener la señal del APD.
- ✓ Diseñar el firmware necesario para el sistema.
- ✓ Diseñar el software necesario para el sistema.
- ✓ Realizar pruebas del sistema diseñado en un experimento sencillo de óptica cuántica.
- ✓ Publicación de resultados.
- ✓ Escritura de la tesis.

Este trabajo está organizado como sigue:

En el primer capítulo se describe el sistema mediante un diagrama a bloques general. También se hace énfasis que bloques se van a realizar en el presente documento.

En el segundo capítulo se describe el diseño del circuito eléctrico para la captura de un solo fotón. La física del APD y su modo de operación, el diagrama del circuito eléctrico, sus componentes a utilizar y finalmente el circuito impreso.

En el tercer capítulo se describe el sistema de control de temperatura indispensable para que el fotodiodo de avalancha no se active con cualquier señal no deseada del medio ambiente a través de celdas peltier. Se muestra el circuito de potencia y control.

En el cuarto capítulo se describe el firmware y software para el control de temperatura. El diagrama de flujo para la programación del microcontrolador. La caracterización de los fotodiodos PIN 1A354, detector 818-BB-21 y el APD GSAPD9-500. La etapa de filtro se describe y los componentes que lo conforman, finalmente se muestran las respuestas.

En el quinto capítulo se describen los resultados experimentales del control de temperatura, la descripción del experimento de óptica cuántica, y las respuestas del detector APD GSAPD9-500 y el detector SPACM-AQ4AC.

En el capítulo sexto se presentan las conclusiones generales del presente trabajo.

En la sección apéndice A se muestran las ponencias en congresos, en el apéndice B se muestra el artículo, en el apéndice C se describe un manual de usuario para el correcto funcionamiento de detector desarrollado, y finalmente se muestran la bibliografía.

# Capítulo 1

## 1. Descripción del Sistema

En este capítulo se describe el diagrama general del sistema, así también el diagrama a bloques del sistema del control de temperatura utilizando un PIC 18F4550 y la descripción de cada bloque.

### 1.1 Diagrama a bloques

La figura 1.1 muestra el diagrama general del sistema.

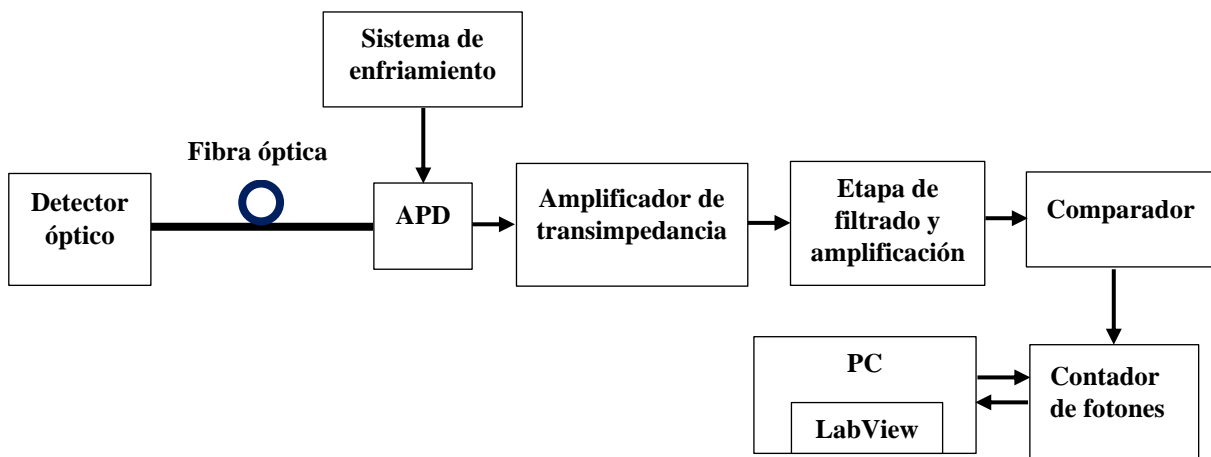


Figura 1.1: Diagrama general del sistema.

Se divide en 2 secciones, que en la primer sección se muestran los bloques que se desarrollaron en el presente trabajo, los cuales son: detector óptico, sistema de enfriamiento, amplificador de transimpedancia, etapa de filtrado y amplificación y comparador. En la segunda sección se describen los bloques que ya habían sido desarrollados: contador de fotones, y PC donde se encuentra la interfaz Labview. La figura 1.2 muestra un diagrama de bloques general pero de manera más simplificada.

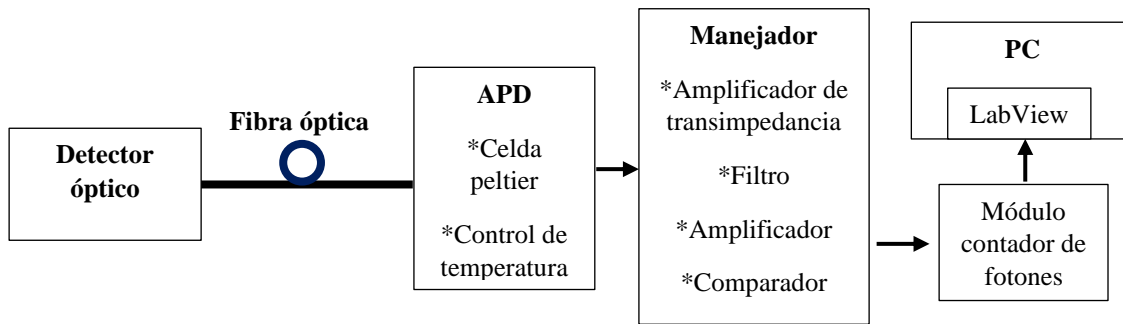


Figura 1.2: Diagrama general del sistema de manera simplificada.

### 1.1.1 Detector óptico, fibra óptica, APD y Manejador.

El bloque experimento óptico contiene a la fuente de luz. Se diseñó la fuente de luz utilizando un VCSEL HFE4381-904 de la empresa Honeywell, ver Figura 1.3 y se caracterizó con el detector PIN 1A354 y las señales obtenidas se comprobó con el detector PIN 818-BB-21. Para ellos se utilizó generador de funciones arbitrarias se configuró un pulso y se calculó la potencia óptica por medio de la reducción del periodo de la señal. Después se caracterizó el APD GSAPD9-500 a diferentes periodos de la señal. El periodo mínimo que reconocieron los detectores PIN fue de 50 ns, mientras que el APD fue de 8ns. Por otra parte, en el experimento de conteo de fotones se utiliza el láser He-Ne.



Figura 1.3: VCSEL HFE4381-904.

El medio de comunicación entre la fuente de luz y los detectores es mediante la fibra óptica. Se emplean tres fibras ópticas multimodo 3 metros de longitud; la primera con conector ST-ST y es utilizada para caracterizar el VCSEL y el detector PIN 1A354. La otra fibra óptica con conector FC-ST es utilizada para caracterizar el detector APD GSAPD9-500. La última fibra óptica con conector FC-FC es utilizada para el experimento de conteo de fotones con el láser He-Ne y el detector APD GSAPD9-500 y el detector C30902.

En el bloque APD se encuentra el fotodiodo de avalancha, la celda peltier y el control de temperatura. La celda peltier es un dispositivo termoeléctrico que se caracteriza por la aparición de una diferencia de temperatura entre las dos caras de un semiconductor cuando por él circula una corriente eléctrica.

Las celdas peltier son utilizadas para realizar un control de temperatura a 10°C y así lograr que el APD no se dispare con cualquier señal no deseada del medio ambiente, además de disminuir las cuentas oscuras que aparecen en el fotodiodo de avalancha cuando se energiza de manera inversa y para reducir el voltaje de polarización.

En el bloque manejador contiene la electrónica necesaria para adquirir la señal eléctrica generada del fotodiodo de avalancha, para filtrarla, amplificarla y compararla con un voltaje de referencia para que la señal de salida sea señales TTL. Debido a que el fotodiodo genera una corriente eléctrica a su salida, entonces es necesario conectar un amplificador que convierta la corriente eléctrica a voltaje, para eso se utiliza un amplificador de Transimpedancia, la figura 1.4 muestra su configuración.

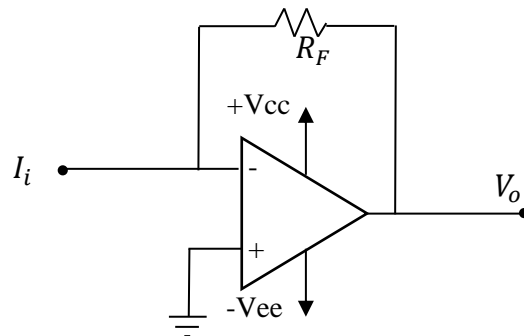


Figura 1.4: Amplificador de transimpedancia.

Un amplificador de Transimpedancia tiene una impedancia de entrada y de salida muy bajas. Su ecuación matemática que describe su funcionamiento es:

$$V_o = -R_F I_i. \quad (1.1)$$

donde  $V_o$  es el voltaje de salida,  $R_F$  es la resistencia de retroalimentación y  $I_i$  es la corriente de entrada del amplificador de Transimpedancia [23].

La respuesta del APD contiene mucho ruido debido a eso se agrega una etapa de filtro con un ancho de banda de 10MHz a 11.5MHz, el cual contiene 9 operacionales OPA659 configurado en; filtro pasa altas, filtro pasa bajas y un integrador. Finalmente es conectado un comparador a través del MAX9203, en donde se compara la señal eléctrica del APD

respecto a un voltaje de referencia, si la señal es mayor al voltaje de referencia entonces la salida es 5V, de lo contrario es 0V.

En la figura 1.5 se muestra el diagrama del control de temperatura con los cuatro lazos de control a través de un PIC 18F4550 de la empresa Microchip.

El PIC tiene un periodo de muestreo de  $0.2\mu\text{s}$ , esto lo hace factible para realizar el control de temperatura, debido a que la transmisión de calor es lenta. Un microcontrolador es un circuito integrado, en cuyo interior posee toda la arquitectura de un computador, esto es CPU, memorias RAM, EEPROM, y circuitos de entrada y salida [24].

El bloque PC contiene el software CCS Compiler, donde se escribió el código de programación en lenguaje C, y dentro del compilador existe la herramienta monitor serial, el cual muestra la temperatura en grados centígrados de cada lazo cerrado de control. Para eso el PIC 18F4550 y la PC se comunican a través de USB. Después de que es estable el control de temperatura se elimina la comunicación USB y se agrega un LED de color verde como indicador del control de temperatura.

La memoria RAM almacena datos de forma temporal durante la ejecución del programa, puede ser escrita/leída en tiempo de ejecución mediante diversas instrucciones. La memoria ROM almacena datos que se deben conservar aun en ausencia de tensión de alimentación, y puede ser escrita/leída en tiempo de ejecución a través de registros.

El bloque CPU ejecuta los cuatro lazos de control, a través de las variables Temp\_act.1, Temp\_act.2, Temp\_act.3 y Temp\_act.4 provenientes del puerto de entrada, realiza la resta con la temperatura deseada de la variable Temp\_dese y la salida es enviada a los puertos de salida multiplicada por una constante Kp.

En el bloque puertos de salida están conectados los DAC MCP4921 en comunicación SPI, esto con la finalidad de reducir el número de pines del PIC 18F4550 y de reducir el espacio de la placa electrónica desarrollada. El DAC MCP4921 convierte la señal digital en voltaje, en un rango de 0V a 5V, con una resolución de 12 bits, es decir tiene una resolución de 0 a 4095. El bus SPI se base de la comunicación a través de 4 hilos; SDO (Dato serial de salida), SDI (Dato serial de entrada), SCK (Reloj serial), SS (Selector de esclavo).

El bloque de etapa de potencia contiene el filtro pasa bajas de 10 Hz., para atenuar el ruido del sensor y del medio ambiente, a través del amplificador operacional TL081, después para controlar la corriente en la celda peltier se conecta el transistor de pequeña señal BC547 en configuración Darlington con el TIP35C, y con esto se logra aumentar la ganancia de los transistores. La conexión de los transistores es en emisor común, donde las celdas peltier van conectadas al colector del TIP35C y el emisor está conectado a GND.

En el bloque celda peltier contiene 4 celdas conectadas en paralelo, y en una esquina de la celda se encuentra el sensor de temperatura LM35 para cerrar el lazo de control. Los sensores LM35 van conectados a los convertidores analógicos a digital (ADC).

En el bloque puertos de entrada van conectados los ADC internos del PIC18F4550 y son configurador para tener una resolución de 10 bits.

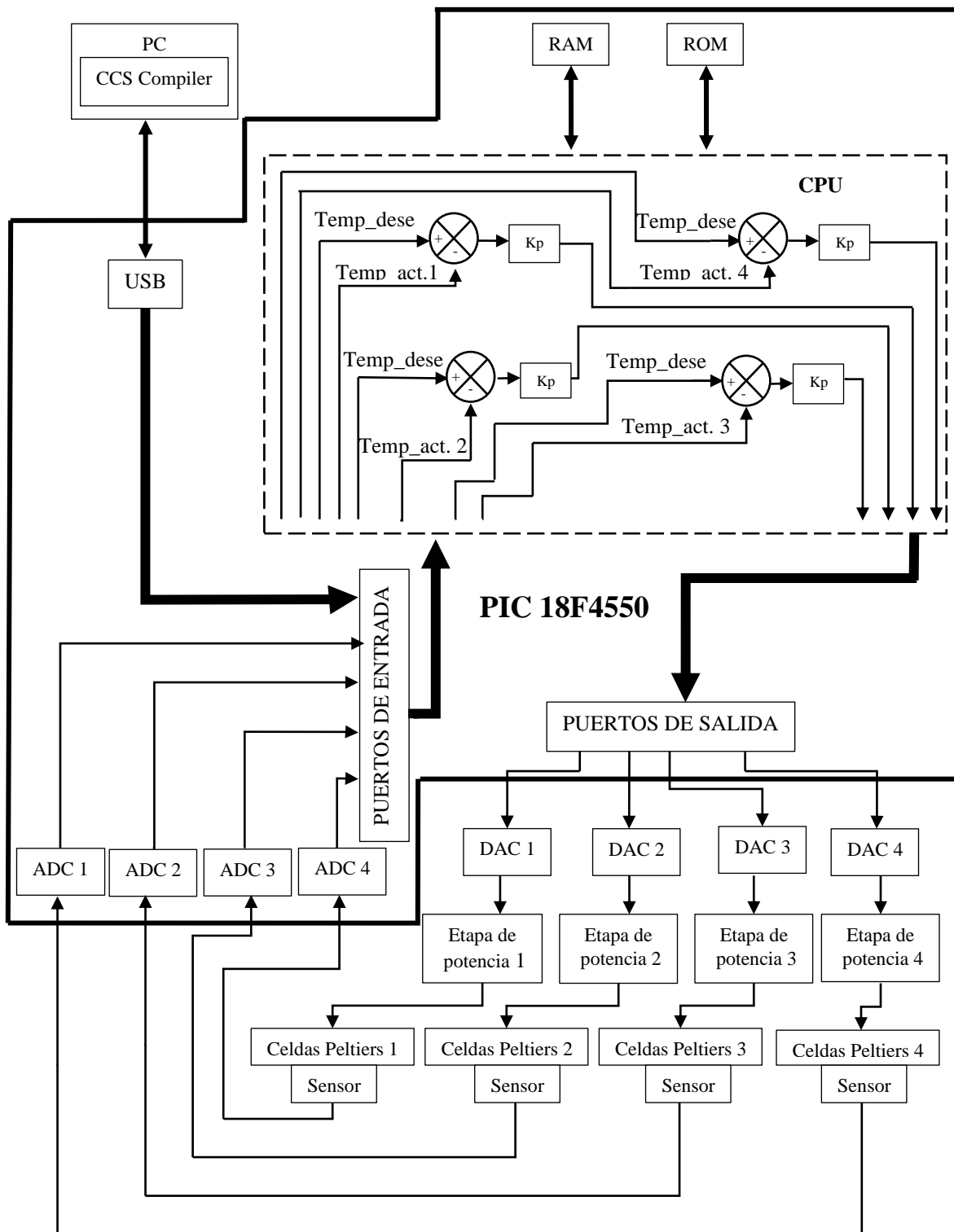


Figura 1.5: Diagrama general del control de temperatura.

### 1.1.2 Módulo contador de fotones y PC.

Los FPGA's son arreglos de compuertas programables por campo, se refiere a programables por campo debido a que un FPGA es una matriz de LABs (Logic Array Blocks, bloques de arreglos lógicos), los cuales son interconectados entre ellos para poder generar un sistema en específico.

El módulo contador de fotones es la tarjeta de desarrollo DE2, y contiene un FPGA Cyclone II 2C35, un adaptador de 9V, un cable USB, 4 pushbutton, 18 led rojos, 9 leds verdes, oscilador de 50MHz, 1 módulo LCD, 2 cabezales de expansión de 40 pines y una guía de instalación [25], ver Figura 1.6.

La tarjeta DE2 es programada para contar los pulsos generados del foto detector APD, para eso el foto detector debe generar señales TTL. Después son enviadas a la PC a través de comunicación USB donde la interfaz LabView 2009 muestra el número de cuentas con un indicador en el panel frontal.

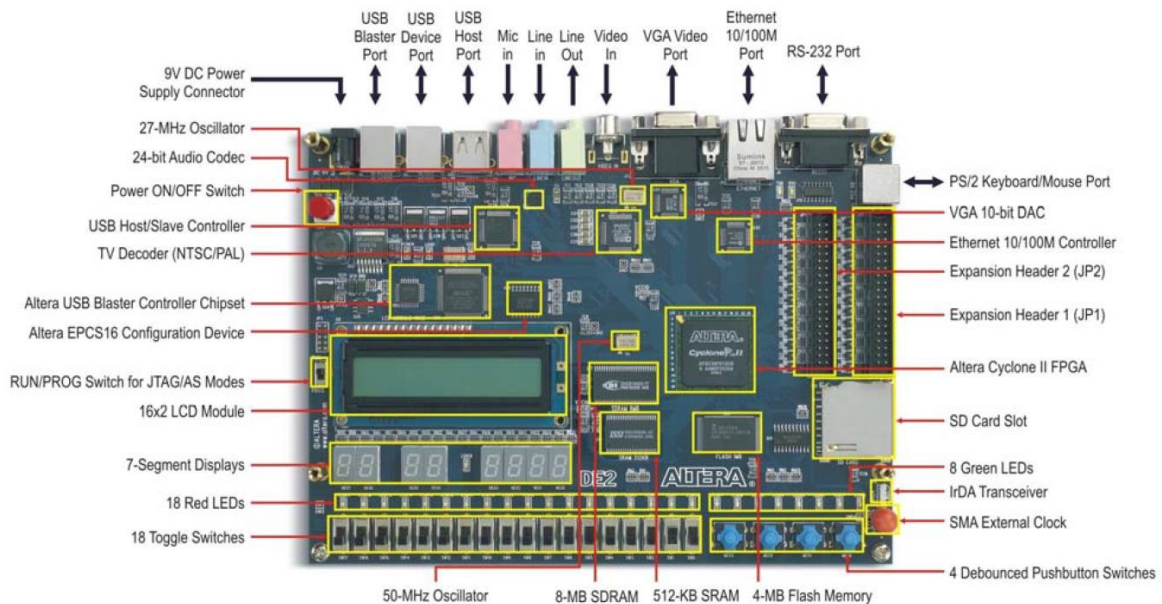


Figura 1.6: Tarjeta DE2.

Cabe recordar que este sistema ya se encuentra desarrollado en el Laboratorio de óptica avanzada en la facultad de ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México, y es utilizada para los experimentos de óptica cuántica que realizan diariamente.

# Capítulo 2

## 2. Diseño del detector

En este capítulo se diseña el detector a través del fotodiodo de avalancha. Iniciando con la física de los semiconductores, el funcionamiento del fotoresistor, el fotodiodo de unión PN, el fotodiodo PIN y fotodiodo de avalancha. Se presenta el diagrama del circuito electrónico, sus componentes que lo conforman y el circuito implementado en una tarjeta perforada.

### 2.1 Fotodetectores semiconductores

Cuando la luz incide en un semiconductor, este puede mover un electrón en la banda de valencia a la banda de conducción, este proceso es llamado *absorción de un fotón*. Para llevar el electrón de la banda de valencia ocupada a la banda de conducción vacía, la energía del fotón debe ser al menos igual a la banda prohibida (bandgap) del semiconductor.

La absorción del fotón es fuerte cuando el fotón causa el movimiento de un electrón de la banda de valencia a la banda de conducción. Entonces el momentum del fotón es extremadamente pequeño en la escala del momentum del electrón, la conservación del momentum requiere que la transición electrón-hueco sea *vertical en el espacio k*, como se muestra en la figura 2.1.

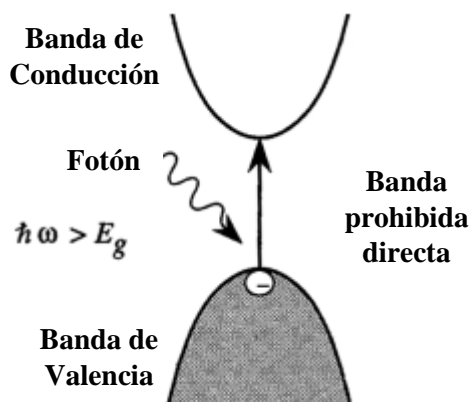


Figura 2.1: Absorción directo en un semiconductor.[26].

Cuando un semiconductor no tiene un bandgap directa, las transiciones verticales  $k$  no son posibles y los electrones pueden absorber un fotón si un fonón (o vibraciones lattice) participa en el proceso, como se muestra en la figura 2.2.

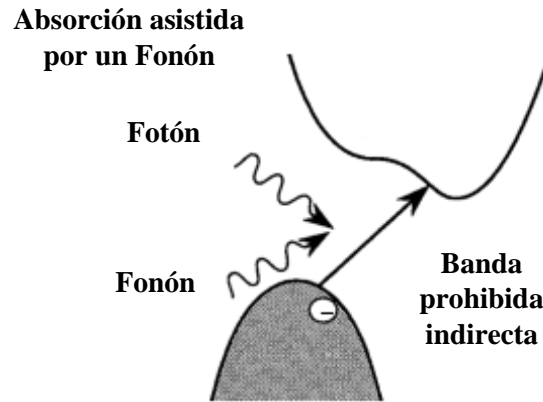


Figura 2.2: Absorción indirecta en semiconductores.

El coeficiente de absorción es cero sobre una longitud de onda de corte dada por  $\lambda_c$ , donde  $c$  es la velocidad de la luz y  $E_g$  es la *banda prohibida* del semiconductor [26]

$$\lambda_c = \frac{hc}{E_g} = \frac{1.24eV}{E_g} \mu m, \quad (2.1)$$

La *responsividad* de un detector tiene fuerte dependencia sobre la longitud de onda de los fotones incidentes. Si la longitud de onda está por encima de la longitud de onda de corte, los fotones no son absorbidos y no habría fotocorriente. Cuando la longitud de onda es menor que  $\lambda_c$ , la energía del fotón debería de ser mayor a la energía de la bandgap y la diferencia se liberaría como calor. Por lo tanto, la energía del fotón incrementa sobre la bandgap, esto produce el mismo número de electrones-huecos, después la responsividad empieza a decrementar, como se muestra en la figura 2.3 [26].

Otra cualidad del detector es la *eficiencia cuántica* que esencialmente cuenta cuántos portadores son recogidos por cada fotón incidente en el detector, esta se define como:

$$\eta = \frac{n_e}{n_p}, \quad (2.2)$$

donde  $n_e$  es la velocidad de generación de fotoelectrones y  $n_p$  es la velocidad de fotones incidentes en el detector. La eficiencia cuántica igual a 1 significa que un fotón incidente en el detector producirá un fotoelectrón. En la práctica valores entre 0.05 and 0.3 son comunes.

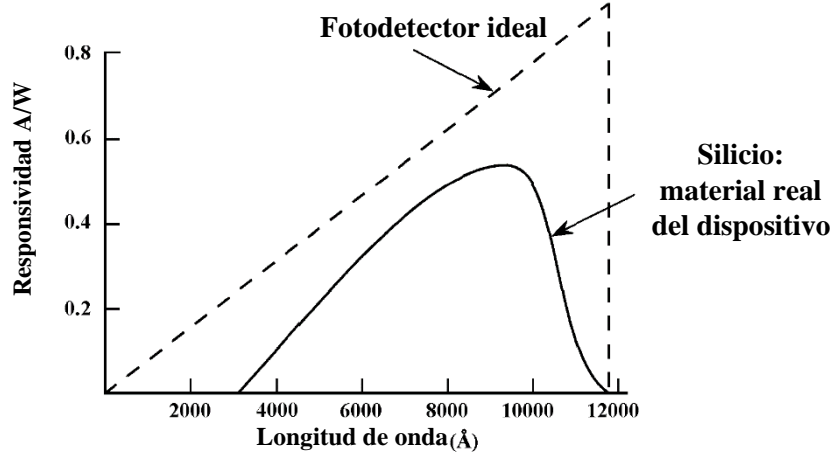


Figura 2.3: Curva de responsividad de un detector ideal.

La magnitud de la señal eléctrica generada en el fotodetector como respuesta a la potencia óptica de la luz incidente, puede ser expresado como una función de la *sensibilidad* ( $S$ ), y se define como:

$$S = \frac{i_p}{\Phi}, \quad (2.3)$$

donde  $i_p$  es la fotocorriente generada en el detector, y  $\Phi$  es la potencia óptica de la luz incidente en el detector.

La corriente generada por los fotones puede ser calculada considerando que sucede cuando un haz de luz con longitud de onda  $\lambda$  incide en un detector. La velocidad de fotones incidentes ( $n_p$ ) es calculada como:

$$n_p = \frac{\Phi}{E_{\text{Photon}}} = \frac{\Phi \lambda}{hc} \quad (2.4)$$

donde  $\Phi$  es la potencia óptica de la luz incidente en el detector,  $\lambda$  es la longitud de onda,  $h$  es la constante de Planck y  $c$  es la velocidad de la luz.

La velocidad de producción de fotoelectrones ( $n_e$ ) es obtenida de la Ec. 2.2.

$$n_e = \eta \times n_p = \frac{\eta \Phi \lambda}{hc}, \quad (2.5)$$

donde  $\eta$  es la eficiencia cuántica y  $n_p$  es la velocidad de fotones incidentes.

Podemos calcular la fotocorriente generada en el fotodetector multiplicando la velocidad de producción de fotoelectrones por la carga del electrón, esto es;

$$i_p = n_e e = \frac{\eta \Phi \lambda}{hc} e, \quad (2.6)$$

donde  $e$  es la carga del electrón.

Vemos que de la Ec. 2.6 la fotocorriente es directamente proporcional a la potencia óptica de la luz incidente en el fotodetector. Ahora de la Ec. 2.3, obtenemos la sensibilidad como:

$$S = \frac{i_p}{\Phi} = \frac{\eta \lambda e}{hc}. \quad (2.7)$$

## 2.2 Detector fotoconductorivo

El detector fotoconductorivo es el más simple de los detectores y consiste en una simple región de semiconductor como el sulfuro de cadmio CdS o CdSe el selenio de cadmio sobre el cual la polarización es aplicada como se muestra en la figura 2.4.

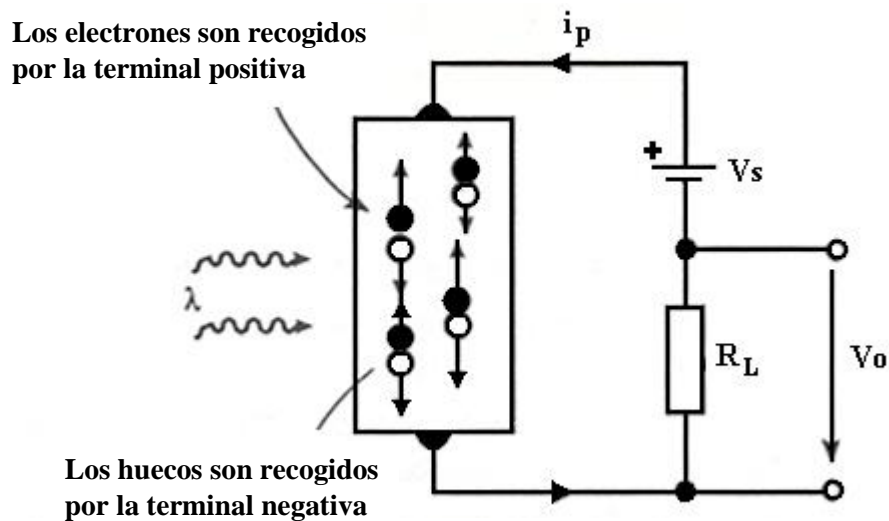


Figura 2.4: Operación del detector fotoconductorivo.

Cuando los fotones tienen más energía que la energía que existe en la banda prohibida del material, entonces los fotones crean pares electrón-hueco, ver Figura 2.5, y son recogidos por el campo eléctrico.

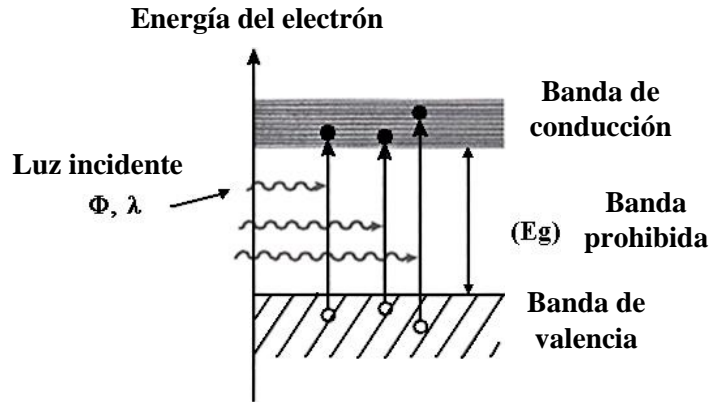


Figura 2.5: Producción electrón-hueco.

El incremento del número de electrones en la banda de conducción y sus correspondientes huecos en la banda de valencia produce un incremento en la conductividad y además un decremento en la resistencia del material. En general, la recolección de electrones y huecos se realiza aplicando un voltaje en serie con una resistencia de carga, como se muestra en la figura 2.6.

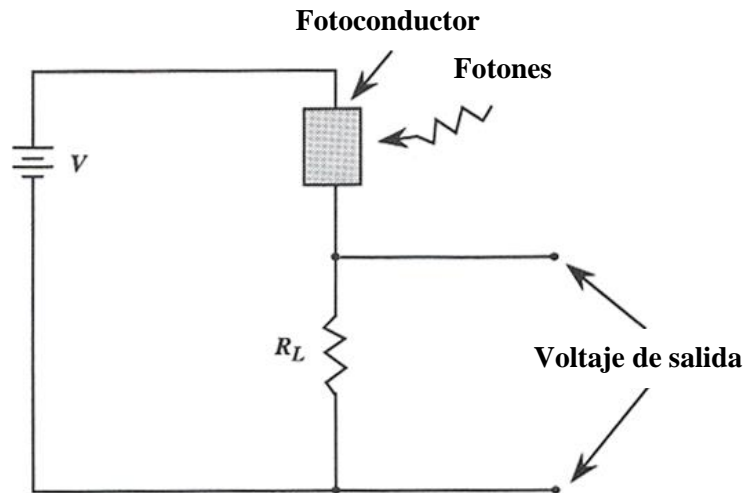


Figura 2.6: Circuito típico para un detector fotoconductor. La luz causa un cambio en la resistencia del fotoconductor.

La variación de corriente producida por la luz incidente en el semiconductor se puede medir en la caída de voltaje de la resistencia de carga. Estos detectores fotoconductores sufren de un gran ruido de corriente oscura en el detector. Por el contrario, un diodo p-n y p-i-n polarizado inversamente tiene una corriente oscura muy pequeña, lo que permite una gran relación señal / ruido.

La banda prohibida del material da una longitud de onda de corte dada por la Ec. 2.1. Por encima de esta longitud de onda de corte, ningún de los electrones puede pasar a la banda de valencia.

### 2.3 Fotodiodo de unión PN

El fotodiodo básico no es más que un diodo p-n cuya unión está expuesta a luz incidente. En condiciones de equilibrio, es decir, sin potencial o iluminación aplicados, a través de la zona de deplexión sobre cada lado de la unión p-n existe una barrera de energía igual a  $eV_0$ , ver Figura 2.7.

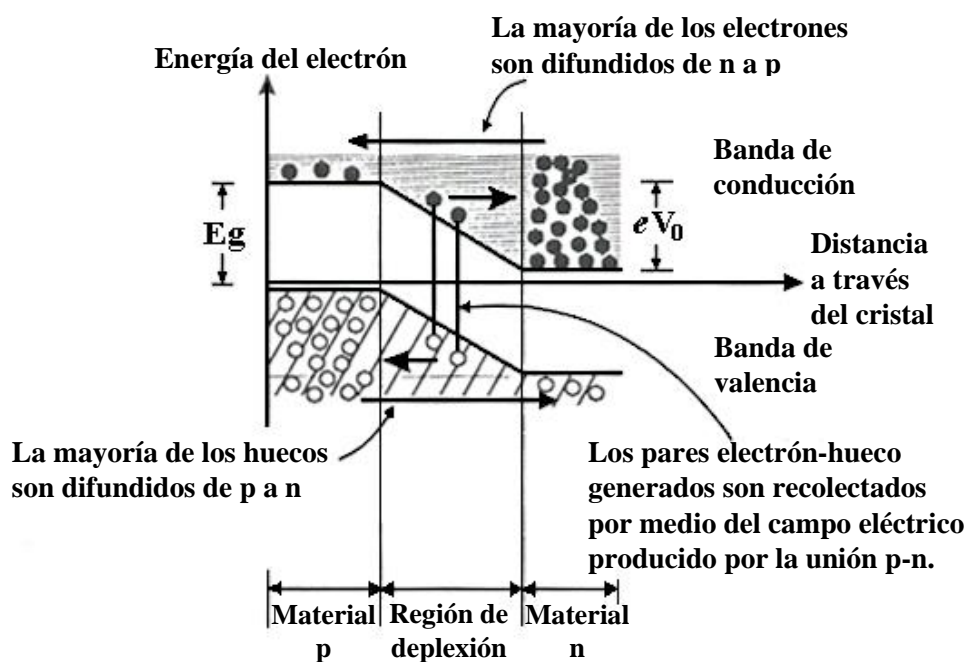


Figura 2.7: Fotodiodo sin potencial externo y sin iluminación.

Los portadores minoritarios son generados térmicamente y “caen sobre” la barrera potencial en lados opuestos de la unión. La corriente que fluye de p a n producida por los portadores mayoritarios se cancela por la corriente de portadores minoritarios que fluye de n a p. El resultado es que a través del diodo hay una corriente neta igual a cero.

Bajo iluminación, el equilibrio es perturbado y se crearán pares de electrón-hueco en la región de deplexión y serían barridos por el campo eléctrico existente en la región. Los electrones son atraídos a la banda de conducción del material n, y los huecos son atraídos a la banda de valencia del material p. En este momento son posibles dos modos de operación, si el diodo no tiene un voltaje externo aplicado entonces el fotodiodo es usado en el *modo fotovoltaico*

y si el diodo es polarizado inversamente entonces el fotodiodo es usado en el *modo fotoconductor*.

En el modo fotovoltaico, el fotodiodo puede funcionar en circuito abierto. Los pares electrón-hueco generados se separan y se desplazan hacia la dirección opuesta de la región de deplexión. Dado que los electrones son atraídos hacia el lado n y los huecos hacia el lado p, una fotocorriente inversa  $i_p$  es inducido y fluye a través del diodo del lado n al lado p. Este efecto produce que la barrera de energía es reducida con respecto a su valor de equilibrio, ver Figura 2.8.

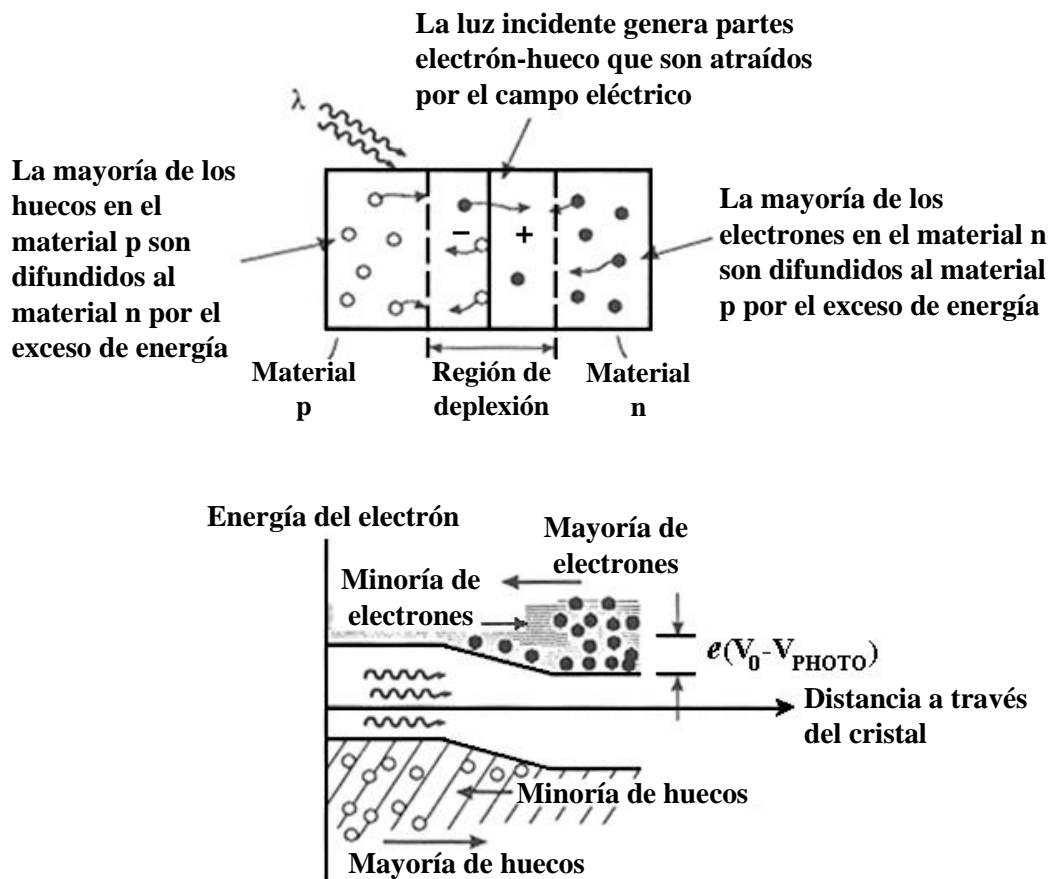


Figura 2.8: Unión p-n de un fotodiodo bajo iluminación operado en el modo fotovoltaico.

Ahora, más portadores mayoritarios son capaces de cruzar la unión, es decir, que los huecos cruzan de p a n y los electrones cruzan de n a p, generando una corriente directa  $i_F$  a través del diodo.

Dado que el fotodiodo está en circuito abierto, la fotocorriente inversa debe equilibrar la corriente directa obteniendo una corriente neta  $i_T$  igual a cero. La variación sobre la barrera de energía puede ser vista como un voltaje directo a través de los extremos del fotodiodo.

Esta señal es la que se mide y de este efecto es tomado el nombre de modo de operación fotovoltaico. Tenemos que:

$$i_T = i_F - i_P, \quad (2.8)$$

donde  $i_T$  es la corriente neta fluyendo a través del fotodiodo,  $i_F$  es la corriente directa producida por la polarización directa inducida y  $i_P$  es la fotocorriente inversa.

La corriente directa  $i_F$  puede ser expresado por la ecuación del diodo como:

$$i_F = i_0 \left[ e^{\left( \frac{eV_{PHOTO}}{kT} \right)} - 1 \right], \quad (2.9)$$

donde  $V_{PHOTO}$  es el voltaje directo inducido,  $k$  es la constante de Boltzman,  $e$  es la carga del electrón y  $T$  es la temperatura absoluta.

Ahora combinando la Ec. 2.9 y Ec. 2.10, tenemos que:

$$i_T = i_0 \left[ e^{\left( \frac{eV_{PHOTO}}{kT} \right)} - 1 \right] - i_P = 0. \quad (2.10)$$

Si el termino exponencial es mucho mayor a la unidad, entonces, se tiene:

$$i_P \cong i_0 e^{\left( \frac{eV_{PHOTO}}{kT} \right)}. \quad (2.11)$$

Finalmente obtenemos:

$$V_{PHOTO} = \left( \frac{kT}{e} \right) \ln \left( \frac{\eta \Phi \lambda e}{i_0 h c} \right). \quad (2.12)$$

Esta es la principal desventaja del fotodiodo en circuito abierto y operado en modo fotovoltaico, la relación entre el fotovoltaje y la potencia óptica de la luz incidente en el detector es no lineal, realmente es una respuesta logarítmica. La principal ventaja de este modo de operación es que el ruido es muy bajo debido a la ausencia de la corriente oscura o corriente de fuga.

Un circuito común para usar un fotodiodo en el modo fotovoltaico se muestra en la figura 2.9.

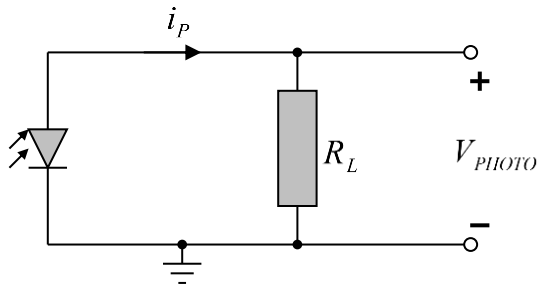


Figura 2.9: Circuito común para usar un fotodiodo en modo fotovoltaico.

De la figura 2.9 podemos ver que, si uno desea usar el fotodiodo en circuito abierto en modo fotovoltaico entonces  $R_L$  necesita ser muy grande; en general este resistor deber ser mayor a la resistencia dinámica del fotodiodo ( $R_D$ ). La resistencia dinámica puede ser entre  $500k\Omega$  y  $100M\Omega$  dependiendo de las características del diodo, entonces el valor del resistor podría ser de  $10G\Omega$  es decir;  $R_L \gg R_D$ .

La respuesta voltaje-corriente de un fotodiodo bajo iluminación y operado en el modo fotovoltaico se muestra en la figura 2.10.

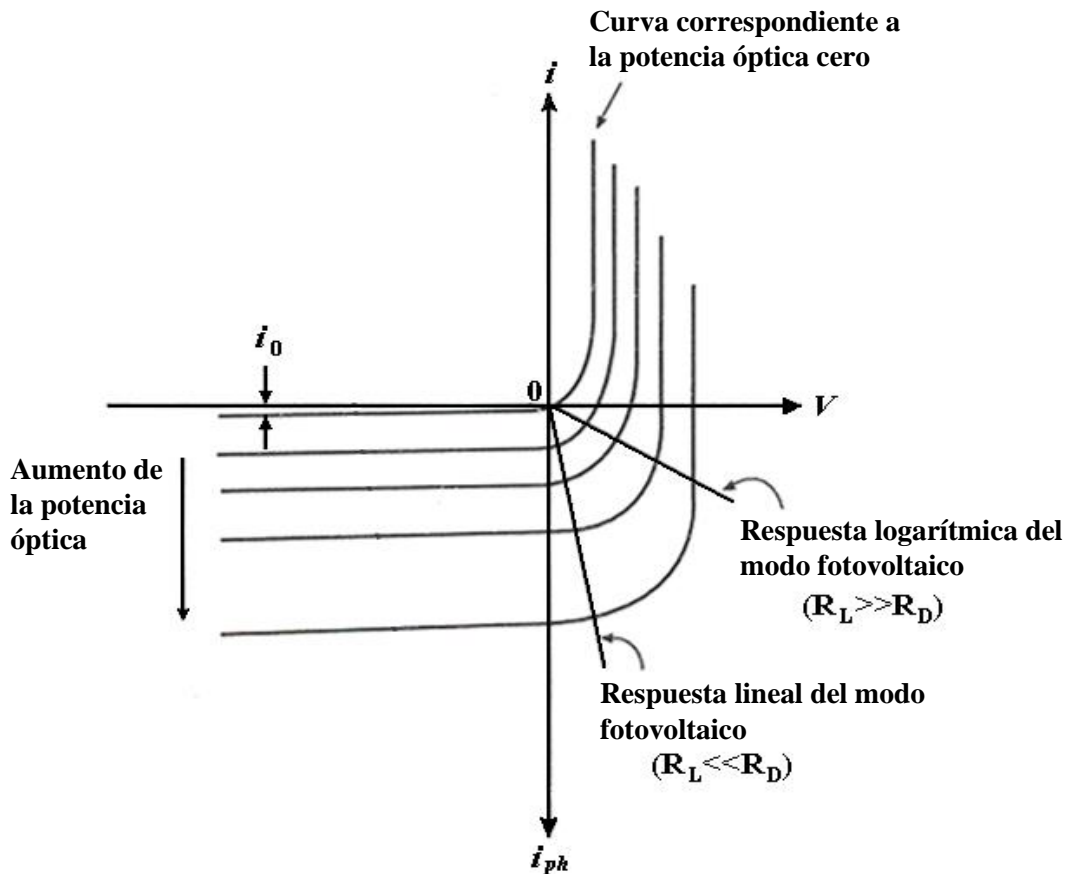


Figura 2.10: Respuesta voltaje-corriente de un fotodiodo bajo iluminación, el fotodiodo es operado en el modo fotovoltaico.

En el modo de operación fotoconductor, el fotodiodo es polarizado inversamente y bajo esta condición los electrones en el material n son tomados de la región de deplexión y los huecos son atrapados por el material p. Esto deja más iones fijos en ambos lados en la región de deplexión, el cual produce un ensanchamiento. La barrera de energía se incrementa en función del voltaje inverso aplicado en el fotodiodo, ver Figura 2.11. El flujo de portadores de cualquier tipo es detenido y la única corriente que puede fluir en el fotodiodo es la corriente inversa  $i_0$ , esta corriente es la corriente oscura del fotodiodo.

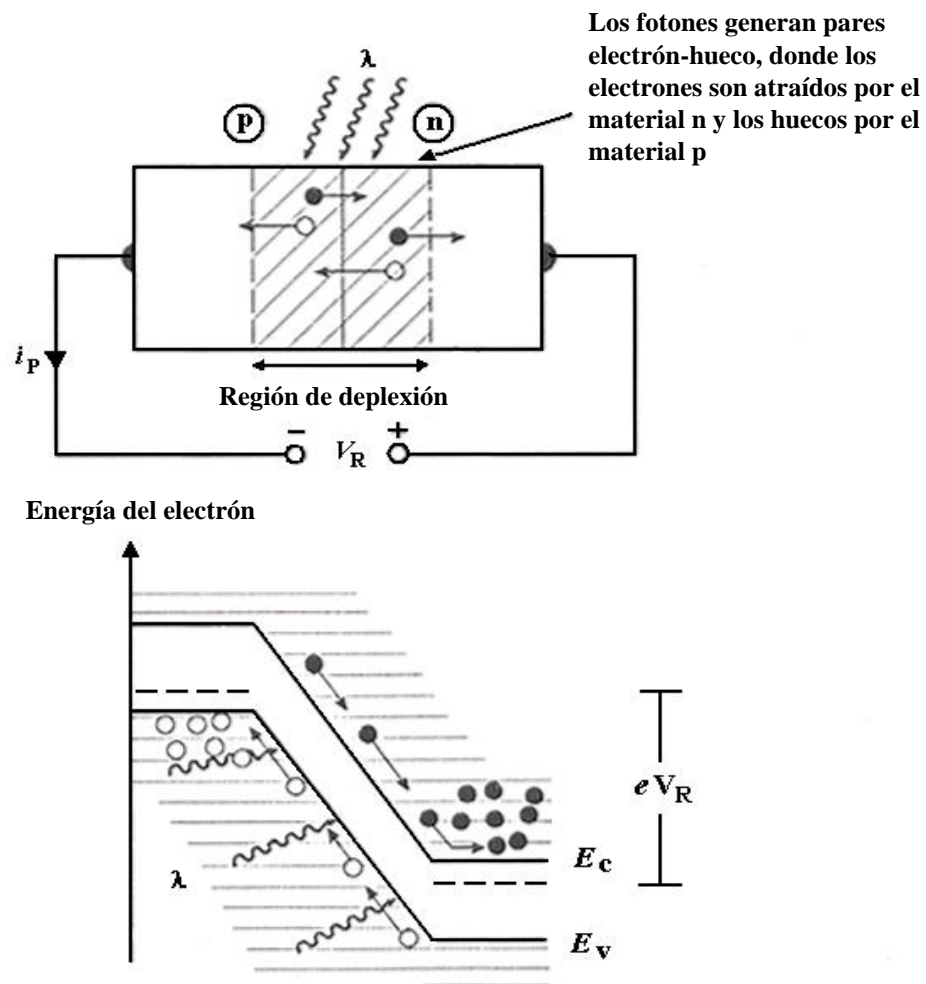


Figura 2.11: Fotodiodo bajo iluminación operado en el modo fotoconductor.

Bajo iluminación, los pares electrón-hueco generados son recogidos por el campo eléctrico a través de la unión y producirán una fotocorriente inversa ( $i_p$ ) fluyendo en la misma dirección de la corriente oscura.

Ahora podemos ver el beneficio más importante del modo fotoconductor, la señal medida como una función de la potencia óptica incidente en el fotodiodo es la fotocorriente instantánea del voltaje a través del fotodiodo. Por consiguiente, la señal de salida será una

función lineal de la potencia óptica si la fotocorriente es mucho más grande que la corriente oscura, se tiene que:

$$i_{OUT} = i_p + i_0 = \frac{\eta\Phi\lambda e}{hc} + i_0 \cong \frac{\eta\Phi\lambda e}{hc}, \quad (2.13)$$

La principal desventaja de este modo de operación es el incremento de ruido producido por la corriente oscura.

Un circuito común para usar un fotodiodo en el modo fotoconductor se muestra en la figura 2.12.

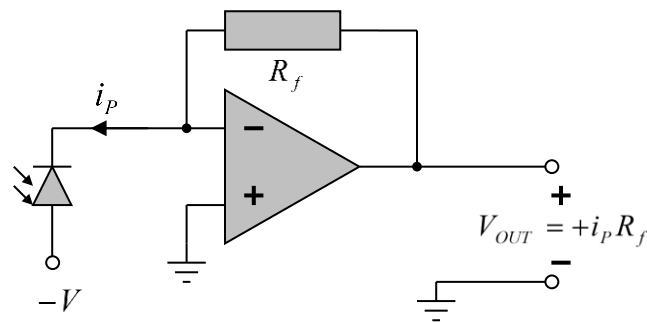


Figura 2.12: Circuito común para usar un fotodiodo en modo fotoconductor.

El voltaje de salida es:

$$V_{OUT} = i_p R_f. \quad (2.14)$$

donde  $i_p$  es la fotocorriente del fotodiodo,  $R_f$  es la resistencia de retroalimentación. Debido que la fotocorriente es negativa, y el amplificador está en modo inversor, por lo tanto, el voltaje de salida es positivo.

La respuesta voltaje-corriente del fotodiodo bajo iluminación se muestra en la Figura 18. Sin iluminación, la curva voltaje-corriente es como la curva característica de un diodo, si incrementamos el voltaje directo la corriente directa aumenta como se muestra, bajo el voltaje inverso solo la corriente oscura ( $i_0$ ) fluye en el fotodiodo. Si incrementamos la potencia óptica, la corriente inversa incrementa hasta  $i_p$  y toda la curva se desplaza hacia abajo en esta cantidad. Para un voltaje inverso dado, por ejemplo  $V_R$ , es posible que el incremento sea una función lineal de la potencia óptica, ver Figura 2.13.

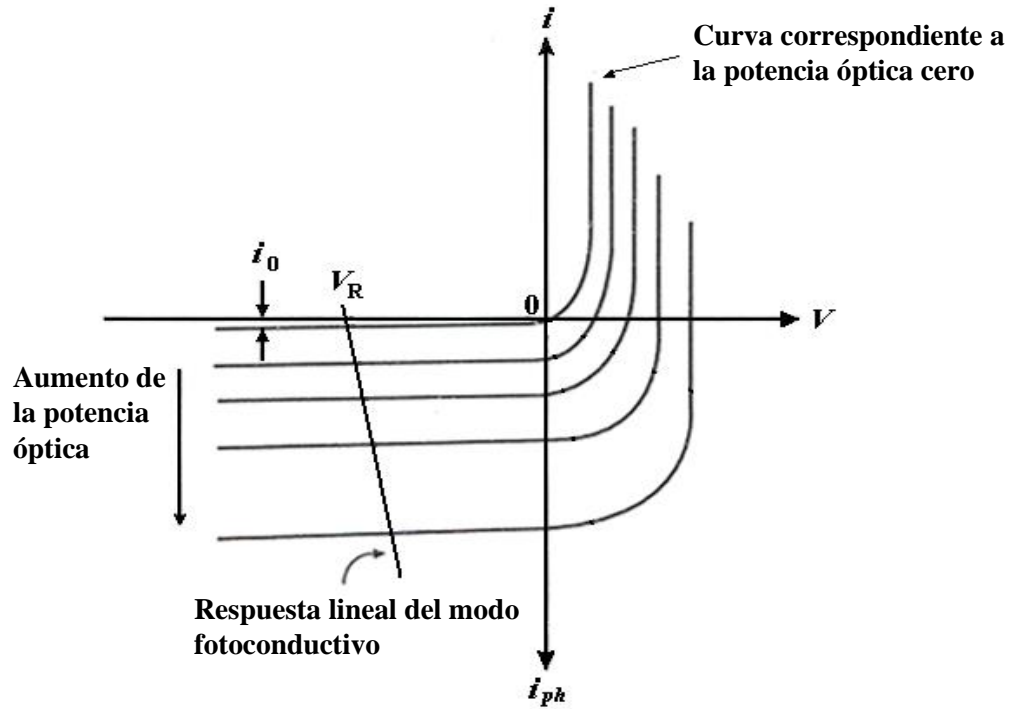


Figura 2.13: Respuesta voltaje-corriente de un fotodiodo bajo iluminación, donde el fotodiodo es operado en el modo fotoconductorio.

En conclusión, si uno desea detectar una potencia óptica lineal significativa y con una respuesta muy rápida entonces necesitamos usar el fotodiodo en el modo fotoconductorio.

## 2.4 Fotodiodo PIN

Un fotodiodo PIN toma el nombre de su estructura, el cual se muestra en la figura 2.14. Podemos ver de la figura 2.14 que hay una gran diferencia entre un fotodiodo PIN y un simple fotodiodo, y es que el fotodiodo PIN incluye un semiconductor intrínseco entre los materiales  $p^+$  y  $n^+$ .

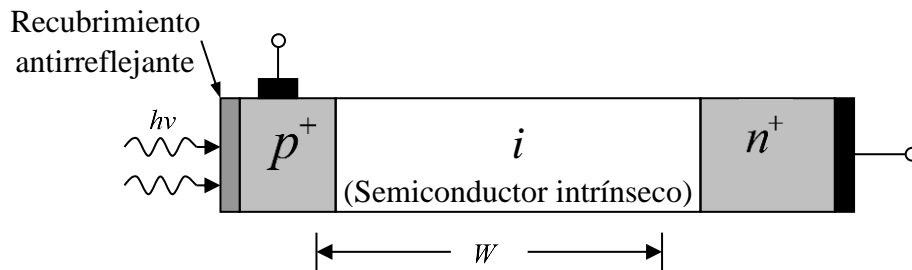


Figura 2.14: Estructura de un fotodiodo PIN.

El cual produce que la región de deplexión ( $W$ ) sea más grande que un simple fotodiodo, esto genera que la capacitancia dinámica del fotodiodo PIN decremente para obtener una respuesta rápida, sin embargo, si  $W$  desea prolongar el tiempo de transito de electrones que controla, la velocidad del dispositivo se vuelve demasiado grande, reduciendo la velocidad del dispositivo. También el fotodiodo PIN incrementa la eficiencia cuántica por medio de un recubrimiento antirreflejante. El fotodiodo PIN puede ser operado en circuito abierto y en el modo fotovoltaico produce la misma respuesta de fotovoltaaje logarítmico ( $V_{PHOTO}$ ) que un simple fotodiodo, dada por la ecuación (2.12)

Un fotodiodo PIN, también, puede ser operado en el modo fotoconductor. La luz incidente en el detector produce pares electrón-hueco, el cual son barridos por el campo eléctrico generado en la región de deplexión por la polarización inversa, los electrones son atraídos por el material  $n$  y los huecos son atraídos por el material  $p$ , ver Figura 2.15 [26].

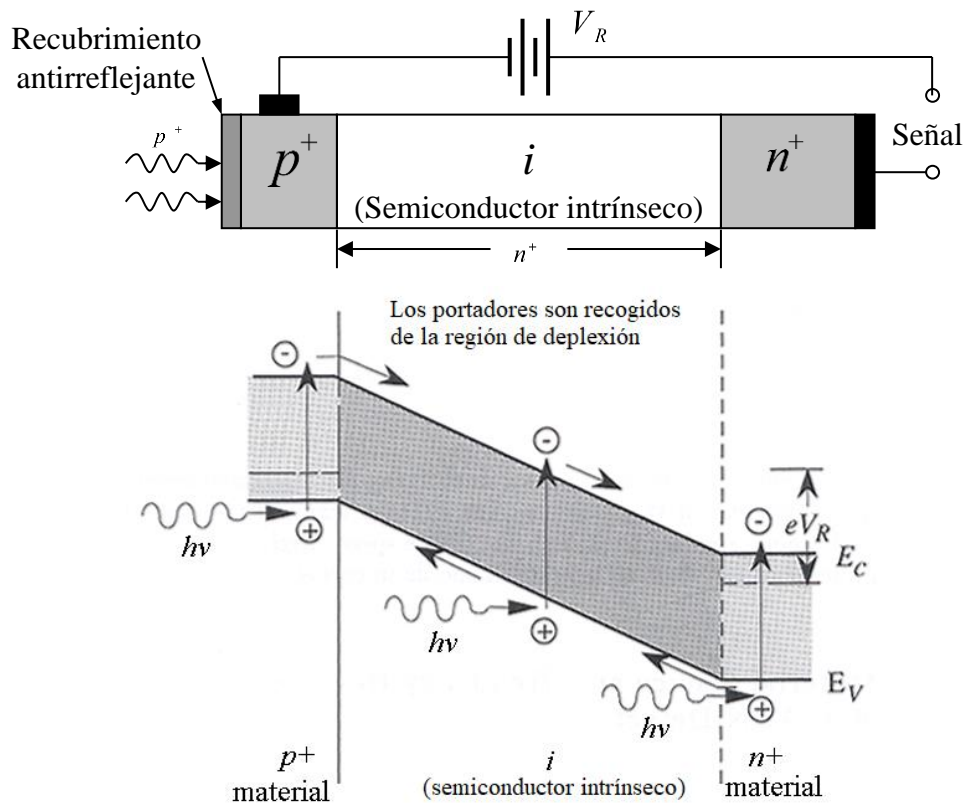


Figura 2.15: Fotodiodo PIN bajo iluminación y operado en el modo fotovoltaico.

La fotocorriente generada es una función lineal de la potencia óptica de la luz incidente en el detector, ver Ec.2.13.

## 2.5 Física del APD y modos de operación

La figura 2.16 muestra las distintas sub-zonas con dopajes diferentes. La zona de absorción es donde se genera el par electrón-hueco primario, cuyo campo eléctrico es moderado. La zona de multiplicación es donde el campo eléctrico es mucho más intenso, por lo tanto, los electrones sufren una aceleración y se generan los pares secundarios, llamados avalancha.

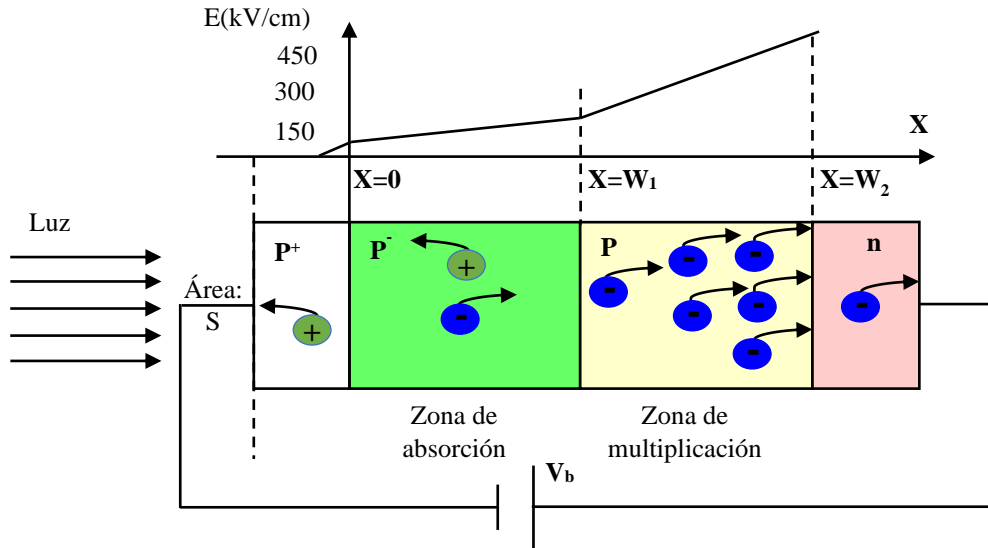


Figura 2.16: Zonas del Fotodiodo de Avalancha APD.

Cada electrón generado es acelerado por el campo presente de forma que su energía cinética es muy elevada. Ese electrón colisiona con otro electrón de la banda de valencia y le cede parte de su energía provocando que ese electrón que estaba en la banda de valencia pase a la banda de conducción, generando el correspondiente par electrón-hueco (e-h). A su vez esos dos pares electrón-hueco pueden ser acelerados colisionando con otros dos, y así sucesivamente. Se tiene ahora una situación en la que cada electrón primario generado por un fotón genera ahora en promedio  $\bar{M}$  pares e-h por efecto de la multiplicación. La figura 2.17 muestra el efecto multiplicación [26].

El factor de Multiplicación de Avalancha ( $M$ ), es el factor de amplificación de corriente fotodetectada en APDs debido al proceso interno de avalancha, sus valores oscilan entre 20 y 100, de esta forma la fotocorriente generada es;

$$i_{fot} = M \mathfrak{R} \Phi = M \left( \frac{qn}{hv} \right) P. \quad (2.15)$$

donde  $i_{fot}$  es la fotocorriente generada,  $\mathfrak{R}$  es la responsividad,  $\Phi$  es la potencia para la detección de los fotones generados y  $M$  es la ganancia del APD.

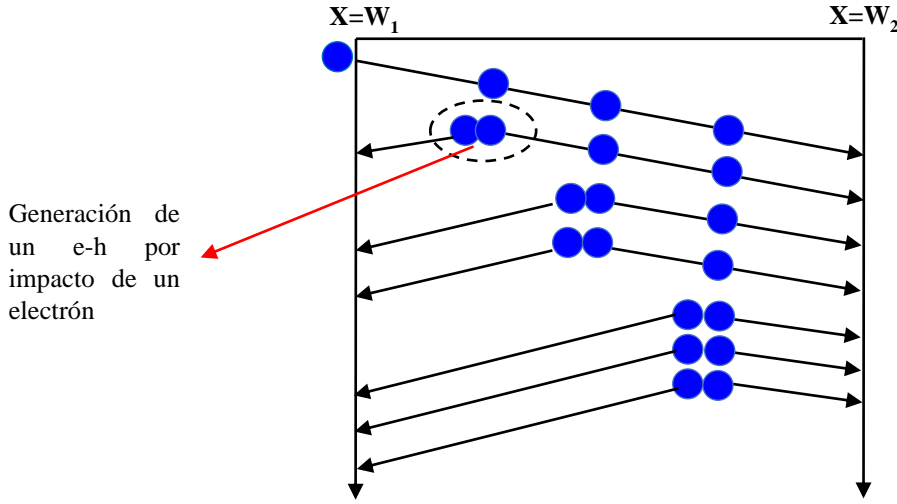


Figura 2.17: Efecto Avalancha.

Uno de los parámetros a considerar cuando se selecciona un APD es su ruido espectral de detección. El ruido total de un APD sin iluminación es [27]:

$$i_n = \sqrt{2q(I_{DS} + I_{DB}M^2F)B}, \quad (2.16)$$

donde  $F$  es el factor de exceso de ruido,  $q$  es la carga eléctrica del electrón,  $I_{DS}$  es la corriente de fuga superficial,  $I_{DB}$  es la corriente de fuga detectada, y  $M$  es la ganancia.

El ruido total de un APD bajo iluminación es:

$$i_n = \sqrt{2q \left[ I_{DS} + (I_{DB}M^2 + \mathfrak{R}M^2P)F \right] B}, \quad (2.17)$$

donde  $\mathfrak{R}$  es la responsividad,  $P$  es la potencia incidente y  $B$  es el ancho de banda del sistema [26]. El factor de exceso de ruido denotado como  $F$ , está dado por:

$$F = k_{eff}M + (1 - k_{eff}) \left( 2 - \frac{1}{M} \right), \quad (2.18)$$

donde  $M$  es la ganancia,  $k_{eff}$  es el factor efectivo  $k$  que puede ser medido experimentalmente por la fórmula de McIntyre dependiendo del factor exceso de ruido en la ganancia [27]. La tabla 2.1 proporciona los valores típicos de  $k$  y  $F$  para los APDs de silicio, germanio, InGaAs.

Tipo de detector	Radio de Ionización ( $k$ )	Ganancias Típicas ( $M$ )	Factor de Exceso de ruido ( $F$ )
Silicio (estructura “reach-structure”)	0.02	150	4.9
Silicio Epitaxial	0.06	100	7.9
Silicio (estructura SLiK™ k mínimo)	0.002	500	3.0
Germanio	0.9	10	9.2
InGaAs	0.45	10	5.5

Tabla 2.1: Valores típicos de los detectores.

### 2.5.1 Modo Geiger

Se utiliza el modo de operación del fotodiodo denominando Geiger. Este es un modo de operación, en el cual el voltaje de polarización del fotodiodo de avalancha es mayor al voltaje de ruptura. Esto resulta un campo eléctrico muy grande en la capa de depleción del diodo y algún portador presente en la capa de depleción sería multiplicado infinitamente por el proceso de multiplicación avalancha [28].

Cuando el fotodiodo se energiza por encima del voltaje de ruptura, normalmente el fotodiodo conduce una corriente grande. Sin embargo, si la corriente es limitada a un valor particular (por ejemplo, 50uA), la corriente es inestable y puede apagarse por sí mismo. La explicación de este comportamiento es que el número de portadores en la región de avalancha en algún tiempo es pequeño y fluctúa intensamente. Si el número de portadores tiende a cero, no existe corriente. Posteriormente permanece apagado hasta que el pulso de avalancha sea activado por un portador fotogenerado o por una carga.

En el modo Geiger, un simple fotoelectrón (electrón generado térmicamente) puede activar un pulso avalancha que descarga el fotodiodo de su voltaje inverso a un voltaje ligeramente menor a  $V_{BR}$ . La probabilidad de que ocurra la avalancha se muestra en la figura 2.18, el cual incrementa con el voltaje inverso  $V_R$ .

La refrigeración es importante, porque permite tener pocas cuentas oscuras, ver Figura 2.19. Esto lo hace factible para operaciones de bajo ruido por debajo de  $V_{BR}$  o para el conteo de fotones por encima de  $V_{BR}$  en el modo geiger.

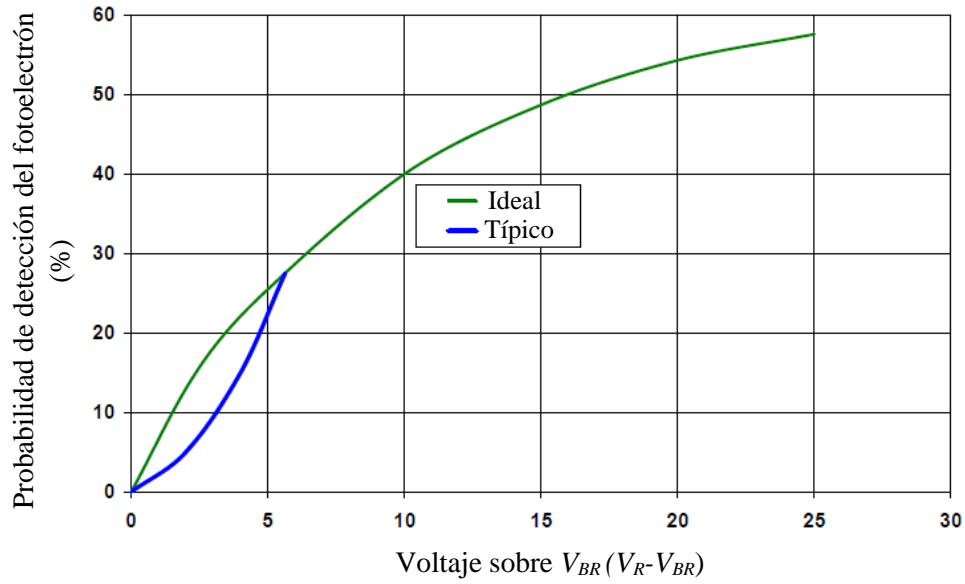


Figura 2.18: Detección del fotón en modo Geiger, curva de probabilidad vs voltaje sobre  $V_{BR}$  ( $V_R > V_{BR}$ ) a 22°C.

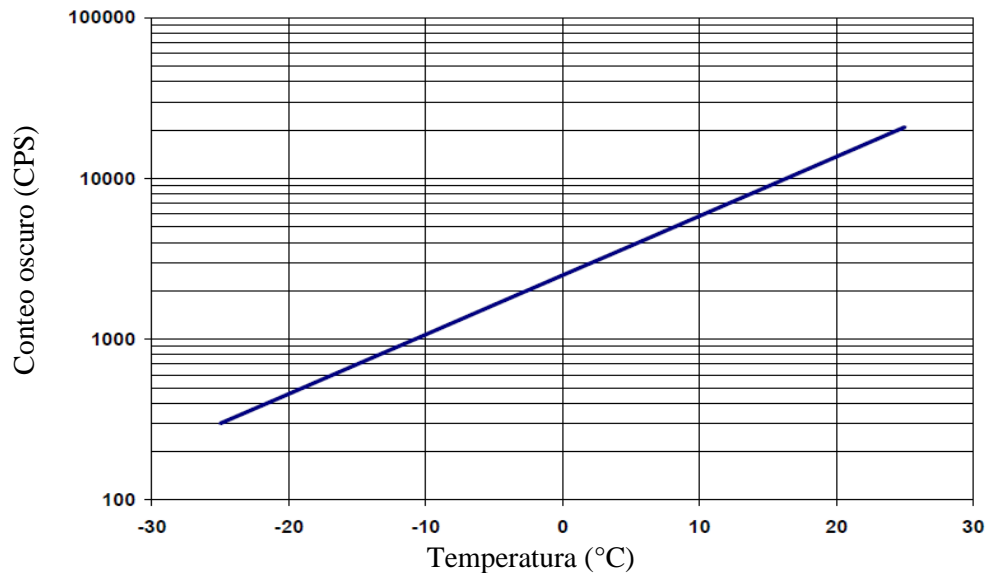


Figura 2.19: Curva típica de cuentas oscuras vs temperatura con una eficiencia del 5% en la detección del fotón a 830 nm.

## 2.6 Diagrama del circuito

La figura 2.20 muestra el diseño del circuito eléctrico para la detección de un fotón a través del fotodiodo de avalancha.

El fotodiodo se utiliza en modo fotoconductor, es decir, se polariza inversamente a través de una fuente de alto voltaje. Las características de la fuente de voltaje son: Voltaje de entrada: 12V, Voltaje de encendido:  $<0.7V$ , Voltaje de salida: 0 a 400 V DC, Corriente máxima de salida: 2.5mA, Intervalo de temperatura:  $-55C^{\circ}$  a  $85 C^{\circ}$ .

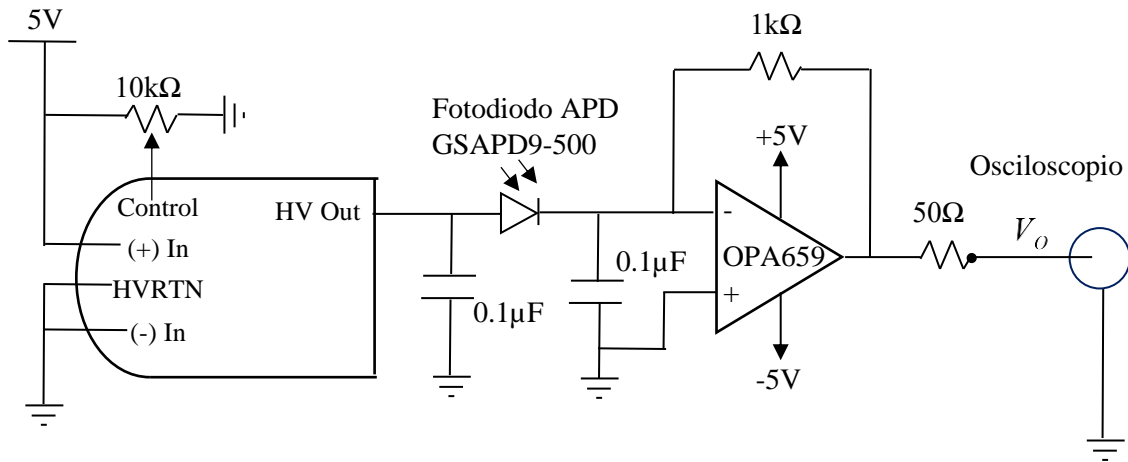


Figura 2.20: Circuito eléctrico diseñado para el fotodiodo de avalancha.

El fotodiodo APD es adquirido de la empresa Shenzhen YiguDian Technology Co., Ltd, ver Figura 2.21. Se eligió con carcasa metálica para que la transmisión de temperatura sea más fácil al fotodiodo y con conector FC para el acoplamiento con la fuente óptica a través de fibra óptica.



Figura 2.21: Fotodiodo APD.

Las aplicaciones del fotodiodo son: detección óptica, LIDAR, sensor de fibra óptica, OTDR, alta resolución óptica en la tomografía, experimento y análisis en la ciencia. En la tabla 2.2 se muestra los valores absolutos del fotodiodo [29]. La tabla 2.3 muestra las características optoelectrónicas a temperatura de  $22\pm 3^{\circ}\text{C}$  del fotodiodo de avalancha.

<b>Voltaje de operación</b>	0.95xVBR	<b>Temperatura de operación</b>	-45~+85°C	<b>Potencia de disipación</b>	100mW
<b>Corriente directa</b>	18 mA	<b>Temperatura de almacenamiento</b>	-45~+125°C	<b>Temperatura de soldadura</b>	260°C (10s)

Tabla 2.2: Valores absolutos del fotodiodo de avalancha.

Parámetros	Símbolo	Condiciones de prueba	Mínimo	Típico	Máximo	Unidad
Respuesta espectral	$\lambda$	—	400~1100	—	—	nm
Diámetro activo	$\varphi$	—	—	500	—	$\mu\text{m}$
Responsividad	$R_e$	$\lambda=905\text{nm}$ , $\varphi=1\mu\text{w}$ , $M=1$	—	0.5	—	A/W
Ganancia de multiplicación	M	$\lambda=905\text{nm}$ , $\varphi=1\mu\text{w}$ , $V_{BR}=30\text{V}$	—	60	—	—
		$\lambda=905\text{nm}$ , $\varphi=1\mu\text{w}$ , $V_{BR}=18\text{V}$	—	100	—	—
		$\lambda=905\text{nm}$ , $\varphi=1\mu\text{w}$ , $V_{BR}=3\text{V}$	—	300	—	—
Tiempo de respuesta	$T_r$	F=1 MHz., RL=500 $\Omega$ , $\lambda=905\text{nm}$	—	0.5	—	Ns
Corriente oscura	$I_d$	M=100	—	0.1	2	nA
Capacitancia total	$C_{tot}$	M=100, f=1MHz	—	3	—	pF
Voltaje de ruptura	$V_{BR}$	IR=10 $\mu\text{A}$	120	—	200	V
Potencia máxima instantánea	P	M=100, 905nm, 10ns, 10KHz	—	—	0.3	mW
Coefficiente de temperatura a voltaje de operación	$\sigma$	$T_c=-40^{\circ}\text{C} \sim 85^{\circ}\text{C}$	—	0.9	1.3	V/°C
Empaquetado	TO46- Con conector de fibra óptica					

Tabla 2.3: Especificaciones del fotodiodo GSAPD-500.

La figura 2.22 muestra la curva característica de la responsividad respecto a la longitud de onda, cuando el fotodiodo tiene una ganancia de 100. La figura 2.23 muestra la corriente respecto a la polarización inversa del fotodiodo de avalancha.

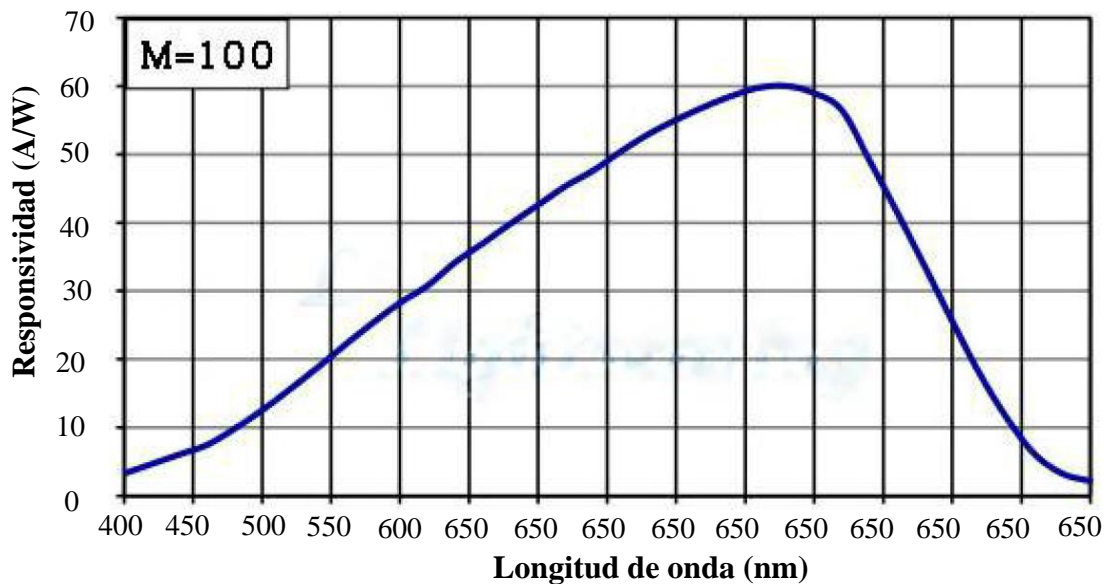


Figura 2.22: Respuesta de responsividad vs longitud de onda del fotodiodo.

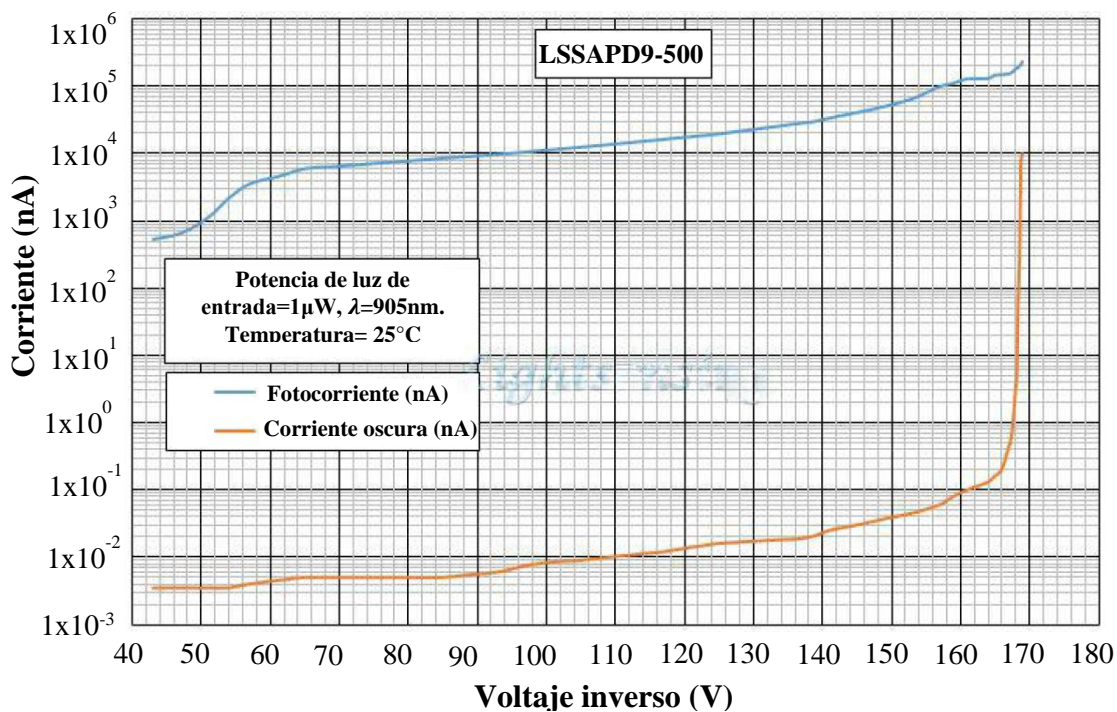


Figura 2.23: Respuesta de la fotocorriente vs polarización inversa del fotodiodo.

La figura 2.24 muestra la configuración de pines del fotodiodo de avalancha visto de manera frontal.

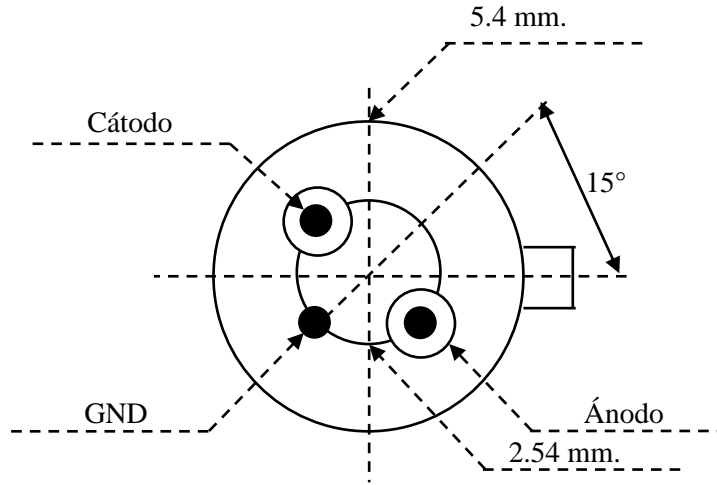


Figura 2.24: Configuración de pines del fotodiodo de avalancha.

La conversión de corriente a voltaje se realiza con un amplificador de transimpedancia OPA659. Sus características son; alto ancho de banda: 650 MHz. ( $G=1 \text{ V/V}$ ), alto slew rate:  $2550 \text{ V}/\mu\text{s}$ ., bajo voltaje de entrada de ruido:  $8.9 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ , bajo voltaje offset:  $\pm 1 \text{ mV}$ ., alta corriente de salida: 70 mA. [30].

Las aplicaciones del OPA659 son: amplificadores de entrada de alta impedancia de adquisición de datos, amplificadores de entrada de osciloscopio de alta impedancia, amplificadores de transimpedancia de fotodiodos de banda ancha, equipo de escaneo de obleas, reflectometría óptica de dominio de tiempo (OTDR), detección de tiempo de vuelo de alta velocidad (TOF) [30].

Para la detección de la corriente generada por un fotón incidente, se propone operar al fotodiodo APD en el modo Geiger, debido a su alta ganancia. Para eso el análisis se inicia con la definición de corriente: es la velocidad de cambio de la carga respecto al tiempo, medida en amperes (a), matemáticamente es [31]:

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} \quad (2.19)$$

Seleccionando un tiempo de 20ns y ganancia de  $10^7$ , se tiene:

$$I = \frac{(10^7)(1.6 \times 10^{-19} \text{ C})}{(20 \times 10^{-9} \text{ s})} = 0.08 \times 10^{-3} \text{ C/s}, \quad (2.20)$$

La corriente de salida del fotodiodo de avalancha será de  $0.08 \times 10^{-3} \text{ A}$  por cada fotón incidente. Esta cantidad será amplificada por un amplificador de transimpedancia.

Sustituyendo en la Ec. (2.16) una resistencia de  $R_F=1k\Omega$ , se tiene un voltaje de salida.

$$V_{sal} = (100\Omega)(0.08 \times 10^{-3} A) = 8mV, \quad (2.21)$$

La fuente de voltaje para el fotodiodo se muestra en la figura 2.25. Las especificaciones del dispositivo son: peso de 5.66 gramos, volumen de  $1.696 \text{ cm}^3$ , 23.37 mm (largo), 11.43 mm (ancho), 6.35 mm (alto) [32].



Figura 2.25: Convertidor DC-DC de la empresa XPEMCO.

Sus principales características son: voltaje de entrada, 12V<sub>m</sub>, voltaje de encendido, <0.7V, voltaje de salida, 0 a 400 V DC, corriente máxima de salida, 2.5mA, rango de temperatura, -55 °C a 85 °C [32]. El diagrama general de la fuente CD-CD se muestra en la figura 2.26.

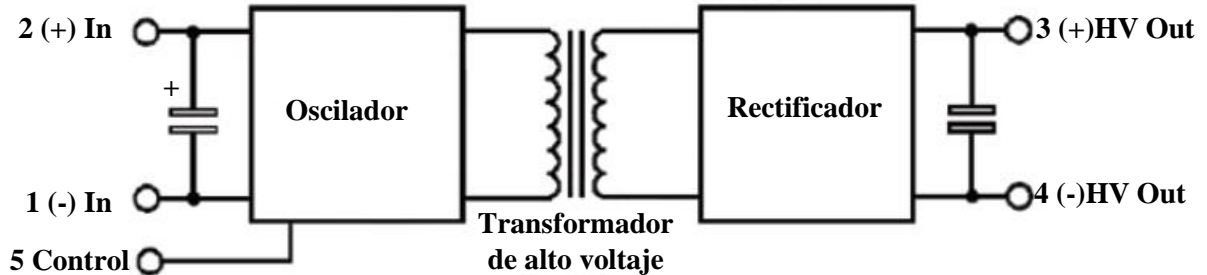


Figura 2.26: Diagrama general de la fuente CD-CD.

Las configuraciones de los pines se muestran en la tabla 2.4.

Número de pin	Función
1	Entrada (-)
2	Entrada (+)
3	Salida (+)
4	Salida (-)
5	Control

Tabla 2.4: Pines de la fuente de voltaje CD-CD.

La caracterización de la fuente de voltaje se muestra en la figura 2.27.

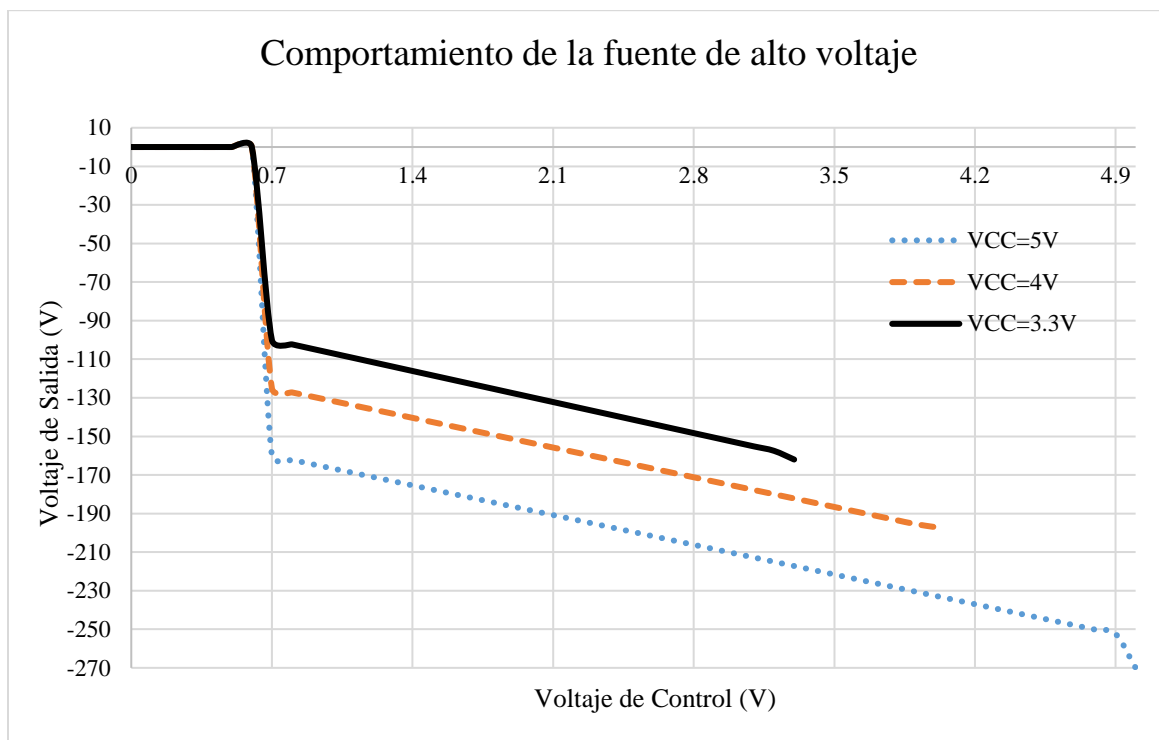


Figura 2.27: Caracterización de la fuente de alto voltaje.

La fuente de voltaje se energizó con 3 voltajes diferentes: 3.3V, 4V y 5V. La línea de color azul representa 5V, el cual tiene un salto de 0V hasta -160V y de ahí se mantiene de manera gradual hasta -270V. La línea de color anaranjado representa 4V, el cual tiene un salto de 0V hasta -125V y de ahí se mantiene de manera gradual hasta -197V. La línea de color negra representa 3.3V, el cual tiene un salto de 0V hasta -100V y de ahí se mantiene de manera gradual hasta -162V.

Por lo tanto, la fuente de alto voltaje se energizará con 5V, debido a que el voltaje de ruptura del fotodiodo de avalancha se encuentra dentro del intervalo de voltaje.

## 2.7 Circuito impreso

La figura 2.28 muestra el circuito eléctrico real. Se observa al fotodiodo de avalancha fijo al soporte de plástico con dos tornillos, los cuatro capacitores, al OPA 659, el cable de color naranja que energiza al fotodiodo de avalancha, el cable de color rojo que es el voltaje +5V, el cable de color azul es -5V, el cable blanco que es el voltaje de salida de OPA659 y la resistencia de 100Ω.

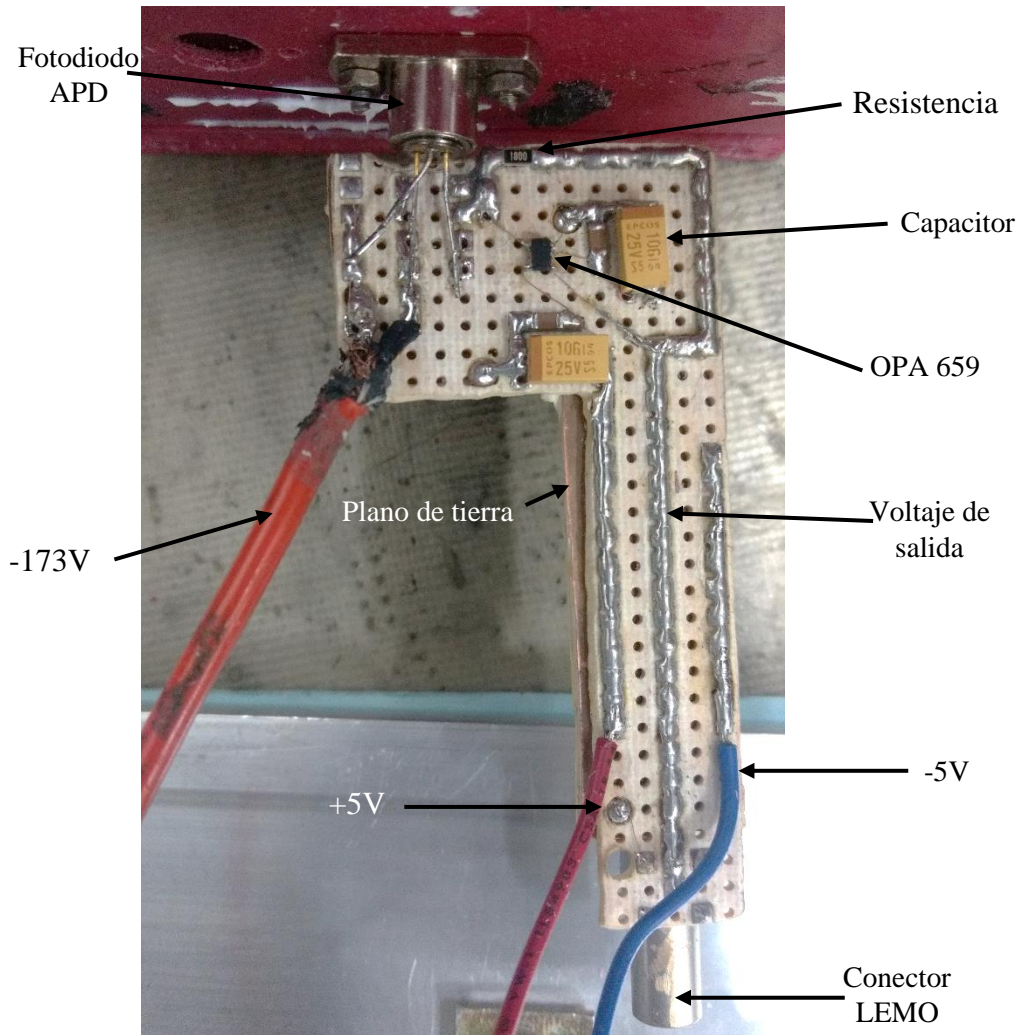


Figura 2.28: Circuito eléctrico real.

## 2.8 Conclusiones

En el presente capítulo se presentaron los diferentes fotodetectores que existen y que dieron lugar al fotodiodo de avalancha, en el cual se mostraron las ecuaciones que describen el modo de operación de cada fotodiodo.

La figura 2.27 tiene una función importante porque describe la corriente del fotodiodo de avalancha cuando es energizado a diferentes voltajes, es decir muestra su ganancia respecto al voltaje de polarización, y esto será validado cuando se lleve a cabo el experimento.

El circuito eléctrico para la adquisición de la señal eléctrica del fotodiodo de la figura 2.28 se realizó en una baquelita perforada y sellada a través de postes de estaño sobre una baquelita de cobre que se utiliza como plano de tierra, estrategia de diseño para atenuar el ruido interno. Cuando la interferencia electromagnética pasa por el poste, la señal electromagnética se divide en dos, la primera parte se refleja y sale de la tarjeta, la otra parte traspasa el poste y se atenúa exponencialmente conforme encuentra otra vía.

# Capítulo 3

## 3. Sistema de enfriamiento para los APD

En este capítulo se muestra la celda Peltier que se utiliza y la obtención del número de celdas óptimas para el control de temperatura, se diseña el circuito eléctrico de potencia y finalmente su implementación. También se presenta el diseño de las piezas en Solidworks y el prototipo final. Además se describe las gráficas del comportamiento de las celdas Peltier cuando es energizado a diferentes voltajes de alimentación, después se presenta el comportamiento del control de temperatura para tres, cuatro y cinco celdas Peltier, finalmente se muestran las gráficas del control de temperatura para el primer detector.

### 3.1 Celda Peltier

El efecto Peltier se caracteriza por la aparición de una diferencia de temperaturas entre las dos caras de un semiconductor cuando por él circula una corriente, ver Figura 3.1. Conformada por dos materiales semiconductores uno tipo P y otro tipo N. Internamente la celda Peltier posee elementos semiconductores altamente impurificados y dispuestos eléctricamente en serie mediante conductores de cobre [33].

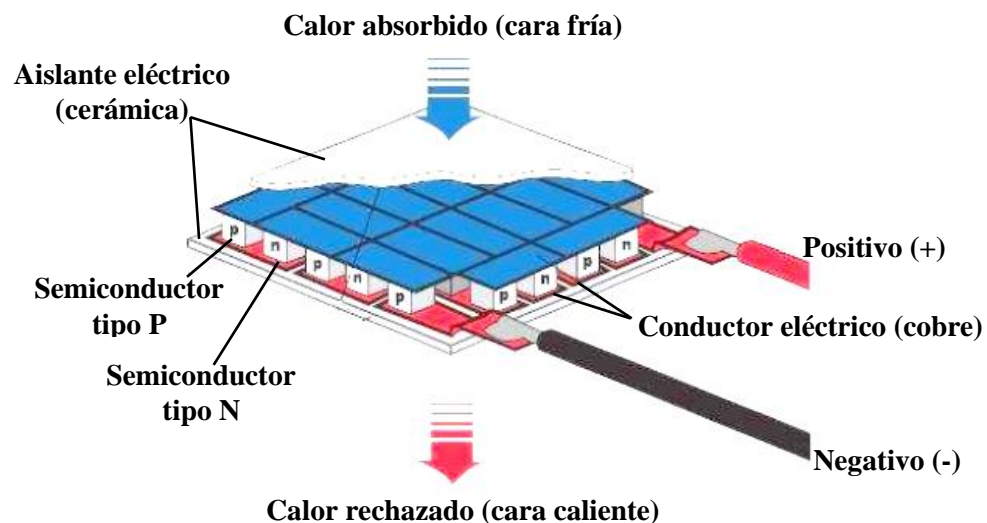


Figura 3.1: Diagrama de la estructura interna del efecto Peltier.

El efecto Peltier es conocido desde 1834. Al aplicar una diferencia de potencial sobre la célula se producirá una cesión de calor por unidad de tiempo en la cara caliente igual a.

$$Q_{PC} = \alpha T_C I, \quad (3.1)$$

donde:  $T_C$  es la temperatura de la cara caliente,  $\alpha$  es el coeficiente de Seebeck,  $I$  es la corriente que atraviesa al circuito. Por el mismo efecto, la absorción de calor por unidad de tiempo en la cara fría será igual a la Ec. (3.1) [34].

La celda Peltier a utilizar se muestra en la figura 3.2, adquirida de la empresa Hebei L.T. Las dimensiones son; 4 cm. de largo, 4 cm. de ancho, y 4 mm. de alto [35].



Figura 3.2: Celda Peltier de la empresa Hebei I.T. (Shanghai).

Su principal ventaja es su bajo costo. Sus especificaciones se muestran en la tabla 3.1. Temperatura máxima de operación 138°C. y vida límite: 200000 hrs. [35].

Temperatura del lado caliente (°C)	25 °C	50°C
Q max (Watts)	43	49
Delta Tmax (°C)	66	75
Imax (Amperes)	5.3	5.3
Vmax (Volts)	14.2	16.2
Resistencia módulo (Ohms)	2.40	2.75

Tabla 3.1: Especificaciones de la celda Peltier Hebei I. T. (Shanghai).

### 3.2 Caracterización de las celdas Peltier

Se prosiguió a encontrar el número de celdas Peltier óptimas para realizar el control de temperatura con un mejor comportamiento. Entonces se emuló la temperatura del medio ambiente a través de una caja de unice, mientras que en el otro sistema se realizó el control

de temperatura de las celdas Peltier. La figura 3.3 muestra el diagrama de bloques de los dos controles de temperatura. El control para emular la temperatura consiste en: el software LabView dentro de bloque PC que es utilizado para programar a la tarjeta de adquisición de datos por USB, la etapa de potencia, finalmente el foco de 100W y un sensor de temperatura LM35. El control de temperatura los componentes son; el software CCS Compiler dentro del bloque PC para programar el PIC 18F4550, el cual se encuentra en la tarjeta Sputnik 2, la etapa de potencia, las celdas Peltier y el sensor de temperatura LM35.

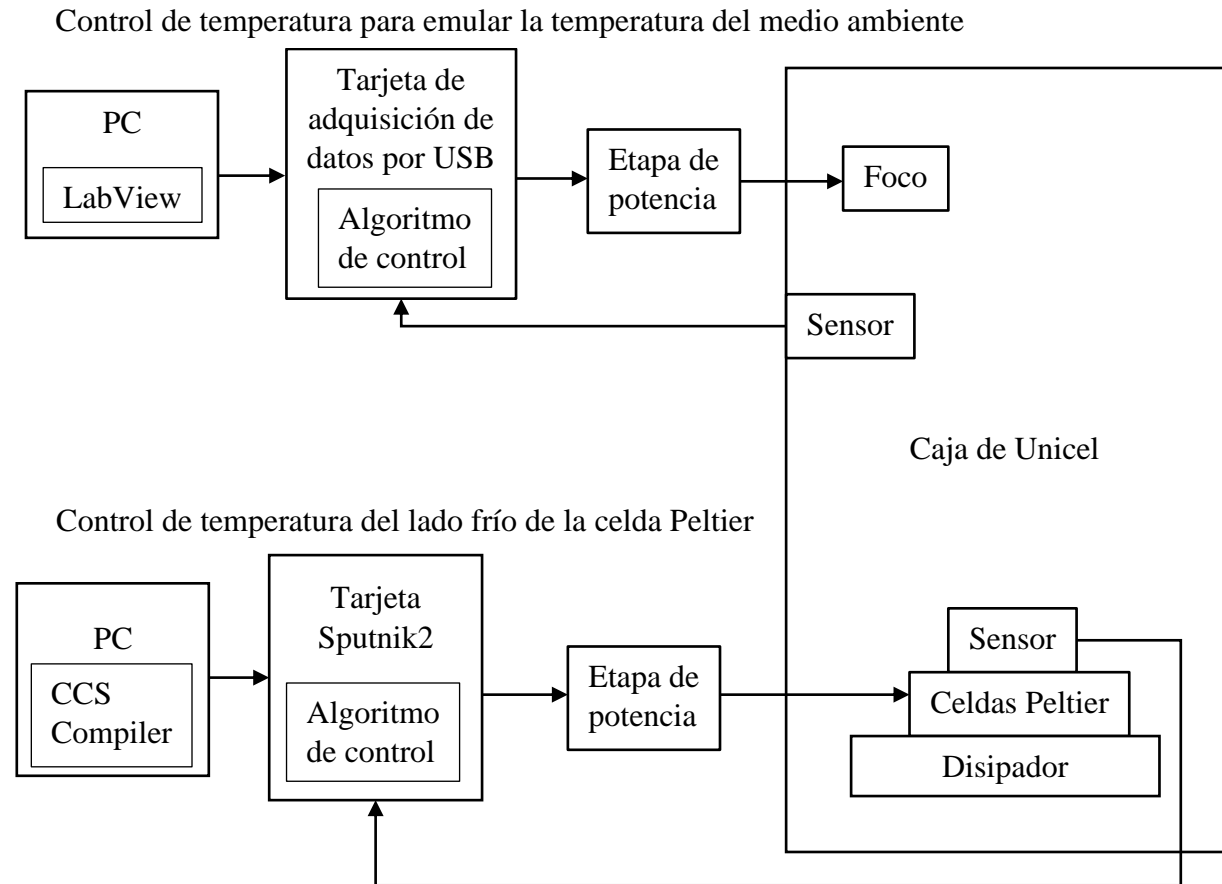


Figura 3.3: Control de temperatura del medio ambiente y lado frío de la celda Peltier.

Ambos controles de temperatura tuvieron el principio del diagrama general de lazo cerrado de control, ver Figura 3.4.

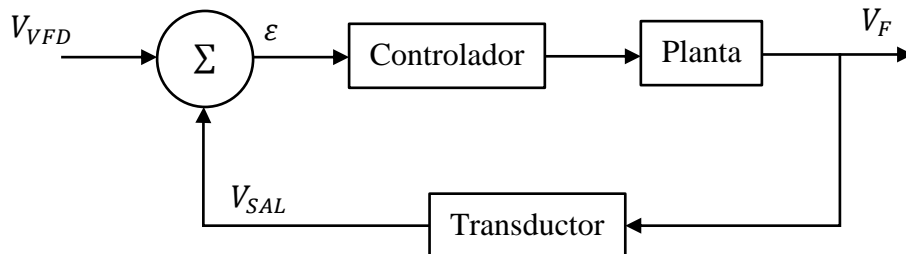


Figura 3.4: Sistema en lazo cerrado de control.



El voltaje necesario para encender el foco fue de 0.89V, es decir, no inicia en 0V, por lo tanto, se debe de tener precaución al hacer control. Cuando se satura el diodo infrarrojo del optoacoplador MOC3041 a través de la resistencia R15, se activa el TRIAC MAC121D y la bombilla se enciende, de lo contrario, la bombilla se apaga.

El bloque de tarjeta de adquisición de datos por USB se muestra en la figura 3.7, el cual contiene un PIC 18F4550.



Figura 3.7: Tarjeta electrónica para el control de temperatura.

Las características de la tarjeta electrónica son: 8 canales digitales de salida, 8 canales digitales de entrada, 4 canales analógicos de entrada, 4 canales analógicos de salida, interfaz USB 2.2 Full-speed, visualización de forma de onda analógica y digital, manejo de salidas digitales.

La programación de la tarjeta se realiza a través del Software Labview 10. Dentro del Software existen varios submenús, que ayudan a configurar los puertos de entrada y salida de la tarjeta, las opciones del submenú son: entradas digitales, salidas digitales, entradas analógicas, salidas analógicas y editor de comandos.

La figura 3.8 muestra el submenú entradas digitales, el cual muestra la forma de onda del puerto digital.

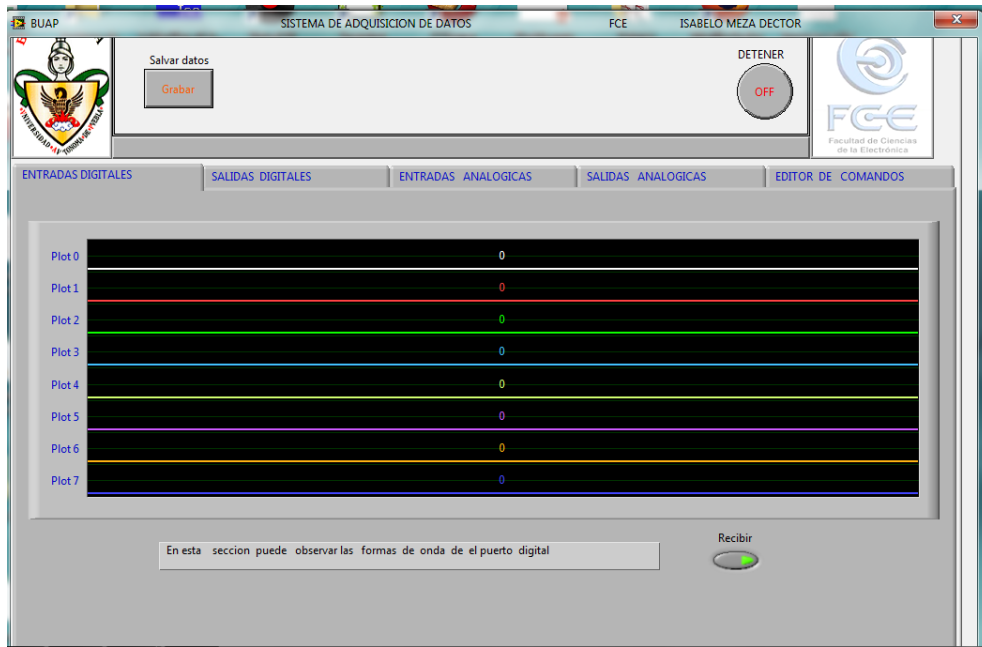


Figura 3.8: Submenú entradas digitales.

La figura 3.9 muestra al submenú salidas digitales, en el cual se puede mandar a escribir al puerto digital secuencias binarias predeterminadas o una palabra digital.



Figura 3.9: Submenú salidas digitales.

La figura 3.10 muestra al submenú entradas analógicas, el cual muestra el voltaje proveniente de los cuatro canales analógicos de manera gráfica y en formato flotante.

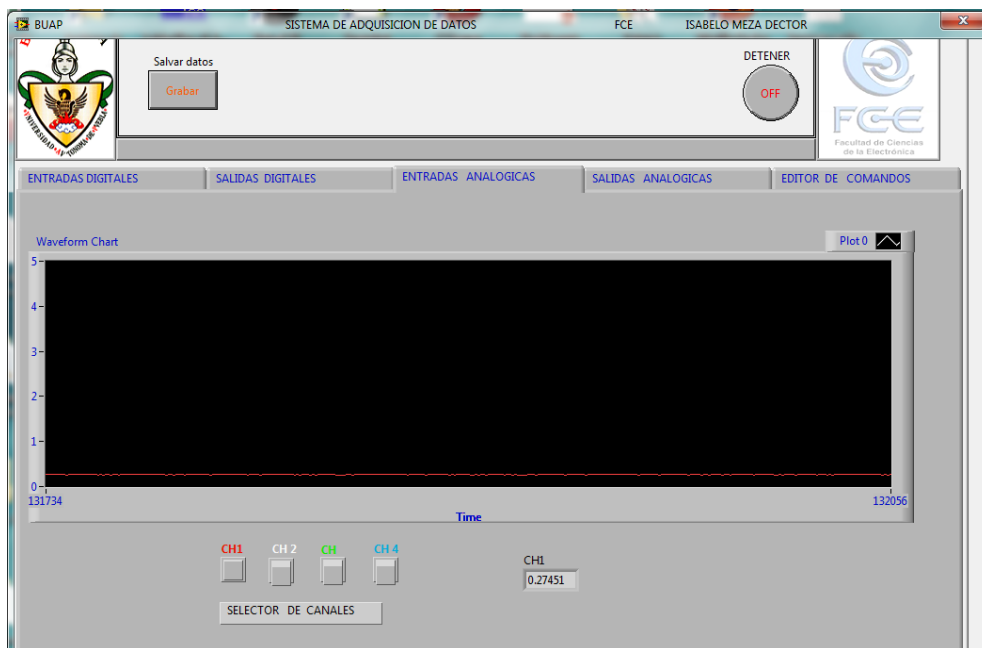


Figura 3.10: Submenú entradas analógicas.

La figura 3.11 muestra el submenú salidas analógicas, en el cual se escribe el valor deseado entre -5V y +5V a los cuatro canales analógicos.

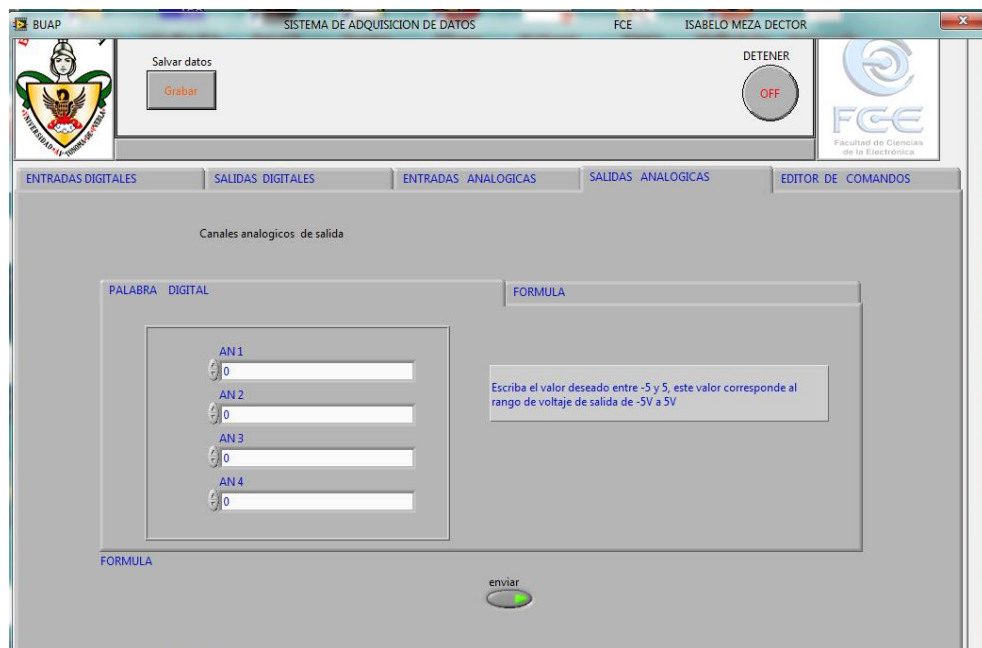


Figura 3.11: Submenú salidas analógicas.

En la figura 3.12 se muestra el submenú editor de comandos, en el cual se puede escribir una ley de control mediante los puertos analógicos de entrada y salida referenciadas como variables X y Y respectivamente.

El algoritmo de control introducido en el editor de comandos para control de temperatura del medio ambiente es:

$$Y_4 = 80 * \tanh(0.25 - x_1) + 172, \quad (3.3)$$

donde  $Y_4$  es la salida analógica del puerto 4,  $x_1$  es la entrada analógica del puerto 1 donde se lee el voltaje del sensor LM35, 0.25 corresponde a la temperatura deseada de 25°C y el número 172 es el voltaje de offset del MOC3041 equivalente al voltaje de 0.89V. La función  $\tanh()$  se utilizó debido a que es una función acotada y el error es cero en su zona lineal. La temperatura deseada aumenta 5 °C cada 15 minutos en el algoritmo de control de la Ec. 3.3.



Figura 3.12: Software LabView 10.0 para la emulación del medio ambiente.

### 3.4 Circuito de potencia y control para la emulación de control del lado frio de la celda Peltier

Se utilizó un microcontrolador PIC 18F4550 para cerrar el lazo de control, a través de la tarjeta SPUTNIK2, desarrollada por Apolonio Ata Pérez, ver Figura 3.13.

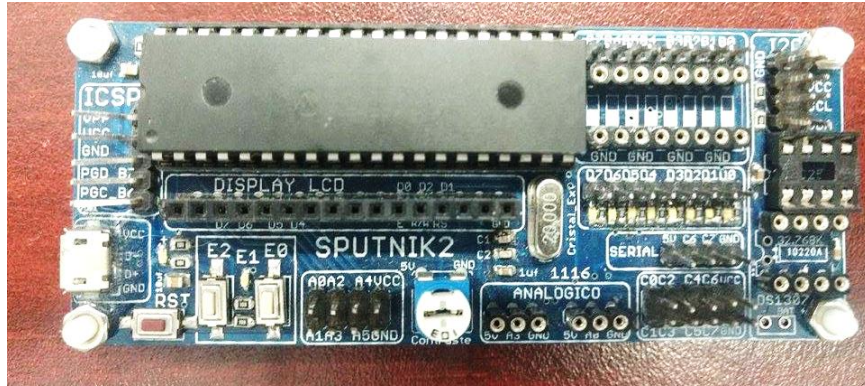


Figura 3.13: Tarjeta Sputnik 2.

Las características de la tarjeta electrónica son: conector para dos dispositivos I2C, conector para batería de respaldo del IC DS 1307, conector para LCD 16x2, conector para puerto serial, pwm1 y pwm2, conector macho del puerto B, conector macho al puerto C, conector ICSP para programar el PIC.

El diseño del circuito eléctrico para el control de corriente se muestra en la figura 3.14.

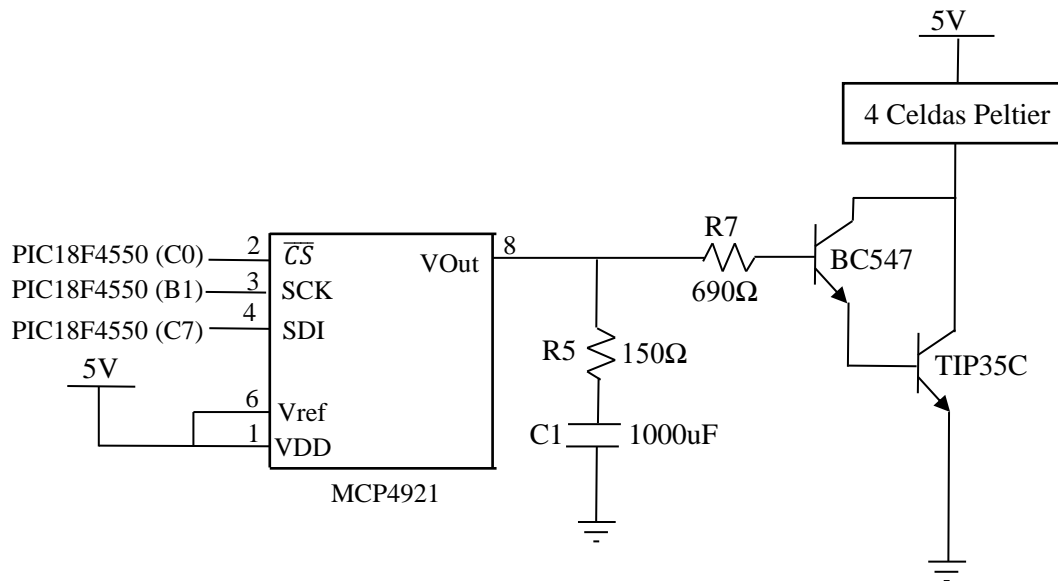


Figura 3.14: Etapa de potencia para el control de temperatura a través de corriente.

Los pines de salida del PIC18F4550 van conectados al DAC MCP4921, el cual suministra de 0V a 5V. Enseguida es conectado un filtro pasa bajas a 10Hz. para atenuar el ruido en la etapa de potencia. Después se diseña un circuito emisor común con transistores NPN TIP 35C y NPN BC547 en configuración darlington. La configuración darlington es útil para aumentar la ganancia del transistor. Las celdas Peltiers son conectados en el colector de ambos transistores. La corriente mínima y máxima que circula por la celda Peltier es; 0A

cuando el DAC MCP4921 suministra 0V y 3.21A cuando el DAC MCP4921 proporciona 5V.

La ecuación que describe el filtro pasa bajas es:

$$F = \frac{1}{2\pi RC}, \quad (3.4)$$

donde  $R$  es la resistencia en ohms,  $C$  es valor del capacitor en faradios y  $F$  es la frecuencia en Hertz. Sustituyendo  $R=150\Omega$ ,  $F=100\mu F$ , se tiene:

$$F = \frac{1}{2\pi(150\Omega)(1000\mu F)} = 10Hz, \quad (3.5)$$

El DAC MCP4921 tiene las siguientes características eléctricas: resolución de 12 bits, voltaje de alimentación: 2.7V a 5.5V, comunicación SPI, temperatura de operación:  $-65^{\circ}\text{C}$  a  $150^{\circ}\text{C}$ . corriente en cada pin: 2mA. Sus aplicaciones son: sensor de calibración, lazo cerrado de control de un motor, instrumento portable, etc. [37].

La comunicación SPI permite 8 bits de datos para ser transmitido y recibido de manera síncrona. La comunicación necesita típicamente tres pines que son [38]:

- Dato serial de salida (SDO)-RC7/RX/DT/SDO.
- Dato serial de entrada (SDI) - RB0/AN12/INT0/FLT0/SDI/SDA.
- Reloj serial (SCK) - RB1/AN10/INT1/SCK/SCL

Adicionalmente, un cuarto pin es usado cuando hay un modo de operación esclavo:

- Selector de esclavo (SS) - RA5/AN4/SS/HLVDIN/C2OUT

Las características eléctricas del BC547 son; voltaje base-colector ( $V_{CBO}$ )=45V,  $h_{fe}$ =100-800, voltaje colector-emisor ( $V_{CEO}$ )=45V, corriente máxima de colector ( $I_C$ )=100mA, potencia de disipación en el colector ( $P_C$ )=500mW, rango de temperatura de operación ( $T_{STG}$ )=  $-65^{\circ}\text{C}$  a  $150^{\circ}\text{C}$  [39].

Las características eléctricas del TIP35C son: voltaje base-colector ( $V_{CB}$ )=100V,  $h_{fe}$ =3-75, voltaje emisor-colector ( $V_{CEO}$ )=100V, corriente máxima de colector ( $I_C$ )=25A, potencia total de disipación ( $P_D$ )=125W, rango de temperatura de operación ( $T_{STG}$ )=  $-65^{\circ}\text{C}$  a  $150^{\circ}\text{C}$  [40].

La corriente de base que circula por el BC547 y TIP35C es:

$$V_{DAC} - V_{R7} - V_{BE} = 0, \quad (3.6)$$

$$i_B = \frac{V_{DAC} - V_{BE}}{R7}, \quad (3.7)$$

Sustituyendo  $V_{DAC} = 5V$ ,  $V_{BE} = 1.4V$ ,  $R7 = 690\Omega$  en la Ec. (3.7) se tiene:

$$i_B = 5.2mA, \quad (3.8)$$

La ecuación del transistor que describe la relación entre la corriente de base y colector es:

$$I_C = \beta I_B. \quad (3.9)$$

Realizando las mediciones de corriente con un multímetro, se tiene que;  $I_C=3.21A$ .,  $I_B=4.3mA$ . Despejando  $\beta$  de la Ec. (3.9) y sustituyendo los datos, se tiene que:

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} = \frac{3.21A}{4.3mA} = 746.51162. \quad (3.10)$$

La figura 3.15 muestra el circuito de potencia diseñado para el control de dos lazos de temperatura. Está dividido en dos etapas, la primera etapa corresponde al primer lazo de control, que inicia con la obtención de temperatura con el sensor LM35, después se amplifica por 11 para tener un mayor rango de adquisición, finalmente va a un convertidor analógico digital del microcontrolador. Después del microcontrolador es conectado un convertidor digital analógico MCP4921, un filtro pasa bajas a 10Hz para atenuar el ruido proveniente de las conexiones y de medio ambiente, la etapa de potencia en configuración Darlington y así controlar la temperatura por medio de la corriente que circula en las celdas Peltier. El segundo control de temperatura es similar al control 1.

Debido a que el voltaje que se obtiene de los sensores LM35 es muy pequeña, en el orden de los 50mV a 250mV, se prosigue a utilizar un amplificador no inversor con ganancia de 11, y la ventaja de que el voltaje de salida no sea negativo. La ecuación que describe el voltaje de salida del amplificador no inversor está dada por la siguiente expresión:

$$V_{out} = \left(1 + \frac{R_F}{R_I}\right) V_{in}, \quad (3.11)$$

donde  $R_F$  es la resistencia de retroalimentación,  $R_I$  es la resistencia conectada a la terminal inversora y conectada a GND,  $V_{in}$  es el voltaje de entrada y  $V_{out}$  es el voltaje de salida.

Sustituyendo a  $R_F = 10 k\Omega$ ,  $R_I = 1 k\Omega$  en la Ec. (3.11) se tiene:

$$V_{out} = \left(1 + \frac{10k\Omega}{1k\Omega}\right) V_{in} = 11V_{in}, \quad (3.12)$$

La Ec. (3.12) representa el voltaje de salida de los amplificadores operacionales: A0, A1 de la figura 3.15. La implementación del circuito se muestra en la figura 3.16



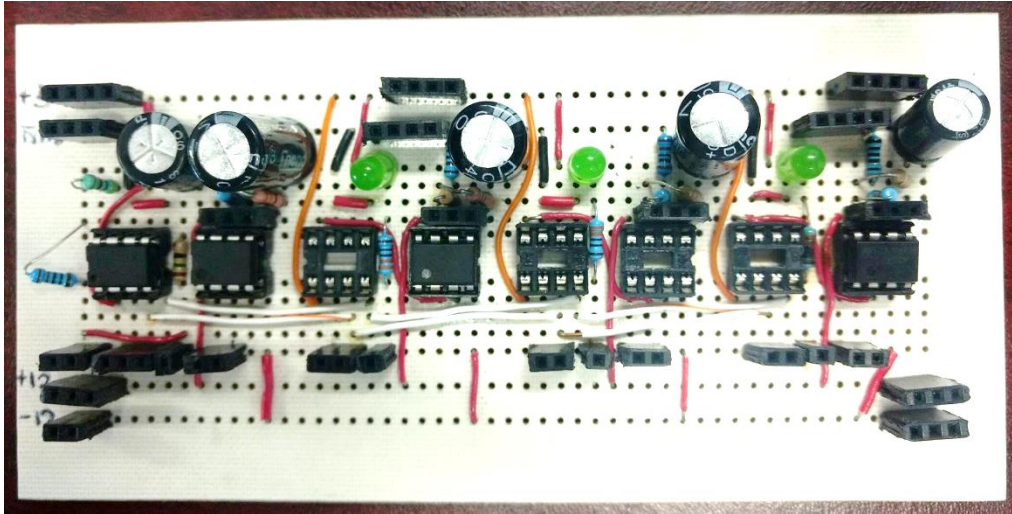


Figura 3.16: Tarjeta desarrollada para el control de temperatura.

El algoritmo de control introducido para control de temperatura es:

$$I_{C_n} = I_{C_{n-1}} + K_p \tanh \left[ (t_{deseada} - t_{actual}) * 1.47 \right], \quad (3.13)$$

donde  $I_{C_n}$  es la corriente actual,  $I_{C_{n-1}}$  es la corriente anterior,  $K_p$  es la ganancia proporcional,  $t_{actual}$  es la temperatura actual  $t_{deseada}$ , es la temperatura deseada. La multiplicación 1.47 al error, sirve para tener un grado de error. Ahora para introducir al PIC en términos de voltaje se realiza el siguiente procedimiento. La Ec. 3.17 es la que involucra la corriente de base y colector del transistor es:

$$I_C = \beta I_B, \quad (3.14)$$

donde  $I_C$  es la corriente de colector,  $I_B$  es la corriente de base,  $\beta$  es la ganancia.  $I_B$  se obtiene del despeje en la figura 3.15,

$$I_C = \beta \left( \frac{V_{DAC} - V_{CD}}{R_L} \right), \quad (3.15)$$

donde  $V_{DAC}$  es el voltaje del DAC,  $V_{CD}$  es el voltaje de base a emisor de la conexión en Darlington. Despejando a  $V_{DAC}$ ,

$$I_C R_L = \beta (V_{DAC} - V_{CD}), \quad (3.16)$$

$$V_{DAC} = \frac{I_C R_L}{\beta} + V_{CD}. \quad (3.17)$$

Recordando que:

$$N_{VDAC} = \frac{V_{DAC}}{\Delta V}, \quad (3.18)$$

El paso de voltaje del MCP4921 es:

$$\Delta V = \frac{5V}{4095}, \quad (3.19)$$

Sustituyendo la Ec. (3.19) en la Ec. (3.18) se tiene:

$$N_{VDAC} = \frac{V_{DAC}}{5V} * 4095, \quad (3.20)$$

Sustituyendo la Ec. (3.17) en la Ec. (3.20) se tiene:

$$N_{VDAC} = \left( \frac{I_C R_L + V_{CD}}{\beta} \right) * 4095, \quad (3.21)$$

donde  $R_L = 690\Omega$ ,  $\beta = 746.51162$ ,  $V_{CD} = 1.143619048$ .\*

En la figura 3.17, se muestra el diagrama de flujo para el control de dos lazos cerrados de control de temperatura, es decir para dos fotodiodos de avalancha.

De acuerdo con el diagrama de flujo, primero se crearon las constantes, después las variables de entrada y finalmente las variables de salida de tipo flotante.

Después se configuró el ADC del PIC 18F4550 para la lectura de la temperatura y también se configuran los pines para la comunicación SPI con los DAC MCP4921. Enseguida se verifica que la comunicación USB sea correcta, esto para que imprima las temperaturas en el monitor de la computadora. Se leen las 3 temperaturas: temperatura del medio ambiente, temperatura del disipador, y temperatura del lado frío de la celda. Se realiza el lazo de control con la Ec. (3.13) y Ec (3.21). Se imprime las temperaturas, y se envía el valor de la variable salida y salida 2 a los DAC's MCP4921.

La figura 3.18 muestra el sistema físico completo, en donde la computadora localizada en la parte izquierda realiza el control del medio ambiente a través de la tarjeta de adquisición de datos desarrollada por el Dr. Sergio Vergara Limón y la Dra. María Aurora Diozcora Vargas Treviño. La Laptop localizada en la parte derecha realiza el control de temperatura con el PIC18F4550 y el almacenamiento de datos se realiza en Excel a través de LabView 15.

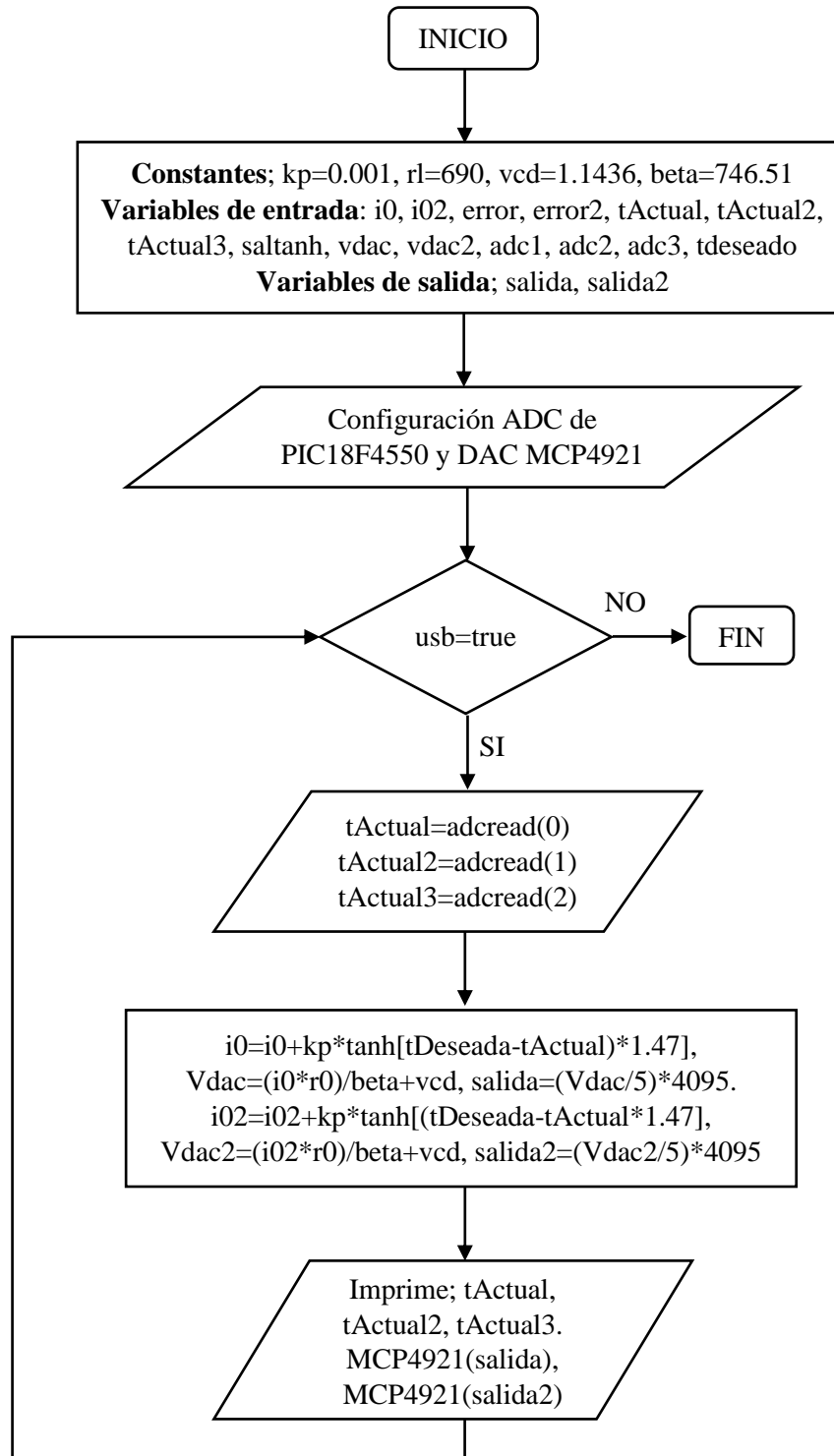


Figura 3.17: Diagrama de flujo para la programación en CCS Compiler.

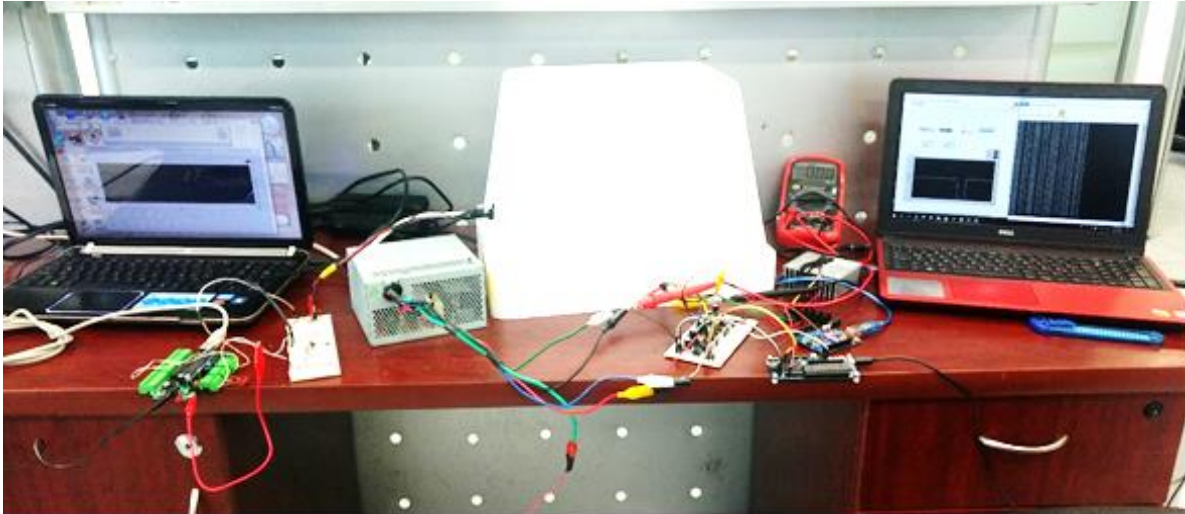


Figura 3.18: Emulación de temperatura y control del lado frío de las celdas Peltier.

### 3.4 Diseño de las piezas en SolidWorks

La figura 3.19 muestra el prototipo diseñado en SolidWorks, con las siguientes piezas: disipador, tapa, soportes frontales y soportes traseros. Solo se imprimirán las tapas y los soportes frontales y traseros. En los soportes traseros saldrían los cables de alimentación de las celdas Peltier, los sensores de temperatura LM35, y los cables de la electrónica para la adquisición de las señales de los fotodiodos de avalancha. En los soportes frontales se colocarían dos fotodiodos de avalancha en los dos orificios.

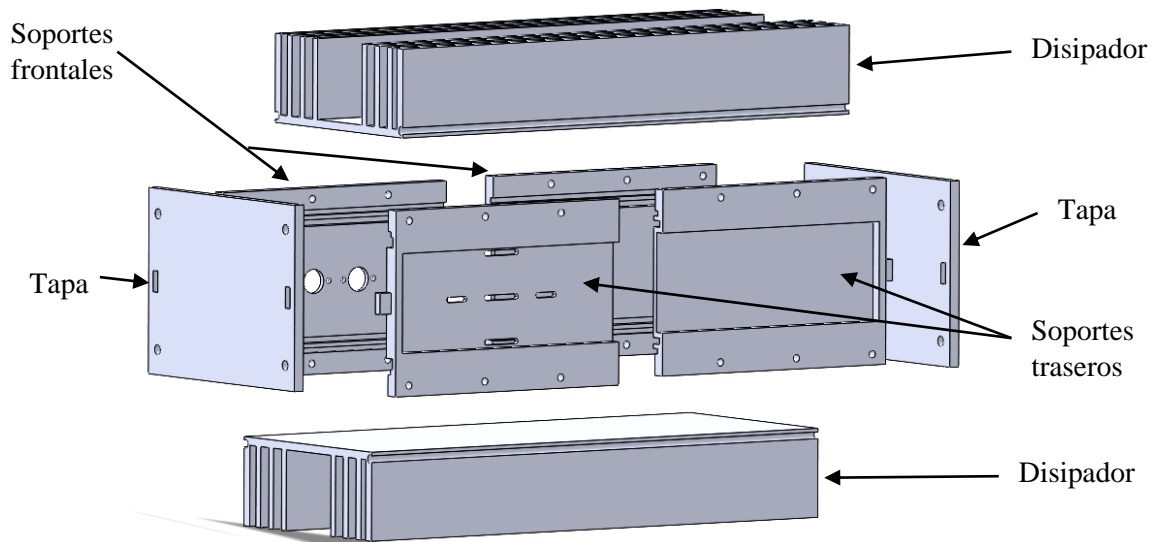


Figura 3.19: Prototipo diseñado en SolidWorks.

Las medidas de los disipadores son: 20 cm de largo, 10 cm de ancho y 5 cm de altura. Las tapas tienen las siguientes medidas: 9.5 cm de largo, 4 cm de ancho y 7.1 cm de altura. Los soportes frontales y traseros tienen las siguientes medidas: 10 cm de largo, 5 cm de ancho, 7.1 cm de altura. La figura 3.20 muestra el prototipo físico, adicionalmente se añadió una placa de aluminio superior e inferior con medidas de 20cm x 10cm.

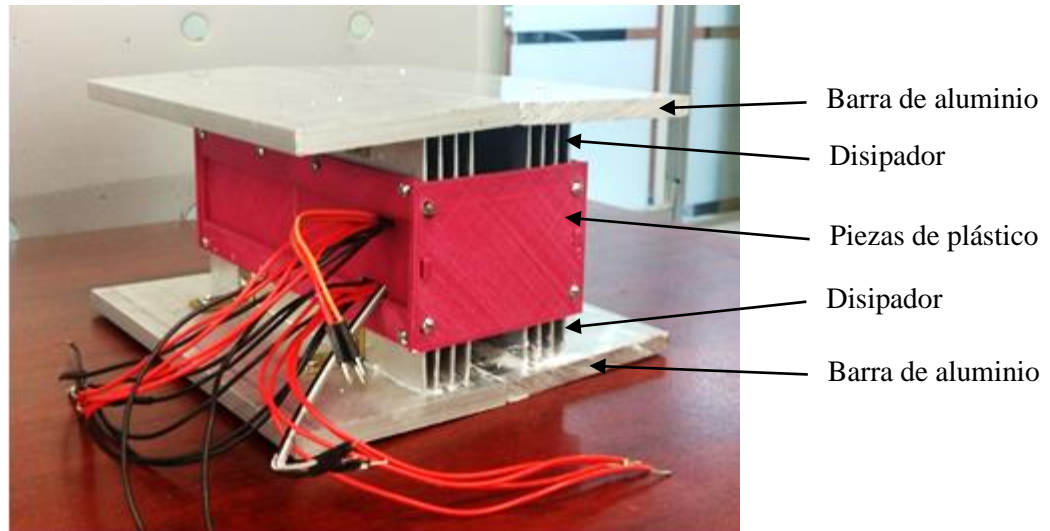


Figura 3.20: Prototipo físico.

Las ocho celdas Peltier y los dos sensores de temperatura se encuentran dentro de las piezas de plástico. La figura 3.21 muestra los componentes del prototipo de manera interna. Se observa las 4 celdas Peltier inferior y superior.

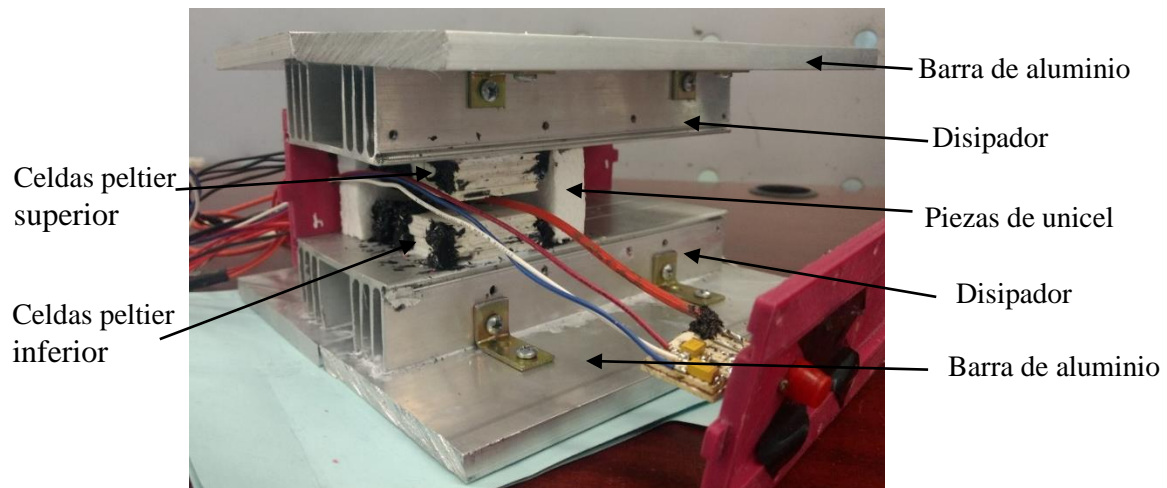


Figura 3.21: prototipo vista de manera interna.

### 3.5 Resultados experimentales

La figura 3.22 muestra la respuesta de la celda Peltier cuando es energizado con 6 V durante 81 segundos. La línea de color anaranjado es la temperatura de la cara caliente de la celda y la línea azul representa la temperatura del lado frío de la celda Peltier.

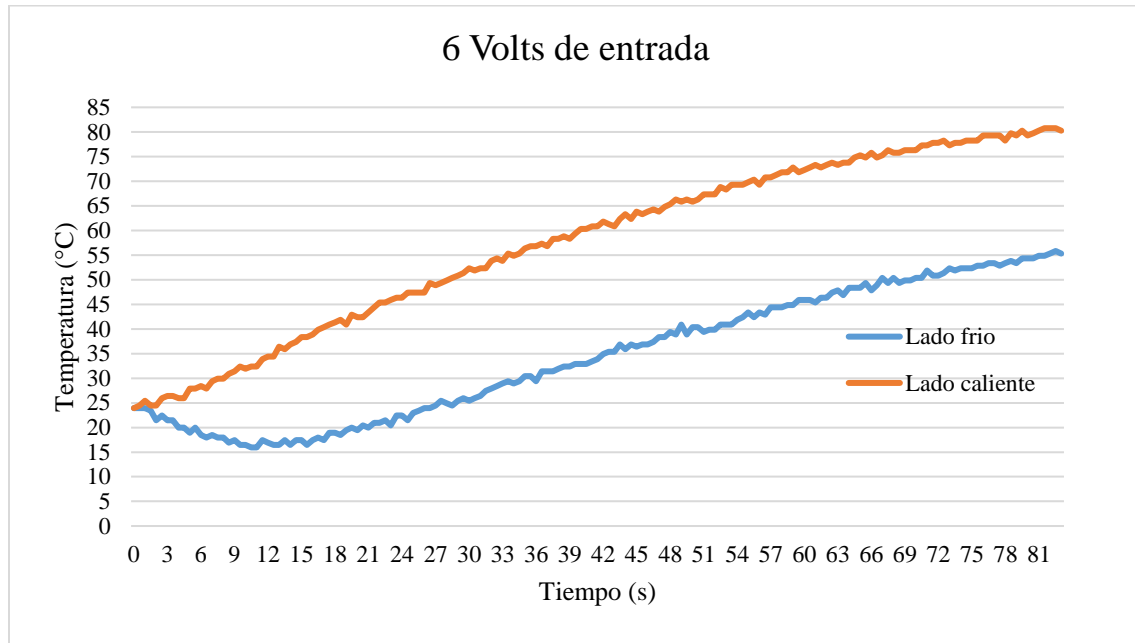


Figura 3.22: Celda Peltier a 6 volts de alimentación.

El cambio de temperatura es de:  $\Delta t = 80^{\circ}C - 55^{\circ}C = 25^{\circ}C$ , y se presenta a partir en 18 segundos. La figura 3.23 muestra la respuesta de la celda peltier cuando es energizado a 5 V.

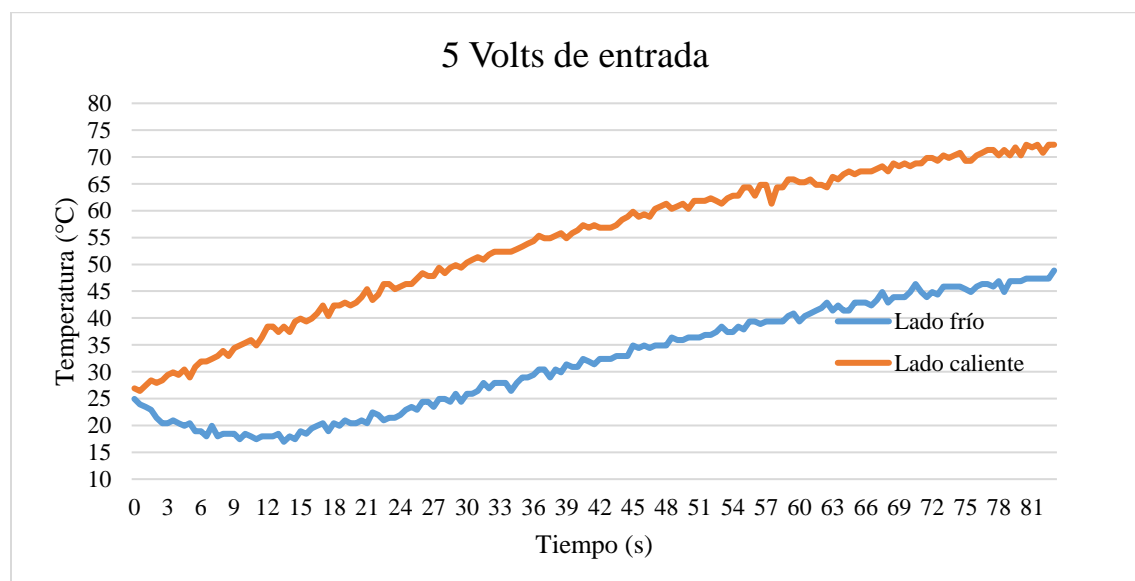


Figura 3.23: Celda Peltier a 5 Volts de alimentación.

El cambio de temperatura es de:  $\Delta t = 72^{\circ}\text{C} - 48^{\circ}\text{C} = 24^{\circ}\text{C}$ , y se presenta a partir en 18 segundos. La figura 3.24 muestra la respuesta de la celda Peltier cuando es energizado a 4 V.

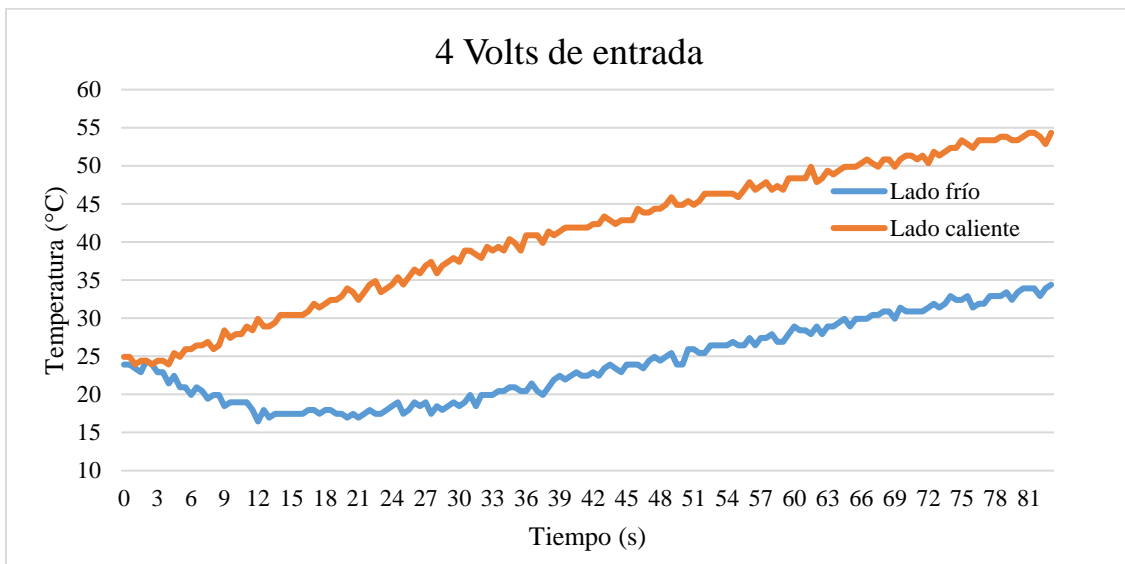


Figura 3.24: Celda Peltier a 4 Volts de alimentación.

El cambio de temperatura es de:  $\Delta t = 54^{\circ}\text{C} - 34^{\circ}\text{C} = 20^{\circ}\text{C}$ , y se presenta a partir en 24 segundos. La figura 3.25 muestra la respuesta de la celda Peltier cuando es energizado a 3 V.

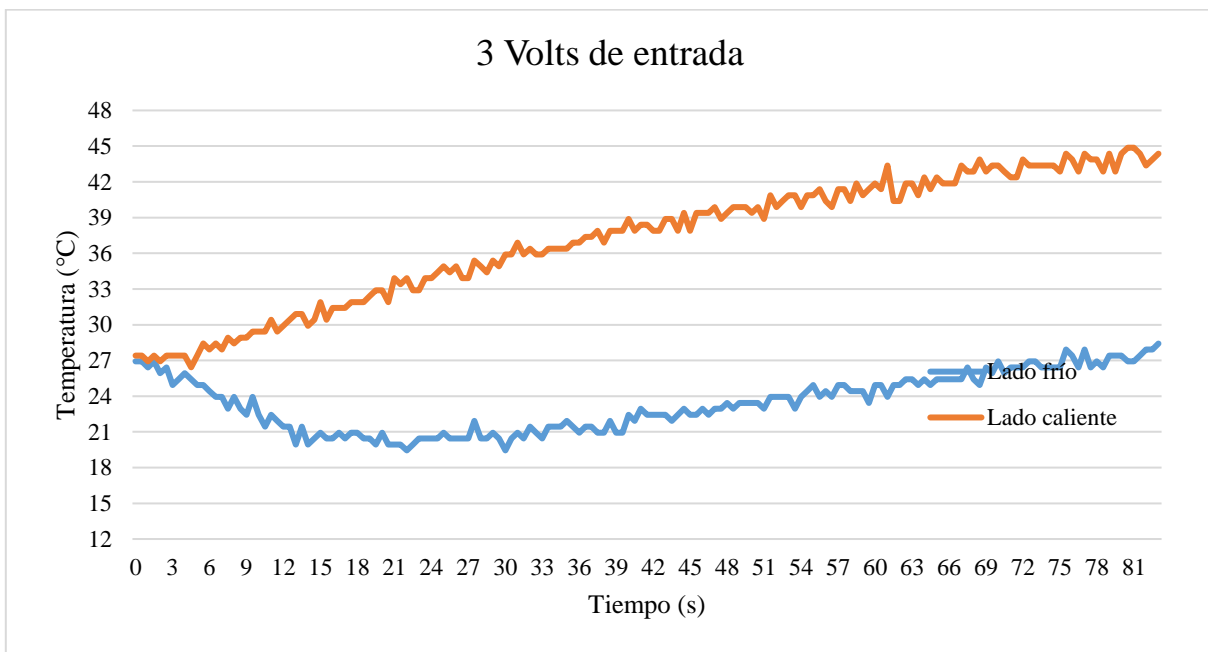


Figura 3.25: Celda Peltier a 3 Volts de alimentación.

El cambio de temperatura es de:  $\Delta t = 44^{\circ}\text{C} - 38^{\circ}\text{C} = 16^{\circ}\text{C}$ , y se presenta a partir en 21 segundos. La figura 3.26 muestra la respuesta de la celda Peltier cuando es energizado a 2 V.

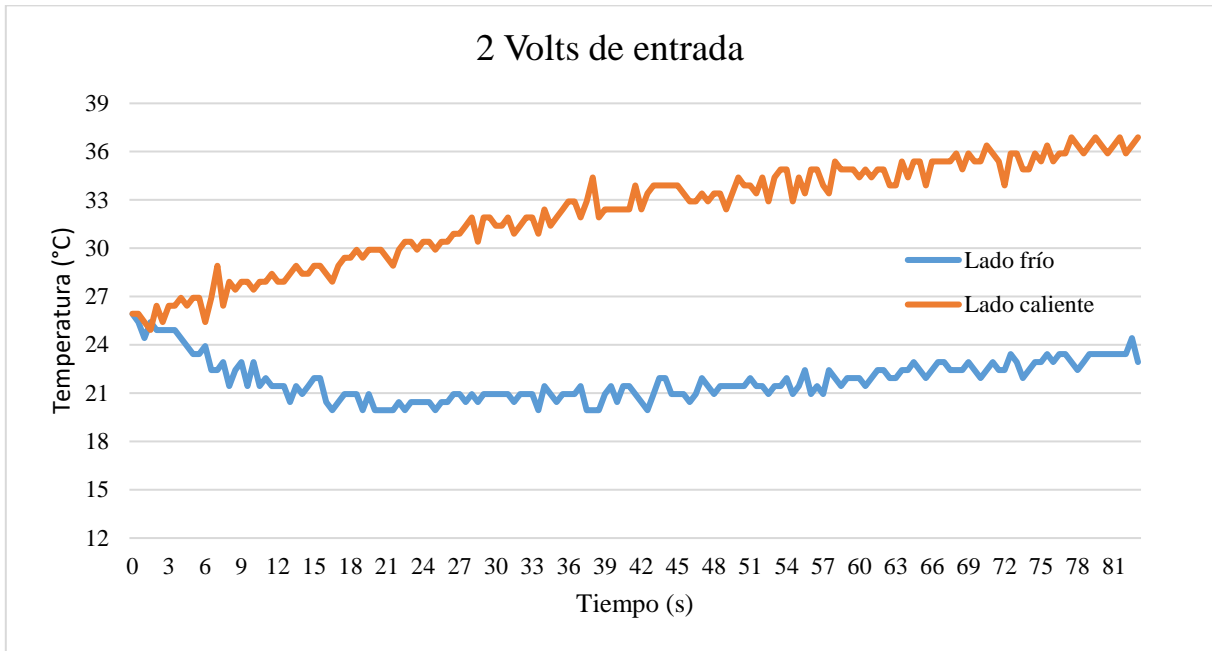


Figura 3.26: Celda Peltier a 2 Volts de alimentación.

El cambio de temperatura es de:  $\Delta t = 36^{\circ}\text{C} - 24^{\circ}\text{C} = 12^{\circ}\text{C}$ , y se presenta a partir en 24 segundos. La figura 3.27 muestra la respuesta de la celda Peltier cuando es energizado en 1 V.

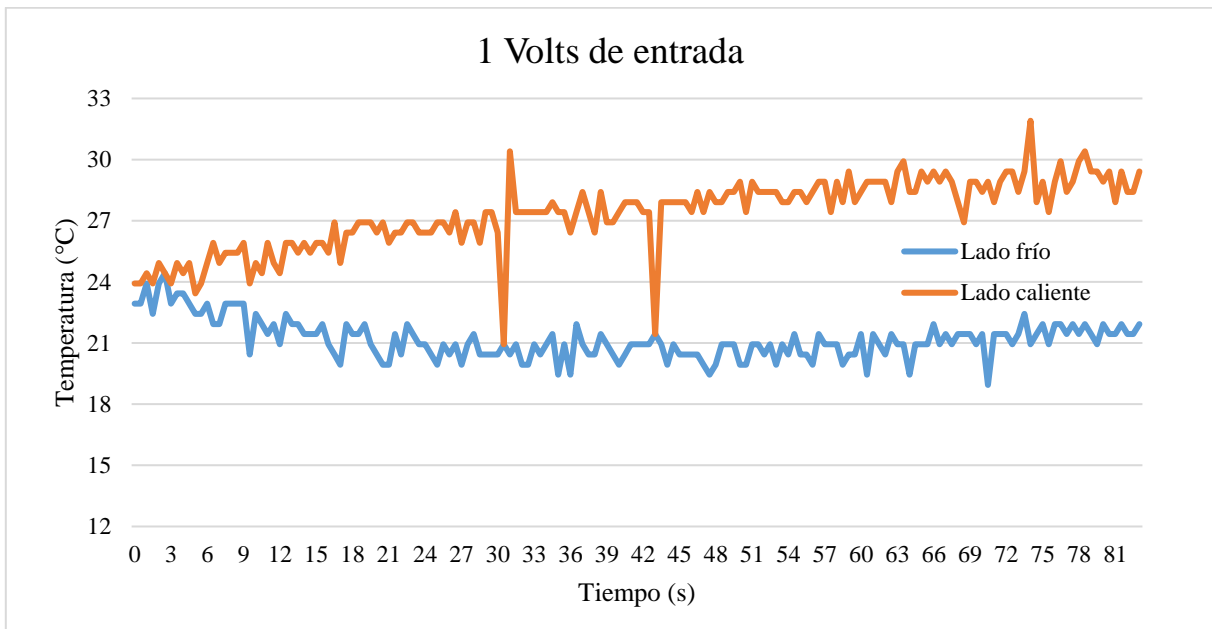


Figura 3.27: Celda Peltier a 1 Volts de alimentación.

El cambio de temperatura es de:  $\Delta t = 29^{\circ}\text{C} - 21^{\circ}\text{C} = 8^{\circ}\text{C}$ , y se presenta a partir en 30 segundos. La figura 3.28 muestra la respuesta de la celda Peltier a 5 volts de alimentación durante 92 segundos, pero, ahora con un disipador con las siguientes dimensiones; 2.1 cm. de ancho, 9.9 cm. de largo, 2.5mm. de grosor.

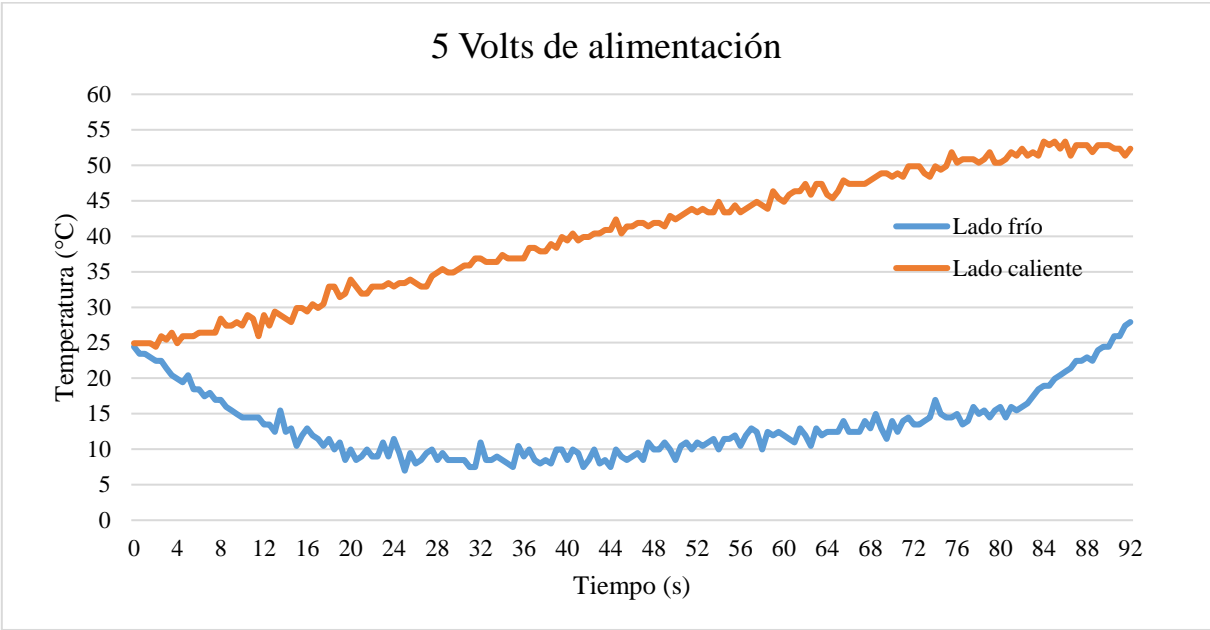


Figura 3.28: Celda Peltier a 5 Volts de alimentación.

La figura 3.29 muestra la respuesta del sistema con tres celdas peltier como resultado del diagrama de bloques de la figura 3.3, esto con la finalidad de encontrar el número de celdas peltier óptimas.

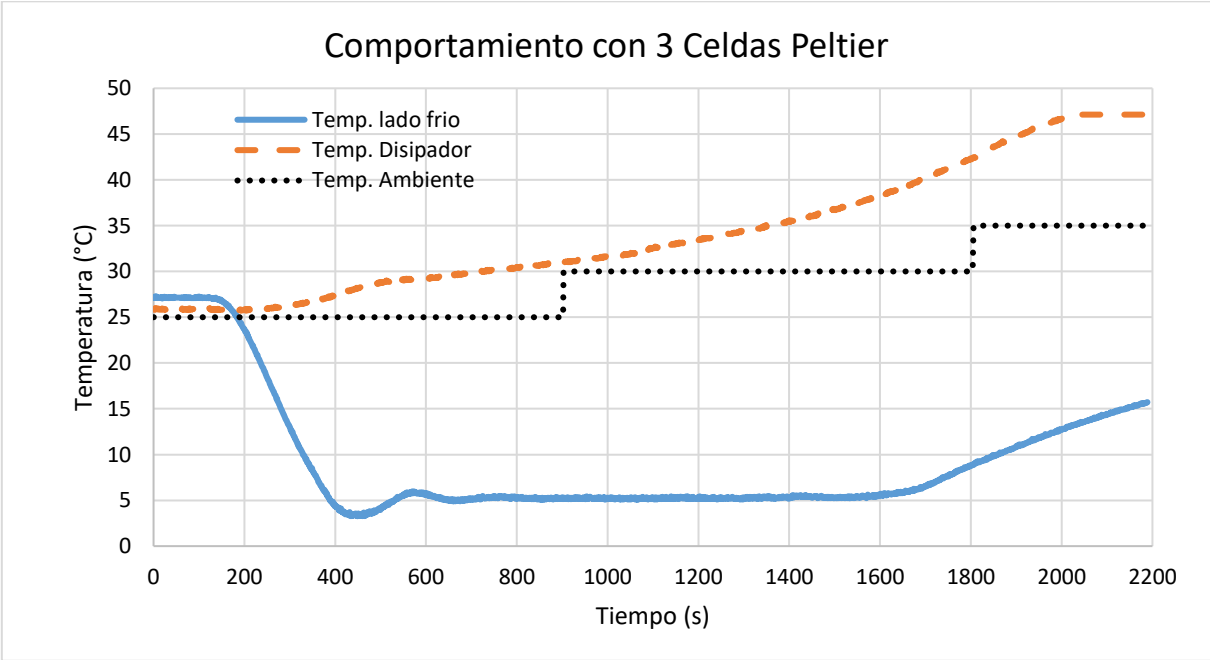


Figura 3.29: Desempeño con 3 celdas Peltier.

La línea de color azul representa la temperatura del lado frío de la celda peltier, la línea de color negra representa la temperatura del medio ambiente, y la línea de color anaranjado representa la temperatura del disipador. La temperatura del medio ambiente incrementa 5 °C cada 15 minutos.

Respecto a la figura 3.29, aproximadamente en 730 segundos representa el control en estado estable, el voltaje es 2.72V y la corriente es de 1.7A, por lo tanto, la potencia es:

$$P = (1.7A) * (2.72V) = 4.624W. \quad (3.22)$$

Y en 1538 segundos donde el sistema sale de control, se tiene voltaje de 4.16V y corriente de 2.6A, por lo tanto, la potencia es:

$$P = (2.6A) * (4.16V) = 10.816W \quad (3.23)$$

La figura 3.30 muestra el comportamiento con 4 celdas peltier. La línea de color azul representa la temperatura del lado frío de la celda peltier, la línea de color negra representa la temperatura del medio ambiente, y la línea de color anaranjado representa la temperatura del disipador.

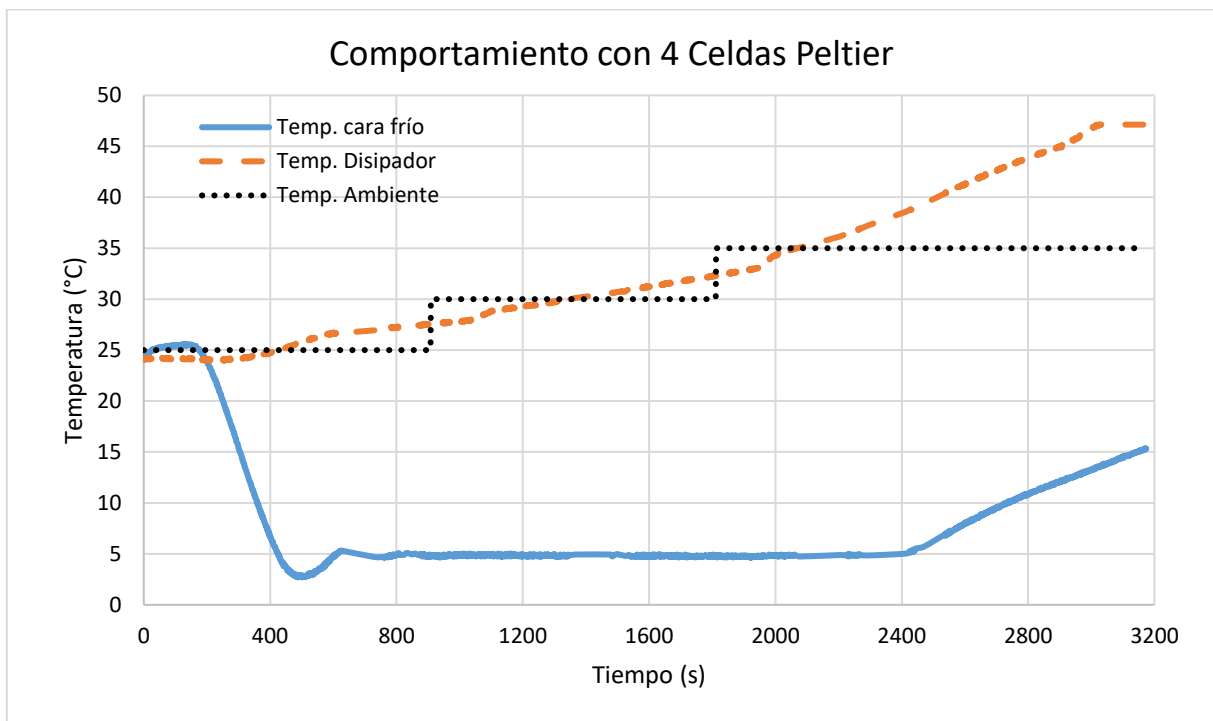


Figura 3.30: Desempeño con cuatro celdas Peltier.

Respecto a la figura 3.30, aproximadamente en 891 segundos el sistema está en estado estable, el voltaje es 2.832V y la corriente es de 1.7A, por lo tanto, la potencia es:

$$P = (1.7A) * (2.832V) = 5.01W \quad (3.24)$$

Y en 2415 segundos el sistema sale de control; se tiene un voltaje de 4.16V y una corriente de 2.6A, por lo tanto, la potencia es:

$$P = (2.6A) * (4.16V) = 10.816W \quad (3.25)$$

La figura 3.31 muestra el comportamiento con 5 celdas peltier. La línea de color azul representa la temperatura del lado frío de la celda peltier. La línea de color negra representa la temperatura del medio ambiente, y la línea de color anaranjado representa la temperatura del disipador.

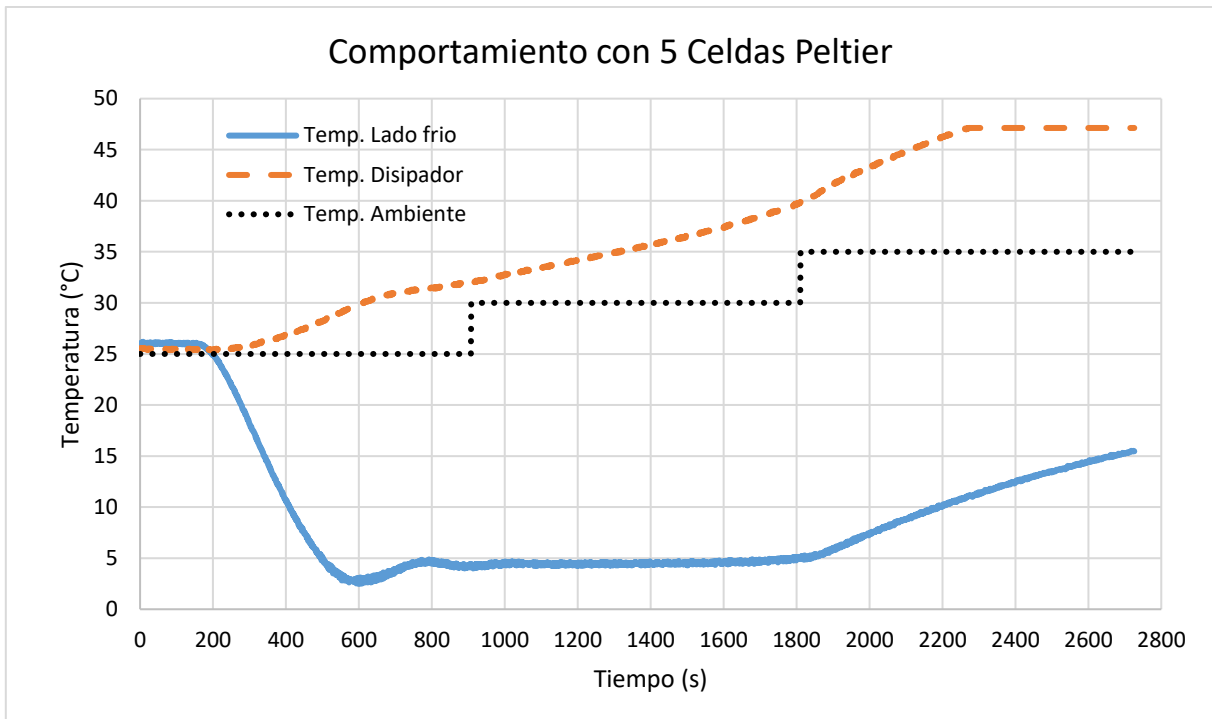


Figura 3.31: Desempeño con cinco celdas Peltier.

Respecto a la figura 3.31, aproximadamente en 1066 segundos representa el control en estado estable, el voltaje es 2.2V y la corriente de 3.52A, por lo tanto, la potencia es:

$$P = (2.2V) * (3.52A) = 8.195W \quad (3.26)$$

Y en 1575 segundos donde el sistema sale de control, se tiene un voltaje de 5V y una corriente de 3.13A, por lo tanto, la potencia es:

$$P = (5V) * (3.13A) = 15.765W \quad (3.27)$$

De las figuras 3.29, 3.30 y 3.31, se observó que el número de celdas a trabajar es con 4, debido a que la temperatura del disipador se encuentra inferior al incremento de la temperatura ambiente, además el tiempo donde el sistema se sale de control es en 2415 segundos. Cuando la temperatura del disipador alcanza aproximadamente los 40 °C, el

sistema se sale de control. La sugerencia fue colocar dos barras de aluminio con dimensiones de 20 cm. x 10cm., esto con la finalidad de disipar el calor generados en las celdas peltier. La figura 3.32 muestra el comportamiento con 4 celdas peltier incluida las barras de aluminio, en un tiempo aproximado de 21000 segundos.

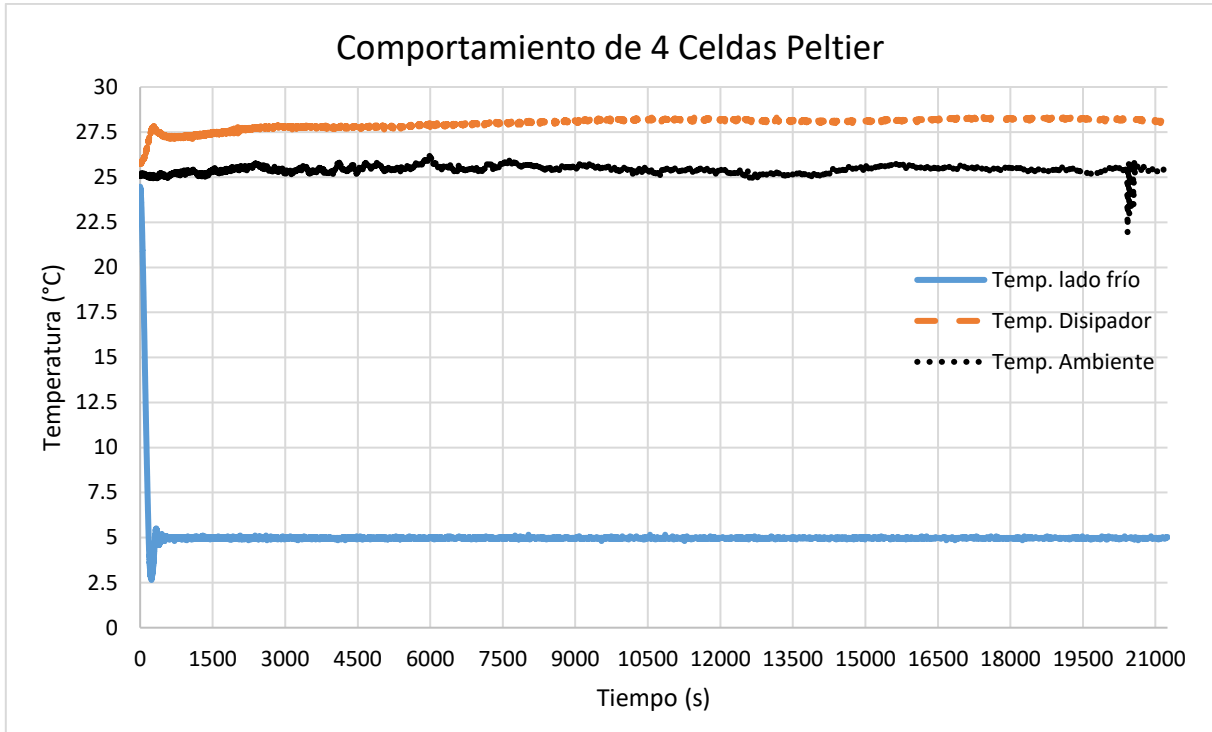


Figura 3.32: Desempeño de un control de temperatura.

De acuerdo con la figura 3.32, en 762 segundos el sistema está en estado estable, el voltaje es 2.36V y la corriente de 1.48A, por lo tanto, la potencia es:

$$P = (1.48A) * (2.36V) = 3.5046W \quad (3.28)$$

La figura 3.33 muestra el comportamiento de dos lazos de control para dos fotodiodos de avalancha. La línea de color negra representa el control 1, mientras que la línea naranja representa el control 2. Por cada lazo de control se utilizaron cuatro celdas peltier en paralelo, el cual la cara fría va al fotodiodo de avalancha y la cara caliente al disipador. El sensor de temperatura LM35 está colocado en una de las esquinas de la cara fría de la celda peltier.

La prueba inició a temperatura ambiente aproximadamente en 18°C, duró 19500 segundos. En estado estable; en el control 1 se tuvo una corriente de 1.7A, un voltaje de 2.6V, por lo tanto, la potencia eléctrica fue de  $P=4.42W$ . En el control 2; se tuvo una corriente de 1.48A, un voltaje de 2.36V, por lo tanto, la potencia fue de  $P=3.5046W$ .

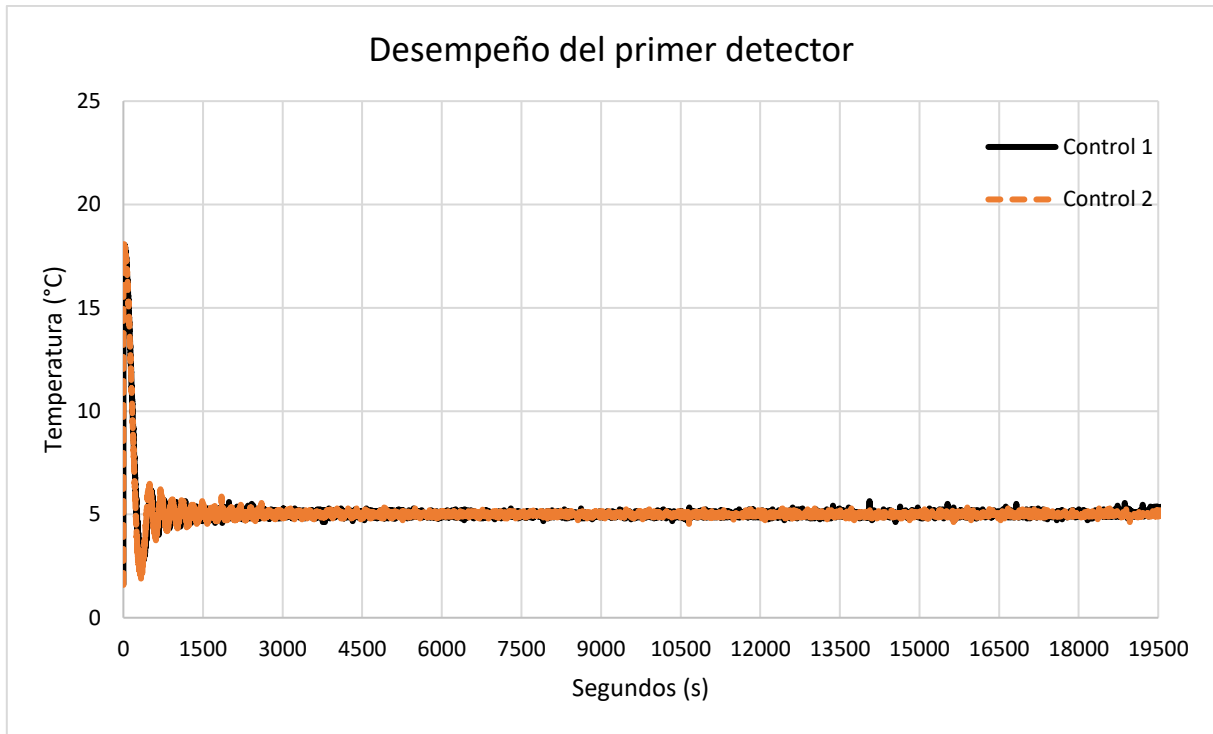


Figura 3.33: Desempeño del primer detector.

### 3.6 Conclusiones

En el presente capítulo se presentó el tipo de celda peltier que se utilizó para el control de temperatura, los dos diagramas de control para encontrar el número óptimo de celdas peltier, la etapa de potencia, y las tarjetas de adquisición.

La Ec. 3.1 es muy importante, porque describe la transferencia de calor, el cual se observa que es directamente proporcional a la corriente. En un inicio el control de temperatura era a través de voltaje, pero el sistema se salía de control y variaba la temperatura en un rango de  $1^{\circ}\text{C}$ , además la alta corriente a ciertos voltajes, y por lo tanto se incrementa la potencia.

La importancia de la ley de control de temperatura de la celda peltier Ec. 3.16 radica en que mantiene la energía de la celda cuando el error es cero, esto lo hace muy importante y eficiente debido a que antes la ley de control solo implicaba la función hiperbólica  $\tanh()$  y en ese entonces la temperatura de la celda se disparaba cuando el error era cero. Por lo tanto, la respuesta de temperatura de la celda peltier es una función no lineal.

El control de temperatura a través de las celdas peltier se realizó de manera exitosa, prueba de ello es que se realizó durante la tarde, iniciando a medio día y terminando más de las 5 de la tarde, es decir donde la temperatura del medio ambiente alcanza su máximo. El inconveniente es cuando la temperatura desciende a partir de  $5^{\circ}\text{C}$ , los disipadores no alcanzan a extraer el calor que se genera por las celdas peltier.

# Capítulo 4

## 4. Caracterización del Fotodiodo de Avalancha

En este capítulo se describe la caracterización del fotodiodo de avalancha. En el primer apartado se realiza la caracterización de la fuente de luz; Laser VCSEL, a través de un fotodiodo PIN. En el segundo apartado se reemplaza el fotodiodo PIN por el fotodiodo de avalancha en modo fotovoltaico. Después se energiza el fotodiodo de avalancha con voltaje negativo y finalmente se opera con el control de temperatura. Y finalmente se presenta el experimento de óptica cuántica, y las respuestas del detector GSAPD9-500 y el detector C30902. Se analizan los resultados y se menciona cual detector es más eficiente.

### 4.1 Caracterización del detector 1A354.

La figura 4.1 muestra el circuito eléctrico para caracterizar el Laser VCSEL D2 a través del fotodiodo PIN D3.

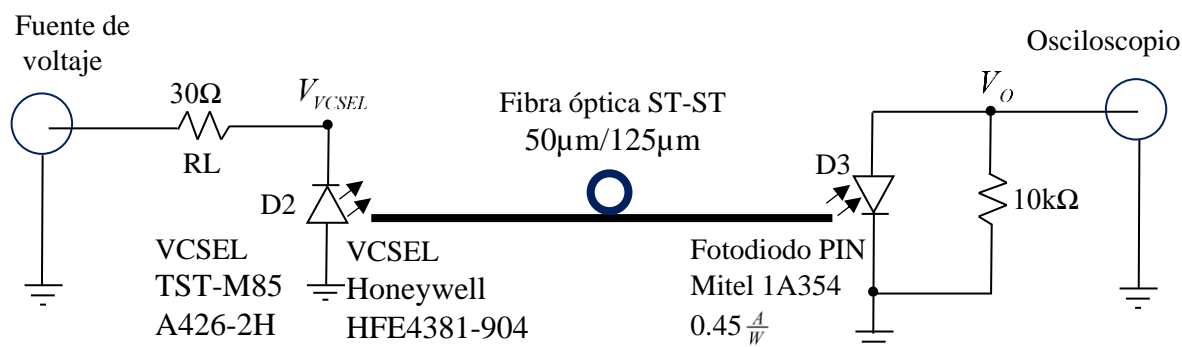


Figura 4.1: Circuito eléctrico para caracterizas VCSEL.

El VCSEL es energizado a través de una fuente de voltaje variable, en el cual se obtendrá los valores de la corriente que circula en VCSEL y también su voltaje, y la resistencia de  $30\Omega$  es utilizado para limitar la corriente. La conexión entre el VCSEL y el fotodiodo PIN es a través de fibra óptica multimodo con conector ST-FC. El fotodiodo PIN es conectado en modo fotovoltaico a través de una resistencia de  $10k\Omega$ , y el voltaje es medido en un voltímetro.

Las características eléctricas-ópticas del VCSEL Laser modelo TST-M85A426-2H son: corriente de umbral=3.5mA, potencia óptica=1.5mW, voltaje directo=2.2V, voltaje de ruptura=14V, longitud de onda=850nm, temperatura de operación=-40°C a 85°C [41].

D3 es un fotodiodo PIN 1A35A de GaAs, su alta velocidad y baja capacitancia lo hace ideal para la comunicación de datos y aplicaciones de propósito general. Su sistema óptico de doble lente está diseñado para fibra monomodo, así como para fibra multimodo con un diámetro de núcleo hasta 62.5µm. La ventaja de éste detector es que se diseñó en el laboratorio de robótica y control de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, además de que cuenta con conector ST para fibra óptica. Las características principales son; responsividad = 0.45A/W, ancho de banda = 1GHz, capacitancia = 2pF, corriente oscura = 1nA, temperatura de operación = -55°C a +125°C, voltaje inverso = 30V [42].

El voltaje en el fotodiodo PIN 1A354 de la figura 4.1, es:

$$V_o = \mathfrak{R}P_oR. \quad (4.1)$$

donde  $\mathfrak{R}$  es la responsividad,  $P_o$  es la potencia óptica,  $R$  es la resistencia. Sustituyendo  $\mathfrak{R}$  y  $R$ , se tiene:

$$V_o = 0.45 \frac{A}{W} P_o (10000\Omega) \quad (4.2)$$

Despejando  $P_o$  de la Ec. 4.2, se tiene:

$$P_o = \frac{V_o}{0.45 \frac{A}{W} (10000\Omega)} \quad (4.3)$$

$$P_o = \frac{V_o}{4500 \frac{V}{W}} \quad (4.4)$$

donde la  $V_o$  es el voltaje medido del fotodiodo PIN a través del voltímetro.

En la tabla 4.1 se muestra la corriente, el voltaje en cada VCSEL y la potencia óptica de los VCSEL T-M85A426-2 y el VCSEL HFE4381-904. El VCSEL TST-M85A426-2H se energizó a una corriente de 3.5mA debido a su máxima corriente de 2mA.

La figura 4.2 muestra la potencia óptica en función de la corriente eléctrica del VCSEL; TST-M85A426-2H y Honeywell HFE4381-904. Se observa como la señal del VCSEL TST-M85A426-2H no es estable, tiene una respuesta de 200uW durante un 1 mA, en comparación del VCSEL HFE4381-904, ya que su respuesta es más suave.

Corriente (A) mA	VCSEL TST-M85A426-2mH			VCSEL Honeywell HFE4381-904		
	Voltaje de Fuente (V)	Voltaje VCSEL (V)	Potencia óptica (uW)	Voltaje de Fuente (V)	Voltaje VCSEL (V)	Potencia óptica (uW)
0	0.95	0.95	0.011	0.72	0.72	0.011
0.5	1.52	1.505	0.19	1.49	1.475	0.0133
1	1.68	1.65	0.76	1.62	1.59	0.02
1.5	1.8	1.755	1.85	1.74	1.695	0.026
2	1.92	1.86	5.75	1.84	1.78	0.035
2.5	2.02	1.945	47.8	1.95	1.875	0.051
3	2.12	2.03	160.75	2.06	1.97	0.073
3.5	2.25	2.145	203	2.16	2.055	0.12
4				2.26	2.14	4.68
4.5				2.35	2.215	26.44
5				2.44	2.29	51.62
5.5				1.98	1.815	80.33
6				2.03	1.85	102.73
6.5				2.07	1.875	133.33
7				2.12	1.91	146.66
7.5				2.16	1.935	155.55
8				2.21	1.97	168.88
8.5				2.25	1.995	173.33
9				2.3	2.03	180
9.5				2.34	2.055	182.22
10				2.45	2.15	193.44

Tabla 4.1: Caracterización de los VCSEL: TST-M85A426-2H y HFE4381-904.

En la figura 4.3 muestra la corriente eléctrica en función del voltaje. La señal de color rojo representa al VCSEL TST-M85A426-2H y la señal azul representa al VCSEL HFE4381-904. Donde se observa que los dos tienen la misma respuesta, excepto que en la señal azul se caracterizó con mayor corriente.

Después de analizar las gráficas 4.2 y 4.3, se determinó utilizar el VCSEL HFE4381-904, debido a que tiene una respuesta de potencia óptica más estable en un rango de corriente de 3.5 mA hasta 10 mA respecto al VCSEL TST-M85A426-2H.

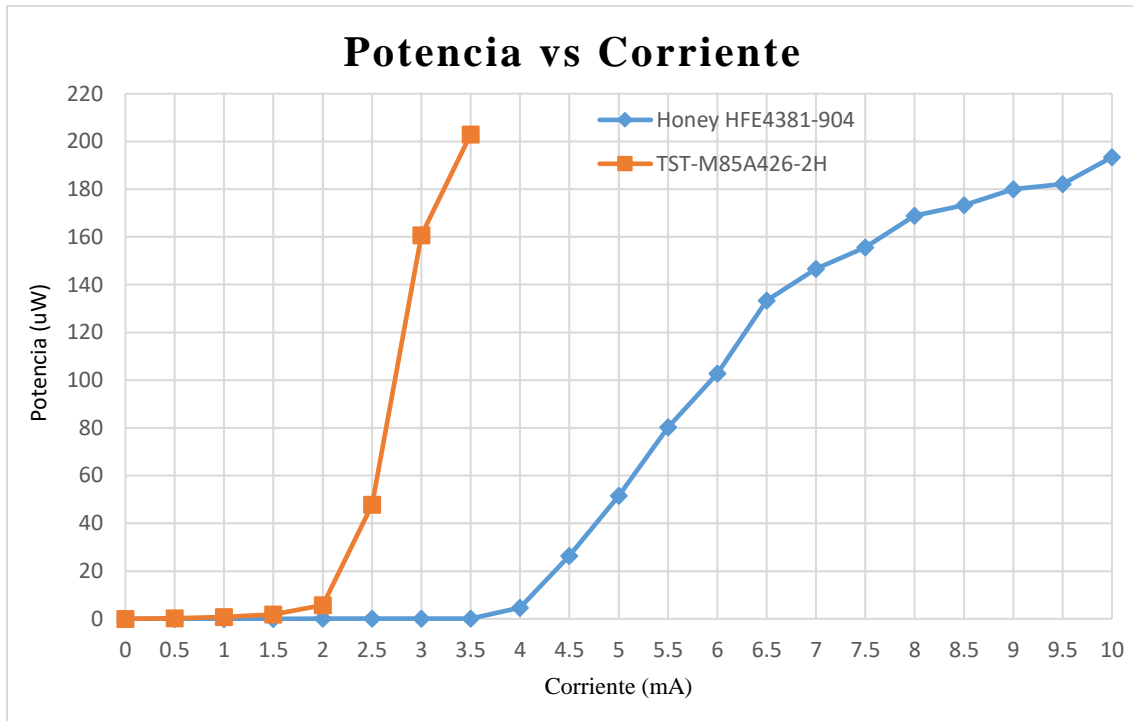


Figura 4.2: Potencia óptica como función de la corriente eléctrica.

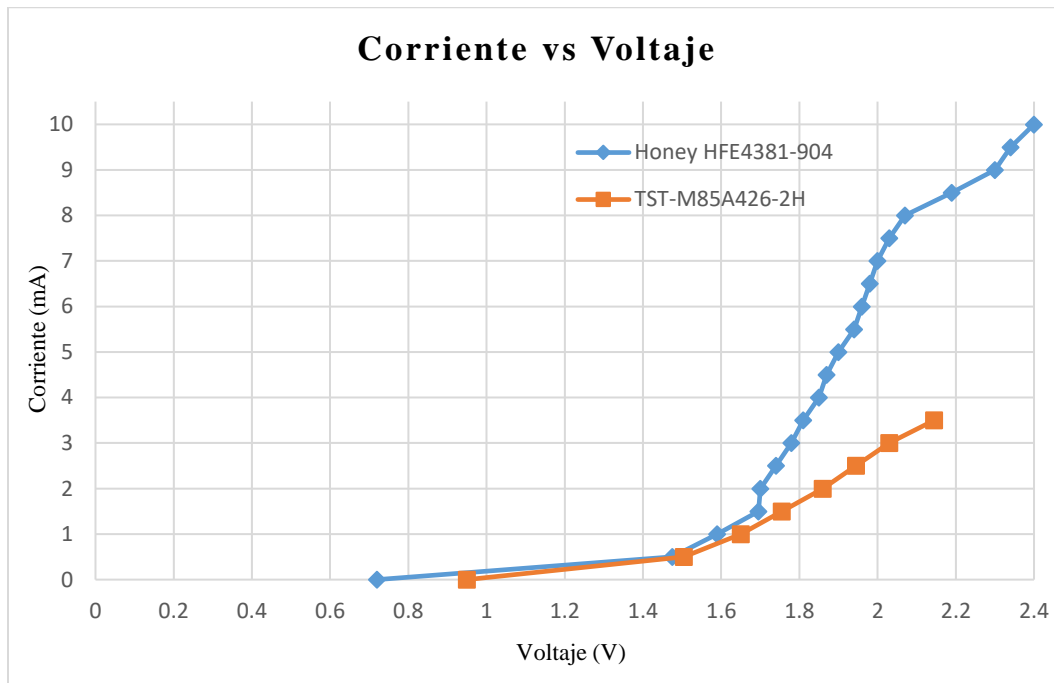


Figura 4.3: Corriente eléctrica como función del voltaje.

### 4.1.1 Número de fotones en 1μs con detector 1A354.

En el generador de ondas arbitrarias se realizó la siguiente configuración; voltaje en alto=1.8V, voltaje en bajo=1V, frecuencia=10KHz, ancho del pulso=1μS. La figura 4.4 muestra la señal obtenida en el osciloscopio, donde la señal azul marino representa la señal del generador de ondas arbitrarias, y la señal de color café es la respuesta del fotodiodo PIN. La amplitud de la respuesta del detector es aproximadamente 0.8mV y también se muestra un pulso ideal de 1μs de color rojo, el cual servirá para medir la potencia óptica, en este caso el pulso rojo está en coincidencia con el pulso de color azul, por lo tanto, se puede afirmar que la potencia en ambos pulsos es la misma.



Figura 4.4: Pulso generado vs respuesta del fotodiodo PIN a 1μs.

Sustituyendo el voltaje 0.8mV obtenido de la figura 4.4 en la Ec. 4.4, se tiene:

$$P_0 = \frac{0.0008V}{0.45 \frac{A}{W} (10k\Omega)} \quad (4.5)$$

$$P_0 = 170 \times 10^{-9} W. \quad (4.6)$$

“La potencia es la variación respecto del tiempo de entrega o absorción de la energía, medida en watts (W). Esta relación se escribe como”:

$$p = \frac{w}{dt} \quad (4.7)$$

donde  $p$  es la potencia en watts (W);  $w$  es la energía en Joules (J), y  $t$  es el tiempo, en segundos (s) [31]. Despejando  $w$  de la Ec. 4.7, se tiene:

$$w = p(dt) \quad (4.8)$$

Sustituyendo el tiempo del ancho del pulso y la Ec. 4.6 en la Ec. 4.8, se tiene:

$$w = (170nW)(1\mu s) \quad (4.9)$$

$$w = 1700x10^{-16} J \quad (4.10)$$

“Cada fotón acarrea una cantidad bien definida de energía, que depende sólo de su longitud de onda. Aunque un fotón puede concebirse como una partícula de energía, sigue teniendo asociada una longitud de onda fundamental, equivalente a la de la onda de propagación. La energía de un solo fotón está dada en términos de su frecuencia  $f$  o de su longitud de onda  $\lambda$ , como” [43]:

$$W_{fot} = hf = h \frac{c}{\lambda} \quad (4.11)$$

donde  $h = 663x10^{-36} Js$  es la constante de Planck,  $c = 300x10^6 \frac{m}{s}$  es la velocidad de propagación del fotón en el espacio libre.

La energía de un fotón a la longitud de onda del VCSEL  $\lambda = 850x10^{-9}m$ :

$$W_{fot} = 663x10^{-36} Js \left( \frac{300x10^6 \frac{m}{s}}{850x10^{-9} m} \right) \quad (4.12)$$

$$W_{fot} = 0.234x10^{-18} J \quad (4.13)$$

Ahora para obtener el número de fotones en  $P_0 = 150x10^{-9}W$ , se divide la Ec. 4.11 entre la Ec. 4.13, se tiene:

$$N_F = \frac{1700x10^{-16} J}{0.234x10^{-18} J} \quad (4.14)$$

$$N_F = 726495.72 \quad (4.15)$$

Por lo tanto, a través del nuevo VCSEL se tiene 641025.64 fotones, una cantidad considerable debido a que se está utilizando el fotodiodo PIN.

#### 4.1.2 Número de fotones en 100ns con detector 1A354.

La figura 4.5 muestra la respuesta del detector PIN 1A354 con un periodo de 100ns. La amplitud de la respuesta del detector es aproximadamente 0.8mV. Se observa que el pulso de color rojo no está en coincidencia con el pulso de color azul, por lo tanto, la potencia no es la misma y es menor a 170nW. El área del pulso color rojo en 100ns es:



Figura 4.5: Respuesta del detector a un ancho de pulso de 100ns.

$$A_{100ns} = (100ns)(800mV) \quad (4.16)$$

$$A_{100ns} = 80x^{-9}sV \quad (4.17)$$

El área  $A_{100ns} = 80x^{-9}sV$  equivale a 170nW, ahora se prosigue a calcular el área del pulso azul. Se divide en 2 triángulos, los cuales son:

$$A_{t1} = \frac{(14ns)(800mV)}{2} = 5.6x^{-9}sV \quad (4.18)$$

$$A_{t2} = \frac{(10ns)(800mV)}{2} = 4x^{-9}sV \quad (4.19)$$

Se suma la Ec. 4.18 y 4.19, y se resta a la Ec. 4.17.

$$A_3 = 80x^{-9}sV - 5.6x^{-9}sV - 4x^{-9}sV \quad (4.20)$$

$$A_{\lambda 3} = 70.4x^{-9}sV \quad (4.21)$$

Se calcula la nueva potencia óptica, por medio de la regla del 3:

$$P_{100ns} = \frac{(70.4x^{-9}sV)(170nW)}{80x^{-9}sV} \quad (4.22)$$

$$P_{100ns} = 149.69nW \quad (4.23)$$

Sustituyendo la Ec. 4.23 en la Ec. 4.8, se tiene:

$$w = (149.69nW)(100ns) \quad (4.24)$$

$$w = 149.69x10^{-16} J \quad (4.25)$$

Ahora para obtener el número de fotones en  $P_0 = 129x10^{-9}W$ , se divide la Ec. 4.25 entre la Ec. 4.13, se tiene:

$$N_F = \frac{149.69x10^{-16} J}{0.234x10^{-18} J} \quad (4.26)$$

$$N_F = 63970.08 \text{ fotones} \quad (4.27)$$

### 4.1.3 Número de fotones en 50ns con detector 1A354.

La figura 4.16 muestra la respuesta del detector PIN 1A354 señal café, con respecto a la señal del generador de funciones señal azul. La prueba se realizó en un ancho de pulso de 50ns. La amplitud de la respuesta del detector es aproximadamente 0.8mV.

Se observa que el pulso de color rojo no está en coincidencia con el pulso de color azul, por lo tanto, la potencia es menor a 170nW. El área del pulso color rojo en 50ns es:

$$A_{50ns} = (50ns)(800mV) \quad (4.28)$$

$$A_{100ns} = 40x^{-9}sV \quad (4.29)$$

El área  $A_{50ns} = 40x^{-9}sV$  equivale a 170nW, ahora se prosigue a calcular el área del pulso azul. Se divide en 2 triángulos y un rectángulo, los cuales son:

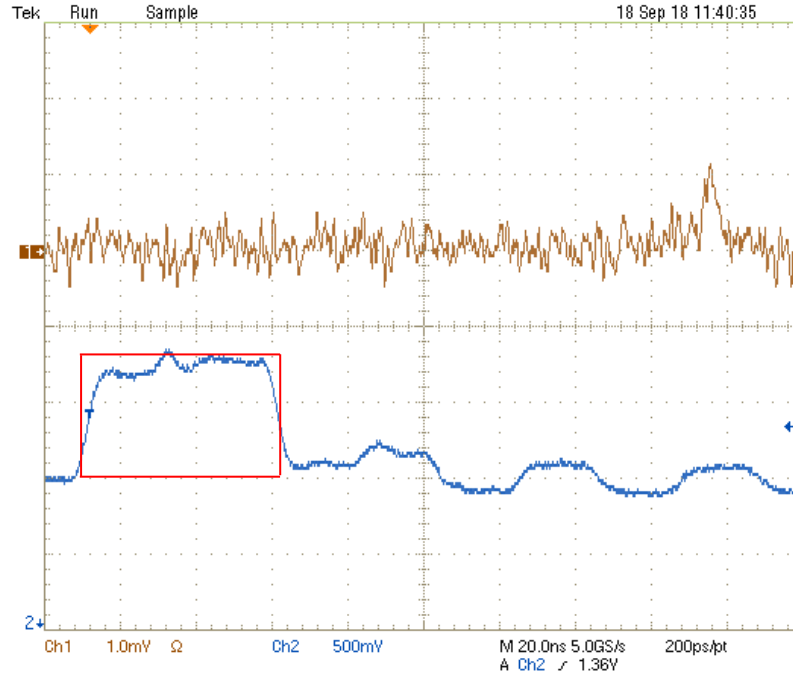


Figura 4.6: Respuesta del detector a un ancho de pulso de 50ns.

$$A_{t1} = \frac{(6ns)(800mV)}{2} = 2.4x^{-9}sV \quad (4.30)$$

$$A_{t2} = \frac{(4ns)(400mV)}{2} = 0.8x^{-9}sV \quad (4.31)$$

$$A_{t3} = \frac{(35ns)(100mV)}{2} = 1.75x^{-9}sV \quad (4.32)$$

Se suma la Ec. 4.30, 4.31 y 4.32, y se resta a la Ec. 4.29.

$$A_{t4} = 40x^{-9}sV - 2.4x^{-9}sV - 0.8x^{-9}sV - 1.75x^{-9}sV \quad (4.33)$$

$$A_{t3} = 35.05x^{-9}sV \quad (4.34)$$

Se calcula la nueva potencia óptica, por medio de la regla del 3:

$$P_{50ns} = \frac{(35.05x^{-9}sV)(170nW)}{40x^{-9}sV} \quad (4.35)$$

$$P_{50ns} = 148.96nW \quad (4.36)$$

Sustituyendo la Ec. 4.36 y el periodo en la Ec. 4.8, se obtiene:

$$w = (148.96nW)(50ns) \quad (4.37)$$

$$w = 74.48 \times 10^{-16} \quad (4.38)$$

Ahora para obtener el número de fotones en  $P_0 = 148.96 \times 10^{-9}W$ , se divide la Ec. 4.38 entre la Ec. 4.13, se tiene:

$$N_F = \frac{74.48 \times 10^{-16} J}{0.234 \times 10^{-18} J} \quad (4.39)$$

$$N_F = 31829.05 \text{ fotones} \quad (4.40)$$

Ese es el número de fotones que se ve con el detector PIN 1A354 con un periodo de 50ns y que nos servirá para caracterizar el fotodiodo de avalancha. Enseguida se comprobará con el detector comercial PIN 818-BB-21.

## 4.2 Caracterización del detector 818-BB-21

La figura 4.7 muestra el circuito eléctrico para adquirir la señal eléctrica del fotodiodo PIN comercial 818-BB-21.

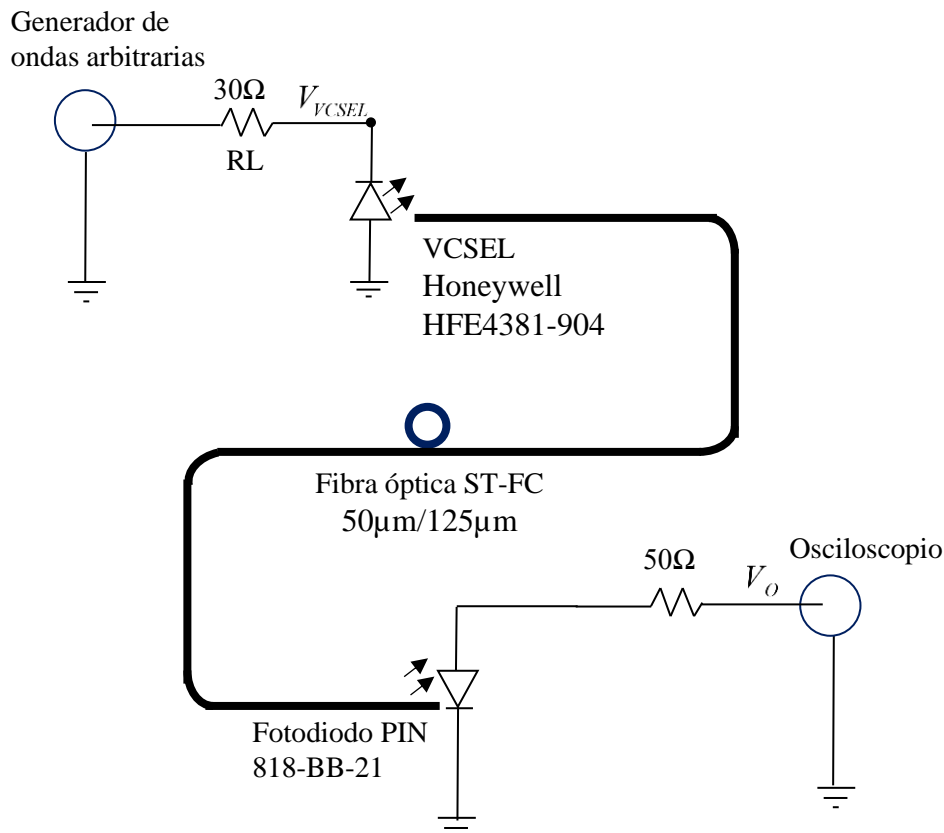


Figura 4.7: Circuito eléctrico de prueba del detector 818-BB-21.

La fuente de luz es el VCSEL Honeywell HFE4381-904 que se utilizó para caracterizar el detector 1A354.

La figura 4.8 muestra el detector PIN comercial 818.BB-21 vista de manera lateral. La incidencia de luz es a través del sensor de apertura y se realiza de manera manual ya que no cuenta con algún conector de fibra óptica, la señal eléctrica de salida es a través de conector BNC.

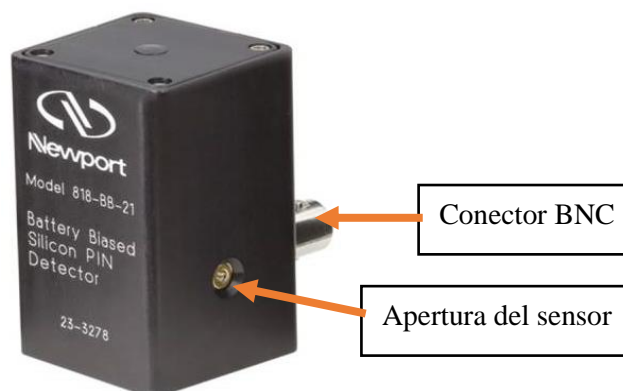


Figura 4.8: Vista lateral del detector PIN 818-BB-21.

Las aplicaciones del detector 818-BB-21, son: el monitoreo de salida de los laser Q-Switch, el monitoreo de salida de los lasers en modo bloqueo, el monitoreo de salida de modulación externa CW de lasers y mediciones de la respuesta en el dominio del tiempo y la frecuencia [44]. Las especificaciones eléctricas del detector PIN 818-BB-21 se muestran en la tabla 4.2.

Modelo	818-BB-21
Responsividad a 830nm	0.47A/W
Voltaje de alimentación	9VDC
Rango espectral	350-1100nm
Ancho de banda	>1.2GHz
Diámetro de área activa	0.4mm
Corriente oscura	<0.1nA
Ángulo de aceptación	10°
Potencia de ruido equivalente	<0.001pW/ $\sqrt{Hz}$
Conector de salidad	BNC

Tabla 4.2: Especificaciones del detector PIN 818-BB-21.

La figura 4.9 muestra la respuesta del detector 818-BB-20 señal café, con respecto a la señal del generador de funciones señal azul. La prueba se realizó en un ancho de pulso de 1 $\mu$ s. El

voltaje en alto de 1.8V, voltaje en bajo de 1V y el acople de impedancia en el osciloscopio fue de  $50\Omega$ . La amplitud de la respuesta del detector es aproximadamente 1mV.

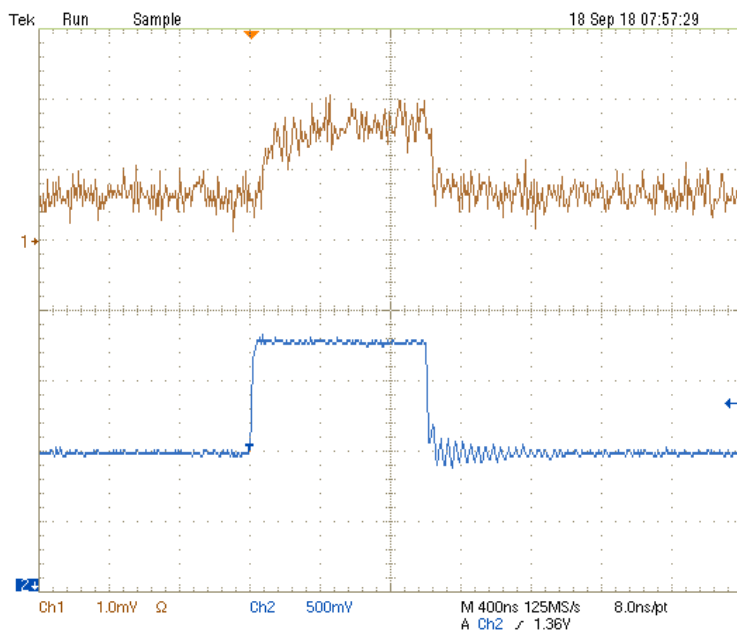


Figura 4.9: Respuesta de la punta óptica a un ancho de pulso de 1 $\mu$ s.

La figura 4.10 muestra la respuesta del detector 818-BB-21 señal café, con respecto a la señal del generador de funciones señal azul. La prueba se realizó en un ancho de pulso de 100ns. La amplitud de la respuesta del detector es aproximadamente 0.9mV.

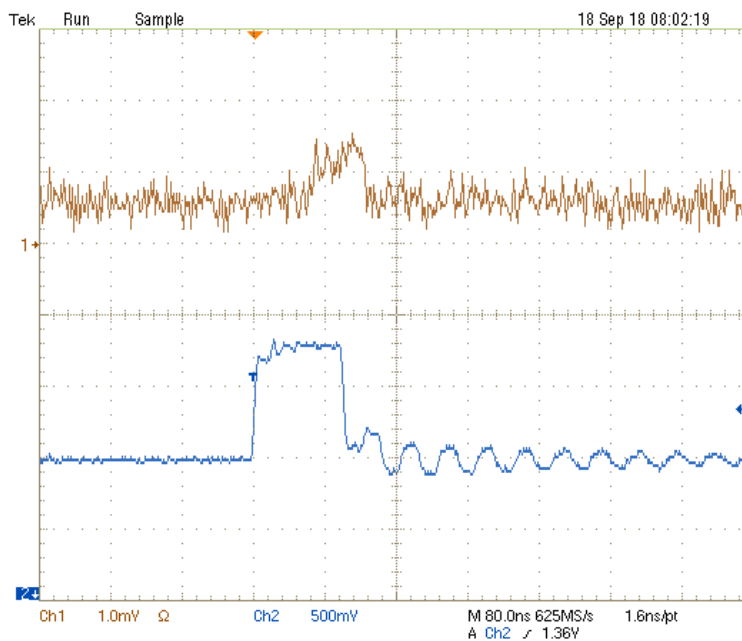


Figura 4.10: Respuesta de la punta óptica a un ancho de pulso de 100ns.

La figura 4.11 muestra la respuesta del detector 818-BB-21 señal café, con respecto a la señal del generador de funciones señal azul. La prueba se realizó en un ancho de pulso de 50ns. La amplitud de la respuesta del detector es aproximadamente 0.9mV.

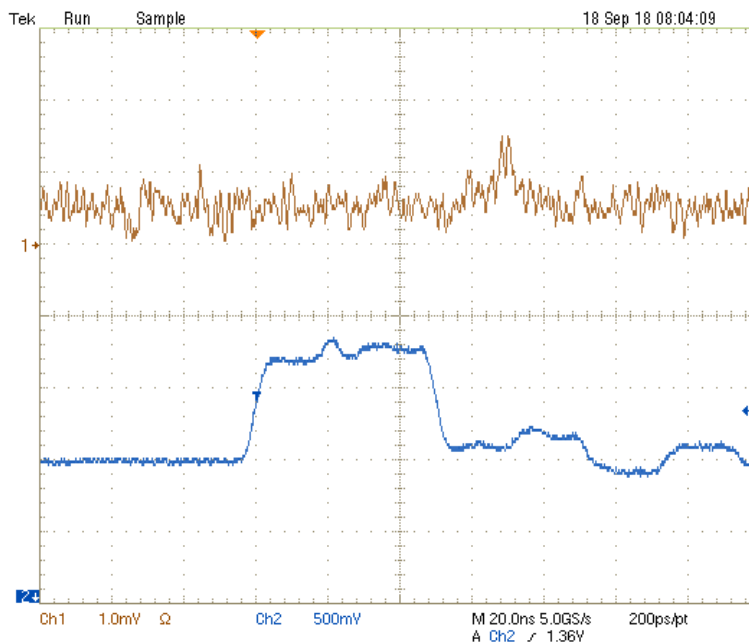


Figura 4.11: Respuesta de la punta óptica a un ancho de pulso de 50ns.

En el detector 818-bb-21 no se puede obtener el número de fotones a diferentes periodos, lo que si se logró es ver su respuesta y con esto afirmar que tiene un comportamiento muy parecido al detector 1A354 donde la respuesta en ambos detectores es en un periodo mínimo de 50ns.

### 4.3 Caracterización del APD GSAPD9-500

La figura 4.12 muestra el circuito eléctrico para adquirir la señal eléctrica del fotodiodo APD, donde se sustituyó el fotodiodo PIN, se añadió una etapa de amplificación con el OPA659 y una fuente de alto voltaje variable de 0 a -173V.

Se añadió un capacitor de 0.1uF al ánodo del fotodiodo APD de 0.1uF, esto con la finalidad de atenuar el ruido. Se debe de tener cuidado con la resistencia de retroalimentación, ya que cuanto mayor es su valor, el ancho de banda se reduce.

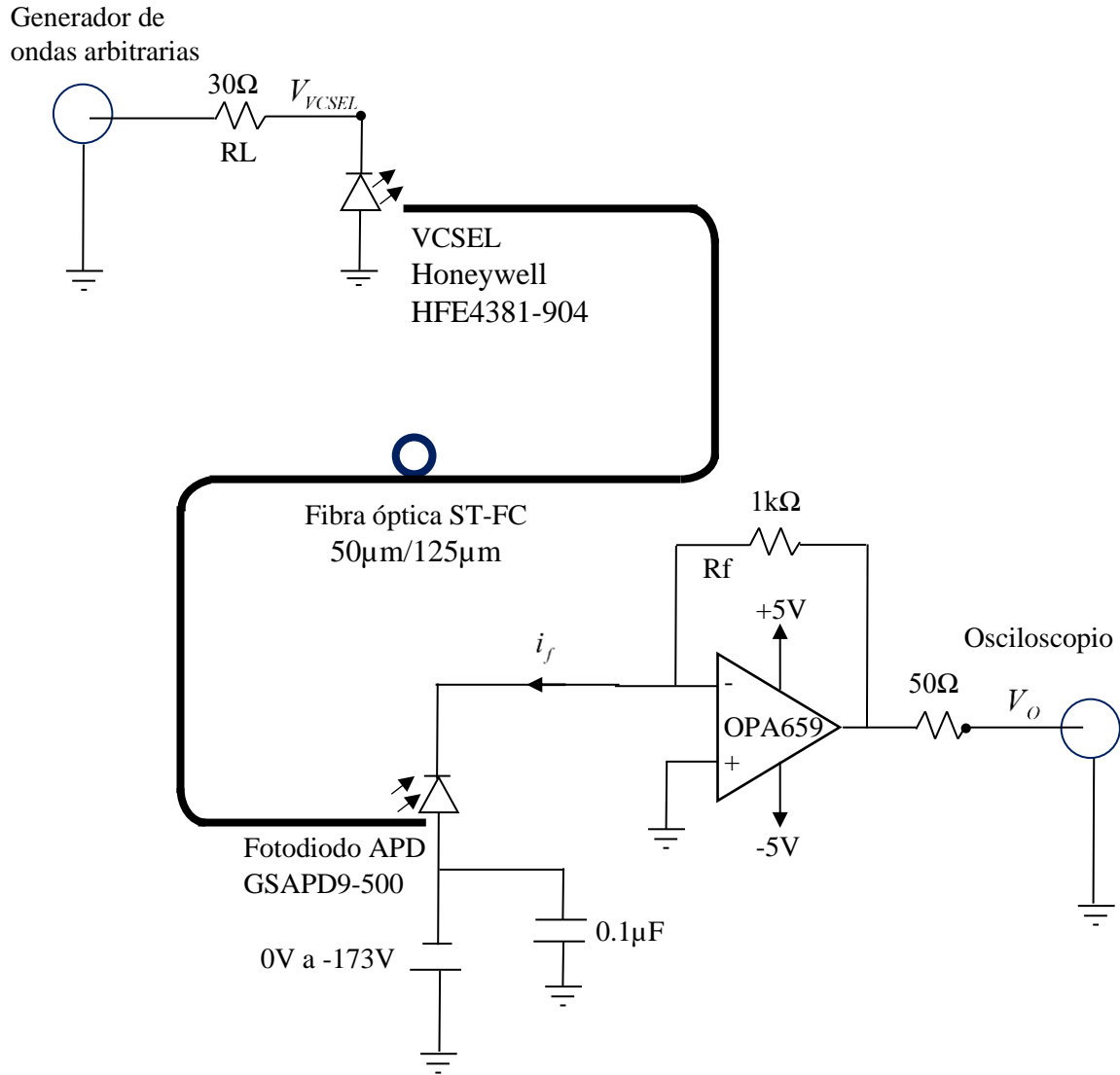


Figura 4.12: Etapa de caracterización del APD.

El voltaje de salida del OPA659 se obtiene mediante la Ec. 2.16. Sustituyendo el valor de  $R_f$ , se tiene:

$$V_{sal} = (10K\Omega)i_f, \quad (4.41)$$

Se prosigue a encontrar los voltajes de ruptura del fotodiodo de avalancha respecto a la temperatura. La figura 4.13 muestra dos líneas; en la primera están los datos experimentales obtenidos y la otra línea es una aproximación por medio de aproximación de mínimos cuadrados.

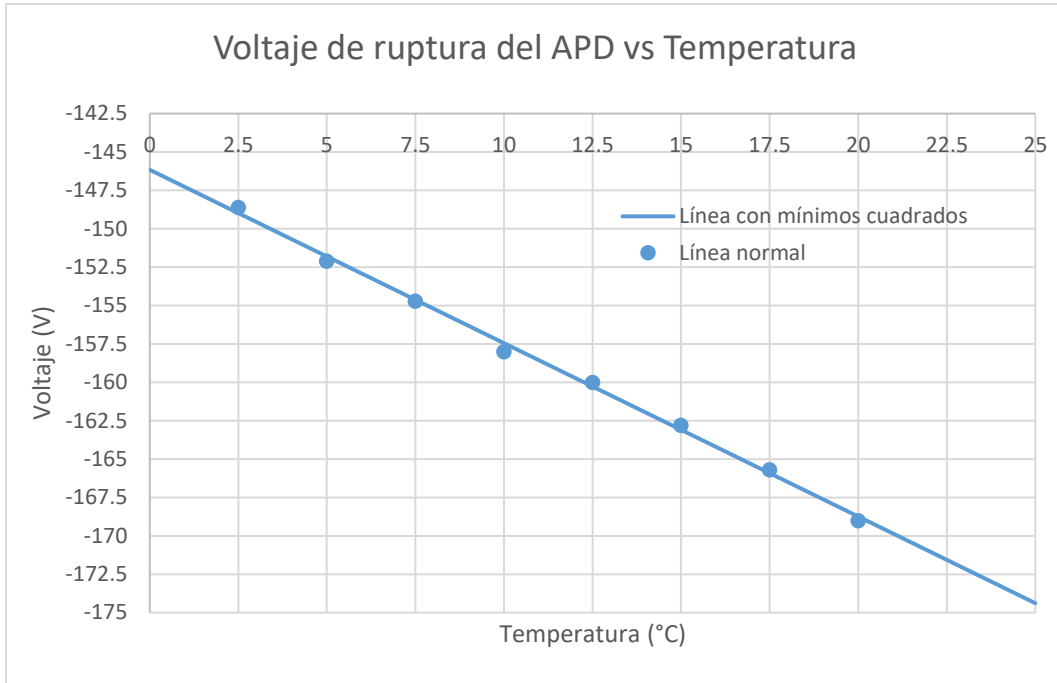


Figura 4.13: Voltajes de rupturas respecto a la temperatura del APD.

“El método de mínimos cuadrados es un procedimiento para ajustar una línea recta a un conjunto de datos obtenidos con mediciones. Si conocemos la ordenada al origen  $\alpha$  y la pendiente  $\beta$ , entonces la abscisa de la recta correspondiente a la ordenada  $x_i$  es  $\alpha + \beta x_i$  donde  $\alpha$  y  $\beta$  son” [33]:

$$\alpha = \frac{\left(\sum_{i=1}^N x_i^2\right)\left(\sum_{i=1}^N y_i\right) - \left(\sum_{i=1}^N x_i\right)\left(\sum_{i=1}^N x_i y_i\right)}{N \sum_{i=1}^N x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N x_i\right)^2} \quad (4.42)$$

$$\beta = \frac{N \sum_{i=1}^N x_i y_i - \left(\sum_{i=1}^N x_i\right)\left(\sum_{i=1}^N y_i\right)}{N \sum_{i=1}^N x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N x_i\right)^2} \quad (4.43)$$

	Temperatura (°C)	Voltaje (V)	[Temperatura (°C)]*[Voltaje (V)]	[Temperatura (°C)] <sup>2</sup>	Orden
	2.5	-148.6	-371.5	6.25	
	5	-152.1	-760.5	25	
	7.5	-154.7	-1160.25	56.25	
	10	-158	-1580	100	
	12.5	-160	-2000	156.25	
	15	-162.8	-2442	225	
	17.5	-165.7	-2899.75	306.25	
	20	-169	-3380	400	
<b>Suma</b>	90	-1270.9	-14594	1275	N=8

Tabla 4.3: Obtención de parámetros para mínimos cuadrados.

Sustituyendo los valores obtenidos de la tabla 8 en Ec. 103 y Ec. 104, se obtiene:

$$\alpha = \frac{(-1270.9)(1275) - (90)(-14594)}{8(1275) - (90)^2} = -145.160 \quad (4.44)$$

$$\beta = \frac{-8(-14594) - (90)(-1270.9)}{8(1275) - (90)^2} = -1.12904 \quad (4.45)$$

Por lo tanto, la ecuación de la recta que pasa por los puntos es:

$$y = -1.12904x - 146.160 \quad (4.46)$$

### 4.3.1 Número de fotones en 8ns con APD GSAPD9-500.

Se toma como referencia la configuración del fotodiodo PIN; VH= 1.8V, VL=1V, pero ahora el periodo de la señal es de: T=8ns. La figura 4.14 muestra el pulso generado de color azul y la respuesta del fotodiodo de avalancha de color lila a temperatura 10°C.

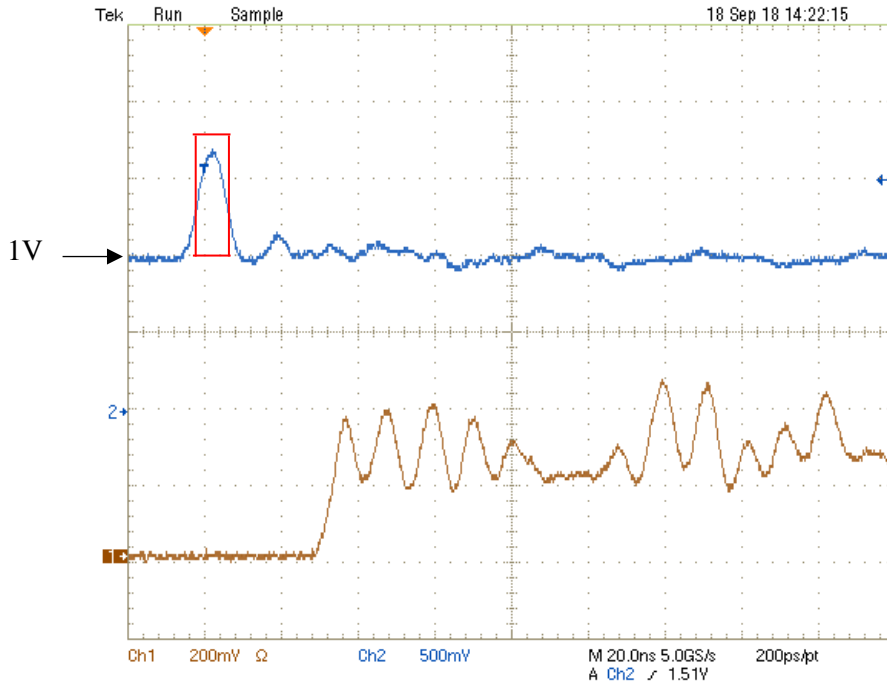


Figura 4.14: Respuesta del APD GSAPD9-500 a un ancho de pulso de 8ns.

Se observa que el pulso de color rojo no está en coincidencia con el pulso de color azul, por lo tanto, la potencia es menor a 170nW. El área del pulso color rojo en 8ns es:

$$A_{8ns} = (8ns)(800mV) \quad (4.47)$$

$$A_{8ns} = 6.4x^{-9}sV \quad (4.48)$$

El área  $A_{8ns} = 6.4x^{-9}sV$  equivale a 170nW, ahora se prosigue a calcular el área del pulso azul. Se divide en 2 triángulos y un rectángulo, los cuales son:

$$A_{t1} = \frac{(8ns)(400mV)}{2} = 1.6x^{-9}sV \quad (4.49)$$

$$A_{t2} = \frac{(6ns)(400mV)}{2} = 1.2x^{-9}sV \quad (4.50)$$

$$A_{t3} = (8ns)(150mV) = 1.2x^{-9}sV \quad (4.51)$$

Se suma la Ec. 4.49, 4.50 y 4.51, y se resta a la Ec. 4.48.

$$A_4 = 6.4x^{-9}sV - 1.6x^{-9}sV - 1.2x^{-9}sV - 1.2x^{-9}sV \quad (4.52)$$

$$A_{13} = 2.4x^{-9}sV \quad (4.53)$$

Se calcula la nueva potencia óptica, por medio de la regla del 3:

$$P_{8ns} = \frac{(2.4x^{-9}sV)(170nW)}{6.4x^{-9}sV} \quad (4.54)$$

$$P_{8ns} = 63.75nW \quad (4.55)$$

Sustituyendo la Ec. 116 y el periodo en la Ec. 4.8, se obtiene:

$$w = (63.75nW)(8ns) \quad (4.56)$$

$$w = 510x10^{-18} \quad (4.57)$$

Ahora para obtener el número de fotones en  $P_0 = 63.75x10^{-9}W$ , se divide la Ec. 4.57 entre la Ec. 4.13, se tiene:

$$N_F = \frac{510x10^{-18}J}{0.234x10^{-18}J} \quad (4.58)$$

$$N_F = 2179.48 \text{ fotones} \quad (4.59)$$

### 4.3.2 Número mínimo de fotones en 8ns con APD GSAPD9-500.

Ahora se realiza la variación del voltaje en alto del generador de funciones arbitrarias hasta 1.3V. La figura 4.15 muestra la respuesta del fotodiodo de avalancha a temperatura de 10°C.

La figura 4.16 muestra la respuesta del fotodiodo de avalancha cuando se energiza con un voltaje en alto de 1.3V y voltaje en bajo de 1V, la adquisición se realizó con la función muestreo del osciloscopio.

La razón de mostrar esta gráfica es porque se percibe la señal a un voltaje mínimo. Se hace el análisis del número de fotones a ese voltaje, tomando como referencia la señal del fotodiodo PIN.

De la figura 4.13 se obtuvo una amplitud de 350mV, entonces la ganancia del fotodiodo APD a 10°C es:

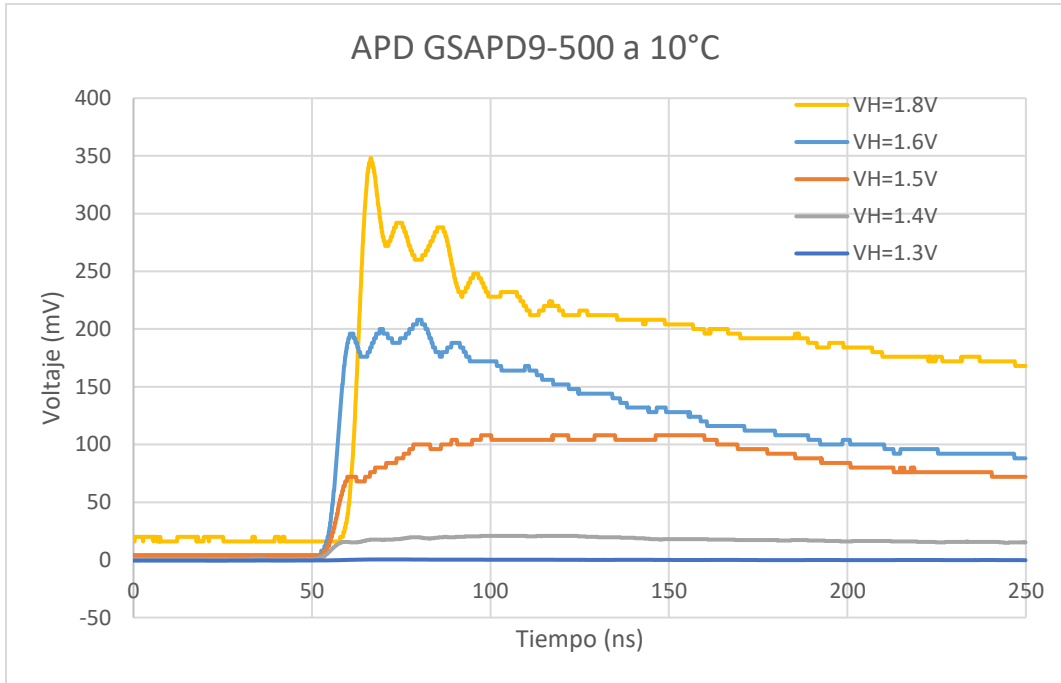


Figura 4.15: Variación del voltaje en alto del generador de funciones arbitrarias.

$$G_{10^{\circ}C} = \frac{350mV}{0.8mV} = 437.5 \quad (4.60)$$

El voltaje 0.8mV es obtenido del detector PIN 1A354 y es la referencia para la obtención de la ganancia. Por lo tanto, el número de fotones es:

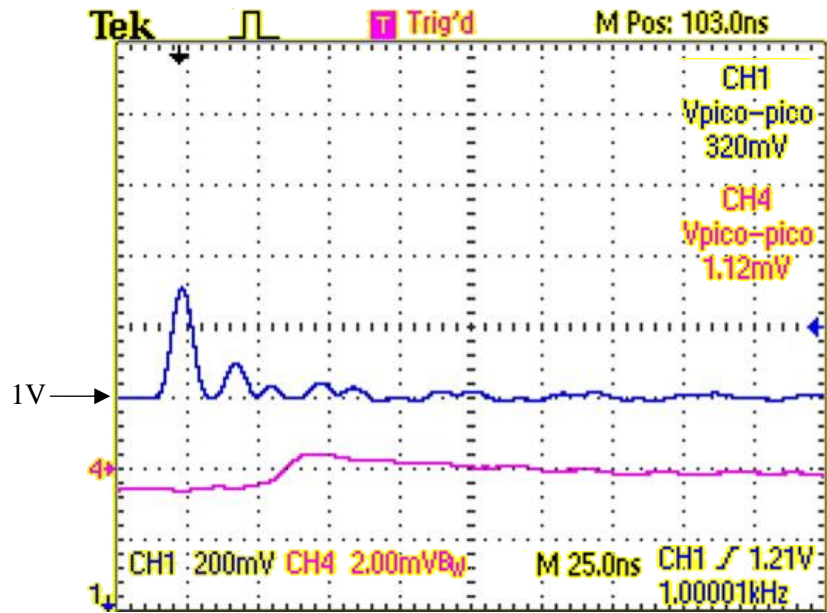


Figura 4.16: Respuesta del APD con VH=1.3V a 10°C.

$$N_F = \frac{2179.48}{437.5} \cong 4.98 \text{ fotones} \quad (4.61)$$

Se observa de la Ec. 4.61 que el número de fotones es mucho menor en comparación al detector 1A354 y al detector PIN 818-BB-210.

El número mínimo de fotones con el detector 1A354 en 50ns fue de: 31829 fotones, y con el detector GSAPD9-500 fue de: 4.98 fotones, por lo tanto, la ganancia del detector es de:

$$\text{Ganancia} = \frac{31829 \text{ fotones}}{4.98 \text{ fotones}} \cong 6391.36 \quad (4.62)$$

Se tiene una ganancia del orden de  $10^3$  a  $10^4$ .

### 4.3.3 Etapa de filtro para el APD GSAPD9-500

La figura 4.17 muestra la transformada de Fourier del pulso generado en  $V_H=1.3V$ . Se realiza un filtro pasabanda de 10MHz a 50MHz para obtener el pulso generado del APD, y así discriminar el ruido presente después de 75MHz.

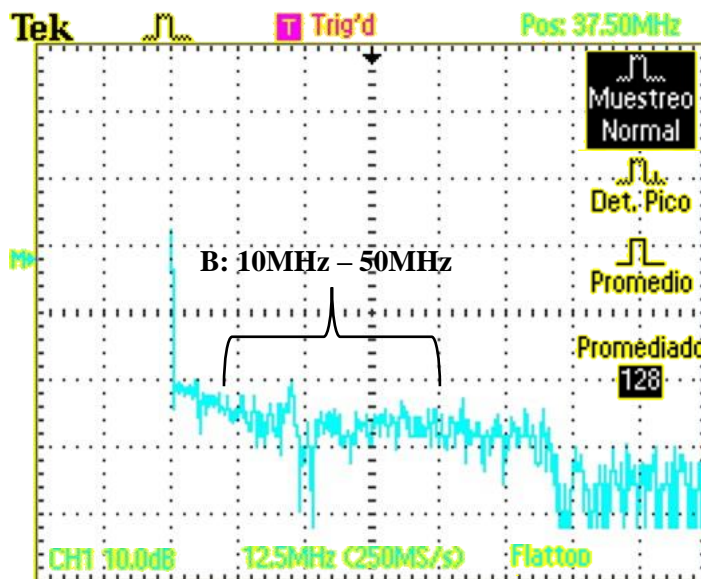


Figura 4.17: Transformada de Fourier en  $V_H=1.3V$ .

La figura 4.18 muestra el circuito eléctrico de la etapa del filtro de la señal del APD, el cual consta de 7 configuraciones del operacional OPA659, y son las siguientes:

Operacional 1: amplificador seguidor utilizado para acoplar impedancia entre el filtro pasa altas y el circuito integrador. El filtro pasa altas tiene una frecuencia de corte de 11.35MHz, donde se elige un capacitor de  $C1=100\text{pF}$ , y una resistencia de  $R1=140.2\Omega$ .

El operacional 1 es un amplificador seguidor, por lo tanto, el voltaje de  $V1$  es igual a  $V2$ , y la ecuación que lo describe es:

$$V2 = \left( \frac{1}{1 - \frac{j}{\omega 1(14.02 \times 10^{-9})}} \right) Vi \quad (4.63)$$

donde  $\omega 1 = 2\pi f$ .

Operacional 2.: circuito integrador cuya salida es proporcional a la integral de la señal de entrada. La ecuación del amplificador integrador es:

$$V_o = -\frac{1}{RC} \int_0^t V_i(t) dt, \quad (4.64)$$

donde  $V_o$  es la señal de salida,  $R$  es el valor de la resistencia,  $C$  es el valor del capacitor y  $V_i$  es la señal de entrada. Proponiendo una resistencia de  $100\Omega$ , una resistencia de retroalimentación de  $5\text{k}\Omega$ , un capacitor de  $47\text{pF}$  y por lo tanto la ecuación que lo describe es:

$$V3 = -4.25 \times 10^6 \int_0^t \left( \frac{1}{1 - \frac{j}{\omega 1(14.02 \times 10^{-9})}} \right) Vi(t) dt, \quad (4.65)$$

En la práctica, el integrador del amplificador operacional requiere un resistor de retroalimentación para reducir la ganancia de cd e impedir la saturación. Debe cuidarse que el amplificador operacional funcione dentro del rango lineal para que no se sature. Debido a esa razón se coloca un resistor de  $5\text{k}\Omega$ .

Operacional 3: filtro pasa altas de primer orden con ganancia de 7 y su frecuencia de corte es 11.5MHz, se propone un capacitor de  $C4=47\text{pF}$ ,  $R7=294\Omega$ , la ecuación que lo describe es:

$$V4 = \left( \frac{1}{1 - \frac{j}{\omega 2(13.81 \times 10^{-9})}} \right) V3 \quad (4.66)$$

Sustituyendo la Ec. 4.65 en la Ec. 4.66, se tiene:

$$V4 = \left( \frac{1}{1 - \frac{j}{\omega 2(13.81 \times 10^{-9})}} \right) \left( -4.25 \times 10^6 \int_0^t \left( \frac{1}{1 - \frac{j}{\omega 1(14.02 \times 10^{-9})}} \right) Vi(t) dt \right) \quad (4.67)$$

El operacional 3 es un amplificador no inversor, su ecuación correspondiente es:

$$V5 = \left( 1 + \frac{R6}{R5} \right) V4 \quad (4.68)$$

Sustituyendo la Ec. 4.67 en la Ec. 4.68, se tiene:

$$V5 = 7 \left( \frac{1}{1 - \frac{j}{\omega 2(13.81 \times 10^{-9})}} \right) \left( -4.25 \times 10^6 \int_0^t \left( \frac{1}{1 - \frac{j}{\omega 1(14.02 \times 10^{-9})}} \right) Vi(t) dt \right) \quad (4.69)$$

Operacional 4: filtro pasa bajas de primer orden y su frecuencia de corte es de 15.9MHz, se propuso un capacitor de C4=1pF, R7=10kΩ, la ecuación que lo describe es:

$$V6 = \left( \frac{1}{1 + j\omega 3(R7)(C4)} \right) V5 \quad (4.70)$$

Sustituyendo Ec. 4.69 en Ec. 4.70, se tiene:

$$V6 = \left( \frac{1}{1 + j\omega 3(10 \times 10^{-9})} \right) 7 \left( \frac{1}{1 - \frac{j}{\omega 2(13.81 \times 10^{-9})}} \right) \left( -4.25 \times 10^6 \int_0^t \left( \frac{1}{1 - \frac{j}{\omega 1(14.02 \times 10^{-9})}} \right) Vi(t) dt \right) \quad (4.71)$$

El operacional 4 es un amplificador no inversor, su ecuación correspondiente es:

$$V7 = \left(1 + \frac{R9}{R8}\right) V6 \quad (4.72)$$

Sustituyendo la Ec. 4.71 en la Ec. 4.72, se tiene:

$$V7 = 2.8 \left( \frac{1}{1 + j\omega 3(10 \times 10^{-9})} \right)^7 \left( \frac{1}{1 - \frac{j}{\omega 2(13.81 \times 10^{-9})}} \right) \left( -4.25 \times 10^6 \int_0^t \left( \frac{1}{1 - \frac{j}{\omega 1(14.02 \times 10^{-9})}} \right) V_i(t) dt \right) \quad (4.73)$$

Operacional 5: filtro pasa bajas de segundo orden y su frecuencia de corte es de 15.9MHz, se propuso un capacitor de C5=1pF, C6=2pF, R10=R11=10kΩ, la ecuación que lo describe es:

$$V9 = \left( \frac{1}{\omega^3 j^2 (R11C5R10C6) + j\omega 3(R10C6 + R11C5) + 1} \right) V7 \quad (4.74)$$

Sustituyendo Ec. 4.73 en Ec. 4.74, se tiene:

$$V9 = \left( \frac{1}{\omega^3 j^2 (200 \times 10^{-18}) + j\omega 3(30 \times 10^{-9}) + 1} \right)^2 \left( \frac{1}{1 + j\omega 3(10 \times 10^{-9})} \right)^7 \left( \frac{1}{1 - \frac{j}{\omega 2(13.81 \times 10^{-9})}} \right) \left( -4.25 \times 10^6 \int_0^t \left( \frac{1}{1 - \frac{j}{\omega 1(14.02 \times 10^{-9})}} \right) V_i(t) dt \right) \quad (4.75)$$

Operacional 6: filtro pasa altas de segundo orden y su frecuencia de corte es de 11.5MHz, se propuso un capacitor de C7=C8=47pF, R12=294Ω, R13=147Ω, la ecuación que lo describe es:

$$V_{10} = \left( \frac{1}{\frac{1}{\omega^4 j^2 (R_{13}C_7 R_{12}C_8)} - \frac{1}{j\omega 4(R_{12}C_8 - R_{13}C_7)} + 1} \right) V_9 \quad (4.76)$$

Sustituyendo Ec. 4.75 en Ec. 4.76, se tiene:

$$V_{10} = \left( \frac{1}{\frac{1}{\omega^4 j^2 (95 \times 10^{-12})} - \frac{1}{j\omega 4(6.9 \times 10^{-9})} + 1} \right) \left( \frac{1}{\omega^3 j^2 (200 \times 10^{-18}) + j\omega 3(30 \times 10^{-9}) + 1} \right) 19.6$$

$$\left( \frac{1}{1 + j\omega 3(10 \times 10^{-9})} \right) \left( \frac{1}{1 - \frac{j}{\omega 2(13.81 \times 10^{-9})}} \right) \left( -4.25 \times 10^6 \int_0^t \left( \frac{1}{1 - \frac{j}{\omega 1(14.02 \times 10^{-9})}} \right) V_i(t) dt \right) \quad (4.77)$$

**Operacional 7:** circuito integrador donde se propone una resistencia de  $R_{15}=5k\Omega$ ,  $C_9=47pF$ , la ecuación que lo describe es:

$$V_{11} = -\frac{1}{(R_{15})(C_9)} \int_0^t V_{10} dt, \quad (4.78)$$

Sustituyendo Ec. 4.77 en Ec. 4.78, se tiene:

$$V_{11} = -4.25 \times 10^6 \int_0^t \left( \frac{1}{\frac{1}{\omega^4 j^2 (95 \times 10^{-12})} - \frac{1}{j\omega 4(6.9 \times 10^{-9})} + 1} \right)$$

$$\left( \frac{1}{\omega^3 j^2 (200 \times 10^{-18}) + j\omega 3(30 \times 10^{-9}) + 1} \right) 19.6 \left( \frac{1}{1 + j\omega 3(10 \times 10^{-9})} \right)$$

$$\left( \frac{1}{1 - \frac{j}{\omega 2(13.81 \times 10^{-9})}} \right) \left( -4.25 \times 10^6 \int_0^t \left( \frac{1}{1 - \frac{j}{\omega 1(14.02 \times 10^{-9})}} \right) V_i(t) dt \right) \quad (4.79)$$

La figura 4.19 muestra la etapa final del filtro, el cual son: circuito sumador y circuito comparador.

Operacional 8: amplificador inversor del ruido con ganancia de 2, la ecuación que lo describe es:

$$V_n = \left( -\frac{R17}{R16} \right) V_{ruido} \quad (4.80)$$

Operacional 9: amplificador inversor sumador con ganancia de 1, la ecuación que lo describe es:

$$V_{12} = -R20 \left( \frac{V_n}{R18} + \frac{V_{11}}{R19} \right) \quad (4.81)$$

Sustituyendo la Ec. 4.79 y la Ec. 4.80 en la Ec. 4.81, se tiene:

$$V_{12} = \left( -2V_{ruido} + \left( -4.25 \times 10^6 \int_0^t \left[ \left( \frac{1}{\omega^4 j^2 (95 \times 10^{-12}) - j\omega 4 (6.9 \times 10^{-9})} + 1 \right) \left( \frac{1}{\omega^3 j^2 (200 \times 10^{-18}) + j\omega 3 (30 \times 10^{-9})} + 1 \right) 19.6 \left( \frac{1}{1 + j\omega 3 (10 \times 10^{-9})} \right) \left( \frac{1}{1 - \frac{j}{\omega 2 (13.81 \times 10^{-9})}} \right) \left( -4.25 \times 10^6 \int_0^t \left( \frac{1}{1 - \frac{j}{\omega 1 (14.02 \times 10^{-9})}} \right) V_i(t) dt \right) \right] \right) \right) \right) \quad (4.82)$$

Comparador: compara el voltaje de la entrada inversora respecto al voltaje en la entrada no inversora, la ecuación que lo describe es:

$$V_o = \{V_r - V_{12} > 0 \Rightarrow V_{cc}\} \quad (4.83)$$

Si el voltaje  $V_r$  es mayor a  $V_{12}$ , entonces el voltaje de salida es +5V, de lo contrario es -5V.

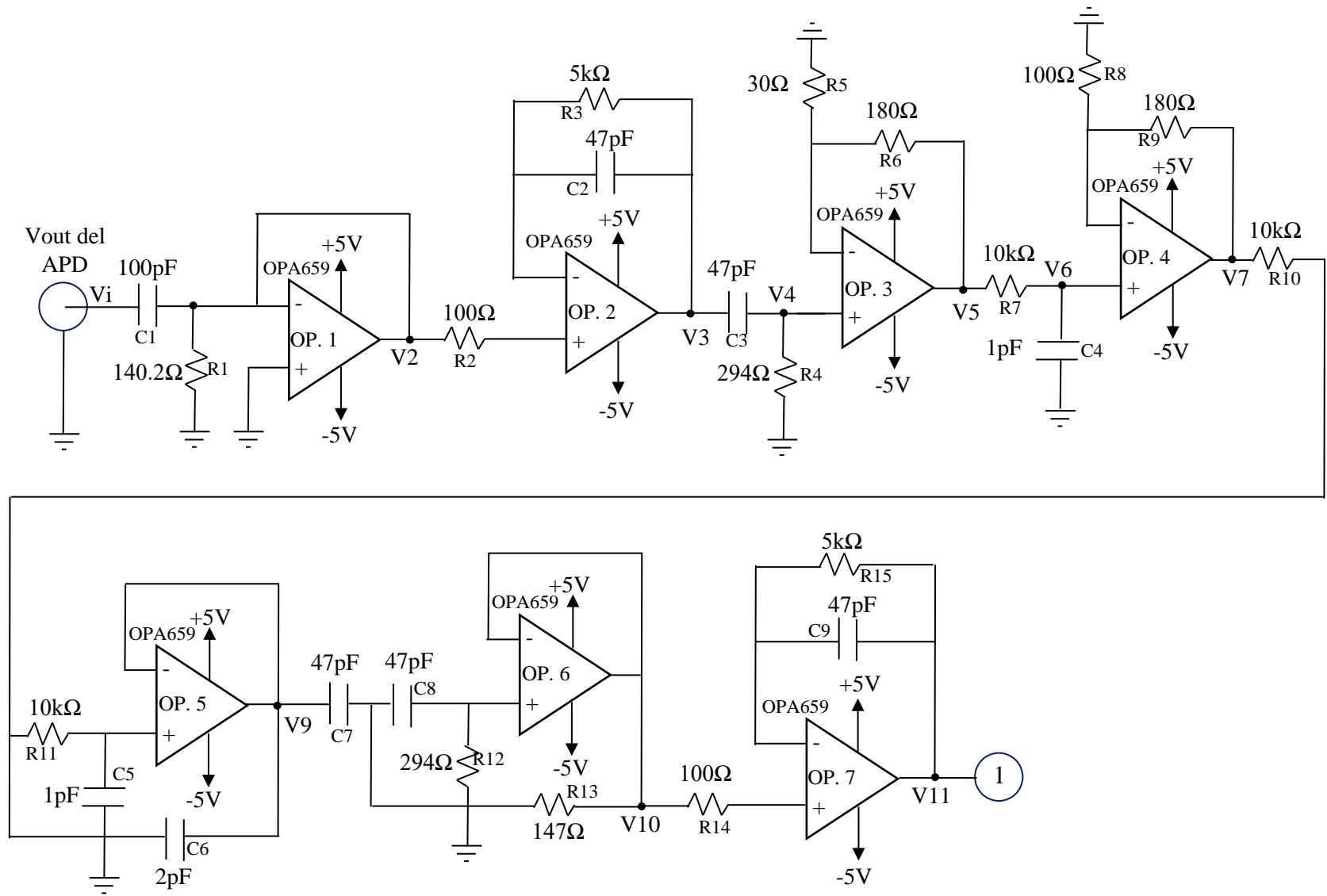


Figura 4.18: Circuito eléctrico de la etapa de filtrado de la señal del APD.

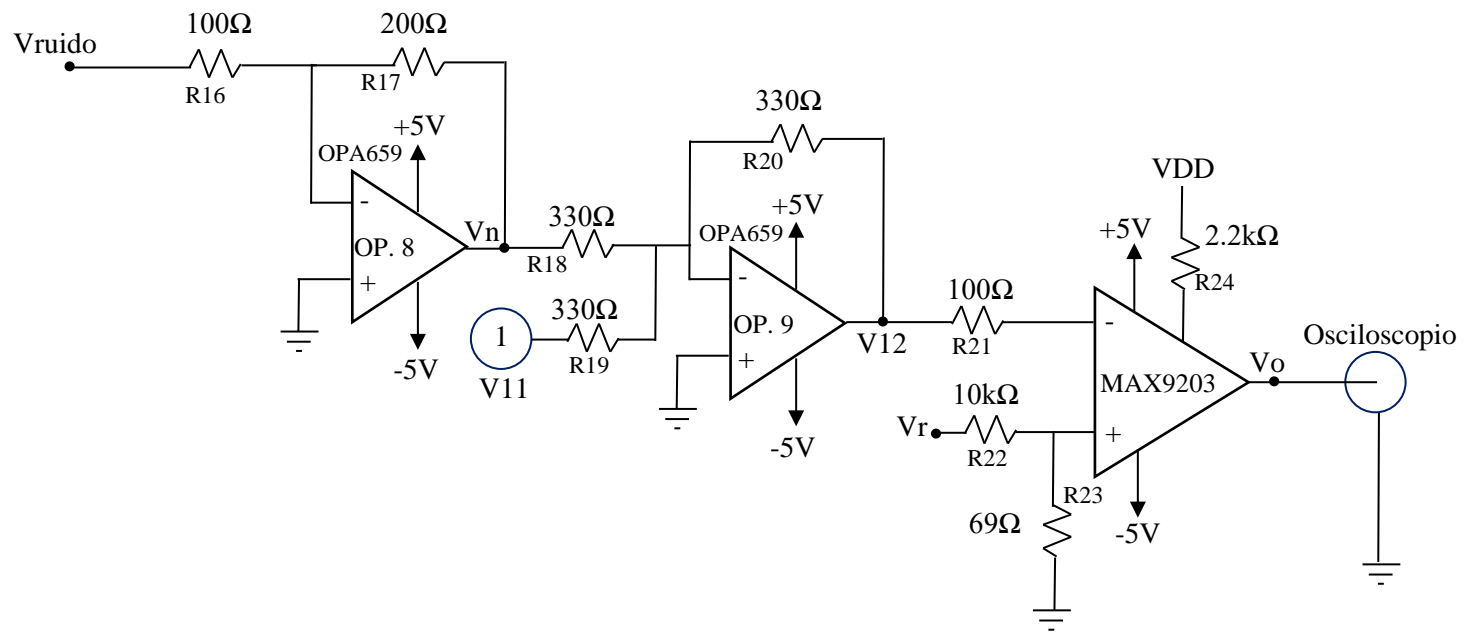


Figura 4.19: Circuito eléctrico amplificador sumador y comparador.

Con el detector GSAPD9-500 se repiten el mismo procedimiento que se realizó con el detector PIN 1A354 y el detector PIN 818-BB-21. La figura 4.20 muestra la respuesta del detector APD señal café, con respecto a la señal del generador de funciones señal azul. La prueba se realizó en un ancho de pulso de 100ns. El voltaje en alto de 1.8V, voltaje en bajo de 1V y el acople de impedancia en el osciloscopio fue de  $1M\Omega$ .

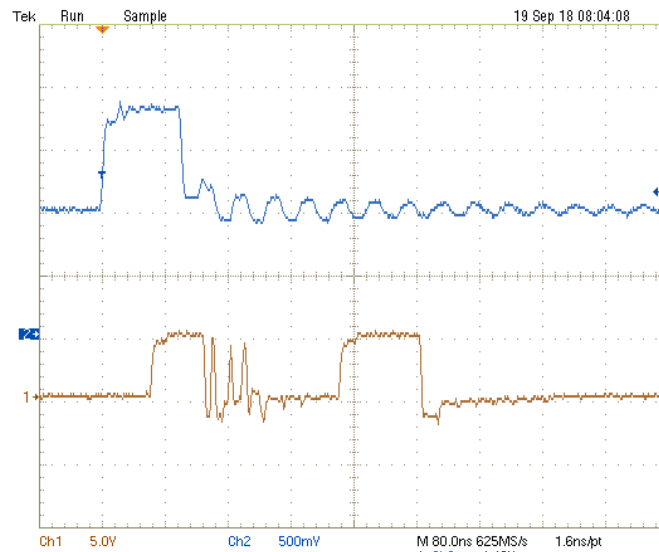


Figura 4.20: Respuesta del APD a un ancho de pulso de 100ns.

La figura 4.21 muestra la respuesta del detector APD señal café, con respecto a la señal del generador de funciones señal azul. La prueba se realizó en un ancho de pulso de 50ns.

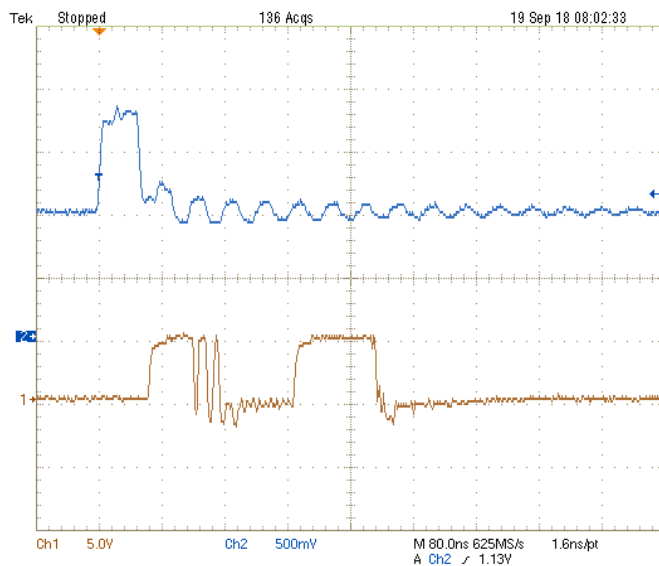


Figura 4.21: Respuesta del APD a un ancho de pulso de 50ns.

La figura 4.22 muestra la respuesta del detector APD señal café, con respecto a la señal del generador de funciones señal azul. La prueba se realizó en un ancho de pulso de 8ns.



Figura 4.22: Respuesta del APD a un ancho de pulso de 8ns.

La figura 4.23 muestra la respuesta del APD cuando no se incide luz óptica. Si en un tiempo de 4  $\mu$ s se tiene 5 pulsos aleatorios, entonces, en 1 segundo se tiene un promedio de 1250000 pulsos. Este es un dato importante cuando se realice el experimento de conteo de fotones.

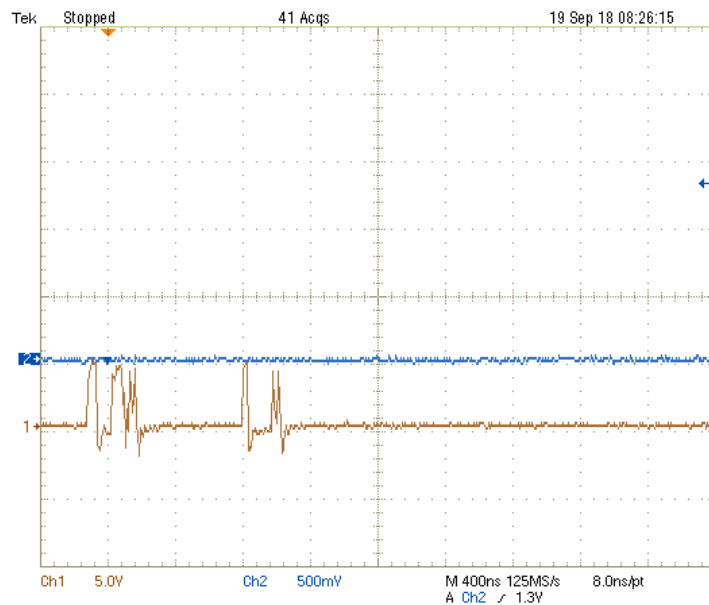


Figura 4.23: Señal de ruido del APD en ausencia de luz.

## 4.4 Experimento de óptica cuántica: conteo de fotones

El experimento de conteo de fotones tiene varias aplicaciones en el laboratorio de óptica avanzada de la facultad de ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México, los cuales son; obtención de la estadística de la fuente óptica, la caracterización de las fuentes ópticas, la coincidencia en función de la correlación, la prueba de existencia del fotón, etc.

La figura 4.24 muestra el diagrama a bloques del experimento de conteo de fotones implementado en el laboratorio de óptica avanzada.

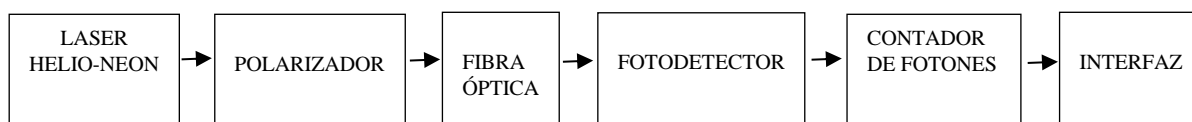


Figura 4.24: Diagrama de bloques del experimento de óptica cuántica.

El LASER HELIO-NEON de la empresa Newport opera a una longitud de onda de 633nm, su potencia óptica es de 4mV, y sus características se muestran en la tabla 4.4 [45].

Modelo	R-30991
Potencia de salida mínima	5mW
Modo espacial	TEM <sub>00</sub>
Polarización	500:1
Diámetro del haz	0.57mm
Ángulo del haz de divergencia	1.41mrad
Modo longitudinal	1082MHz
Ruido	1%
Tamaño de cabeza del laser	177.8mm x 44.5mm
Tamaño de la fuente voltaje	104.8mm x 38.1mm x 165.1mm
Requerimientos de alimentación	120/240 VAC, 50/60Hz

Tabla 4.4: Especificaciones del LASER R30991.

Se utilizaron dos polarizadores para disminuir la intensidad del laser de tal forma que se tiene 1 millón de fotones por segundo. La fibra óptica multimodo de longitud de 3 metros con conector FC-FC. En la sección del APD se utilizó el detector APD GSAPD9-500 y el detector APD C30902. El contador de fotones es un dispositivo donde se configura la ventana de conteo en el orden de  $\mu$ s. La interfaz que muestra los números de fotones es LabView 2009.

#### 4.4.1 Detector APD GSAPD9-500

Ahora se prosigue a realizar el experimento de óptica cuántica mostrado en el diagrama de bloques de la figura 4.24. La figura 4.25 muestra la respuesta del detector APD GSAPD9-500 vista en el osciloscopio. Se observa un pulso de amplitud de 5V y el periodo de la señal es de aproximadamente de 40 ns. El pulso es contabilizado por el contador de fotones y después enviado hacia la interfaz.

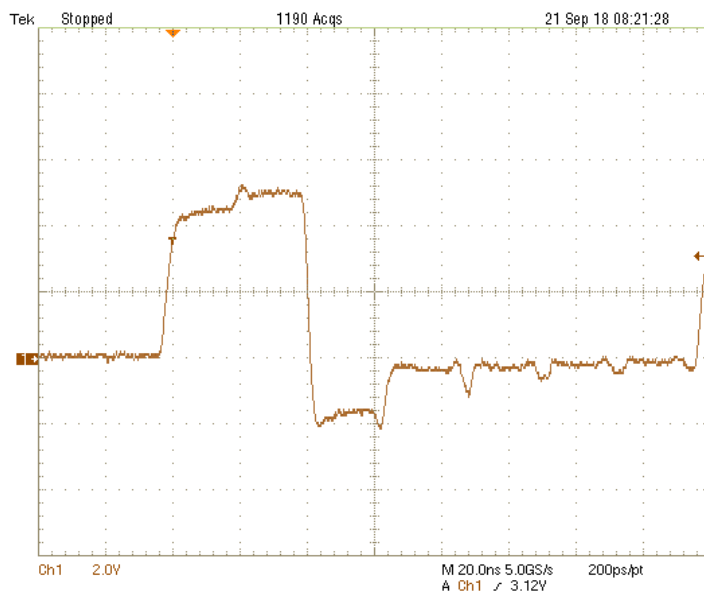


Figura 4.25: Respuesta del APD GSAPD9-500 en el osciloscopio.

La figura 4.26 muestra el número de fotones que mide por segundo, el cual se tiene una cantidad de 720444 fotones en un segundo. La ventana de coincidencia es de 5.37 ns y su frecuencia es de 5Hz.

La figura 4.27 muestra el número de fotones cuando no se incide el láser He-Ne.

Se observa que se tiene casi el mismo número de fotones, lo cual demuestra que este APD no es el adecuado para realizar el experimento de óptica cuántica. El número anterior corresponde a las cuentas oscuras del APD, en realidad no está contando fotones.

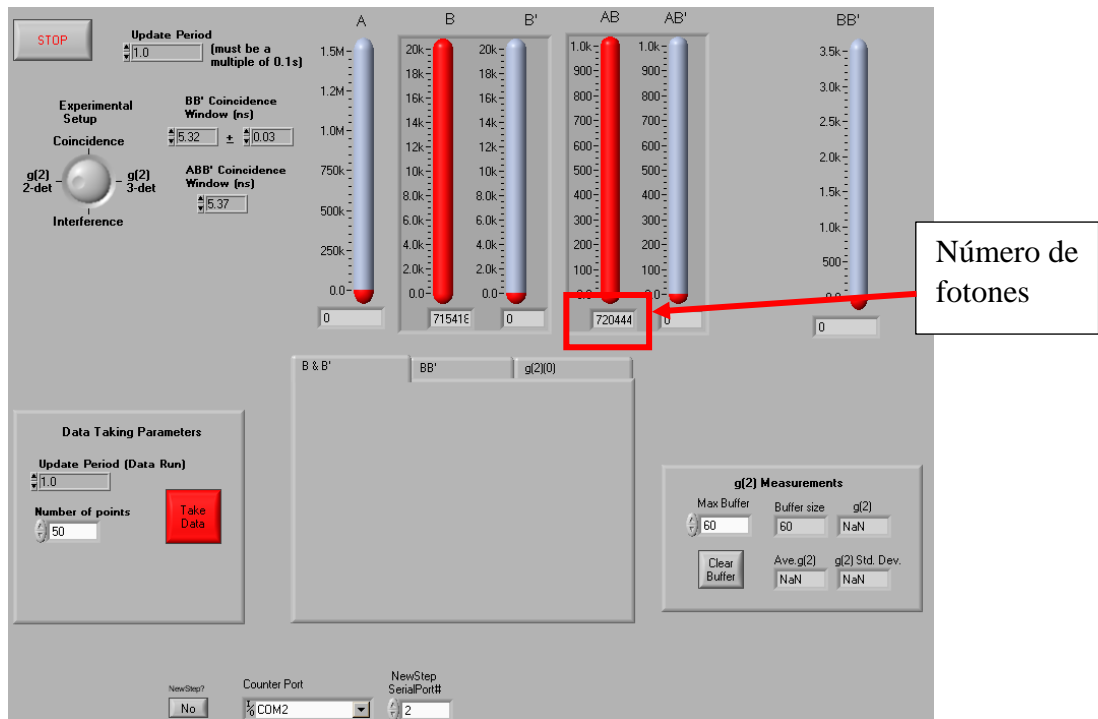


Figura 4.26: Respuesta del detector del APD GSAPD9-500 con incidencia de luz.

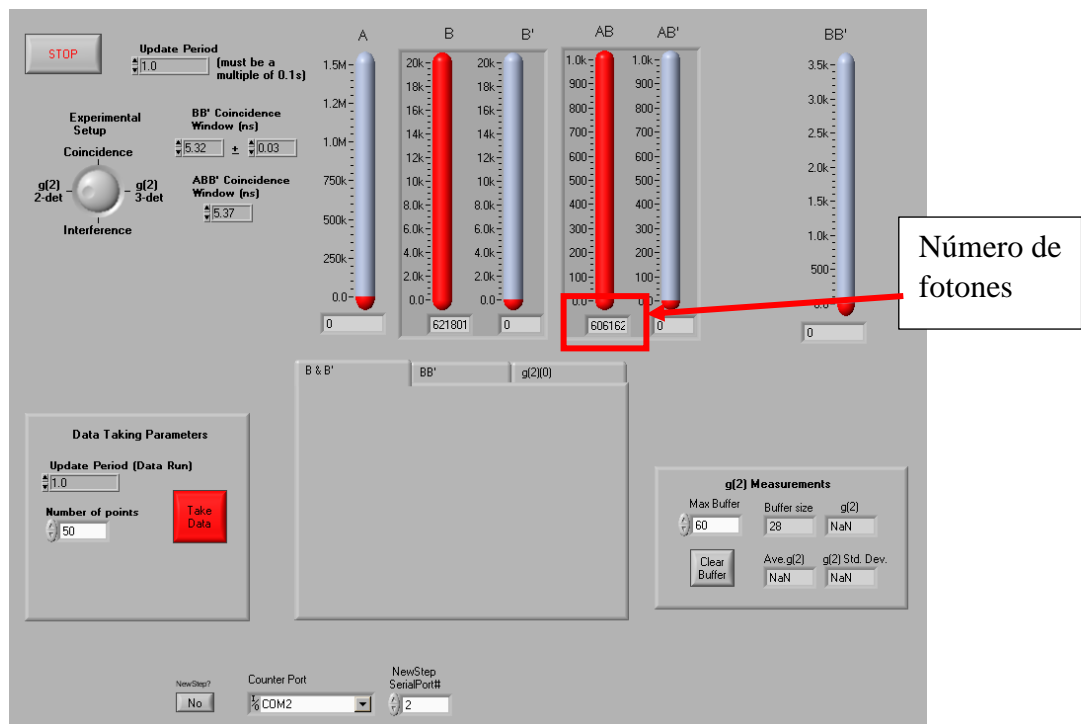


Figura 4.27: Respuesta del detector APD GSAPD9-500 sin incidencia de luz.

#### 4.4.2 Detector SPCM-AQR

La figura 4.28 muestra la respuesta del detector SPCM-AQR vista en el osciloscopio.

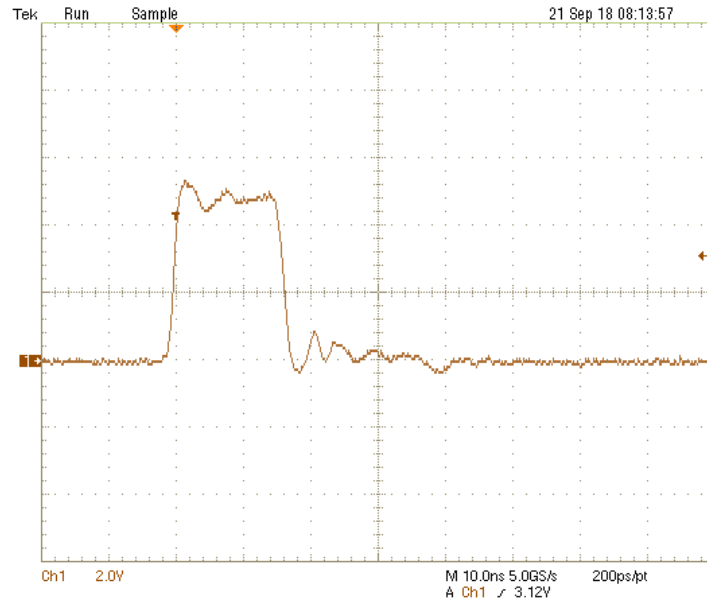


Figura 4.28: Respuesta del detector SPCM-AQR en el osciloscopio.

Se observa un pulso de amplitud de 5V, el periodo de la señal es de 20 ns. A comparación de la señal de la figura 86, después del pulso se observa que es estable. La figura 4.29 muestra la respuesta en la interfaz, donde se muestra un número de 1200444 fotones en un segundo.

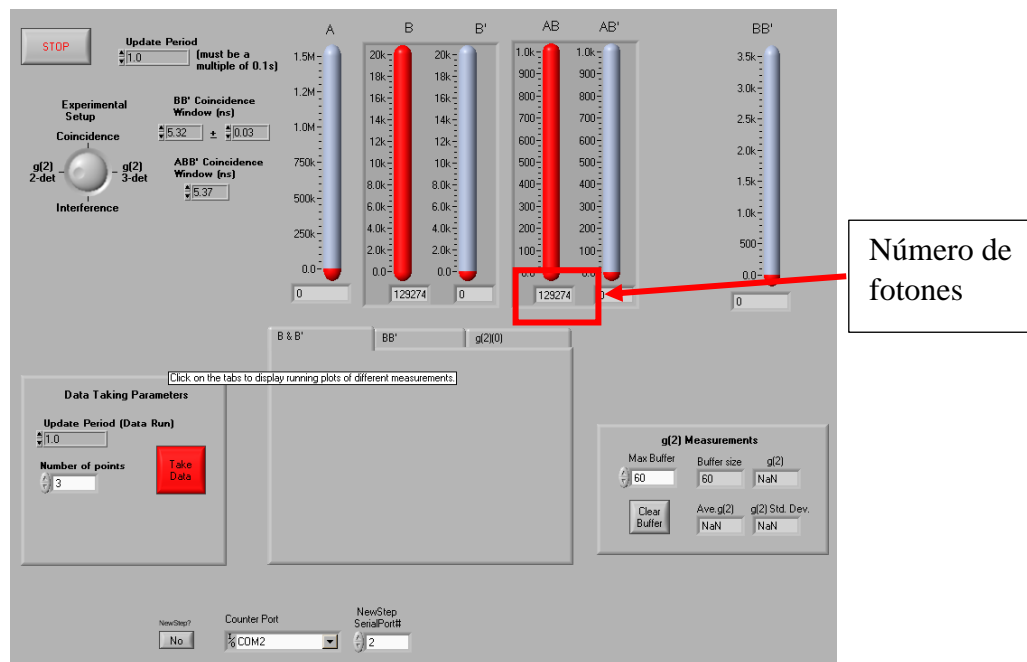


Figura 4.29: Respuesta del detector SPCM-AQR con incidencia de luz.

La figura 4.30 muestra el número de fotones cuando no se incide el laser He-Ne.

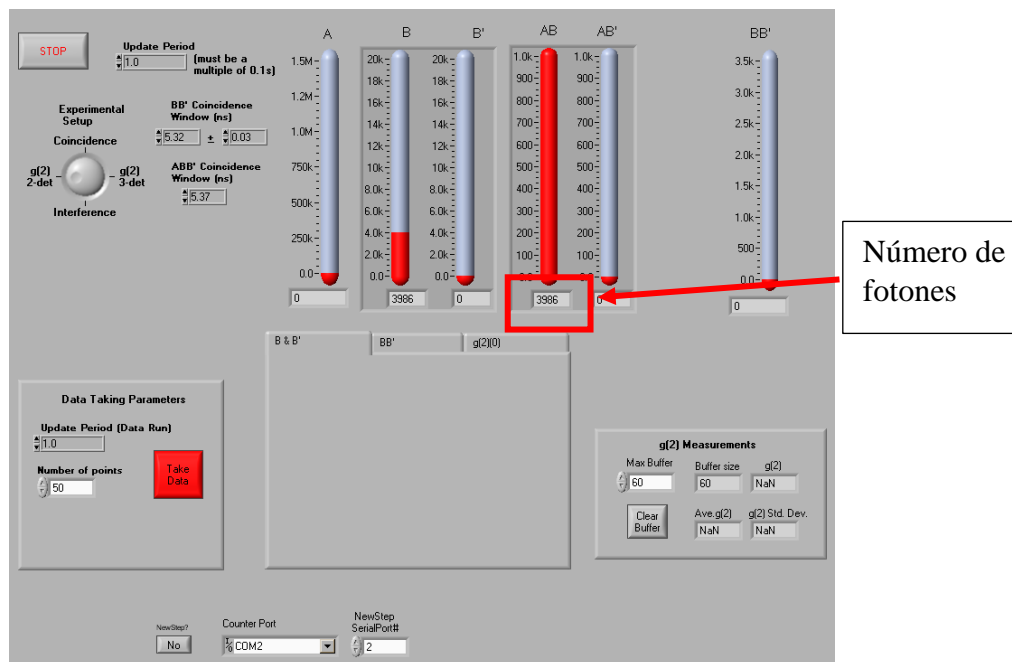


Figura 4.30: Respuesta del detector SPCM-AQR sin incidencia de luz.

Se observa que existe una diferencia, porque cuando se incide la luz se tiene 1200000 fotones por segundo, mientras que cuando no se incide la luz se tiene 3900 fotones por segundo, por lo tanto, se demuestra que este detector es el adecuado para realizar el experimento de óptica cuántica. La cantidad de 3900 fotones corresponde a las cuentas oscuras.

## 4.4 Conclusiones

Se realizó la caracterización de los diferentes detectores PIN con diferentes periodos y bajo las mismas condiciones, es decir con el mismo laser y con el generador de ondas arbitrarias, y así obtener ciertos números de fotones. Como no se tiene un aparato para medir la potencia óptica, fue necesario hacer extrapolaciones de la señal proveniente del generador de ondas arbitrarias, y así obtener una aproximación en un periodo de 8ns con el APD GSAPD9-500.

En la etapa de filtrado no se logró atenuar el ruido en su totalidad proveniente del APD a pesar de que se colocó un amplificador sumador de ruido y un plano de tierra, por lo tanto es necesario operar al APD a temperaturas menores a cero grados centígrados.

Por otra parte, la respuesta del APD GSAPD9-500 en el experimento de conteo de fotones no fueron las esperadas, la diferencia fue mínima cuando la luz incide en el APD y cuando no, en comparación con el detector comercial, el cual mostró una gran diferencia. Una de las razones principales es la temperatura a la que trabaja y con esto se reduce el número de cuentas oscuras, mientras que el APD que se utilizó en este proyecto la temperatura de operación fue de 10°C, además la fuente de luz es continua, es decir los fotones llegan todos al mismo tiempo.

# Conclusiones Generales

Respecto a los resultados experimentales obtenidos en el presente trabajo de tesis los objetivos se cumplieron.

El controlar temperatura con la celda peltier resulto ser algo complicado, debido que se debe tomar en cuenta el paso de temperatura de la celda que permanece constante con el mismo voltaje y corriente aplicado, sin embargo la potencia aplicada a la misma celda también se tiene que disipar, esto permite que cuando queremos calentar usando la celda peltier es relativamente fácil de controlar, sin embargo al enfriar debemos extraer el calor del medio más el calor generado por la potencia aplicada a la celda peltier, lo cual complica el control de la temperatura.

La regulación de temperatura por medio de las celdas peltier mostro ser adecuada, aunque en un principio se plantearon dos lazos cerrados de control para refrigerar con 8 celdas peltier en cada detector, al final solo se usó un lazo cerrado de control con 4 celdas peltier, y con esto el sistema de control es capaz de mantener la temperatura deseada en el detector entre 20 y 5 grados celcius a una temperatura ambiente entre 30 y 10 grados celcius.

La etapa de filtrado es un elemento muy importante en la detección de los 10 a 100 fotones, ya que el nivel de la señal es del orden de cientos de microvolts, y el ruido presente en el medio era del orden de milivolts, y con el problema que ambos voltajes compartían el mismo ancho de banda, se tuvieron que proponer algunas técnicas para separar las señales, como cambiar el ancho de pulso con el fin de modificar el ancho banda de la señal, también se introdujo ruido intencionalmente en las tarjetas de circuito impreso con el fin de restarlo al ruido inducido, lo cual resultó en una gran disminución del ruido total, con lo que finalmente logramos ver la pequeña señal producida por los fotones.

A pesar de que el APD que se adquirió no trabaja en modo Geiger para detectar un solo fotón, presentó una amplificación de  $10^4$ , lo que significa ver del orden de 10 a 100 fotones, sin embargo la ganancia de este tipo de APDs se ha incrementado tres órdenes de magnitud en los últimos 7 años, esto nos hace pensar que en unos cuantos años con el avance de la tecnología se tendrán ADPs de bajo costo con ganancias de  $10^6$  a  $10^8$ , y con lo aportado en este trabajo se podrá instrumentar un detector que pueda captar un solo fotón.

Como trabajo futuro sería implementar lo aportado en este trabajo pero con un fotodiodo que opere en modo Geiger y que cuente con celdas peltier al vacío para lograr ver un solo fotón.

# Apéndice A. Ponencias a congresos

En este apéndice se muestran las evidencias de la participación en los congresos. Se participó en la modalidad de poster en “Mexican Humanitarian Technology Conference (MHTC) 2017” IEEE sección Puebla.



EXTENDS ITS APPRECIATION

*Dany Ivan Martínez de la Cruz*

For attending to the “Mexican Humanitarian Technology Conference (MHTC) 2017”

Puebla, Mexico, March 31, 2017



  
**Dr. German A. Munoz-Hernandez**  
IEEE Puebla Section Chair

  
**Dr. Jaime J. Cid-Monjaraz**  
Organizing Committee MHTC 2017 Chair



# Constancia

Artículo: **90-Diseño de un sistema de adquisición de datos para un fotodiodo de avalancha**

Autores: **Dany Ivan Martinez De La Cruz, María Aurora Diozcora Vargas Treviño, Víctor Manuel Velázquez Aguilar, Sergio Vergara Limón, Jaime Julián Cid Monjaraz and Luis Ernesto Valencia Segura**

Área: **Nuevas Tecnologías**

El Comité Técnico del **XIV Congreso Internacional sobre Innovación y Desarrollo Tecnológico CIINDET 2018**, que se llevó a cabo en la ciudad de Cuernavaca Morelos México, del 21 al 23 de marzo de 2018, hace constar que el artículo citado fue presentado de acuerdo con el programa técnico del congreso e incluido en las memorias del mismo.

La presente se expide para los fines que a los autores convengan.

Cuernavaca Morelos México, a 23 de marzo de 2018.



Atentamente

Dr. Rafael Castellanos Bustamante  
Presidente del Comité Técnico CIINDET 2018

# Apéndice B. Artículos

XIV Congreso Internacional sobre Innovación y Desarrollo Tecnológico,  
21 al 23 de marzo de 2018, Cuernavaca Morelos, México.

## Diseño de un sistema de adquisición de datos para un fotodiodo de avalancha

D. I. Martínez<sup>1,a</sup>, M. A. Vargas<sup>1,b</sup>, V. Velázquez<sup>2,c</sup>, S. Vergara<sup>1,d</sup>, J. Cid<sup>1,e</sup>, L. E. Valencia<sup>1,f</sup>

<sup>1</sup> Maestría en Ciencias de la Electrónica, opción Automatización, Facultad de Ciencias de la electrónica, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

<sup>a</sup> danyivanmtz@gmail.com, <sup>b</sup> auroravargast@hotmail.com, <sup>d</sup> svergara2@hotmail.com, <sup>e</sup> jaimc.cid@correo.buap.mx,

<sup>f</sup> luz.valencia.segura@gmail.com

<sup>2</sup> Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México

<sup>c</sup> vicvela@ciencias.unam.mx

**Resumen**—En el siguiente trabajo se presenta el diseño de un sistema de adquisición de datos para un fotodiodo de avalancha, el cual va a detectar un fotón generado de una fuente óptica. Para que el fotodiodo de avalancha funcione correctamente es necesario que opere a una temperatura menor a la del medio ambiente. Así, se presenta el diseño y la implementación de un control de temperatura con celdas peltier para una temperatura deseada de 5 °C, el cual para cada fotodiodo de avalancha serán dos controles de temperatura, dando un total de 4. Finalmente se presenta el diseño electrónico para la detección de la señal eléctrica generada de fotodiodo de avalancha, el diseño de las piezas en SolidWorks 16.0 para dos fotodiodos, y el prototipo con las piezas ensambladas.

**Palabras clave.** Fotodiodo de Avalancha, Celda Peltier, control, diseño electrónico.

### 1. Introducción

Las primeras referencias a la interacción entre la luz y los materiales semiconductores datan de la segunda mitad del siglo XIX, el primer experimento de algo parecido a un fotodiodo tuvo lugar en 1939, cuando el ingeniero Russell Shoemaker Ohl demostró el efecto de la luz sobre una unión rectificadora formada accidentalmente en una barra de germanio [1]. Pioneros en el desarrollo del estado sólido en la detección de un solo fotón fue realizado en los años 1960's en la compañía RCA por McIntyre y en el laboratorio de investigación Shockley por Haitz. Los fotodiodos de avalancha operados en el modo lineal y Geiger en los años sesenta y principios de los años setentas tuvieron un campo activo de experimentación e investigación teórica. En 1972 fue patentado en Japón el detector de un solo fotón de estado sólido con diseño diferente [2].

El fotodiodo de avalancha es un fotodiodo especial que trabaja en la región de ruptura en avalancha para obtener una amplificación de corriente interna. Los electrones separados se desplazan hacia esta región donde un campo electrostático elevado los acelera hasta una velocidad muy elevada. Cuando los electrones acelerados se recombinan o chocan hay una gran posibilidad de que se cree un nuevo par por ionización por impacto. El segundo par también se separa y estos nuevos electrones repiten el proceso. El proceso termina hasta que todos los portadores abandonan la región de avalancha. En la Figura 1 muestra las distintas sub-zonas con dopajes diferentes.

La zona de absorción donde se genera el par electrón-hueco primario el cual el campo eléctrico es moderado, después existe una sub-zona denominada zona de multiplicación donde el campo es mucho más intenso y los electrones sufren una aceleración generando los pares secundarios, llamados avalancha.

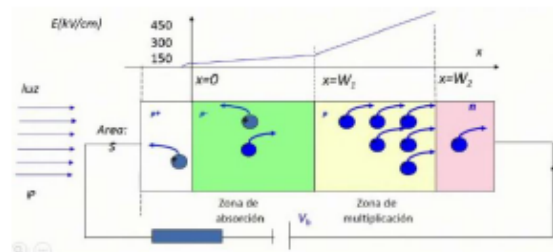


Figura 1. Zonas del Fotodiodo de Avalancha APD.

Se utiliza el modo de operación del fotodiodo denominando geiger. Este es un modo de operación, en el cual el voltaje de polarización del fotodiodo de avalancha es mayor al voltaje de ruptura. Esto resulta un campo eléctrico muy grande en la capa de depleción del diodo y algún portador presente en la capa de depleción sería multiplicado infinitamente por el proceso de multiplicación avalancha [3].

En este proyecto se presentará un sistema de adquisición de datos para un fotodiodo de avalancha, el cual va a representar la señal obtenida por un fotón incidente.

### 2. Diseño de Sistema de adquisición

La Figura 2 muestra el diagrama general del sistema de adquisición de datos.

ISBN 978-607-95255-8-3

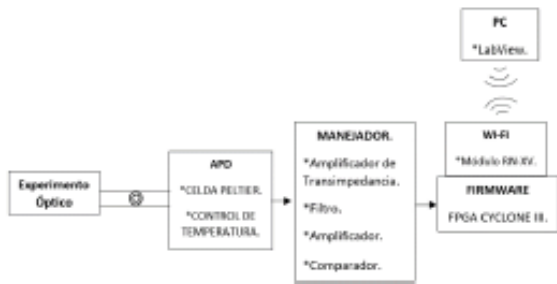


Fig 2. Diagrama general del sistema.

En el bloque experimento óptico contiene la fuente óptica, el cual genera un solo fotón con un arreglo óptico.

En el bloque APD se encuentra el fotodiodo de avalancha de la empresa Shenzhen Yigudian Technology, y el control de temperatura a través de la celda peltier. El control de temperatura es necesario porque evita que el APD se active con cualquier señal del medio ambiente, así la finalidad es mantener la temperatura de los fotodiodos de avalancha a 5 °C, a través de celdas peltier.

En el bloque manejador contiene la electrónica necesaria para adquirir la señal eléctrica generada del fotodiodo de avalancha, así los dispositivos electrónicos son: Amplificador de Transimpedancia, Filtro, Amplificador y un Comparador.

En el bloque Firmware contiene la tarjeta de adquisición, el cual es un FPGA Cyclone III y va a mandar información sobre el conteo de fotones a la PC a través del módulo Wi-Fi. En el bloque PC contiene el software LabView, el cual mostrará los fotones incidentes en el fotodiodo de avalancha.

El efecto peltier se caracteriza por la aparición de una diferencia de temperaturas entre las dos caras de un semiconductor cuando por él circula una corriente, ver Figura 3. Conformada por dos materiales semiconductores uno tipo P y otro tipo N. Internamente la celda peltier posee elementos semiconductores altamente impurificados y dispuestos eléctricamente en serie mediante conductores de cobre [4].



Fig 3. Diagrama de la estructura interna del efecto peltier.

El efecto peltier es conocido desde 1834. Al aplicar una diferencia de potencial sobre la célula se producirá una cesión de calor por unidad de tiempo en la cara caliente igual a [5].

$$Q_{PC} = \alpha T_C I \quad (1)$$

Donde;  $T_C$  es la temperatura de la cara caliente,  $\alpha$  es el coeficiente de Seebeck,  $I$  es la corriente que atraviesa al circuito. Por el mismo efecto, la absorción de calor por unidad de tiempo en la cara fría será igual a la ecuación (1) [5].

La celda peltier a utilizar se muestra en la Figura 4, adquirida de la empresa Hebei L. T.



Fig 4. Celda Peltier TEC1-12705.

Sus principales características son:  $Q_{max} = 43W$ ,  $I_{max} = 5.3A$ ,  $V_{max} = 14.2V$ ,  $R = 2.4\Omega$ , todos los parámetros antes mencionados son a 25 °C. Temperatura máxima de operación 138°C, vida límite: 200000 hrs.

La Figura 5 muestra el fotodiodo de avalancha, adquirida de la empresa Shenzhen YiguDian Technology Co. Ltd.



Fig 5. Fotodiodo de Avalancha.

Las principales características son: baja corriente de oscuridad, ganancia  $M=300$ , longitud de onda=400-1100 nm, voltaje de ruptura=200.

Así, en el presente artículo se desarrollará la investigación del bloque APD y bloque manejador. Se presenta el diseño y la implementación de un control de temperatura con celdas peltier para una temperatura deseada de  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Aprovechando las dimensiones de la celda peltier se realiza el diseño de las piezas en SolidWorks para dos fotodiodos de avalancha, es decir se realizarán dos controles de temperatura. Se presenta el diseño electrónico para la detección de la señal eléctrica generada por un fotodiodo de avalancha, y el prototipo físico.

### 3. Control de Temperatura

La Figura 6 muestra el diagrama general de control, donde se realizaron dos algoritmos de control. En el primer algoritmo se emula la temperatura del medio ambiente dentro de una caja de unicel, el cual las pruebas se inicia a  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  y cada 15 minutos se incrementa  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , hasta alcanzar  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ . En el segundo algoritmo de control se realiza el control de temperatura a la temperatura deseada de  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , esto con la finalidad de encontrar el número de celdas peltier óptimas para el control de temperatura.

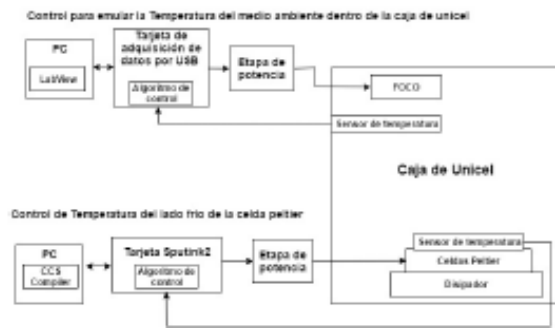


Fig 6. Diagrama general de control

Ambos controles de temperatura se realizaron en base al siguiente diagrama de lazo cerrado de control, ver Figura 7.

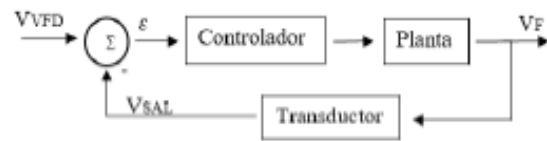


Fig 7. Lazo cerrado de control.

Donde:  $V_{VFD}$  es el valor de la variable física deseada en grados centígrados,  $V_{SAL}$  es el valor obtenido del transductor,  $\epsilon$  es el error proveniente de  $V_{VFD} - V_{SAL}$ , y  $V_F$  es la variable física en grados centígrados. El bloque controlador contiene el algoritmo de control. El bloque planta representa el foco para el control de emulación de la temperatura del medio ambiente y la celda peltier para el control de temperatura.

Se utilizó el LM35 como sensor de temperatura para ambos controles de temperatura, ver Figura 8, debido a su linealidad en un rango de  $2\text{ }^{\circ}\text{C} - 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ , proporcionando  $10\text{mV}$  por  $^{\circ}\text{C}$ .



Fig 8. Sensor de temperatura LM35.

### 4. Control para emular la temperatura del medio ambiente dentro de la caja de unicel.

La Figura 9 muestra la etapa de potencia.

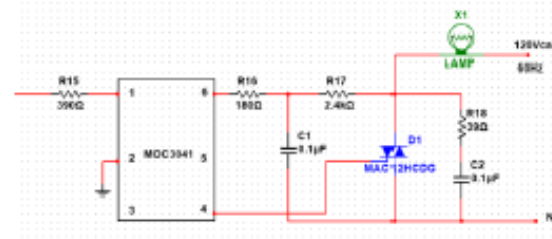


Fig 9. Etapa de potencia.

La corriente del MOC3041 y voltaje en saturación es de  $10\text{mA}$  y  $4\text{V}$  respectivamente. El voltaje necesario para encender el foco es de  $0.89\text{V}$ . Cuando se satura el diodo del optoacoplador MOC3041 a través de la resistencia R15, se activa el TRIAC MAC121D y la bombilla se enciende, de lo contrario, la bombilla se apaga.

La Figura 10 muestra la tarjeta de adquisición de datos por USB utilizada para el primer lazo de control.



Fig 10. Tarjeta de adquisición de datos por USB.

Sus características son: 8 canales digitales de salida, 8 canales digitales de entrada, 4 canales analógicos de entrada, 4 canales analógicos de salida, Interfaz USB 2.2 Full-speed, Visualización de forma de onda analógica y digital, Manejo de salidas digitales. El algoritmo de control introducido para control de temperatura del medio ambiente es.

$$Y_4 = 80 * \tanh(0.25 - x_1) + 172 \quad (2)$$

Donde  $Y_4$  es la salida digital 4 de la tarjeta,  $x_1$  es la entrada analógica 1 del pic donde se lee el voltaje del LM35 y el número 172 es el offset del MOC3041 correspondiendo al voltaje 0.89V.

#### B. Control de temperatura del lado frío de la celda peltier.

La Figura 11 muestra la etapa de potencia para el control de temperatura del lado frío de la celda peltier diseñado en el software Eagle.

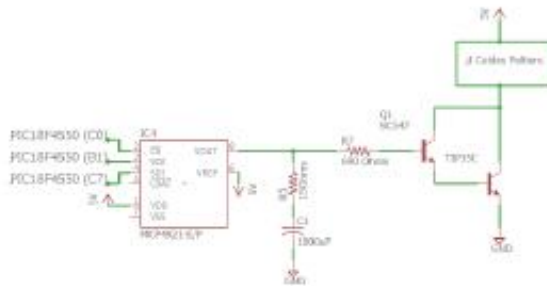


Fig 11. Etapa de potencia

Donde los pines de salida del PIC18F4550 van conectados al DAC MCP4921, el cual suministra de 0V a 5V. Enseguida va un filtro a 10Hz, esto para atenuar el ruido en la etapa de potencia. Y finalmente la configuración en Darlington de un transistor NPN TIP35C con un transistor NPN BC547. Las celdas peltiers van en el colector de los transistores. La ganancia de la conexión en Darlington es  $\beta = 741$ , el voltaje entre la base del BC547 y el emisor del Tip35C es de  $V_{cd} = 1.1436V$ .

La Figura 12 muestra la tarjeta Sputnik2 utilizada.



Fig 12. Tarjeta Sputnik2.

Las características de la tarjeta electrónica son: conector para dos dispositivos I2C, conector para batería de respaldo del IC DS 1307, conector para LCD 16x2, conector para puerto serial, pwm1 y pwm2, conector macho del puerto B, conector macho al puerto C, conector ICSP para programar el PIC18F4550.

El algoritmo de control introducido para control de temperatura del medio ambiente es.

$$I_{C_n} = I_{C_{n-1}} + K_p \tanh((t_{actual} - t_{deseada}) * 1.47) \quad (3)$$

Donde  $I_{C_n}$  es la corriente actual,  $I_{C_{n-1}}$  es la corriente anterior,  $K_p$  es la ganancia proporcional,  $t_{actual}$  es la temperatura actual,  $t_{deseada}$  es la temperatura deseada. La multiplicación 1.47 al error, sirve para tener un grado de error. La conversión a voltaje es.

$$V_{DAC} = \frac{I_C R_L}{\beta} + V_{CD} \quad (4)$$

Donde  $V_{DAC}$  es el voltaje del DAC MCP4921,  $V_{CD}$  es el voltaje de base a emisor de la conexión en Darlington,  $\beta$  es la ganancia del transistor en configuración Darlington,  $R_L$

es la resistencia R7 de la Figura 12. Y la conversión a número de bits es.

$$N_{VDAC} = \frac{\left(\frac{I_C R_L}{\beta} + V_{CD}\right)}{5V} * 4095 \quad (5)$$

Donde  $N_{VDAC}$  es el número de bits comprendido de 0 a 4095 debido a que el DAC MCP491 es de 12 bits.

#### 4. Manejador del APD

En la Figura 13 se muestra el diseño electrónico correspondiente al bloque manejador. Donde se muestra la fuente de alto voltaje, enseguida conectada al fotodiodo de avalancha y finalmente un amplificador de Transimpedancia OPA 659 debido a su tiempo de respuesta de 10ns.

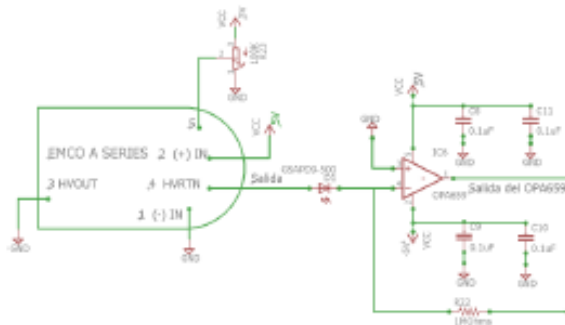


Fig 13. Bloque manejador.

La fuente de alto voltaje se energiza con 5V, y a través de un potenciómetro se varía el voltaje de salida en un rango de 0V a -260V. El voltaje de ruptura del fotodiodo es de 173V.

#### 5. Resultados

La Figura 14 muestra la respuesta del sistema con tres celdas peltier. La línea de color azul representa la temperatura del lado frío de la celda peltier. La línea de color gris representa la temperatura del medio ambiente, y la línea de color anaranjado representa la temperatura del disipador.

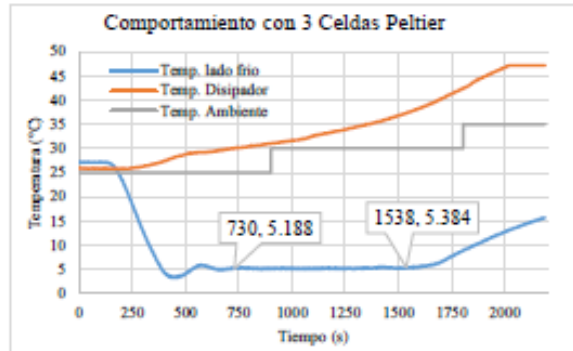


Fig 14. Comportamiento con 3 Celdas Peltier.

Respecto a la figura 14, aproximadamente en 730 segundos representa el control en estado estable, el voltaje es 2.72V y la corriente de 1.7A, por lo tanto, la potencia es.

$$P = (1.7A) * (2.72V) = 4.624W.$$

Y en 1538 segundos donde el sistema sale de control, se tiene voltaje de 4.16V y corriente de 2.6A, por lo tanto, la potencia es.

$$P = (2.6A) * (4.16V) = 10.816W.$$

La Figura 15 muestra el comportamiento con 4 celdas peltier.

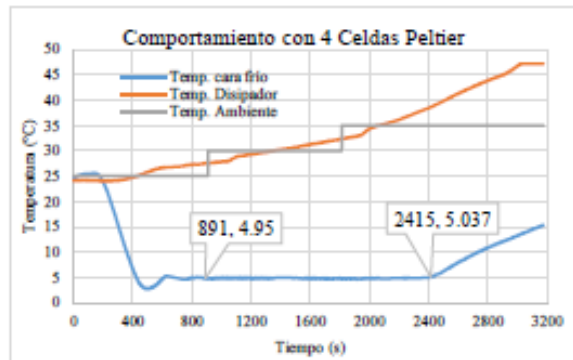


Fig 15. Comportamiento con 4 Celdas Peltier.

De acuerdo con la figura 15, en 891 segundos representa el control en estado estable, el voltaje es 2.72V y la corriente de 1.7A, por lo tanto, la potencia es.

$$P = (1.77A) * (2.832V) = 5.01W$$

Y en 2415 segundos donde el sistema sale de control, se tiene voltaje de 4.16V y corriente de 2.6A, por lo tanto, la potencia es.

$$P = (2.6A) * (4.16V) = 10.816W$$

La Figura 16 muestra el comportamiento con 5 celdas peltier.

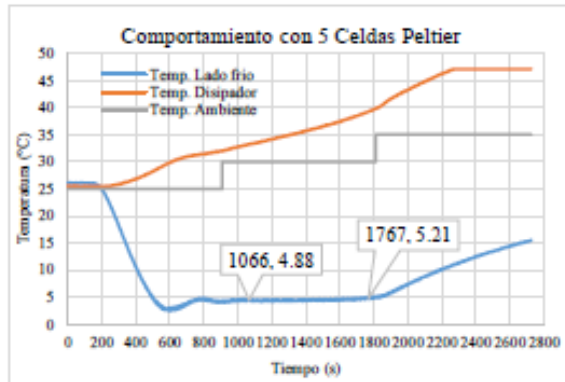


Fig 16. Comportamiento con 5 Celdas Peltier.

Respecto con la figura 16, aproximadamente en 1066 segundos representa el control en estado estable, el voltaje es 2.2V y la corriente de 3.52A, por lo tanto, la potencia es.

$$P = (2.2A) * (3.52V) = 8.195W$$

Y en 1757 segundos donde el sistema sale de control, se tiene voltaje de 5V y corriente de 3.13A, por lo tanto, la potencia es.

$$P = (3.13A) * (5V) = 15.675W$$

De las gráficas 14, 15 y 16, se observó que el número de celdas a trabajar es con 4, debido a que la temperatura del disipador se encuentra inferior al incremento de la temperatura ambiente, y el tiempo máximo donde falla el control es en 2415 segundos. También se observa que, en cierto tiempo, el control de temperatura falla aproximadamente en 40°C en el disipador. La sugerencia fue colocar dos barras de aluminio con dimensiones de 20 cm x 10cm. La Figura 17 muestra el comportamiento con 4 celdas peltier incluida la barra de aluminio.

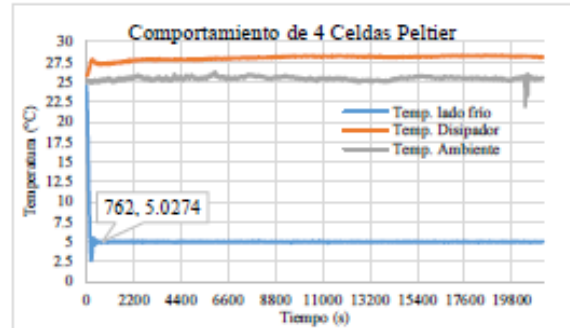


Fig 17. Comportamiento con 4 Celdas Peltier y disipador.

De acuerdo con la figura 17, en 762 segundos representa el control en estado estable, el voltaje es 2.36V y la corriente de 1.48A, por lo tanto, la potencia es.

$$P = (1.48A) * (2.36V) = 3.5046W$$

La Figura 18 muestra el diseño del prototipo extrapolado en SolidWorks 16.0.

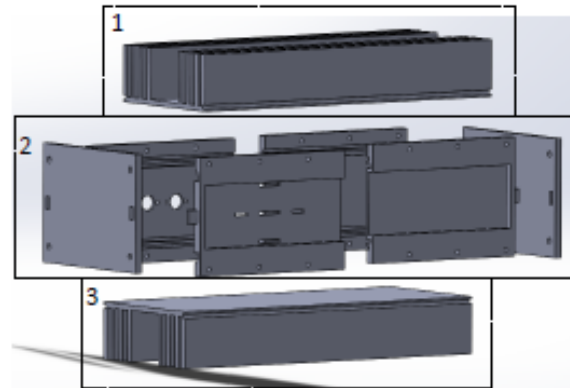


Fig 18. Diseño en SolidWorks 16.0.

En los rectángulos 1 y 3 de la figura 18 representa al disipador de aluminio con medidas de: largo=20cm., ancho=10cm., alto=5cm.

En el rectángulo 2 de la figura 18 se encuentran dos tapas y cuatro soportes. Las medidas de las tapas son: largo=9.5cm., ancho=4cm., alto=7.1cm. En un soporte, van a ir fijados dos fotodiodos de avalancha. En otro soporte van a salir los cables del bloque manejador, los dos sensores LM35, y los cables de los dos controles de temperatura. Finalmente, en los dos últimos soportes que no tienen perforación, será utilizados para cerrar el prototipo. Las medidas de los cuatro soportes son: largo=10cm., ancho=5cm., alto=7.1cm.

La Figura 19 muestra el prototipo ensamblado. Se observa las piezas impresas de SolidWorks atornilladas a los dos disipadores. Los dos disipadores atornillados a la barra de aluminio a través de L y con pasta térmica para que transfiera el calor generado de las celdas al disipador, barra de aluminio.



Fig 19. Prototipo.

## 6. Conclusiones

En el presente artículo se presentó un sistema de adquisición de datos, en el cual se hizo énfasis en los bloques APD y en el Manejador. El control clásico se suprimió en este control de temperatura debido a la naturaleza de la celda peltier, es decir cada vez que se llegaba a la temperatura deseada, el error era cero, la respuesta del control fue nula y entonces la celda peltier aumentaba su temperatura en el lado frío. Por lo tanto, la ecuación (3) brindó un mejor desempeño en el control de temperatura evitando el fenómeno de aumento de temperatura.

Una de las ventajas principales de este sistema de adquisición de datos es la restricción de un ventilador en función de extractor, y el costo inferior respecto al fotodetector que existe en el mercado.

## 7. Referencias

- [1] Pérez García Miguel Ángel. 2014. Instrumentación electrónica. Editorial Paraninfo. Primera edición. pp 398.
- [2] D. Renker. (2006). Geiger-mode avalanche photodiodes, history, properties and problems. *Science Direct*, 52.
- [3] G. Patterson, M. Sobral. Efecto Peltier. Departamento de Física FCEyN. Universidad de Buenos Aires. Diciembre 2007.
- [4] W.J. Kindt, N.H. Shalrjerdy, H.W. van Zeijl. (1997). A silicon avalanche photodiode for single optical photon counting in the Geiger mode. *Science Direct*, 99.
- [5] Platero Carlos, Castedo Luis, Ferré Manuel y Vicente Carlos. Control clásico y moderno sobre células Peltier en un entorno didáctico. pp 1.

## 8. Biografías



**Dany Ivan Martínez De La Cruz.** Nació el 4 de junio de 1991 en Chicoutepic, Veracruz, México. Realizó su licenciatura en Ingeniería Electrónica en la Facultad de Ingeniería Eléctrica en la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo en 2015, estudiante de la maestría de la Facultad de Ciencias de la Electrónica de la Universidad Autónoma de Puebla, México.



**María Aurora Diezcora Vargas Treviño,** nació en la ciudad de Puebla, Puebla el 14 de diciembre de 1972. Licenciatura en Electrónica FCE-BUAP Puebla, Puebla, México, 1994. Maestría en Ciencias especialidad en Optoelectrónica FCFM-BUAP, Puebla, Puebla, México 1997, Doctorado en Ciencias especialidad en Optoelectrónica, FCFM-BUAP, Puebla, México, 2000. Ella es desde el 2005 Profesor

Investigador en la Facultad de Ciencias de la Electrónica de la BUAP en la ciudad de Puebla, Puebla, México, sus líneas de investigación son la instrumentación electrónica, la robótica, el control y la automatización.



**Víctor Manuel Velázquez Aguilar.** Nació en la Ciudad de México, México el 22 de octubre de 1964. Obtuvo su licenciatura y maestría en física en la Facultad de Ciencias de la UNAM. En 1999 obtuvo el Doctorado en Física Nuclear en el CINVESTAV del IPN. A partir del 2003 forma parte del personal académico del Departamento de Física de la Facultad de Ciencias de la UNAM. Sus líneas de investigación son la Estructura Nuclear, Complejidad Cuántica y Óptica Cuántica. El Dr. Velázquez es Investigador Nacional nivel II.



**Sergio Vergara Limón,** nació en la ciudad de Puebla, Puebla el 7 de octubre de 1970. Licenciatura en Electrónica de 1970. Licenciatura en Electrónica FCE-BUAP Puebla, Puebla, México, 1994. Maestría en Ciencias especialidad en Optoelectrónica FCFM-BUAP, Puebla, Puebla, México, 1997, Doctorado en Ciencias especialidad en Optoelectrónica, FCFM-BUAP, Puebla, Puebla, México, 2000. El es desde el 2005 Profesor Investigador en la Facultad de Ciencias de la Electrónica de la BUAP en la ciudad de Puebla, Puebla, México, sus líneas de investigación son la instrumentación electrónica, la robótica, el control y la automatización.



**Jaime Cid Menjaraz.** Nació en Puebla, Puebla, México el 28 de enero de 1959. Realizó su licenciatura en Electrónica en la Facultad de Ciencias Físico Matemáticas de la BUAP en 1985, Maestría en Control Automático en el Instituto Tecnológico de Puebla en 1995 y el Doctorado en Ingeniería Mecatrónica en la Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla en el año de 2007 en Puebla, México. Es autor de 3 libros, con más de 100 publicaciones científicas, en congresos nacionales e internacionales y revistas, asesor en más de 50 trabajos de tesis profesionales de licenciatura y maestría, tiene 9 solicitudes de patente, su línea de investigación es en Visión y Robótica.



**Luis Ernesto Valencia Segura.** Nació en Puebla, Puebla, el 20 de junio de 1982. Licenciatura en Electrónica FCE-BUAP Puebla, Puebla, México, 2007. Maestría en Ciencias de la Electrónica opción en Automatización FCE-BUAP, Puebla, Puebla, México 2016.

## Apéndice C. Estancia

En esta sección se describe las actividades realizadas en el laboratorio de óptica avanzada en la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México, a cargo del Dr. Víctor Manuel Velásquez Aguilar. El periodo de la estancia fue de 01 de junio al 31 de julio.

### Constancia

Ciudad de México, a 1 de Agosto de 2018  
ASUNTO: Constancia de Estancia de Investigación

Dirección del Programa de  
Becas de Movilidad para Becarios CONACYT.  
PRESENTE:

Por medio de la presente hago constar que el Ing. Dany Ivan Martinez de la Cruz estudiante de la Maestría en Ciencias de la Electrónica opción Automatización de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, realizó una estancia de investigación en la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México a cargo del Dr. Víctor Manuel Velásquez Aguilar, del 01 de junio al 31 de julio de 2018.

Sin más por el momento y agradeciendo la atención prestada me despido cordialmente de usted quedando a sus órdenes.

Atentamente



---

Dr. Víctor Manuel Velásquez Aguilar  
Universidad Nacional Autónoma de México

## Reporte de la estancia

1. Se diseñó la etapa de filtro del APD a través de 9 operacionales de transimpedancia en configuración de: seguidor de emisor, amplificador inversor, integrador, sumador inversor, ver Figura C.1. El filtro pasa banda tiene un ancho de banda de 11.35MHz a 15.9MHz.

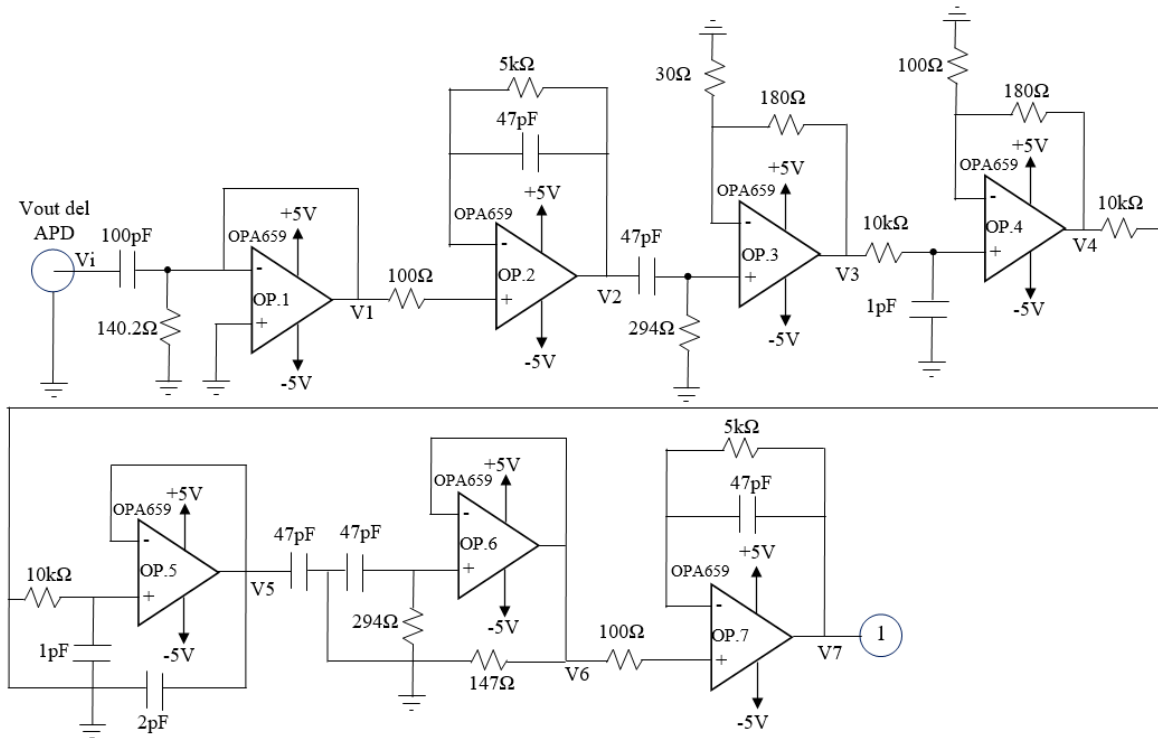


Figura C.1: Etapa de filtro.

En la figura C.2 se muestra la etapa donde se suma ruido inducido para atenuar la señal del APD con ganancia de 2. Y finalmente se utiliza un comparador a través del MAX9203. Si V8 es mayor al voltaje de referencia, la salida del comparador será 5V, de lo contrario será 0V. La salida del comparador es conectado a un conector LEMO para atenuar el ruido electromagnético.

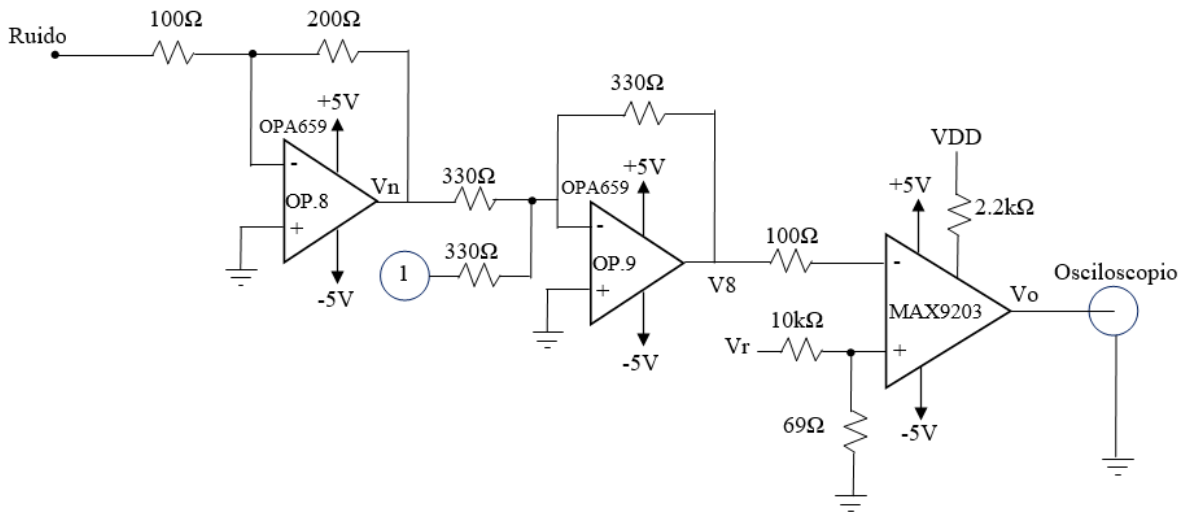


Figura C.2: Etapa de inducción del ruido y comparador.

2. La figura C.3 muestra el circuito eléctrico para adquirir la señal eléctrica del detector 818-BB-21, donde la fuente de luz es el VCSEL Honeywell HFE4381-904.

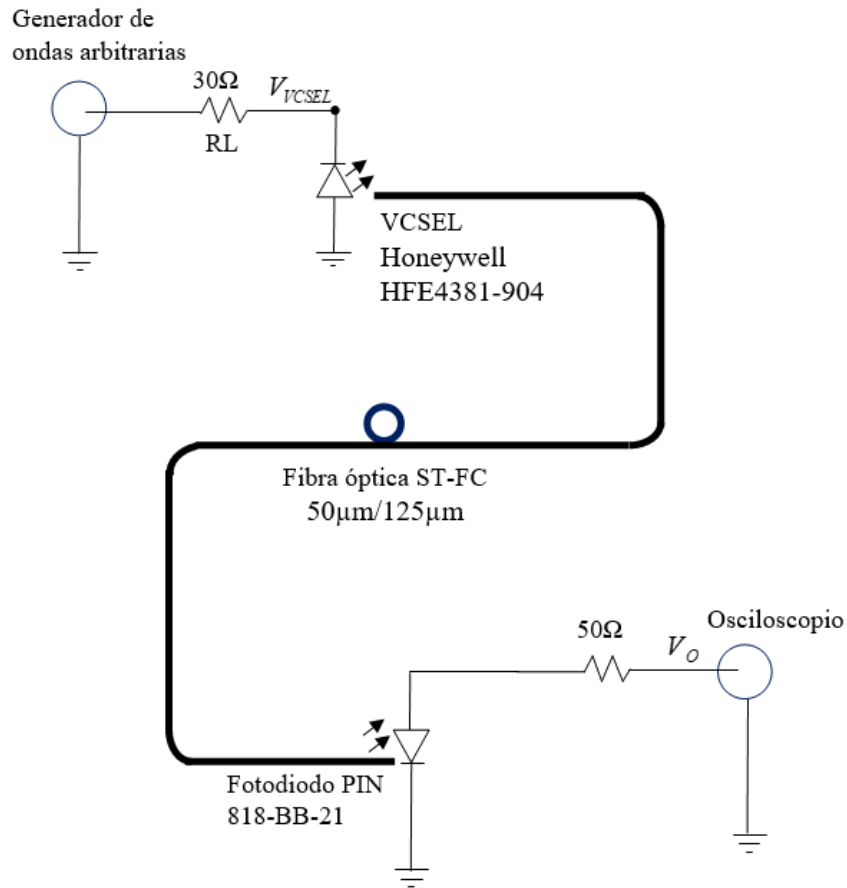


Figura C.3: Circuito eléctrico para el detector 818-BB-21.

En el generador de ondas arbitrarias se configuró un pulso con ancho de  $1\mu\text{s}$ , amplitud de voltaje en bajo de  $1\text{V}$ , voltaje en alto de  $1.8\text{V}$ .

La figura C.4 muestra la respuesta del detector 818-BB-20 señal café, con respecto a la señal del generador de funciones señal azul. La prueba se realizó en un ancho de pulso de  $1\mu\text{s}$  y  $500\text{ns}$ . El acople de impedancia en el osciloscopio fue de  $50\Omega$ .

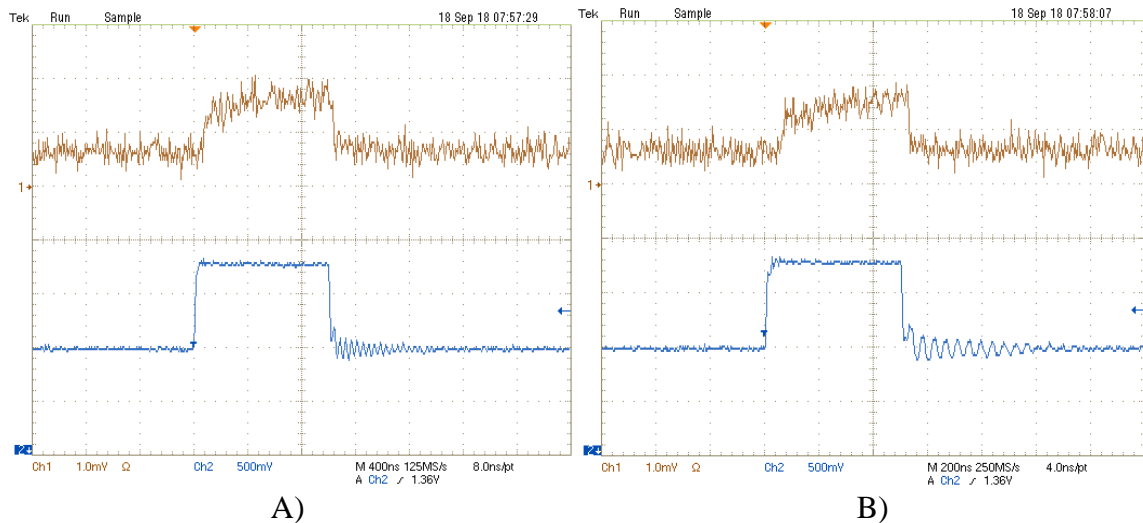


Figura C.4: A) Respuesta de la punta óptica a  $1\mu\text{s}$ . B) Respuesta de la punta óptica a  $500\text{ns}$ .

La figura C.5 muestra la respuesta del detector 818-BB-21 señal café, con respecto a la señal del generador de funciones señal azul. La prueba se realizó en un ancho de pulso de  $100\text{ns}$  y  $50\text{ns}$ .

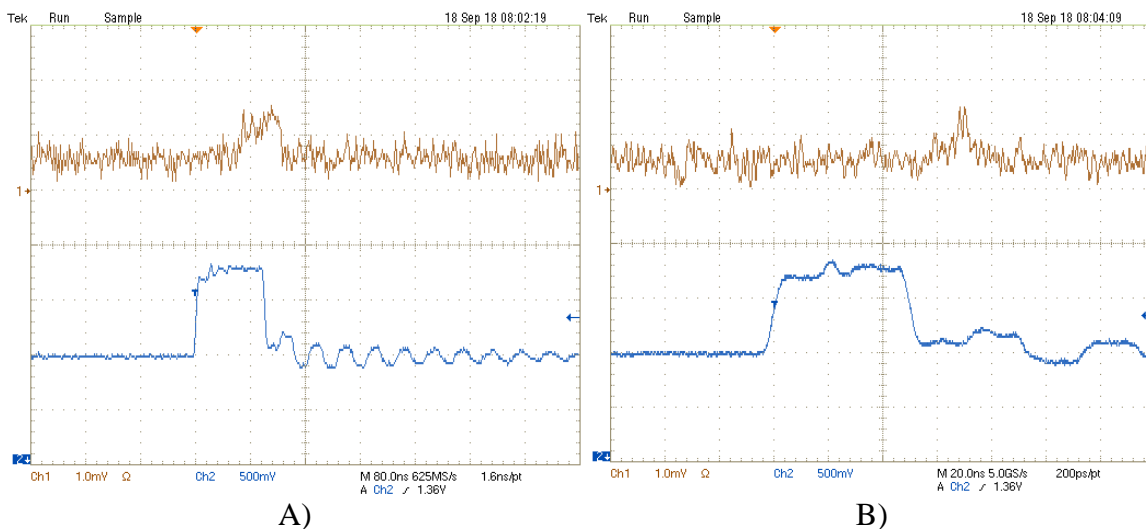


Figura C.5: A) Respuesta de la punta óptica a  $100\text{ns}$ . B) Respuesta de la punta óptica a  $50\text{ns}$ .

3. Se acondicionó el experimento de óptica cuántica: conteo de fotones, el diagrama a bloques del experimento se muestra en la siguiente figura C.6. Las aplicaciones en el laboratorio de óptica avanzada de la facultad de ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México son; obtención de la estadística de la fuente óptica, la caracterización de las fuentes ópticas, la coincidencia en función de la correlación, la prueba de existencia del fotón, etcétera.

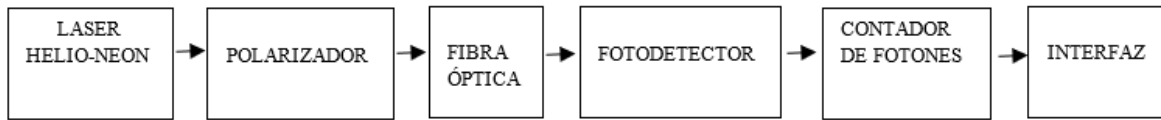


Figura C.6: Diagrama de bloques del experimento óptico.

La fuente óptica consiste de un laser que opera a una longitud de onda de 633nm. Después se utiliza un polarizador que su función es atenuar la señal proveniente del láser. Se utiliza una fibra multimodo con conector FC-FC de longitud de 3 metros.

En el bloque fotodetector se utilizó el detector GSAPD9-500 y el detector SPCM-AQR. Después existe un contador de fotones y una interfaz donde muestra el número de cuentas en LabView 2010.

La figura C.7 muestra la respuesta del detector APD GSAPD9-500 vista en el osciloscopio.

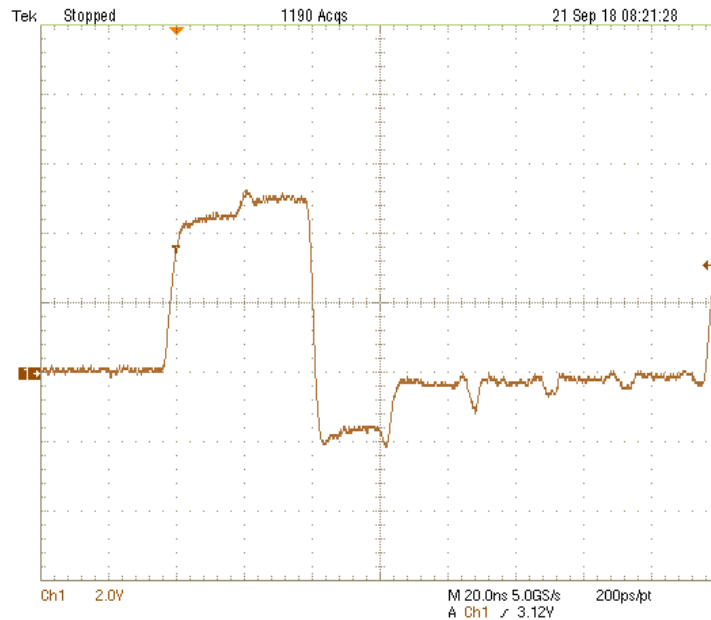


Figura C.7: Respuesta del APD GSAPD9-500.

Se observa un pulso de amplitud de 5V, el periodo de la señal es de 40 ns. El experimento se realizó con una fuente de laser rojo HeNe R-30991 de 633nm y 4mW. La figura C.8 muestra la respuesta en la interfaz, donde se muestra un número de 720444 fotones en un segundo.

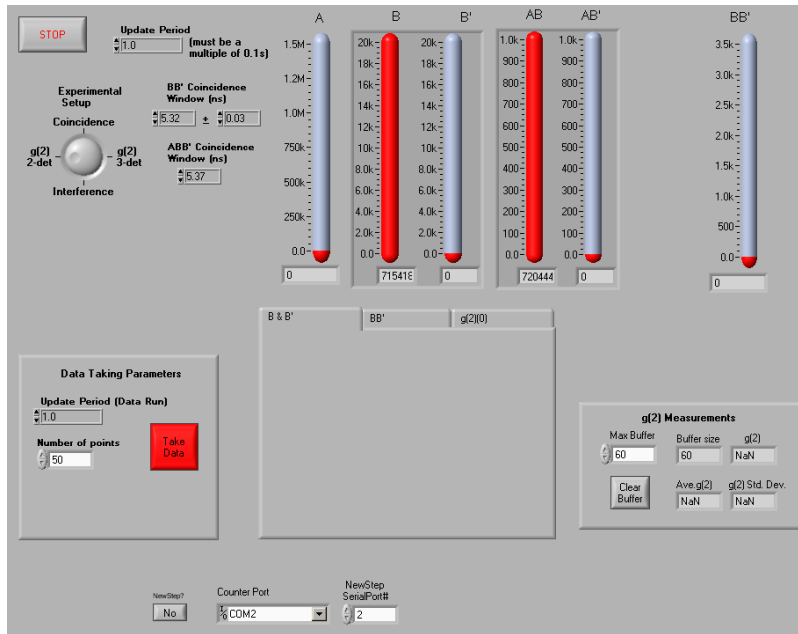


Figura C.8: Número de fotones del APD GSAPD9-500.

La figura C.9 muestra el número de fotones cuando no se incide el laser He-Ne.

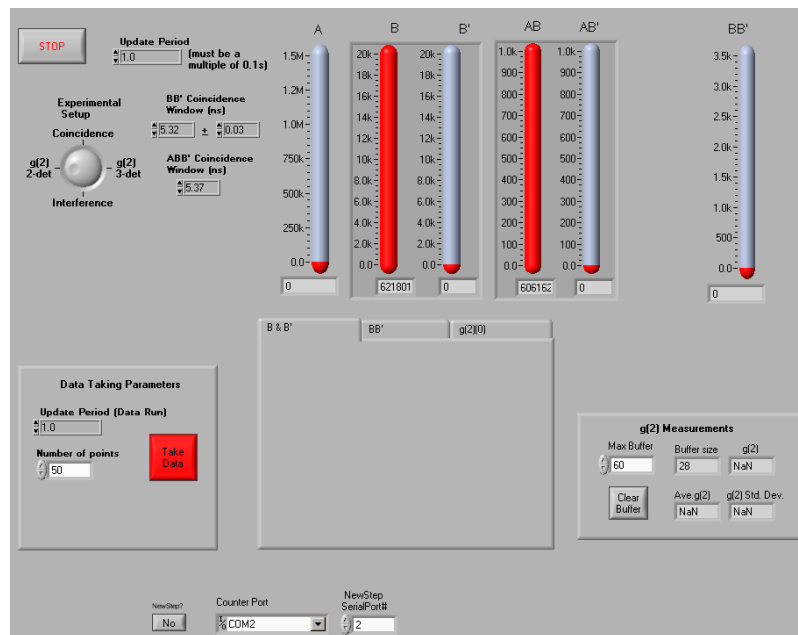


Figura C.9: Respuesta del APD GSAPD9-500 sin incidencia de luz.

Se observa que se tiene el mismo número de fotones, lo cual demuestra que este APD no es el adecuado para realizar éstos experimentos de óptica cuántica.

La figura C.10 muestra la respuesta del detector SPCM-AQR vista en el osciloscopio. Se observa un pulso de amplitud de 5V, el periodo de la señal es de 20 ns. El experimento se realizó con una fuente de laser rojo HeNe R-30991 de 633nm y 4mW.

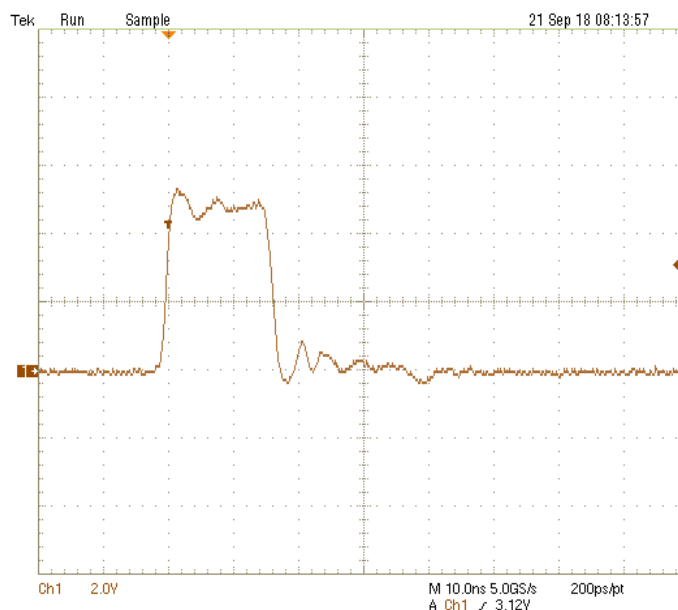


Figura C.10: Respuesta del detector SPCM-AQR.

La figura C.11 muestra la respuesta en la interfaz, donde se muestra un número de 1200444 fotones en un segundo.

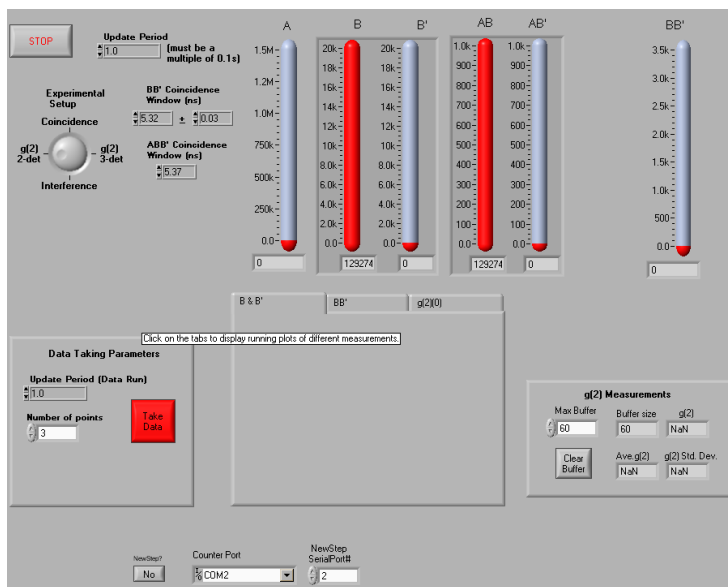


Figura C.11: Número de fotones del detector SPCM-AQR.

La figura C.12 muestra el número de fotones cuando no se incide el laser He-Ne.

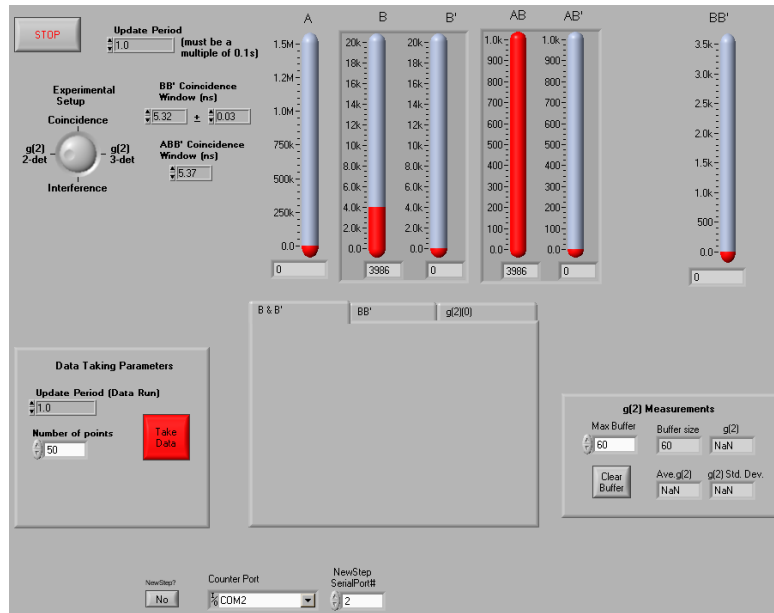


Figura C.12: Respuesta del detector SPCM-AQR sin incidencia de luz.

Se observa que existe una diferencia entre el detector GSAPD9-500 y el detector SPCM-AQR cuando el laser está apagado. Las razones se deben a que el fotodiodo utilizado en el detector GSAPD9-500 no opera en modo Geiger, y es necesario una etapa electrónica de apagado del APD para que realice el muestreo de la señal del laser.

## Apéndice D. Manual de usuario

En esta sección se describe un manual de usuario para el correcto uso del fotodetector APD GSAPD9-500, primero se describe el hardware, después el software de programación del control de temperatura y finalmente las instrucciones de uso.

### Descripción del hardware

La figura D.1 muestra la fuente de voltaje que suministra 5V, 3.3V, 12V y -12V. La figura D.2 muestra un gabinete donde se encuentra la etapa de control de temperatura.

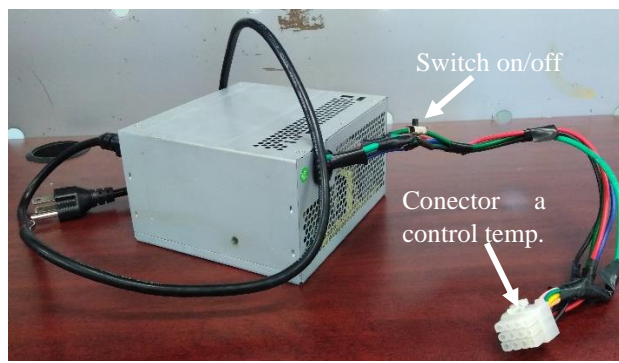


Figura D.1: Fuente de voltaje.

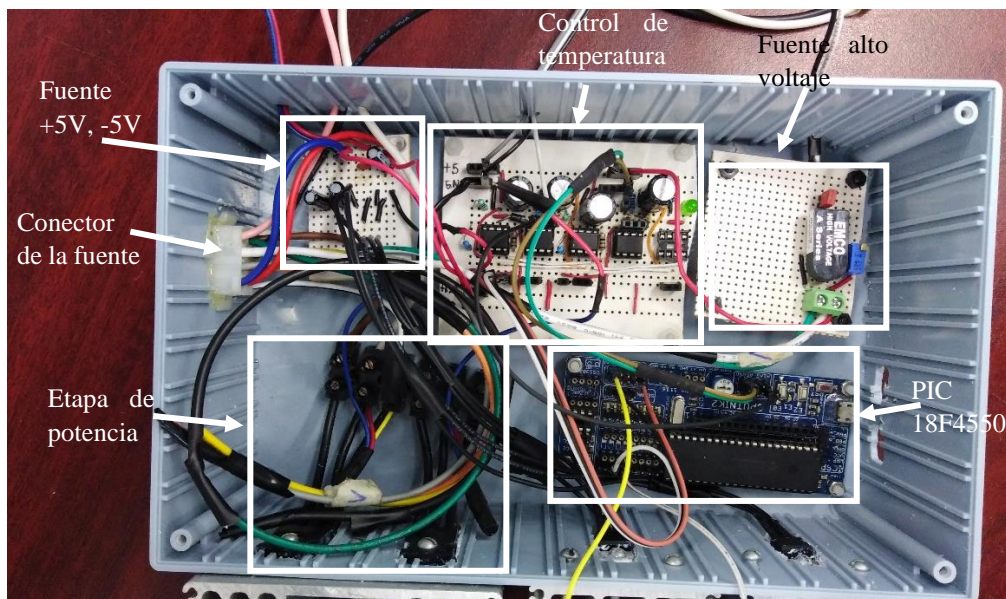


Figura D.2: Gabinete de control de temperatura.

La figura D.3 muestra las especificaciones de los cables de salida del gabinete del control de temperatura y el detector GSAPD9-500. Se debe tener en cuenta lo siguiente; el cable azul representa -5V y el cable rojo es +5V, el cable de color negro de alimentación de las celdas es +5V, mientras que el cable blanco va conectado al colector del transistor TIP35C.

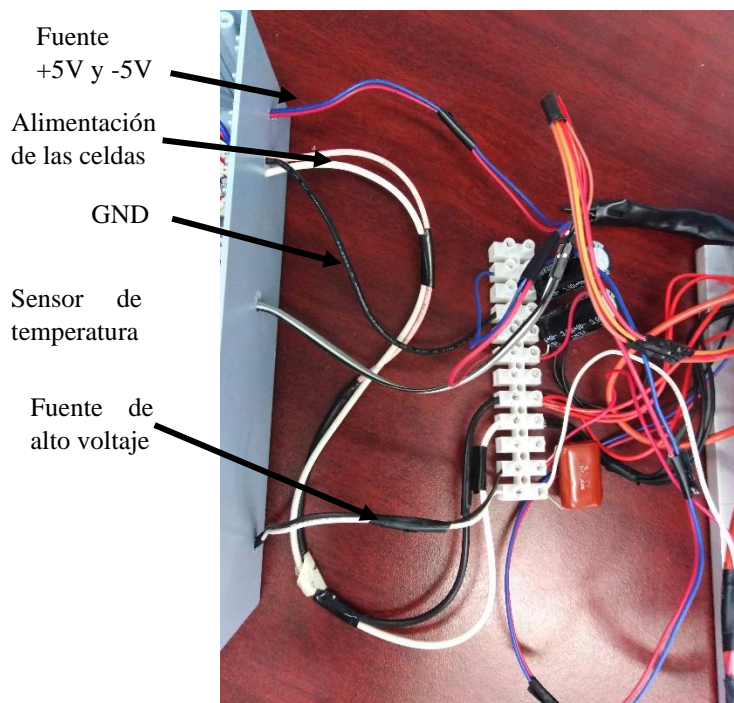


Figura D.3: Especificación de los cables de salida del control de temperatura.

La figura D.4 muestra un gabinete donde se encuentra la etapa de filtro de la señal del APD. Las consideraciones son; el trimpot de color azul representa el voltaje de umbral del comparador MAX9203, la salida del detector va conectado a la entrada de la etapa del filtro.

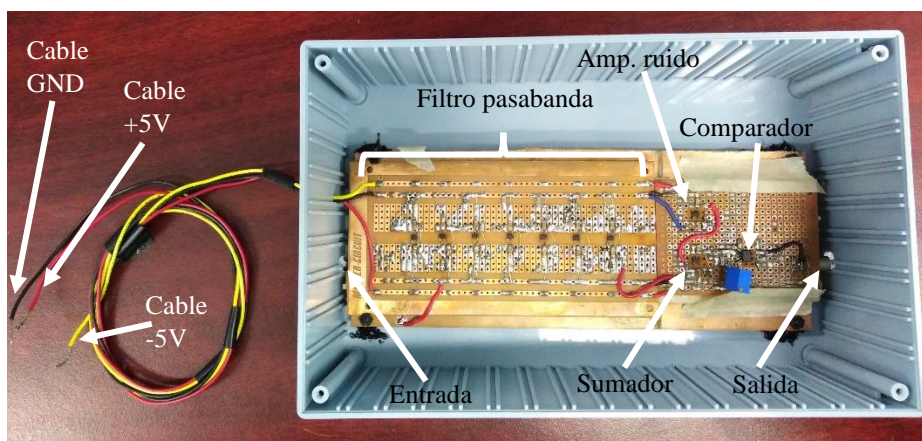


Figura D.4: Gabinete de la etapa de filtro.

La figura D.5 muestra el prototipo desarrollado, visto de manera frontal, donde se encuentra el conector LEMO, los cables de alimentación del fotodiodo APD y los cables del amplificador de transimpedancia.

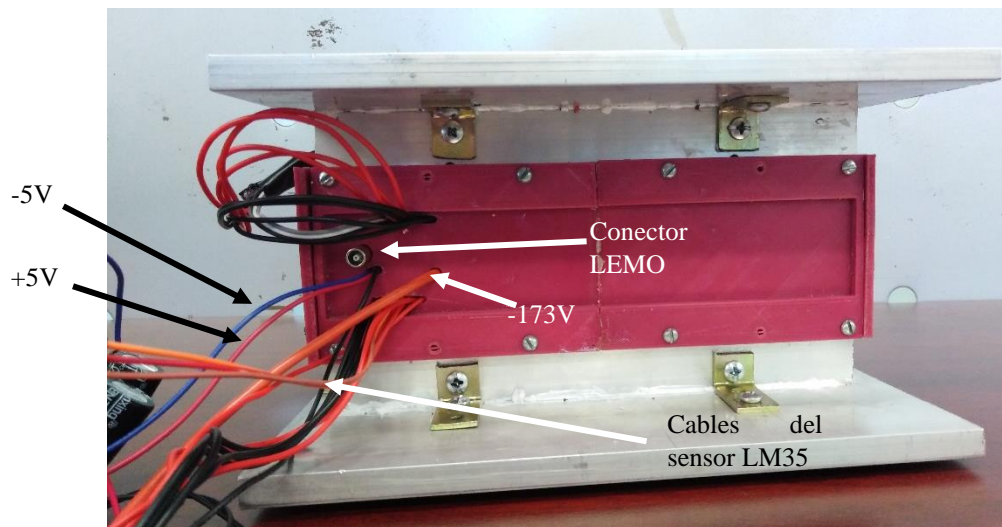


Figura D.5: Vista frontal del detector.

En la figura D.6 muestra la parte trasera del detector, donde se encuentra el conector ST del fotodiodo APD, ahí se conecta la fibra óptica multimodo, que es el medio de comunicación entre el VCSEL y el APD.

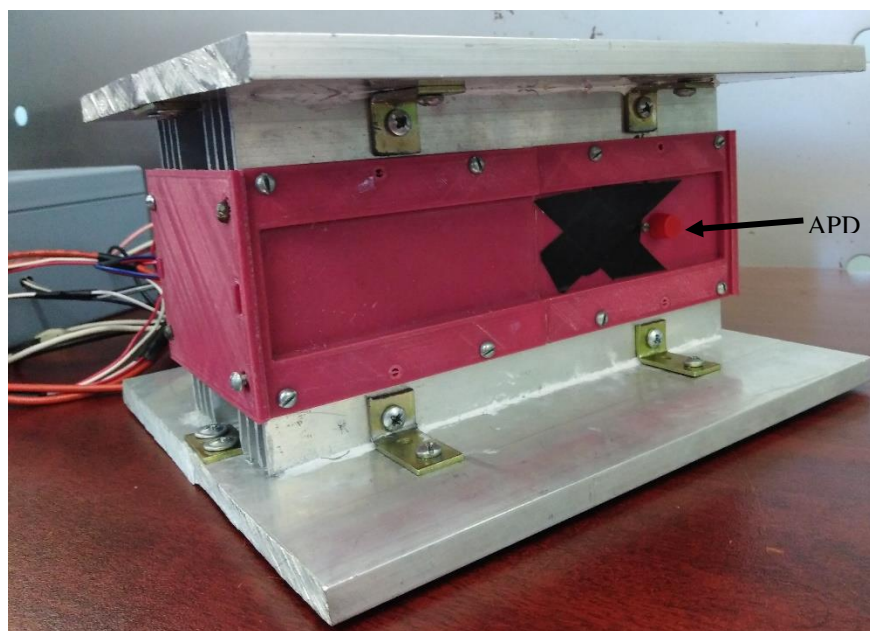


Figura D.6: Vista trasera del detector GSAPD9-500.

## Descripción del software

La descripción del software para el control de temperatura se basa en el diagrama de flujo de la figura 3.17, pero con un lazo de control de temperatura, ver Figura D.7.

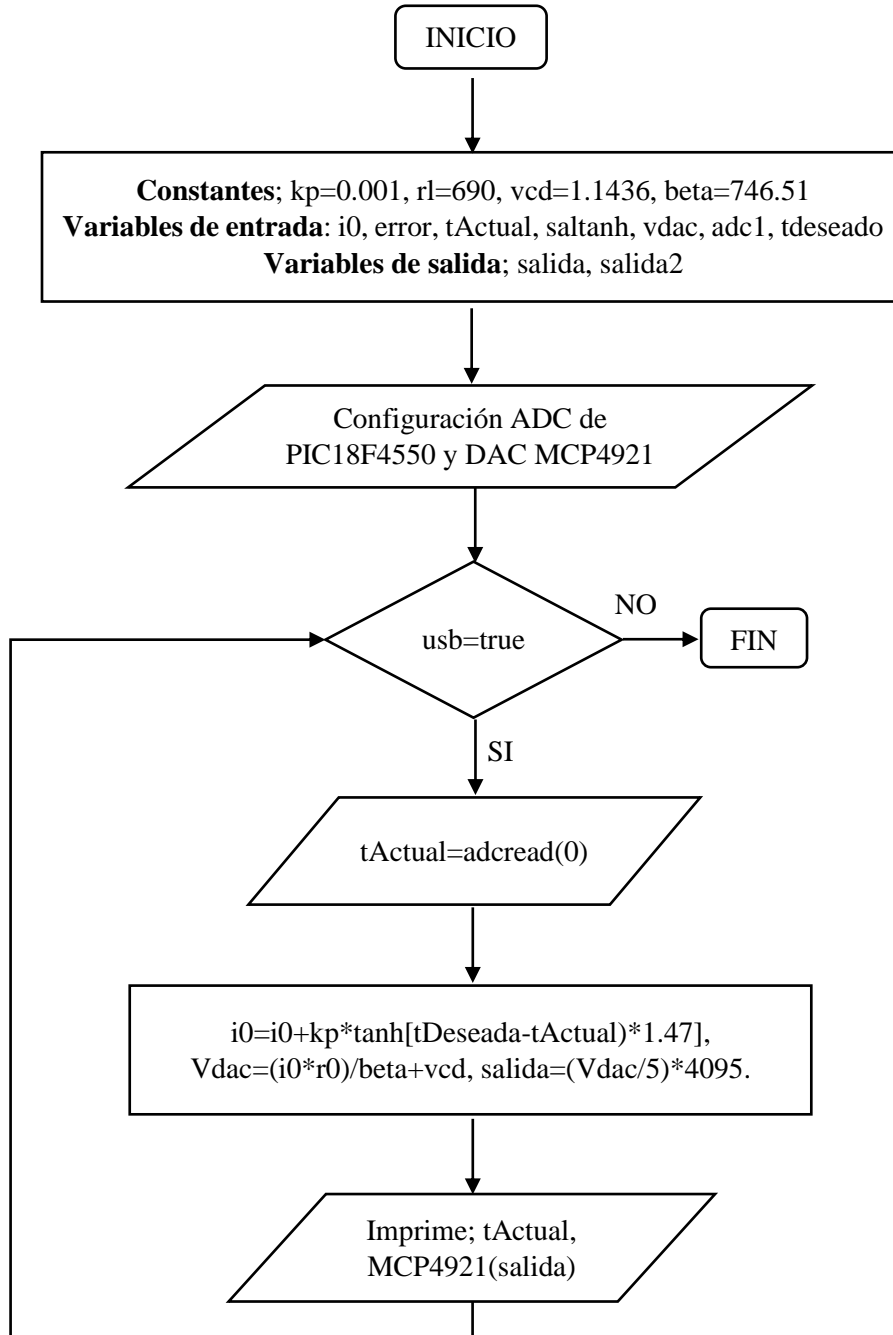


Figura D.7: Diagrama de flujo para la programación en CCS Compiler.

Primero se definen las constantes, como; constante proporcional,  $r_l$ ,  $v_{cd}$ , y la ganancia del transistor en configuración darlington, después las variables de entrada y finalmente las variables de salida de tipo flotante.

Después se configuró el ADC del PIC 18F4550 para la lectura de la temperatura, y también se configura los pines para la comunicación SPI con los DAC MCP4921. Enseguida se verifica que la comunicación USB sea correcta, esto para que imprima las temperaturas en el monitor de la computadora. Se obtiene la temperatura de la celda. Se realiza el lazo de control de temperatura. Y finalmente se imprime la temperatura actual, y se envía el valor de la variable salida al DAC MCP4921 en un rango de 0 a 4095.

## **Instrucciones de uso**

1. Conectar la fuente de voltaje al módulo del control de temperatura.
2. Conectar los cables de alimentación de las celdas a la clema de potencia, y también conectar los cables del sensor de temperatura LM35.
3. Activar el interruptor de encendido de la fuente de voltaje, y esperar a que el led verde encienda, en ese instante el control de temperatura estará funcionando.
4. Observar en la parte trasera del detector GSAPD9-500 que tenga el protector para evitar dañar al fotodiodo con la luz ambiente.
5. Con cuidado quitar el protector para conectar el VCSEL a través de fibra óptica multimodo con conector ST/ST.
6. En el generador de ondas arbitrarias configurar un pulso con voltaje en alto de 1.8V, voltaje en bajo de 1V, frecuencia de 1MHz y ancho de pulso de 50ns.
7. Conectar la salida del generador de ondas arbitrarias al osciloscopio con un cable LEMO y observar el pulso generado. Se recomienda una impedancia de  $50\Omega$  en el osciloscopio.
8. Con un cable LEMO conectar la salida del detector GSAPD9-500 al módulo de la etapa de filtro.
9. En la salida del módulo de filtro conectar un cable LEMO al osciloscopio. Se recomienda verificar que el acople de impedancia sea de  $50\Omega$  en el osciloscopio.
10. Ajustar las dos señales en el osciloscopio modificando el voltaje y el tiempo para tener una mejor visualización de las señales.

# Apéndice E. TOEFL ITP

## TOEFL ITP Score Report

Name of Institution: FACULTAD DE LENGUAS DE LA BUAP

Name: MARTINEZ DANY

Student Number: 216470583

DOB: 06/04/1991

Sex: M Degree:

Times Taken TOEFL: 1

Native Country: Mexico

Native Language: Spanish

Scaled Scores:

Listening Comprehension: 45

Test Date: 05/18/2018

Structure & Written Expression: 48

Form: TOEFL ITP

Reading Comprehension: 50

Total Score: 477



The face of this document has a security background. The back contains a watermark. Hold at an angle to view.

The TOEFL® ITP Assessment Series is designed to be used for placement, progress monitoring, and exit purposes. TOEFL® ITP scores can also be used for admissions to programs and institutions where English is not the dominant language of instruction for content courses. Learn more at [www.ets.org/toefl\\_itp/use](http://www.ets.org/toefl_itp/use).

119631-16573 • FB317C100 • Printed in U.S.A.

I.N. 770462

Copyright © 2012 by Educational Testing Service

**Student's File Copy  
Do Not Copy**

## Bibliografía

- [1] C. Fow-Sen, X. Zhao, Y. Xiuqin, *et al*, An optical packets switch based on WDM technologies. *J. Lightwave Technol.* 23(3), pp. 994-1014, 2005.
- [2] Sattárot D. K. 1977. *Fibroóptica*. Editorial Mir Moscú. Primera edición. pp 35, 36.
- [3] Tomasi Wayne. 2003. *Sistemas de comunicaciones electrónicas*. Editorial Prentice Hall. Cuarta edición. pp , 423.
- [4] VCSEL Diodo Laser, disponible en: <http://www.lasermate.com/tstma4x-2h.htm>
- [5] N, Mukoyama, H. Otama, J. Sakurai. N. Ueki, H. Nakayama, VCSEL array-based light exposure system for laser printing, in *Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers XII*, ed, by C. Lei, J. K, Guenter. *Proceedings of SPIE*, vol. 6908 (2008), p. 69080H-
- [6] N. Ueki, H. Tezuka, A. Ota, Vertical-cavity Surface-emitting laser diode (VCSEL)-VCSEL array and its application to the copier. *J. Imaging Soc. Jpn.* 44, 149 (2005)
- [7] Pérez García Miguel Ángel. 2014. *Instrumentación electrónica*. Editorial Paraninfo. Primera edición. pp 398.
- [8] R. J. McIntrye, Theory of Microplasma instability in silicon, *J. Appl. Phys.*, vol 32, pp. 983, 1961
- [9] R. H. Haitz, “Model for the electrical behavior of a microplasma” *J. Appl. Phys.*, vol 35, pp. 1370, 1964.
- [10] D. Renker. (2006). Geiger-mode avalanche photodiodes, history, properties and problems. *Science Direct*, 52.
- [11] K. Yamamoto, Patent No. Jp S49-59585, 1972.
- [12] Fotodiodos, disponible en: <https://www.rp-photonics.com/photodiodes.html>
- [13] España Boquera María Carmen. 2005. *COMUNICACIONES ÓPTICA Conceptos esenciales y resolución de ejercicios*. Editorial DIAZ DE SANTOS. Primera edición. pp 124.
- [14] LIDAR, disponible en: <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geodesia/lidar.aspx>
- [15] Espectroscopia de Correlación de Fotones, disponible en: <http://www.malvern.com/es/products/technology/dynamic-light-scattering/>

- [16] Óptica adaptativa, disponible en:  
<http://www.iac.es/gabinete/iacnoticias/2-99/gtc/gtc3.htm>
- [17] Palubiak Darek, El-Desouki Munir M. et. al. High-Speed, Single-Photon Avalanche-Photodiode Imager for Biomedical Applications. *IEEE SENSORS JOURNAL*, VOL. 11, NO. 10, OCTOBER 2011.
- [18] Michalet Xavier, Ingargiola Antonino, et. al. Silicon Photon-Counting Avalanche Diodes for single- Molecule Fluorescence Spectroscopy. *IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN QUANTUM ELECTRONICS*, VOL. 20, NO. 6, NOVEMBER/DECEMBER 2014.
- [19] Martino Marisaldi, Maccagnani Piera, et. al. Single Photon Avalanche Diodes for Space Applications. *IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record*, 2011.
- [20] Li Yichen, Videv Stefan, et. al. Single Photon Avalanche Diode (SPAD) VLC System and Application to Downhole Monitoring. *Optical Networks and Systems Symposium. Globecom 2014*.
- [21] SPCM-AQR, disponible en:  
[https://sites.fas.harvard.edu/~phys191r/Bench\\_Notes/D4/SPCMAQR.pdf](https://sites.fas.harvard.edu/~phys191r/Bench_Notes/D4/SPCMAQR.pdf)
- [22] SPCM-AQ4C, disponible en:  
[http://www.excelitas.com/downloads/DTS\\_SPCM-AQ4C.pdf](http://www.excelitas.com/downloads/DTS_SPCM-AQ4C.pdf)
- [23] Paul Malvino Albert. *Principios de electrónica*. Editorial McGraw W-Hill. 2000. Sexta edición. pp 720.
- [24] Reyes Carlos A. *Microcontroladores Programación en BASIC*. 2006. Editorial Microchip. Segunda edición. pp 17.
- [25] Manual de usuario DE2, disponible en:  
[ftp://ftp.altera.com/up/pub/Webdocs/DE2\\_UserManual.pdf](ftp://ftp.altera.com/up/pub/Webdocs/DE2_UserManual.pdf)
- [26] Singh Jaspirth. *Semiconductor Optoelectronics Physics and Technology*. 1995. Editorial McGRAW-HILL. Primera edición. pp.
- [27] Ruido espectral, disponible en  
[http://www.perkinelmer.com/CMSResources/Images/446538APP\\_AvalanchePhotodiodesUsersGuide.pdf](http://www.perkinelmer.com/CMSResources/Images/446538APP_AvalanchePhotodiodesUsersGuide.pdf)
- [28] W.J. Kindt, N.H. Shahrjerdy, H.W. van Zeijl. (1997). A silicon avalanche photodiode for single optical photon counting in the Geiger mode. *Science Direct*, 99.
- [29] Fotodiodo APD GSAPD9-500, disponible en:  
<https://chinese.alibaba.com/product-detail/silicon-500um-avalanche-photodiode-apd--60571017827.html>

- [30] OPA 659, disponible en:  
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa659.pdf>
- [31] Alexander and Sadiku, 2006. Fundamentos de circuitos eléctricos. Editorial McGraw-Hill. Tercera edición. pp. 7, 11.
- [32] Convertidor CD-CD, disponible en:  
<http://www.digikey.com.mx/products/es/power-supplies-board-mount/dc-dc-converters/922?k=&pkeyword=&pv1525=407&FV=ffecb99&mnonly=0&newproducts=0&ColumnSort=0&page=1&quantity=0&ptm=0&fid=0&pageSize=25>
- [33] G. Patterson, M. Sobral. Efecto Peltier. Departamento de Física FCEyN. Universidad de Buenos Aires. Diciembre 2007.
- [34] Platero Carlos, Castedo Luis, Ferre Manuel y Vicente Carlos. Control clásico y moderno sobre células Peltier en un entorno didáctico. pp 1.
- [35] Celda Peltier TEC1-12705, disponible en  
<http://peltiermodules.com/peltier.datasheet/TEC1-12705.pdf>
- [36] Sensor de temperatura LM35, disponible en  
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm35.pdf>
- [37] MCP4921, disponible en;  
<http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/21897b.pdf>
- [38] PIC18F4550, disponible en;  
<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39632e.pdf>
- [39] BC547, disponible en:  
<http://www.mouser.com/ds/2/149/BC547-190204.pdf>
- [40] TIP35C, disponible en:  
<https://www.onsemi.com/pub/Collateral/TIP35A-D.PDF>
- [41] VCSEL TST-M85A426-2H, disponible en:  
<http://www.lasermate.com/tstma4x-2h.htm>
- [42] Fotodiodo PIN 1A354, disponible en:  
[http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheets/50/139787\\_DS.pdf](http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheets/50/139787_DS.pdf)
- [43] Watson J. 1993. Optoelectrónica. Editorial Limusa. Primera edición. pp. 27
- [44] Detector Newport 818-BB-21, disponible en:  
<https://www.newport.com/p/818-BB-21>
- [45] Laser R-309091, disponible en: <https://www.newport.com/p/R-30991>