

Universidad Autónoma de Baja California

Instituto de ingeniería



Maestría y doctorado en ciencias e Ingeniería

**Desarrollo de un sistema de muestreo optoelectrónico polifásico
por medio de fotodiodos, red de fibra óptica y un solo
láser pulsado**

Tesis

Para obtener el grado de:
Maestro en Ciencias

Presenta:
Daniel Omar Baez Nuñez

Director:
Dr. Carlos Villa Angulo

Codirector:
Dr. Iván Olaf Hernández Fuentes



Dedicatoria

La presente tesis de las dedico padres por toda la formación de valores que me han brindado y por dar ejemplo de responsabilidad y perseverancia en el trabajo además de todo el apoyo y consejos recibidos de ellos en los momentos buenos, así como en los malos.

A mi hermano por su apoyo incondicional en los retos que sean presentado en la vida diaria como en lo profesional.

A mis compañero, colegas y amigos del laboratorio de física aplicada y bioinformática por todos los buenos momento vividos, los momentos de tristeza y desesperación, pero lo más importante es que nos convertimos una gran familia.



Agradecimientos

Al Dr. Carlos Villa y Dr. Olaf Hernández por creer en mí y darme la oportunidad de formar parte de su equipo de trabajo, por compartir sus conocimientos y enseñanzas, realmente agradezco su orientación y guía a lo largo de estos años y gracias por ser un ejemplo de dedicación y amor al trabajo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico que me otorgó durante estos años y permitió que pudiera dedicar todo mi tiempo a la realización de este gran proyecto.



Resumen

En este trabajo de tesis se presenta de manera detallada la implementación de un sistema de muestreo optoelectrónico formado por circuitos de conmutación con fotodiodos y red de distribución de fibra óptica con un solo láser pulsado, en este trabajo fue separado en dos secciones. La primera es el circuito de conmutación y este circuito consiste en la conexión en serie de una fuente de corriente directa V_{bias} , una señal analógica V_{in} a conmutar, un fotodiodo de alta velocidad de conmutación y un resistor de carga RL . El fotodiodo es polarizado por V_{bias} al cual se le superpone la señal analógica V_{in} de entrada. Debido al comportamiento de los fotodiodos sabemos que trabajan en dos regiones o de dos formas. Región lineal, donde la señal conmutada puede variar como una señal analógica, en la cual la salida es proporcional a la entrada. Región de saturación, la cual se comporta como una señal digital (on/off). La segunda sección de este trabajo consiste en el diseño y la implementación práctica del reloj de red óptica utilizado para activar (disparar) y sincronizar las diferentes etapas de muestreo, demultiplexación y multiplexación en la arquitectura general del ADC.

En el capítulo 2 se determina el punto de operación de los fotodiodos, el cual consiste primero en obtener la curva característica (Curva I-V) y la curva V_{RL} Vs V_{bias} de cada fotodiodo bajo diferentes configuraciones de potencia óptica y carga RL para así conocer los límites de la región lineal y región de saturación de cada fotodiodo, además estas curvas permitirán conocer el voltaje o amplitud de la respuesta del fotodiodo. Una vez obtenidos estos datos se ejecuta un programa de Matlab que consiste en modelos de aproximación lineal, este programa junto con los datos de las curvas I-V y V_{RL} Vs V_{bias} proporcionan el V_{bias} y la excursión máxima de la señal analógica para mantener la linealidad en el comportamiento del fotodiodo, también se desarrolló un programa para el análisis de la respuesta en frecuencia de los fotodiodos, ya que debemos conocer como es el



comportamiento del fotodiodo conforme aumenta la frecuencia y debido a la aplicación del proyecto, se necesita encontrar la frecuencia de corte de la señal analógica para operar la conmutación en una región adecuada.

En el capítulo 3 se realizan pruebas del circuito de conmutación con diferentes configuraciones de potencia óptica, carga RL y fotodiodos. Mediante un láser a 660 nm se generan pulsos de luz con distintos ciclos de trabajo para estudiar la respuesta transitoria de los fotodiodos con un valor fijo en V_{bias} y para el muestreo se superpone la señal senoidal, los datos más importantes tanto para la respuesta transitoria como para el muestreo son los tiempos de subida y bajada del pulso generado por el fotodiodo, ya que estos tiempos determinan si es lo suficientemente rápido, en el muestreo se vuelven más cruciales porque debido a la señal analógica, el punto de operación trabaja en un rango y esto provoca que cambien los tiempos de respuesta, además también se analiza el comportamiento de la respuesta conforme se aumenta la frecuencia.

En el capítulo 4 se estudian los métodos para duplicar la frecuencia porque ese es el propósito del reloj óptico, primero se estudia el circuito básico para doblar la frecuencia el cual consiste en un divisor óptico y un lazo de fibra óptica para provocar un retardo, posteriormente se caracterizan los lazos de fibra óptica de diferentes longitudes con la intención de conocer el retardo que provocan en la señal una vez hecho esto se siguió con la implementación del circuito donde se descubrió que el método utilizado para doblar la frecuencia no funcionó debido a las características de los divisores ópticos por lo tanto se buscó y se encontró otro método para doblar la frecuencia de la señal, el cual funcionó perfectamente. El último paso para completar el reloj óptico fue diseñar una red de fibras ópticas donde se tuvieran 3 señales diferentes, una señal principal con frecuencia F y dos señales secundarias a la mitad de la frecuencia, pero desfasadas entre sí medio período.



En el capítulo 5 se describen los resultados y conclusiones obtenidas durante y después de la realización de este trabajo de tesis. Donde se concluyó que el fotodiodo con la respuesta más rápida es el OE Market PD-850, el segundo más rápido fue el QPhotonics QPDI-40 y el más lento es el Thorlabs FDS02, pero la ventaja que tiene el FDS02 es que genera la mayor amplitud en comparación con los otros fotodiodos porque su responsividad está centrada en 750 nm. También en este capítulo se pueden ver buenos resultados la de implementación del reloj óptico, se logró duplicar la frecuencia base de 10 MHz a 20 MHz con dos señales secundarias a 10 MHz, pero desfasadas entre sí medio periodo. Utilizando este reloj se logró muestrear una señal analógica a 20 MHz en fases diferentes. También se menciona que sí se cuenta con el equipo adecuado específicamente láser y fotodiodos el alcance de este proyecto puede ser muy grande porque se puede llevar a muestrear señales en el orden de GHz.



Abstract

In this thesis work, the implementation of an optoelectronic sampling system formed by switching circuits with photodiodes and fiber optic distribution network with a single pulsed laser is presented in detail, this work it was separated into two sections. The first is the switching circuit and this circuit consists of the series connection of a direct current source V_{bias} , an analog signal V_{in} to be switched, a high-speed switching photodiode and a load resistor R_L . The photodiode is biased by V_{bias} to which the analog input signal V_{in} is superimposed. Due to the behavior of photodiodes we know that they work in two regions or in two ways. Linear region, where the switched signal can vary as an analog signal, in which the output is proportional to the input. Saturation region, which behaves like a two-state signal (on/off signal). The second section of this work consists of the design and the practical implementation of the optical network clock used to activate (trigger) and synchronize the different stages of sampling, demultiplexing and multiplexing in the general architecture of the ADC.

In chapter 2 the operating point of the photodiodes is determined, which consists first of obtaining the characteristic curve (I-V Curve) and the V_{RL} vs V_{bias} curve of each photodiode under different configurations of optical power and resistive load R_L in order to know the limits of the linear region and saturation region of each photodiode, in addition these curves will allow to know the voltage or amplitude of the photodiode response. Once these data are obtained, a Matlab program is executed that consists of linear approximation models, this program together with the data of the I-V and V_{RL} vs V_{bias} curves provide the V_{bias} and the maximum excursion of the analog signal to maintain linearity in the behavior of the photodiode, a program was also developed for the analysis of the frequency response of the photodiodes, since we must know how the photodiode behavior is as the frequency



increases and due to the application of the project, it is necessary to find the cut-off frequency of the analog signal to operate the switching in a suitable region.

Chapter 3 tests the switching circuit with different configurations of optical power, RL load, and photodiodes. By means of a laser at 660 nm, light pulses with different duty cycles were generated to study the transient response of the photodiodes with a fixed value in V_{bias} and for the sampling the sinusoidal signal were superimposed, the most important data for both the transient response and for sampling are the rise and fall times of the pulse generated by the photodiode, since these times determine if it is fast enough, in sampling they become more crucial because due to the analog signal, the operating point works in a range and this causes the response times to change, in addition, the response behavior is also analyzed as the frequency is increased.

In chapter 4 the methods to double the frequency are studied because that is the purpose of the optical clock, first the basic circuit to double the frequency is studied which consists of an optical splitter and a fiber optic loop to cause a delay, then fiber optic loops of different lengths were characterized with the intention of knowing the delay they caused in the signal, once this was done, the implementation of the circuit was continued where it was discovered that the method used to double the frequency did not work due to the characteristics of optical splitters therefore another method to double the frequency of the signal was sought and found, which worked perfectly. The last step to complete the optical clock was to design a network of optical fibers where there were three different signals, a main signal with frequency F and two secondary signals at half the frequency, but half a period out of phase with each other.

Chapter 5 describes the results and conclusions obtained during and after the completion of this thesis work. Where it was concluded that the photodiode with the fastest response is the OE Market PD-850, the second fastest was the QPhotonics QPDI-40 and the slowest is



the Thorlabs FDS02, but the advantage that the FDS02 has is that it generates the most amplitude compared to the other photodiodes because its responsivity is centered at 750 nm. Also in this chapter good results are shown in the implementation of the optical clock, it was possible to double the base frequency from 10 MHz to 20 MHz with two secondary signals at 10 MHz, half a period out of phase with each other. Using this clock, it was possible to sample an analog signal at 20 MHz in different phases. It is also mentioned by having the appropriate equipment, specifically laser and photodiodes, the scope of this project can be very large because it can lead to sampling signals in the order of GHz.



Índice

Dedicatoria	i
Agradecimientos	ii
Resumen.....	iii
Capítulo 1. Introducción	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Marco teórico	4
1.3 Justificación	10
1.4 Hipótesis.....	11
1.5 Objetivos.....	12
1.5.1 Objetivo general	12
1.5.2 Objetivos específicos.....	12
Capítulo 2. Punto de operación del fotodiodo.....	13
2.1 Caracterización de fotodiodos tipo PIN	15
2.1.1 Programa de Matlab para caracterización.....	19
2.1.2 Fotodiodo Thorlabs FDS02	21
2.1.3 Fotodiodo OEMARKET PD-850.....	22
2.1.4 Fotodiodo QPhotonics QPDI-40	24
2.2 Punto de operación del fotodiodo	25
2.2.1 Programa de Matlab para el punto de operación	27
2.2.2 Fotodiodo Thorlabs FDS02	30



2.2.3	Fotodiodo QPhotonics QPDI-40	33
2.2.4	Fotodiodo OEMARKET PD-850.....	34
2.3	Análisis de la respuesta en frecuencia	35
2.3.1	Programa de Matlab para la respuesta en frecuencia	36
2.3.2	Fotodiodo Thorlabs FDS02	39
2.3.3	Fotodiodo QPhotonics QPDI-40	40
2.3.4	Fotodiodo OEMARKET PD-850.....	41
Capítulo 3.	Respuesta transitoria y muestreo	42
3.1	Laser.....	43
3.1.1	Tren de pulsos ópticos	46
3.2	Programa para la respuesta transitoria y muestreo.....	49
3.3	Respuesta transitoria	55
3.3.1	Fotodiodo Thorlabs FDS02	57
3.3.2	Fotodiodo QPhotonics QPDI-40	61
3.3.3	Fotodiodo OE Market PD-850.....	64
3.4	Muestreo de señales	67
3.4.1	Fotodiodo Thorlabs FDS02	68
3.4.2	Fotodiodo QPhotonics QPDI-40	74
3.4.3	Fotodiodo OE Market PD-850.....	78
Capítulo 4.-	Reloj óptico	82
4.1	Circuito para doblado de frecuencia con retardo y retroalimentación	82
4.2	Caracterización de fibra óptica	83



4.2.1	Aplicación del circuito	87
4.2.2	Circuito para doblado de frecuencia con retraso directo	89
4.3	Circuito del reloj óptico.....	91
Capítulo 5.- Resultados y conclusiones.....		95
Referencias		110



Índice de figuras

Figura 1. Curva característica de un fotodiodo con varios niveles de potencia óptica, A) circuito en modo fotoconductor y B) circuito en modo fotovoltaico.	5
Figura 2. Características de respuesta típicas en función de la potencia de la señal óptica de entrada para A) un fotodetector con una señal de corriente de salida y B) un fotodetector con una señal de voltaje de salida.	6
Figura 3. Representación esquemática de una fibra óptica.....	7
Figura 4. Tipos de fibra óptica. Se representan esquemáticamente las secciones transversales geométricas de la fibra óptica, las distribuciones del índice de refracción, las características de propagación del pulso y las trayectorias de los rayos ópticos.	8
Figura 5. Acoplador X realizado a partir de dos fibras con una separación entre núcleos d . La energía es transferida por una onda evanescente a lo largo de la longitud de interacción L	9
Figura 6. Esquemas de acoplamiento intentan colocar los núcleos lo más cerca posible entre sí.	10
Figura 7. Circuito muestreador- demultiplexor de dos etapas conectado a dos cuantificadores.....	14
Figura 8. Circuito de conmutación rápida con activación óptica.....	15
Figura 9. Ejemplo de la región lineal y de saturación en un fotodiodo	16
Figura 10. Diagrama de bloques para la caracterización de fotodiodos	18
Figura 11. Capturas del osciloscopio, A) con potencia óptica cero y B) con potencia óptica.	18
Figura 12. Ejemplo, A) Curva I-V del FD y B) curva V_{RL} Vs V_{bias} del FD.....	21



Figura 13. FDS02, con $RL = 50 \Omega$ y $P = 50 \text{ mW}$, A) curva I-V, B) curva VRL Vs $Vbias$.
 22

Figura 14. FDS02, con $RL = 100 \Omega$ y $P = 50 \text{ mW}$, A) curva I-V, B) curva VRL Vs $Vbias$.
 22

Figura 15. PD-850 con $RL = 50 \Omega$ y $P = 25 \text{ mW}$, A) curva I-V, B) curva VRL Vs $Vbias$.
 23

Figura 16. PD-850 con $RL = 100 \Omega$ y $P = 25 \text{ mW}$, A) curva I-V, B) curva VRL Vs $Vbias$.
 23

Figura 17. QPDI-40, con $RL = 50 \Omega$, $P = 50 \text{ mW}$, A) curva I-V, B) curva VRL Vs $Vbias$.
 24

Figura 18. QPDI-40, con $RL = 100 \Omega$, $P = 50 \text{ mW}$, A) curva I-V, B) curva VRL Vs $Vbias$.
 25

Figura 19. Ejemplo de linealidad del punto de operación, B) acercamiento de A. 26

Figura 20. Punto de operación (FDS02), $RL = 50 \Omega$ y $P = 25 \text{ mW}$ 32

Figura 21. Punto de operación (FDS02), $RL = 100 \Omega$ y $P = 50 \text{ mW}$ 32

Figura 22. Punto de operación (QPDI-40), $RL = 50 \Omega$ y $P = 50 \text{ mW}$ 33

Figura 23. Punto de operación (PD-850), $RL = 50 \Omega$ y $P = 25 \text{ mW}$ 34

Figura 24. Diagrama de bloques para la respuesta en frecuencia. 36

Figura 25. Ejemplo de respuesta en frecuencia. 39

Figura 26. Resp. feq. (FDS02), $RL = 50 \Omega$, $P = 50 \text{ mW}$, $Vbias = 174 \text{ mV}$ y $Vpp = 70 \text{ mV}$.
 40

Figura 27. Resp. feq. (QPDI-40), $RL = 50 \Omega$, $P = 50 \text{ mW}$, $Vbias = -95 \text{ mV}$ y $Vpp = 60 \text{ mV}$.
 41

Figura 28. Resp. feq. (PD-850), $RL = 50 \Omega$, $P = 25 \text{ mW}$, $Vbias = 3.2 \text{ V}$ y $Vpp = 600 \text{ mV}$.
 42

Figura 29. Diagrama de bloques para utilización del analizador de redes. 47



Figura 30. Ejemplo de la medición del tren de pulsos.....	47
Figura 31. Pulsos ópticos (Ciclo 50%), A) Feq = 250 KHz, B) Feq = 5 MHz.....	48
Figura 32. Pulsos ópticos (Ciclo 16%), A) Feq = 250 KHz, B) Feq = 5 MHz.....	48
Figura 33. Pulsos ópticos (Ciclo 2%), A) Feq = 250 KHz, B) Feq = 5 MHz.....	48
Figura 34. Diagrama de bloques, resp. transitoria y muestro	50
Figura 35. Resp. Transitoria (FDS02), RL = 50 Ω, ciclo 16% A) Feq = 250 KHz y B) Feq = 5 MHz	58
Figura 36. Resp. Transitoria (FDS02), RL = 50 Ω, ciclo 2% A) Feq = 250 KHz y B) Feq = 5 MHz	59
Figura 37. Resp. Transitoria (FDS02), RL = 100 Ω, ciclo 16% A) Feq = 250 KHz y B) Feq = 5 MHz	60
Figura 38. Resp. Transitoria (QPDI-40), RL = 50 Ω, ciclo 16% A) Feq = 250 KHz y B) Feq = 5 MHz.....	62
Figura 39. Resp. Transitoria (QPDI-40), RL = 50 Ω, ciclo 2% A) Feq = 250 KHz y B) Feq = 5 MHz.....	64
Figura 40. Resp. Transitoria (PD-850), RL = 50 Ω, ciclo 16% A) Feq = 250 KHz y B) Feq = 5 MHz	65
Figura 41. Resp. Transitoria (PD-850), RL = 50 Ω, ciclo 2% A) Feq = 250 KHz y B) Feq = 5 MHz	66
Figura 42. FDS02, RL = 50 Ω, muestreo a A) Feq = 10 KHz, B) Feq = 250 KHz y C) Feq = 5 MHz con ciclo 16%.....	69
Figura 43. FDS02, RL = 50 Ω, muestro a A) Feq = 10 KHz, B) Feq = 250 KHz y C) Feq = 5 MHz con ciclo 2%.....	71
Figura 44. FDS02, RL = 100 Ω, muestro a A) Feq = 10 KHz, B) Feq = 250 KHz y C) Feq = 5 MHz con ciclo 16%.....	73



Figura 45. QPDI-40, RL = 50 Ω , muestro a A) Feq = 10 KHz, B) Feq = 250 KHz y C) Feq = 5 MHz con ciclo 16%.	75
Figura 46. QPDI-40, RL = 50 Ω , muestro a A) Feq = 10 KHz, B) Feq = 250 KHz y C) Feq = 5 MHz con ciclo 2%.	77
Figura 47. PD-850, RL = 50 Ω , muestro a A) Feq = 10 KHz, B) Feq = 250 KHz y C) Feq = 5 MHz con ciclo 16%.	79
Figura 48. PD-850, RL = 50 Ω , muestro a A) Feq = 10 KHz, B) Feq = 250 KHz y C) Feq = 5 MHz con ciclo 2%.	81
Figura 49. Circuito básico para doblado de frecuencia.	83
Figura 50. Diagrama bloques, retardo con la misma longitud de fibra óptica.	85
Figura 51. Diagrama de bloque, retardo con diferentes longitudes de fibra óptica.	85
Figura 52. Retardos provocados por A) misma longitud, B) 5 metros, C) 10 metros y D) 20 metros de fibra óptica.	86
Figura 53. Circuito y configuración utilizada en el doblado de frecuencia.	88
Figura 54. Señal generada por el circuito para doblar la frecuencia.	89
Figura 55. Circuito para doblar la frecuencia con dos divisores.	90
Figura 56. Tren de pulsos opticos a 10 MHz utilizando un doblador.	90
Figura 57. Circuito basico del reloj óptico.	93
Figura 58. Configuracion del reloj óptico.	93
Figura 59. Foto real del circuito del reloj óptico.	94
Figura 60. Señal par e impar del reloj óptico.	94
Figura 61. Señal principal para la activación del convertidor.	95
Figura 62. Tiempos de A) subida y B) bajada con RL = 50 Ω y ciclo del 16%.	98
Figura 63. Tiempos de A) subida y B) bajada con RL = 50 Ω y ciclo del 2%.	98
Figura 64. Caída de amplitud con A) ciclo del 16% y B) ciclo del 2%.	99
Figura 65. FDS02, Resp. Transitoria, señales secundarias, sin alinear amplitud.	102



Figura 66. FDS02, Resp. Transitoria, señales secundarias, amplitud alineada..... 103

Figura 67. Curva VRL Vs $Vbias$ de fotodiodos a usar con el reloj óptico..... 104

Figura 68. Curva VRL Vs $Vbias$ de fotodiodos utilizando nuevo metodo..... 105

Figura 69. FDS02, Resp. trans. en fases diferentes con escala de tiempo en A) 10 ns y B) 40 ns..... 107

Figura 70. FDS02, muestreo en fases diferentes con escala de tiempo en A) 1 μ s y B) 200 ns..... 107



Índice de tablas

Tabla 1. Resultados del programa de punto de operación	29
Tabla 2. Configuraciones para la respuesta transitoria	56
Tabla 3. (FDS02) Tiempos de subida y baja, ciclo de 16% y $RL = 50 \Omega$	57
Tabla 4. (FDS02) Tiempos de subida y baja, ciclo de 2% y $RL = 50 \Omega$	59
Tabla 5. (FDS02) Tiempos de subida y baja, ciclo de 16% y $RL = 100 \Omega$	60
Tabla 6. (QPDI-40) Tiempos de subida y baja, ciclo de 16% y 50Ω	62
Tabla 7. (QPDI-40) Tiempos de subida y baja, ciclo de 2% y $RL = 50 \Omega$	63
Tabla 8. (PD-850) Tiempos de subida y baja, ciclo de 16% y $RL = 50 \Omega$	65
Tabla 9. (PD-850) Tiempos de subida y baja, ciclo de 2% y $RL = 50 \Omega$	66
Tabla 10. Retardos de fibra óptica.....	86



Capítulo 1. Introducción

1.1 Antecedentes

Existen algunos trabajos publicados desde hace décadas en los cuales se utilizan los fotodiodos para circuitos de conmutación activados ópticamente, por ejemplo, en [1] se desarrollaron fotodiodos tipo PIN para aplicarlos como interruptores de alta potencia a frecuencias bajas, en este trabajo se utiliza un voltaje de polarización inverso para que opere el fotodiodo. En las publicaciones de R. Caverly y G. Hiller también utilizan fotodiodos tipo PIN para aplicaciones de alta potencia y se dedicaron a tratar de definir el valor mínimo de voltaje de polarización inversa requerido para que el fotodiodo opere correctamente y definen que este voltaje es equivalente al voltaje constante autogenerado por el fotodiodo al ser iluminado. [2] [3]

El trabajo desarrollado por C. Villa se presenta un procedimiento para seleccionar el voltaje mínimo de polarización inversa para fotodiodo tipo PIN en un circuito de muestreo de alta velocidad de conmutación activado ópticamente, esto para evitar un efecto no lineal llamado espurios en el dominio de la frecuencia, se reportan un incremento en el rango dinámico libre de espurios y una reducción en la señal a ruido sin distorsión. [4]

Una de las aplicaciones más importantes de los circuitos de conmutación es su uso en sistemas de muestreo para Convertidores de Analógico a Digital (ADC por sus siglas en inglés), en el trabajo realizado por R. H. Walden revisa minuciosamente el estado del arte de los ADC electrónicos, se explica cuáles son sus limitantes de desempeño en términos de frecuencia de muestreo y número efectivo de bits convertidos, también dice que la tecnología de Semiconductor Complementario de Oxido Metálico (CMOS por sus siglas en inglés) es la tecnología que lidera en la fabricación de circuitos integrados para ADC ya que habilita el diseño que permite bajo consumo de potencia y permite que se incluya en el



mismo chip una cantidad significativa de procesamiento digital de señales que permite la corrección de errores de conversión y filtrado necesario para ciertos ADC. [5]

Varias publicaciones tratan de distintos tipos de ADC que utilizan activación óptica, por ejemplo, en [6] se hace una revisión extensa de décadas de trabajo para realizar ADC fotónicos, su revisión se limita a los sistemas en los que la entrada es una señal en el dominio electrónico y la salida es una versión digital de esa señal también en el dominio electrónico, por tanto, excluye los sistemas fotónicos que digitalizan imágenes o señales de comunicaciones ópticas. En [6] se revisa el estado del arte de los ADC electrónicos y sus propiedades básicas, también se revisan las propiedades de los enlaces ópticos analógicos que se encuentran en la mayoría de los ADC fotónicos, luego se estudian cuatro clases de ADC fotónicos, 1) ADC asistido fónicamente en los que se añade un dispositivo fotónico a un ADC electrónico para mejorar desempeño, 2) ADC con muestreo fotónico y cuantificación electrónica, 3) ADC con muestreo electrónico y cuantificación fotónica y 4) ADC con muestreo y cuantificación fotónicos, se observa, sin embargo, que los 4 clases de ADC fotónicos requieren algún muestreo y cuantización electrónicos. Después de revisar todos los ADC fotónicos conocidos en las cuatro clases, la revisión concluye con una discusión sobre el potencial de los ADC fotónicos en el futuro.

Un ejemplo de ADC fotónico es el trabajo publicado por [7] en el cual se desarrolla un ADC que realiza el muestreo utilizando tren de pulsos ópticos súper estables generados por láser, este trabajo demuestra que se puede digitalizar una señal de 41 GHz con 7 bits efectivos usando un ADC construido con componentes discretos, esto corresponde a un desempeño 4 o 5 veces mejor que un ADC electrónico actual, también en este trabajo se desarrolló ADC fotónico en un circuito integrado de Silicio con componentes de núcleo fotónico y se usó para digitalizar una señal de 10GHz con 3.5 bits efectivos.



En el trabajo [8] nos muestra el diseño e implementación de un circuito de muestreo y demultiplexación auto-sincronizado de señales analógicas donde utilizan circuitos de conmutación rápida activados por una señal óptica, pero lo más importante es que nos dice que teniendo un láser con un ancho de banda de 320 MHz se puede incrementar la frecuencia a 1.28 GHz utilizando elementos ópticos pasivos como fibras ópticas y divisores ópticos pero además nos dice que utilizando este método se pueden demultiplexar las señales para reducir la frecuencia de trabajo de los cuantificadores y no es necesario utilizar fuentes o señales externas para sincronizar el reloj óptico con los dispositivos electrónicos de cuantificación y codificación de los ADC.

También en [9], nos demuestra una nueva arquitectura optoelectrónica de muestreo y demultiplexación con cuantificadores electrónicos para la implementación de un convertidor optoelectrónico de analógico a digital (OADC por sus siglas en inglés) de alta velocidad, lograron desarrollar un sistema OADC con resolución de 10.24 GM/s. El OADC consta de a) una red óptica que genera una señal óptica de 10.24 GHz, utilizada como fuente de activación en el proceso de muestreo, y ocho señales ópticas de 1.28 GHz, utilizadas como relojes de activación en el proceso de demultiplexación, b) una red optoelectrónica compuesta por una conexión en cascada de fotodiodos PIN utilizados para muestrear y demultiplexar la señal analógica de RF, c) una red de acondicionamiento de señales electrónicas y d) cuantificadores electrónicos de 12 bits de resolución utilizados para generar los códigos digitales de salida.

Existen varios trabajos publicados donde también se utilizan fotodiodos para circuitos de conmutación rápida activados ópticamente, por ejemplo, en [10] y [11] se utilizan circuitos de conmutación con fotodiodos para la etapa de muestreo y demultiplexación de un convertidor analógico a digital (ADC) optoelectrónico y se utilizan cuantificadores electrónicos. La característica que tienen los trabajos [8], [9], [10] y [11] es



que en estos trabajos la activación es óptica por medio de un láser pulsado que activa los fotodiodos pero la señal analógica muestreada es eléctrica, es decir, no se necesita que la señal muestreada pase al dominio óptico y de vuelta al dominio eléctrico, otro punto importantes en estos trabajos es que la señal de salida del circuito de conmutación es analógica, es decir, la salida es proporcional a la entrada en esa región y por tanto activaron los fotodiodos en una región lineal, sin embargo no explican un método para lograr esto, al parecer lo hicieron a prueba y error.

En [12] se explica una metodología para activar el circuito de conmutación con fotodiodo tipo PIN para que trabaje en una región lineal, en este trabajo se derivan un conjunto de ecuaciones para determinar un punto de operación en el cuarto cuadrante de la curva I-V del fotodiodo, y se compararon las mediciones de varios rangos lineales con los resultados teóricos obtenidos utilizando aproximación lineal y simulaciones numéricas.

1.2 Marco teórico

Un fotodiodo de unión p-n es un dispositivo semiconductor de dos capas, cuenta con una capa de material tipo “p” y otra capa de material tipo “n” y también cuenta con dos terminales de conexión llamadas ánodo la cual está conectada al material tipo “p” y cátodo la que va conectada al material tipo “n”, un fotodiodo sin luz aplicada se comporta como un diodo, sin embargo al aplicársele luz en su región fotosensible cambia su curva corriente-voltaje (curva I-V) como se muestra en la Figura 1.

En la Figura 1 se puede observar P_s que representa la potencia óptica de la señal aplicada, la primera curva I-V con etiqueta “Dark” es obtenida sin luz aplicada I_o representa a la corriente de saturación inversa que es el valor de corriente que se produce al aplicarse

un voltaje inverso V_r , Las otras dos curvas I-V se obtienen al aplicar luz con potencia óptica de cierto nivel, la curva más hacia abajo tiene mayor P_s .

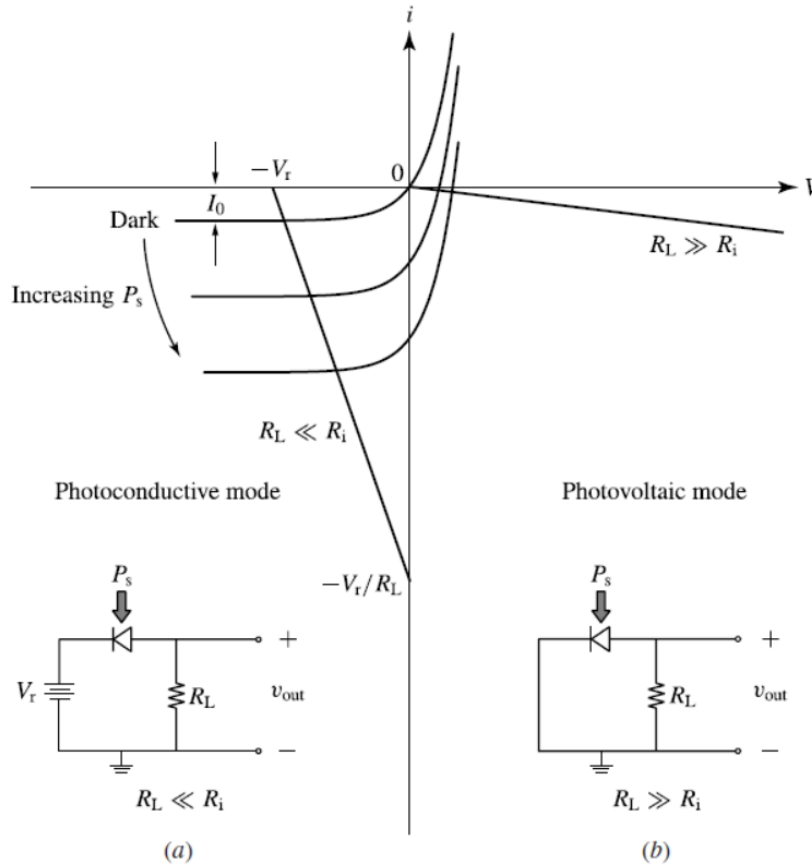


Figura 1. Curva característica de un fotodiodo con varios niveles de potencia óptica, A) circuito en modo fotoconductor y B) circuito en modo fotovoltaico.

La linealidad de un fotodetector significa que su señal de corriente o voltaje de salida es linealmente proporcional a su señal óptica de entrada. Se requiere una respuesta lineal para que un fotodetector convierta fielmente la forma de onda de una señal óptica de entrada en una señal eléctrica de salida sin distorsión. Cuando un fotodetector tiene una respuesta lineal, su eficiencia cuántica y su responsividad definidas son constantes y son independientes de la potencia P_s de la señal óptica de entrada. Sin embargo, todo

fotodetector práctico solo tiene un rango finito de respuesta lineal, como se muestra en la Figura 2. Cuando la potencia de la señal óptica de entrada alcanza un cierto nivel, la respuesta de un fotodetector comienza a saturarse, desviándose así de la linealidad.

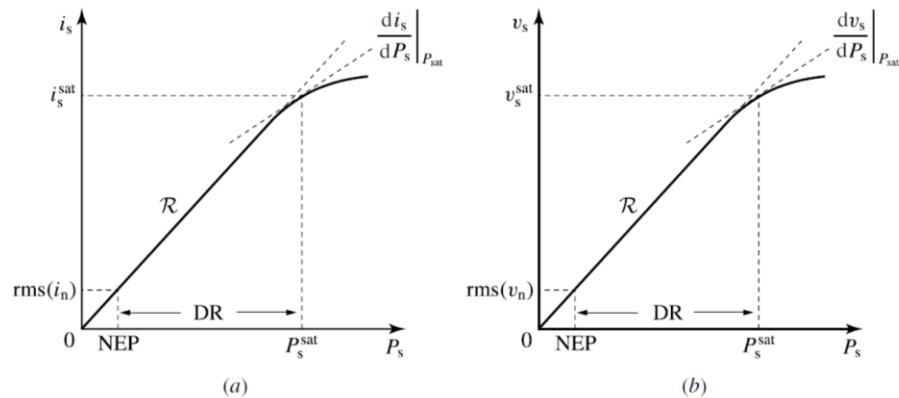


Figura 2. Características de respuesta típicas en función de la potencia de la señal óptica de entrada para A) un fotodetector con una señal de corriente de salida y B) un fotodetector con una señal de voltaje de salida.

Un cable de fibra óptica es una guía de ondas dieléctrica, generalmente de sección transversal circular, que guía la onda electromagnética en modos discretos a través de reflexiones internas cuyo ángulo de incidencia en la interfaz es igual o mayor que el ángulo crítico. El confinamiento de la energía dentro de la estructura dieléctrica se describe analíticamente mediante las ecuaciones de Maxwell y las condiciones de frontera en la interfaz dieléctrico-dieléctrico, en contraste con la interfaz tradicional metálico-dieléctricos en guías de ondas metálicas. Las geometrías más comunes de los cables de fibra son las que se muestran en la Figura 4. Se clasifican como multimodo de índice de pasos, multimodo de índice gradual e índice de pasos monomodo. Las dimensiones típicas, las distribuciones del índice de refracción, las trayectorias de los rayos ópticos y la dispersión

de pulsos de cada tipo de cable también se ilustran en la Figura 4. Por tanto, los cables de fibra óptica se pueden clasificar en dos casos: fibras monomodo y multimodo.

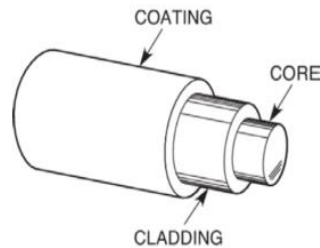


Figura 3. Representación esquemática de una fibra óptica.

Las fibras monomodo permiten la propagación de ondas en un solo ángulo, mientras que los cables multimodo transmiten ondas que viajan en muchos ángulos, todo dentro del núcleo central de la fibra. Tanto las fibras monomodo como las multimodo se fabrican con un núcleo central con un alto índice de refracción (constante dieléctrica) rodeado por un revestimiento (Figura 3) con un índice de refracción más bajo. La onda es guiada en el núcleo por una reflexión interna total en la interfaz núcleo-revestimiento. Los cables monomodo suelen tener un índice de pasos en el que el diámetro del núcleo central es muy pequeño (normalmente de 2 a 16 μm) y no mucho mayor que la longitud de onda que transportan. Estructuralmente, son los más simples y exhiben discontinuidades abruptas en el índice de refracción a lo largo de la interfaz núcleo-revestimiento. Por lo general, el índice de refracción del núcleo central es de aproximadamente 1,471 y el del revestimiento es de 1,457.

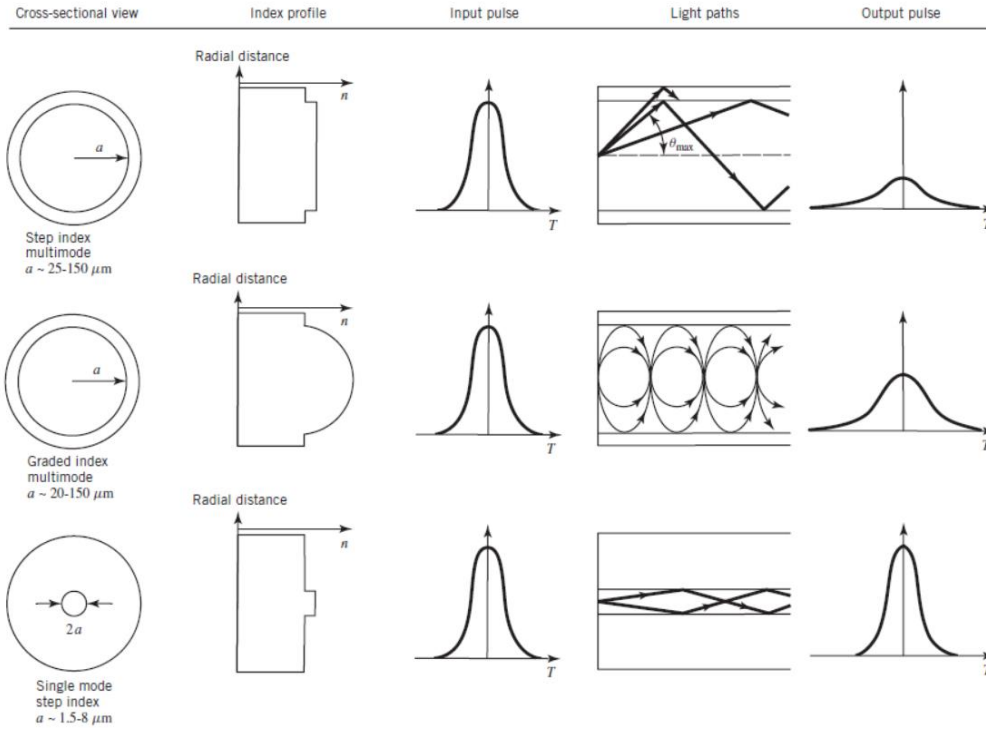


Figura 4. Tipos de fibra óptica. Se representan esquemáticamente las secciones transversales geométricas de la fibra óptica, las distribuciones del índice de refracción, las características de propagación del pulso y las trayectorias de los rayos ópticos.

Un acoplador óptico suele ser un dispositivo pasivo que distribuye energía desde la fibra principal a una o más fibras ramificadas. La Figura 5 muestra un acoplador de 2x2. Se han desarrollado varias técnicas para construir acopladores. Cada uno tiene algunas ventajas e inconvenientes, y se han propuesto varios tipos utilizando fibras ópticas y componentes microópticos, por ejemplo: acopladores de revestimiento pulidos, divisores de haz, tipos de micro-curvatura y tipos de desplazamiento lateral.

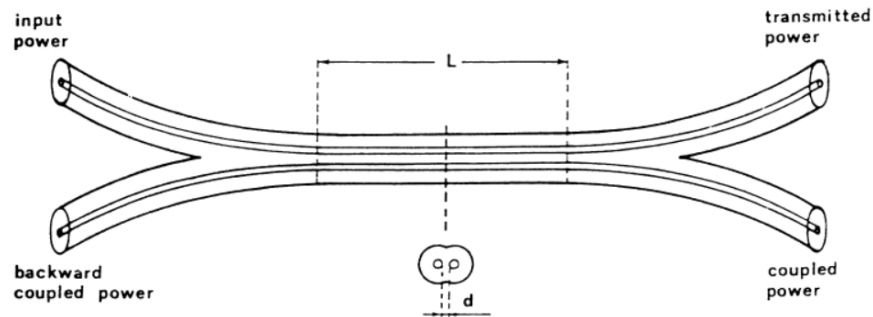


Figura 5. Acoplador X realizado a partir de dos fibras con una separación entre núcleos d . La energía es transferida por una onda evanescente a lo largo de la longitud de interacción L .

El acoplador X (también llamado acoplador 2 x 2) es el equivalente guiado del divisor de haz convencional (consulte la Figura 5). El propósito es acercar los núcleos de fibra entre sí para que pueda tener lugar un acoplamiento de potencia eficiente. La energía se transfiere de la fibra óptica excitada a la fibra paralela adyacente porque una parte apreciable de la energía se propaga al revestimiento por la onda evanescente, como se ve en Figura 5. Por lo tanto, la mayoría de los esquemas de acoplamiento intentan colocar los núcleos lo más cerca posible entre sí.

Un método para fabricar estos acopladores consiste en pulir un lado del núcleo para ambas fibras fijadas en los soportes y luego poner los núcleos en contacto con una interfaz líquida de índice coincidente (ver Figura 6).

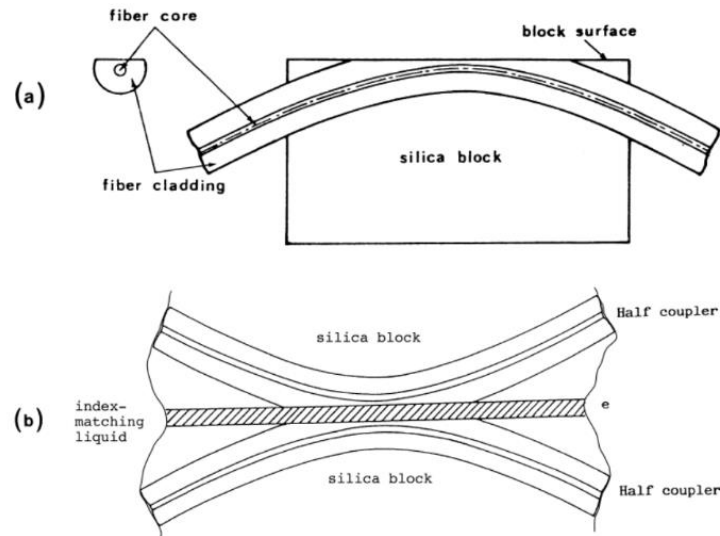


Figura 6. Esquemas de acoplamiento intentan colocar los núcleos lo más cerca posible entre sí.

La latencia es un retraso de tiempo entre una estimulación y su respuesta. Es causado por limitaciones de velocidad en un sistema físico. En términos más simples, la latencia es el tiempo que tarda una señal en viajar (o propagarse) desde el punto A al punto B. En telecomunicaciones, la latencia describe el retraso de tiempo de un paquete que viaja a través de una red o el retraso impuesto a una señal que viaja en un medio de transmisión como un cable de cobre, una guía de ondas de fibra óptica o incluso un espacio libre.

1.3 Justificación

Los circuitos de conmutación de alta velocidad son una parte esencial en un gran número de aplicaciones tales como las comunicaciones satelitales, conmutadores de señales de radio frecuencia electrónicos y circuitos muestreadores para convertidores analógico-digitales. Estos circuitos de conmutación son tradicionalmente encapsulados en circuitos



Integrados o circuitos impresos electrónicos interconectados con circuitos osciladores electrónicos. Este tipo de encapsulamiento limita la capacidad de desempeño de los circuitos de conmutación debido a las capacitancias parasitas existentes en los circuitos que lo conforma incluyendo los osciladores electrónicos. Una alternativa actualmente en exploración para minimizar los efectos antes mencionados es utilizar osciladores no electrónicos; por ejemplo, osciladores ópticos para activar el circuito de conmutación electrónico.

En este trabajo se utilizará un haz de luz para controlar la activación de los circuitos de conmutación. Esta alternativa se ha seleccionado debido a que en la actualidad existen sistemas de generación de pulsos ópticos que permiten frecuencias de repetición de pulsos más altas que las que se consiguen con osciladores electrónicos convencionales. Adicionalmente, se puede generar pulsos ópticos con muy bajo jitter temporal, así como pulsos de luz con valor de periodo y ancho de pulso muy estable.

1.4 Hipótesis

Utilizando las técnicas de diseño de sistemas ópticos pasivos (cables y acopladores de fibra óptica) se generará una red de señales ópticas a partir de un solo laser pulsado, dichas señales se podrán configurar para obtener frecuencias mayores a las del láser, estarán sincronizadas y tendrán retardos de tiempo relativos entre las mismas que serán ajustables por medio del ajuste de la longitud de los cables de fibra óptica. Esto permitirá realizar un sistema de muestreo con activación óptica y al utilizar señales ópticas para la activación se pueden alcanzar mayores frecuencias de muestreo y más estables ya que los generadores de luz láser pulsados son más estables que los osciladores electrónicos.



1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Diseñar un sistema de muestreo por medio de circuitos de conmutación de alta velocidad activados ópticamente basados en fotodiodos utilizando un solo laser pulsado y una red de distribución de luz por medio de líneas y acopladores de fibra óptica de tal manera que la señal sea muestreada a una frecuencia principal y se distribuya en varias señales secundarias sincronizadas.

1.5.2 Objetivos específicos

1. Recopilación bibliográfica acerca de: a) Técnicas para diseño de circuitos de conmutación optoelectrónicos con fotodiodos b) Técnicas de utilización de fibra óptica para aumentar la frecuencia de pulsos de luz y para generar retardos de tiempo entre pulsos de luz.
2. Realizar caracterización del láser para comprar los datos dados por el fabricante contra los datos obtenidos.
3. Realizar caracterización del fotodiodo para poder encontrar la región optima de funcionamiento y bajo que configuración se puede obtener el tiempo de respuesta más rápido.
4. Diseñar una etapa de circuito de conmutación optoelectrónico con fotodiodo y que sea posible acoplar varias etapas en cascada para formar el circuito muestreador-demultiplexor completo.



5. Diseñar una etapa de acoplador de fibra óptica 2x2 con retroalimentación con línea de fibra óptica para generar pulsos al doble de la frecuencia de entrada y que sea posible acoplar varias etapas en cascada.
6. Diseñar una red con los acopladores apropiados y líneas de retardo de fibra óptica para obtener varias señales de luz pulsada a partir de un solo laser y controlar el retardo de tiempo entre las mismas.
7. Implementar un sistema de muestreo optoelectrónico completo y comprobar que las señales muestreada principal y las secundarias puedan ser viables para ser cuantificadas y convertidas.

Capítulo 2. Punto de operación del fotodiodo

En el trabajo realizado [6] se revisa el estado del arte de los ADC electrónicos y sus propiedades básicas, también se revisan las propiedades de los enlaces ópticos analógicos que se encuentran en la mayoría de los ADC fotónicos, luego se estudian cuatro clases de ADC fotónicos, 1) ADC asistido fónicamente en los que se añade un dispositivo fónico a un ADC electrónico para mejorar desempeño, 2) ADC con muestreo fónico y cuantificación electrónica, 3) ADC con muestreo electrónico y cuantificación fónica y 4) ADC con muestreo y cuantificación fónicos, se observa, sin embargo, que los 4 clases de ADC fotónicos requieren algún muestreo y cuantización electrónicos.

Este trabajo consiste en el análisis e implementación de una red de fibra óptica para muestreo fónico. Un convertidor de este tipo puede ser dividido en dos secciones, la primera consiste en el circuito de conmutación y la segunda sección es la parte de cuantificación electrónica.

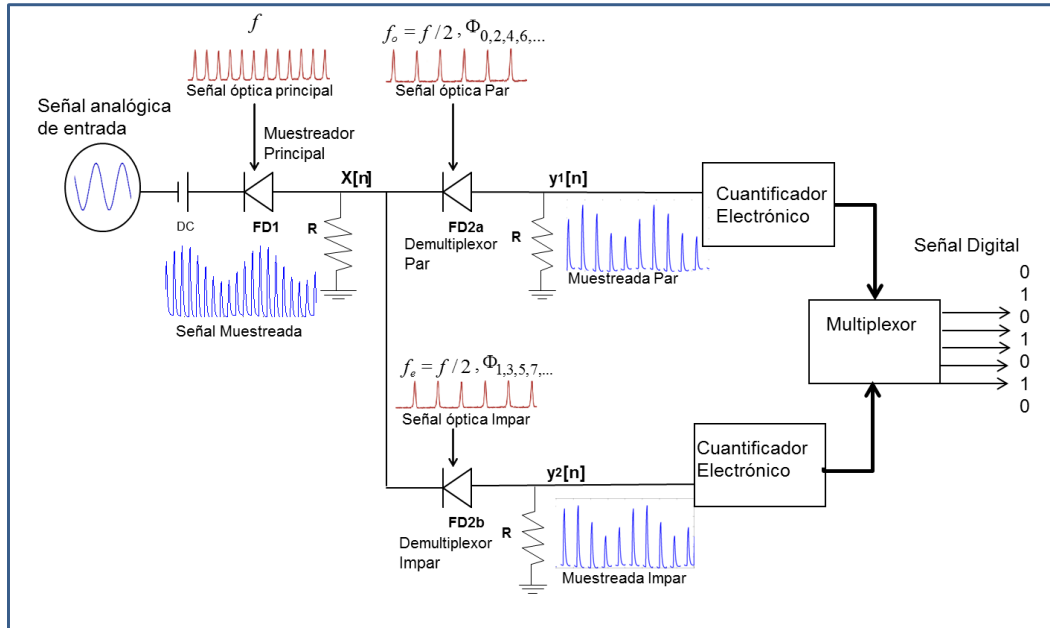


Figura 7. Circuito muestreador- demultiplexor de dos etapas conectado a dos cuantificadores

En la Figura 7 se observa el muestreador básico optoelectrónico conectado con la señal analógica a convertir, la finalidad de este circuito es conmutar una señal analógica de voltaje; es decir permitir el paso o no de dicha señal hacia la salida del circuito. La conmutación es controlada por medio de luz aplicada al circuito, esta luz puede ser continua o pulsos de luz, el muestreador básico consta de un fotodiodo en serie con un resistor de carga, la entrada de voltaje se aplica al cátodo del fotodiodo, el ánodo de este está en serie con el resistor de carga y la salida del circuito es el voltaje en este resistor.

Una vez que la señal analógica es muestreada a alta frecuencia, el tren de muestras puede ser demultiplexado separando las muestras pares e impares, reduciendo con esto la velocidad requerida de los circuitos subsecuentes al proceso de muestreo (cuantificación y codificación). La demultiplexación se logra haciendo pasar la señal muestreada por circuitos muestreadores conectados en cascada de tal forma que, si un tren de pulsos ópticos alineado en tiempo con las muestras impares impacta la parte sensitiva del PD

demultiplexor par, este solo dejara pasar las muestras pares de la señal muestreada original. Este proceso se puede repetir para las muestras impar.

Este trabajo se concentrará en la sección de conmutación o muestreo y la parte de cuantificación y codificación se hará con dispositivos electrónicos tradicionales. Como ya se mencionó el circuito de conmutación consiste en un fotodiodo quien realizara el muestreo. Debido a esto es importante conocer el funcionamiento del fotodiodo, así como su respuesta. A continuación, se mostrará el procedimiento utilizado para la caracterización y la respuesta en frecuencia del fotodiodo.

2.1 Caracterización de fotodiodos tipo PIN

La Figura 8 muestra el circuito de conmutación rápida con activación óptica utilizado en este trabajo. Este circuito consiste en la conexión en serie de una fuente de corriente directa V_{bias} , una señal analógica V_{in} a conmutar, un fotodiodo de alta velocidad de conmutación y un resistor de carga R_L . El fotodiodo es polarizado por V_{bias} al cual se le superpone la señal analógica V_{in} de entrada.

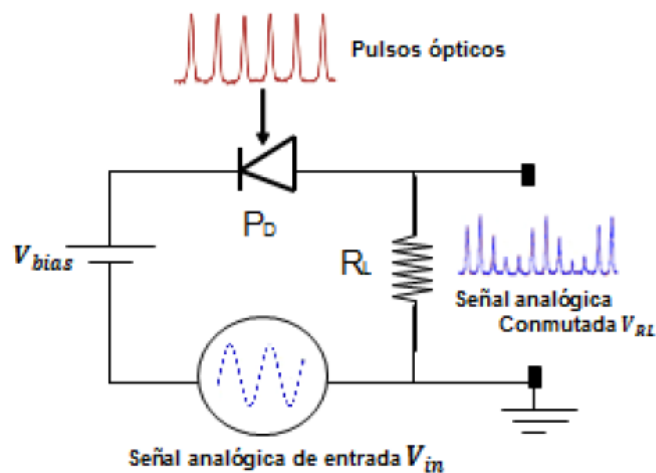


Figura 8. Circuito de conmutación rápida con activación óptica.

Debido a las aplicaciones en las que se desea usar el fotodiodo, sabemos que se puede obligar a trabajar en dos regiones (Figura 9). Región lineal, donde la señal conmutada puede variar como una señal analógica, en la cual la salida es proporcional a la entrada. Región de saturación, la cual se comporta como una señal digital (on/off). En esta sección explicaremos como obtener o medir dichas curvas además se mostrarán las curvas de algunos fotodiodos que se estarán utilizando a largo de este proyecto. Es importante obtener las curvas de caracterización porque con ellas podemos determinar el punto de operación de los fotodiodos ya que se desea armar un circuito de conmutación para el muestreo de señales analógicas, además las curvas nos ayudaran a identificar las diferentes regiones y así se encontraran los límites de dichas regiones, con estos datos podemos obligar al fotodiodo a trabajar en la región lineal debido a que necesitamos que la respuesta del fotodiodo sea proporcional a la entrada ya que se estarán conmutando señales analógicas.

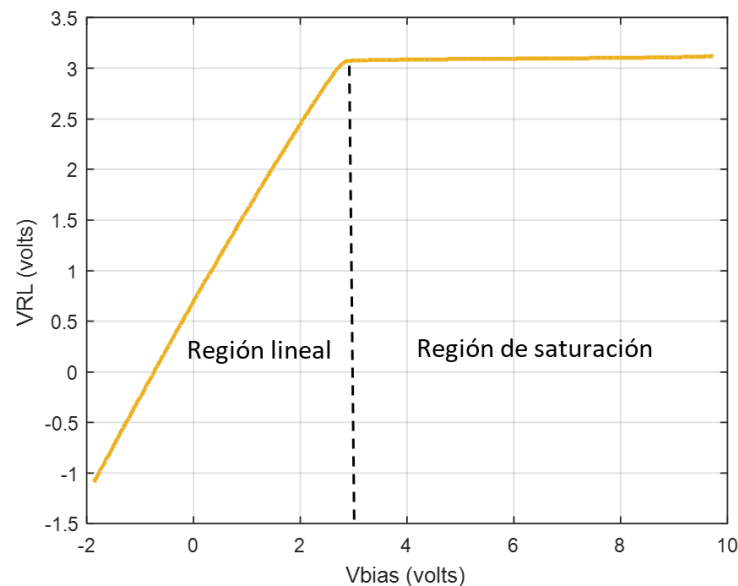


Figura 9. Ejemplo de la región lineal y de saturación en un fotodiodo



Para poder obtener estas curvas, se cuenta con diferentes métodos e instrumentación, la más sencilla de implementar es utilizar instrumentos de medición estándar como lo es un generador de funciones y un osciloscopio. Para la caracterización de fotodiodos se utilizó un generador arbitrario de funciones Tektronix modelo AFG 3101, osciloscopio Tektronix MSO 4034 y un láser Coherent modelos Obis XL660 con una longitud de onda en 660nm, ancho de banda de 100 MHz y potencia nominal a 75 mW, los dispositivos son conectados como en la Figura 10.

Para obtener las mediciones de la curva mostrada anteriormente tenemos que graficar el voltaje de polarización del fotodiodo (V_{bias}) contra el voltaje en la resistencia (V_{RL}) lo que significa que se debe conectar una resistencia en serie al fotodiodo. Para lograr obtener estas mediciones se necesita incrementar V_{bias} de un valor inicial a un valor final y medir simultáneamente a V_{bias} y V_{RL} , eso se puede lograr utilizando un generador de funciones, el cual generara una señal de voltaje triangular ya que esta cuenta con valores de voltaje que van aumentando de manera proporcional de un punto inicial a un punto final, es decir, genera una rampa. Para tomar la medición de la respuesta del fotodiodo se utiliza un osciloscopio, para este punto se están utilizando 2 canales del osciloscopio, en uno de ellos se observa la señal de entrada V_{bias} y en el otro canal se observa la señal de salida V_{RL} , como se muestra en la Figura 11. Los datos de ambos canales se guardan manualmente en una USB y luego se procesan mediante un programa de Matlab. Con este programa se obtiene 2 gráficas, una gráfica que es la curva característica del fotodiodo (Figura 12A) y la segunda gráfica es de V_{RL} contra V_{bias} , esta nos indica el V_{bias} (Figura 12B) que se deben utilizar para que el fotodiodo trabaje de manera lineal.

Debido a que el fotodiodo se utilizará con un tren de pulsos, también debemos de obtener las curvas del fotodiodo cuando la potencia óptica es cero, lo que significa que se

obtendrán 2 juegos de curva, uno cuando el fotodiodo es iluminado con una potencia determinada y otro juego cuando la luz es cero.

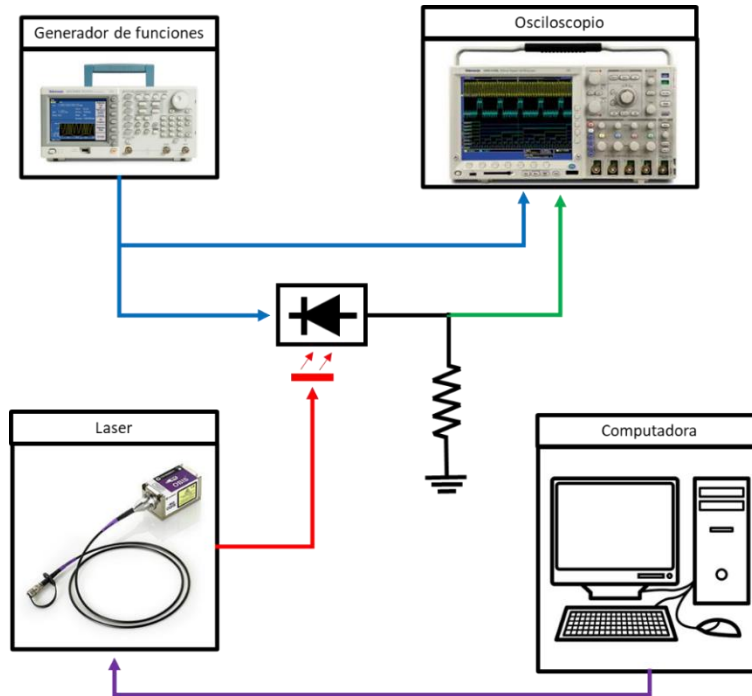
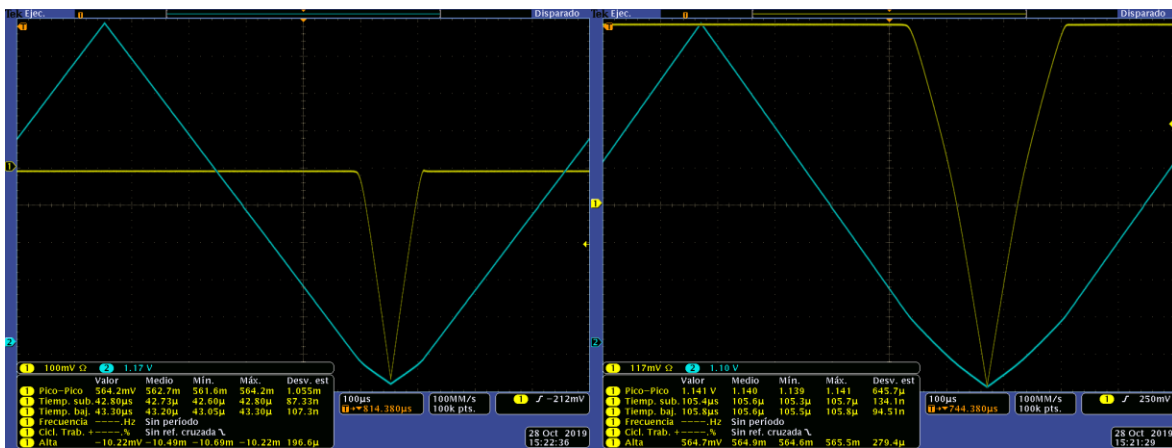


Figura 10. Diagrama de bloques para la caracterización de fotodiodos



A)

B)

Figura 11. Capturas del osciloscopio, A) con potencia óptica cero y B) con potencia óptica.



2.1.1 Programa de Matlab para caracterización

Una vez que ya se tienen las mediciones del osciloscopio, los datos se pasan a un archivo de Excel (.xlsx), donde se compilan los datos, un archivo para V_{bias} (con y sin potencias) y un archivo para V_{RL} (con y sin potencia), estos datos se cargan en matlab como matrices. En el programa se ingresa manualmente el valor de la carga RL. Como se mencionó anteriormente necesitamos incrementar V_{bias} de un valor inicial a un valor final, la sección 1 del programa se encarga de extraer los datos de V_{bias} y V_{RL} que corresponden a la rampa desea, como se muestra en la figura 5B, la señal de V_{bias} es la onda azul, en esta onda, solo la pendiente que va del punto máximo al punto mínimo está completa, la sección 1 del programa se encarga de detectar que la pendiente sea de un punto mínimo a máximo o viceversa, extrae solo esa sección de la onda y ordena los datos para que se conviertan en un pendiente de va de un punto mínimo a un punto máximo, esto sucede para ambas señales V_{bias} y V_{RL} .

Una vez que ya se tienen los datos de V_{bias} y V_{RL} , la sección 2 del programa se encarga de calcular la corriente (I_d) y el voltaje (V_d) del fotodiodo, si se resta V_{bias} menos V_{RL} se obtiene V_d y debido a que la carga RL está en serie, si calculamos la corriente en RL encontramos la corriente en todo el circuito por lo tanto será la corriente en el fotodiodo.

En la sección 3 del programa solo se utiliza para graficar, sabemos que para obtener la curva característica del fotodiodo solo se debe graficar I_d contra V_d y para obtener la otra curva solo se grafica V_{RL} contra V_{bias} . En la Figura 12 se muestra un ejemplo del resultado entregado por este programa.



```
clc;
close all;

RL=50; %Resistencia, cambiar manualmente

for i=1:2
Vb=Vb1(:,i);
Vrl=Vrl1(:,i);
[Vbiasmin,imin]=min(Vb);
[Vbiasmax,imax]=max(Vb);
imax_imin=imax-imin;

    if imax<imin
        B=(imax_imin)*(-1);
        V1=Vb(imax:imin);
        VRL1=Vrl(imax:imin);
        V1(49901:1:end)=[];
        VRL1(49901:1:end)=[];
        V1= flip(V1);
        VRL1=flip(VRL1);
        Vbias(:,i)=V1;
        VRL(:,i)=VRL1;
    else
        V1=Vb(imin:imax);
        VRL1=Vrl(imin:imax);
        V1(49901:1:end)=[];
        VRL1(49901:1:end)=[];
        Vbias(:,i)=V1;
        VRL(:,i)=VRL1;
    end
end

Vd=VRL-Vbias;
Id=VRL/RL;
Vbiassort=sort(Vbias);
VRLsort=sort(VRL);
Vdsort=VRLsort-Vbiassort;
Idsort=sort(Id);

c=figure;
plot(Vbiassort,VRLsort,'linewidth',2);
xlabel('Vbias (volts)');
ylabel('VRL (volts)');
title(sprintf('Vbias vs VRL con RL= %g ohms',RL));
grid;
legend('PL=0mW','PL=13mW','Location','southeast');

%=====Grafica curva caracteristica fotodiodo
f=figure;
plot(Vdsort,-Idsort,'linewidth',2);
xlabel('Vd (volts)');
ylabel('Id (Amperes)');
title(sprintf('Vd vs Id con RL= %g ohms',RL));
grid;
legend('PL=0mW','PL=13mW','Location','northwest');

%=====Se guardan graficas y datos
saveas(f,'Curva Caracteristica','png');
saveas(c,'Curva Saturacion','png');
save('Curva.mat','Vbiassort','VRLsort','Vdsort','Idsort','c','f');
```

Sección 1

Sección 2

Sección 3

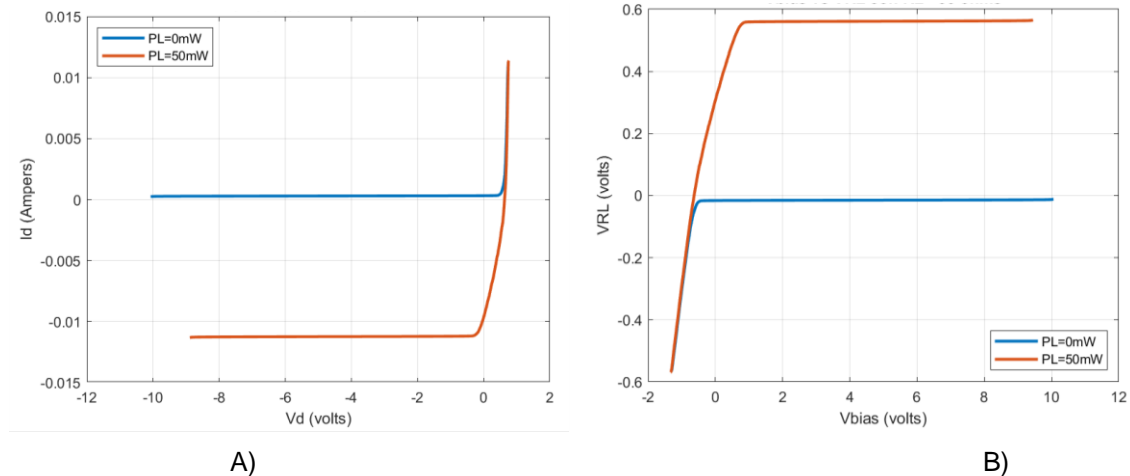


Figura 12. Ejemplo, A) Curva I-V del FD y B) curva V_{RL} Vs V_{bias} del FD.

2.1.2 Fotodiodo Thorlabs FDS02

Para obtener las curvas de la Figura 13, se utilizó una carga R_L de 50Ω y una potencia óptica de $50 mW$, como bien se sabe con una R_L de 50Ω se obtendrá la respuesta más rápida del fotodiodo y eso es justo lo que se necesita para la aplicación desea, como se puede ver en la Figura 13B, con esta configuración obtenemos una región lineal un poco pequeña, sin mencionar que la máxima amplitud de la respuesta del fotodiodo será de aproximadamente $600 mV$, claro esto solo pasara si el fotodiodo se satura lo que significa que la máxima amplitud que podemos conseguir en la respuesta será de aproximadamente $500 mV$ esto con la intención de conservar al fotodiodo en la región lineal. En cambio sí usamos una carga R_L de 100Ω , como se sabe, conforme se aumente la carga la rapidez de la respuesta del fotodiodo será más lenta, pero incrementar la carga aumentará V_{RL} como se muestra en la Figura 14B lo que significa que aumentaremos la amplitud de la respuesta del fotodiodo, simplemente con realizar este cambio el voltaje en V_{RL} aumento de $600 mV$ a $1.2 V$, siendo un poco conservador para evitar que el fotodiodo se llegue a saturar, la

máxima amplitud que obtendríamos sería 1 V aproximadamente, se gana en amplitud pero se pierde en el tiempo de respuesta.

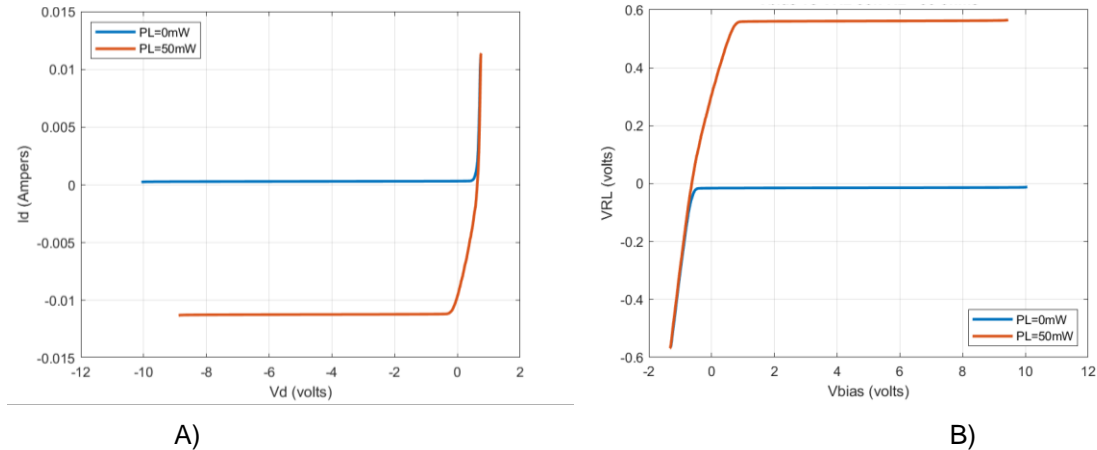


Figura 13. FDS02, con $R_L = 50 \Omega$ y $P = 50 \text{ mW}$, A) curva I-V, B) curva V_{RL} Vs V_{bias} .

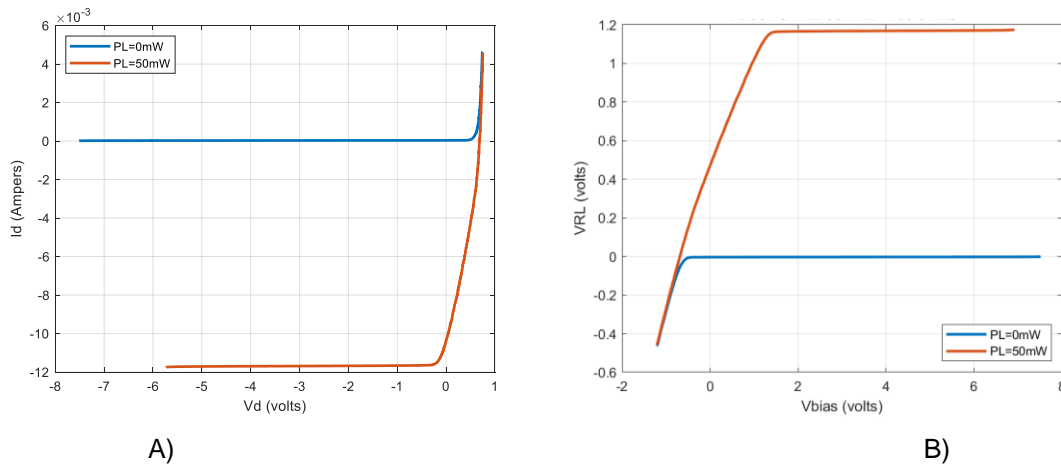


Figura 14. FDS02, con $R_L = 100 \Omega$ y $P = 50 \text{ mW}$, A) curva I-V, B) curva V_{RL} Vs V_{bias} .

2.1.3 Fotodiodo OEMARKET PD-850

Para la caracterización de este fotodiodo se probó una configuración con carga R_L de 50Ω y con potencia óptica de 25 mW , como se puede ver en la Figura 15B, este fotodiodo cuenta con una región lineal bastante grande pero V_{RL} es bastante pequeño, esto nos permite muestrear una señal analógica con una amplitud grande pero la respuesta del fotodiodo

será un poco pequeña, la región lineal tiene un rango de V_{bias} bastante grande lo cual tiene beneficios para la aplicación pero, tiene un pequeño detalle, si se observa la Figura 15A podemos ver que el mayor porcentaje de la región lineal está en el tercer cuadrante cuando en teoría, dicha región debe estar en el cuarto cuadrante, en el capítulo 3 analizaremos si afecta o no esta condición.

En la Figura 16 vemos un cambio en las curvas, se cambió el valor de R_L a 100Ω , como ya lo sabemos, nuestra región lineal se duplico lo cual es muy bueno para así poder muestrear señal con una amplitud grande pero también teniendo en cuenta que esto hará un poco más lenta la respuesta del fotodiodo.

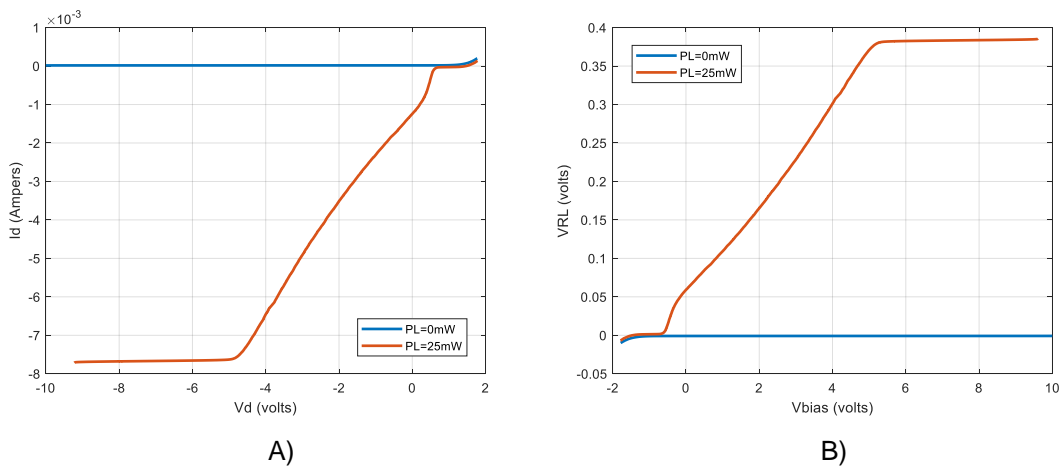


Figura 15. PD-850 con $R_L = 50 \Omega$ y $P = 25 \text{ mW}$, A) curva I-V, B) curva V_{RL} Vs V_{bias} .

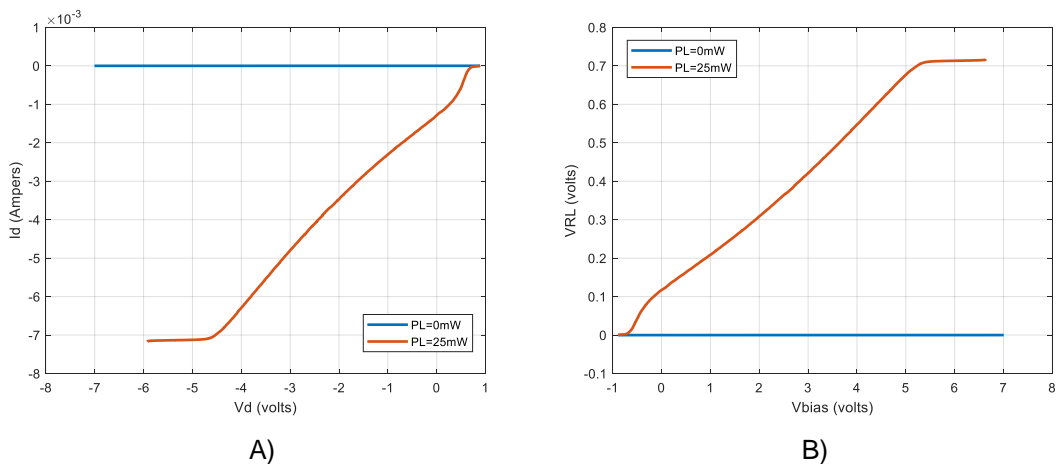


Figura 16. PD-850 con $R_L = 100 \Omega$ y $P = 25 \text{ mW}$, A) curva I-V, B) curva V_{RL} Vs V_{bias} .

2.1.4 Fotodiodo QPhotonics QPDI-40

Este fotodiodo se caracterizó bajo dos configuraciones, una con una carga R_L de 50Ω y la otra con R_L de 100Ω , como ya sabemos incrementar la carga R_L aumentará la amplitud de la respuesta del fotodiodo, pero al mismo tiempo será más lenta la respuesta. Como se ve en la Figura 17B, para la configuración con R_L de 50Ω , se cuenta con una región lineal muy pequeña, sin mencionar que el V_{RL} es pequeño, ya que la máxima amplitud que puede alcanzar la respuesta es de aproximadamente 200 mV , esto es provocado por la responsividad del fotodiodo, debido a que está centrada en 1550 nm y para este proyecto se utiliza un láser de 660 nm , es por esto que los voltajes entregados por el fotodiodo son muy pequeños pero si lo comparamos con la configuración de carga R_L de 100Ω se puede ver en la Figura 18B que el V_{RL} se duplico lo que significa que nuestra región lineal incremento, aunque la región lineal es muy pequeña para ambos casos, aun así es suficiente para realizar pruebas, ya que para efectos de análisis se usaran señal analógicas pequeñas.

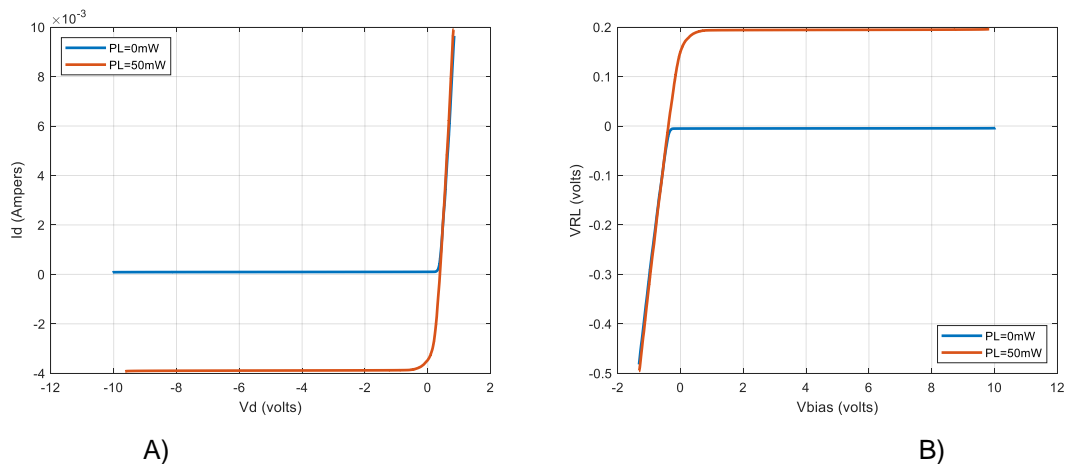


Figura 17. QPDI-40, con $R_L = 50 \Omega$, $P = 50 \text{ mW}$, A) curva I-V, B) curva V_{RL} Vs V_{bias} .

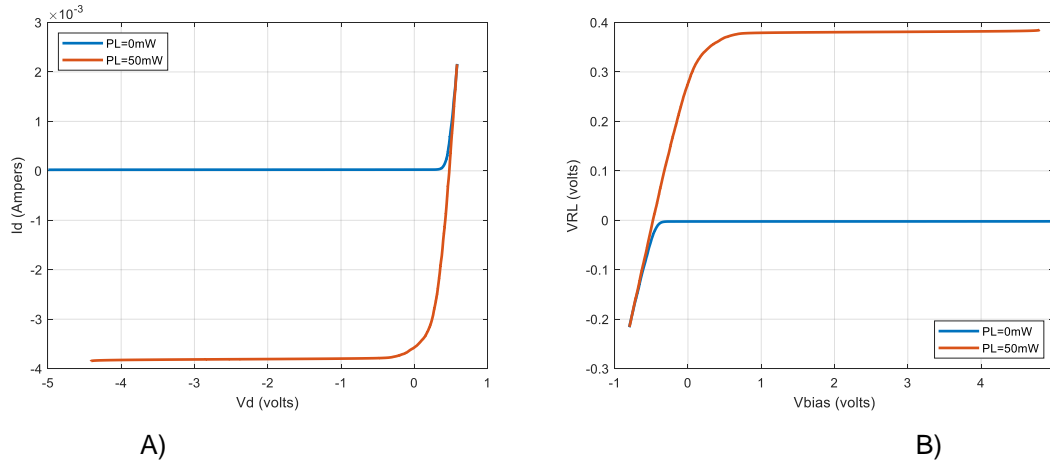


Figura 18. QPDI-40, con $R_L = 100 \Omega$, $P = 50 mW$, A) curva I-V, B) curva V_{RL} Vs V_{bias} .

2.2 Punto de operación del fotodiodo

En esta sección se aplicarán modelos de aproximaciones lineales [13] con carga R_L del fotodiodo para determinar el punto de operación del fotodiodo, se sabe que el fotodiodo debe trabajar en el cuarto cuadrante de la curva I-V, esto significa que el voltaje en el fotodiodo debe ser positivo y la corriente debe circular en sentido contrario a la polarización del fotodiodo. Para lograr poner al fotodiodo a trabajar en dicha región, se aplica un voltaje que con ayuda de R_L pone al fotodiodo en dicha región. Se usará un método desarrollado en [13] para calcular el valor de V_{bias} y de amplitud (V_{PP}) que la señal senoidal tendrá.

Para forzar al fotodiodo a trabajar en el cuarto cuadrante de su curva característica I-V la potencia aplicada controla al fotodiodo como un interruptor de conmutación, además obligando al fotodiodo a trabajar en el cuarto cuadrante que permite que V_{RL} sea lineal con respecto a V_{bias} dentro de un rango de operación. Para que el fotodiodo trabaje en el cuarto cuadrante de su curva I-V se necesita que $V_d > 0$ y $I_d < 0$, es decir que los valores de I_d y V_d que determinan el punto de operación no sobrepasen los límites del cuarto cuadrante de la curva I-V.

Debido a que el fotodiodo PIN es un dispositivo con respuesta no lineal (al igual que otros componentes electrónicos como diodos, transistores, etc.), para utilizarlo se requiere establecer un punto de operación, alrededor del cual, el fotodiodo se comporta de manera lineal, esto se logra ajustando un valor de corriente directa sobre el cual las variaciones de alterna se mantendrán restringidas en un rango donde la respuesta es casi lineal.

El objetivo del programa es encontrar el punto de operación, así como el rango de trabajo donde el fotodiodo se mantendrá trabajando de manera lineal. Como podemos ver en la Figura 19, la tangente trazada fue encontrada mediante los modelos de aproximación lineal, así como los puntos mostrados en este ejemplo, sabemos que el rango donde la línea trazada sea tangente en la curva V_{bias} Vs V_{RL} será nuestro rango máximo de trabajo para el punto seleccionado ya que sabemos que este rango será lineal y si se trabaja fuera de este rango puede que la linealidad se pierda.

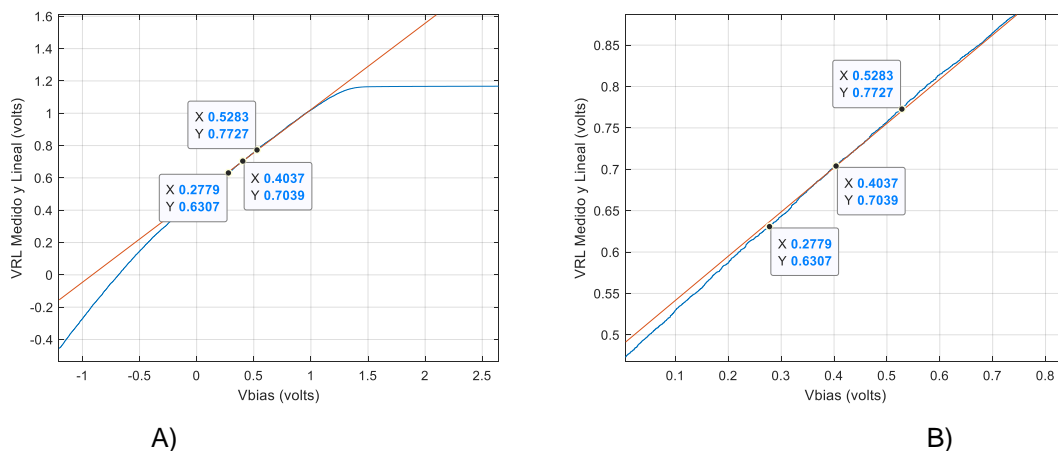


Figura 19. Ejemplo de linealidad del punto de operación, B) acercamiento de A.



2.2.1 Programa de Matlab para el punto de operación

Para poder usar este programa primero se debió caracterizar los fotodiodos, debido a que los datos entregados por el programa de caracterización se utilizan en este programa, por eso es muy importante haber caracterizado los fotodiodos. Este programa se extrajo de [13], pero se realizaron algunas modificaciones para poder usarlo con los dispositivos que se tienen. Esas modificaciones consisten en que en este programa se tiene que ingresar manualmente algunas características como la responsividad y corriente de saturación del fotodiodo que se vaya a analizar, una vez que se ingresan esos datos en el programa, ya se puede utilizar para analizar el fotodiodo en cuestión. En base a la curva I-V del fotodiodo se debe seleccionar un V_d , se puede elegir cualquier punto siempre y cuando este en el cuarto cuadrante, este punto se elige de manera arbitraria siempre y cuando se tengan en cuenta dichos límites, una vez seleccionado el punto V_d se ingresa en el programa así como la carga RL y los datos del programa de caracterización, cuando se tengan todos estos datos, se ejecuta el programa. El programa utiliza unos modelos matemáticos desarrollados en [13] para encontrar V_{bias} y el V_{PP} de la señal senoidal. En base al V_d seleccionado, el programa encuentra el V_{bias} que provoca dicho V_d pero también calcula cual sería el V_{PP} ideal que debería de tener la señal senoidal a muestrear, también entrega datos como los límites de la región lineal así como otros datos, pero para el propósito de este proyecto los datos importantes son el V_{bias} , V_{PP} y los límites de la región lineal, en base a los resultados de este programa se realiza el análisis de la respuesta en frecuencias, respuesta transitoria y muestreo.



Desarrollo de un sistema de muestreo optoelectrónico polifásico por medio de fotodiodos, red de fibra óptica y un solo laser pulsado



```
function [Tab1,Tab2,Tab3]=PuntoVd_V2 (Vdo,RL,Vbiassort,Vdsort,VRLsort,Idsort)

%Punto Encontrar un punto de operacion especifico en base a Vdo

%Encontrar corriente Id para el Vdo escogido (Ido)
dif=abs(Vdo-Vdsort);
[j,u]=min(dif);
Vbiaso=Vbiassort(u);
VRLo=VRLsort(u);
Ido=Idsort(u);
Vd0=0;
%CORRIENTE FOTOGENERADA Iph
dif=abs(Vd0-Vdsort);|
[j,u]=min(dif);
Iph=Idsort(u);
%Encontrar el parametro k,rango lineal de Vd (Vd1),Vbiasmin,Vbiasmax
%===== Para el FDS02=====
Isat=500e-12;
R=0.2; % a 660nm
P=Iph/R;
T=27+273; %Temperatura en grados Kelvin
Kb=1.38e-23;%Constante de Boltzman
q=1.6e-19; %Carga del electrón
k=log((Iph-Ido)/Isat+1)/Vdo; %constante k (definida en la tesis)
n=q./(k*Kb*T); %coeficiente de emisión
Vbiasmin=RL*Isat+5/k;
Vbiasmax=Iph*RL;
w=4;
Vdrang=w/(5*k);
Vpp=(1+k*RL*Isat*exp(k*Vdo))*w/(5*k);

%rango de Vd para ser lineal
%===== Para encontrar equivalente lineal =====
dif=abs(Vdo-Vdrang-Vdsort);
[j,u]=min(dif);
Vd1=Vdsort(u);
Vbias1=Vbiassort(u);
VRL1=VRLsort(u);
Id1=Idsort(u);

dif=abs(Vdo+Vdrang-Vdsort);
[j,u]=min(dif);
Vd2=Vdsort(u);
Vbias2=Vbiassort(u);
VRL2=VRLsort(u);
Id2=Idsort(u);
Vpp2=Vbias2-Vbias1;

% APROXIMACION DE RESISTENCIA
rdo=(Vd2-Vd1)/(-Id2+Id1); % Rd a partir de la pendiente de la recta
Rdo=1/(k*Vdo*Isat*exp(k*Vdo)); %Rd teorica

%Versiones Lineales
VRL1=((Vbiassort-Vbiaso)*RL)/(RL+rdo)+VRLo;
Vd1=-((Vbiassort-Vbiaso)*rdo)/(rdo+RL)+Vdo;
Id1=(Vdsort-Vdo)/rdo-Ido;
A=rdo./(rdo+RL)*100;

A1=[VRLo,Vdo,rdo,(Ido*1e3),(Iph*1e3),k];
Tab1=array2table(A1,'VariableNames',{'VRLo_V' 'Vdo_V' 'Rdo_Ohms' 'Ido_mA' 'Iph_mA'
'K'});
```



```
A2=[Vbiasmin,Vbiasmax,Vbiaso,Vpp];
Tab2=array2table(A2,'VariableNames',{'Vbiasmin_V' 'Vbiasmax_V' 'Vbiaso_V'
'Vpp_V'});

A3=[Vd1,Vd2,Vbias1,Vbias2];
Tab3=array2table(A3,'VariableNames',{'Vd_P1_V' 'Vd_P2_V' 'Vbias_P1_V'
'Vbias_P2_V'});

%===== GRAFICA DE DATOS=====
a=figure;
plot(Vbiassort,VRLsort,Vbiassort,VRL1);
xlabel('Vbias (volts)');
ylabel('VRL Medido y Lineal (volts)');
title(sprintf('Vbias vs VRL Medido y Lineal con RL= %g ohms',RL));
grid;
xlim([0 Vbiasmax]);
saveas(a,'Vbias_VRL_med_lin','fig');

e=figure;
plot(Vdsort,-Idsort,Vdsort,Idl);
xlabel('Vd (volts)');
ylabel('Id Medido y Lineal (volts)');
title(sprintf('Vd vs Id Medido y Lineal con RL= %g ohms',RL));
grid;
xlim([0 1]);
ylim([-1.2*Iph 0]);
saveas(e,'Vd_Id_med_lin','fig');
end
```

VRLo_V	Vdo_V	Rdo_Ohms	Ido_mA	Iph_mA	K
0.352024	0.23	73.26931259	7.04048	9.64482	67.2427705
Vbiasmin_V	Vbiasmax_V	Vbiaso_V	Vpp_V		
0.074357461	0.482241	0.121859	0.11607081		
Vd_P1_V	Vd_P2_V	Vbias_P1_V	Vbias_P2_V		
0.218183	0.242293	0.143	0.102437		

Tabla 1. Resultados del programa de punto de operación

La tabla 1 es un ejemplo del resultado del programa, pero hay 4 datos importantes que en base a ellos se realizan las siguientes pruebas y son el $V_{biasmin}$, $V_{biasmax}$, V_{biaso} y V_{pp} .

V_{bias} mínimo y máximo nos proporciona los límites de la región lineal, V_{biaso} es el punto de voltaje con el que se tiene que polarizar el fotodiodo, cabe mencionar que este punto puede cambiar siempre y cuando se encuentre dentro de los límites antes



mencionados. El punto entregado por el programa es calculado en base a V_d que elegimos en la curva característica del fotodiodo, en base a ese punto se calculó V_{bias} . En cuanto a V_{PP} es la excursión de la señal senoidal, este V_{PP} es el ideal para el punto seleccionado, el V_{PP} cambiará según punto seleccionado.

2.2.2 Fotodiodo Thorlabs FDS02

El punto de operación calculado en base al V_d seleccionado es el siguiente:

Para el caso con una carga R_L de 50Ω se encontró que usando un $V_{bias} = -74.95 mV$ obtendremos un $V_{RL} = 225.1 mV$ en la respuesta del fotodiodo con una excursión de la señal senoidal con $V_{PP} = 100 mV$ donde el punto mínimo está en $-124.9 mV$ y el punto máximo está en $-24.86 mV$ y con un rango en V_{RL} que va desde $206.8 mV$ hasta $242.7 mV$ (Figura 20).

Cuando se iniciaron con las pruebas, se descubrió que los datos obtenidos por el programa de punto de operación y las mediciones reales no concordaban, usando el V_{bias} indicado por el programa realmente se medía un V_{RL} menor al mostrado en la Figura 20, esto se debe a que el fotodiodo genera una resistencia dependiendo de la potencia óptica aplicada y esta carga no fue contemplada cuando se configuró la fuente de voltaje, es por eso que el V_{bias} se tiene que incrementar o disminuir hasta obtener el mismo V_{RL} que se muestra en la Figura 20.

Por lo tanto, el punto de operación obtenido en parte por la curva y en parte por las mediciones quedo de la siguiente manera, cabe mencionar que seguimos con el caso con carga R_L de 50Ω .



Con un de $V_{bias} = -26 \text{ mV}$ se obtiene un $V_{RL} = 225.1 \text{ mV}$, se encontró una excursión de la señal senoidal de un $V_{PP} = 65 \text{ mV}$ donde el punto mínimo está en -59 mV y entregará un $V_{RL} = 206.5 \text{ mV}$ y el punto máximo está en 6 mV entregando un $V_{RL} = 242.4 \text{ mV}$.

Como se puede ver para este caso se tuvo que incrementar el valor de V_{bias} para obtener los valores de V_{RL} entregados por las curvas, como se mencionó esto es debido a que no se tomó en cuenta la resistencia generada por el fotodiodo por lo que se tiene que compensar dicha carga ya que no se configuró en la fuente de voltaje.

Para el caso con carga $RL = 100 \Omega$ (Figura 21) el punto de operación según el programa es:

Con un de $V_{bias} = 404 \text{ mV}$ se obtiene un $V_{RL} = 703.9 \text{ mV}$, se encontró una excursión de la señal senoidal de un $V_{PP} = 250 \text{ mV}$ donde el punto mínimo está en 277.9 mV entrega un $V_{RL} = 631.3 \text{ mV}$ y el punto máximo está en 528.3 mV entrega un $V_{RL} = 773 \text{ mV}$

Una vez que se compensó la carga del fotodiodo el punto de operación real es:

Con un de $V_{bias} = 461 \text{ mV}$ se obtiene un $V_{RL} = 703.3 \text{ mV}$, se encontró una excursión de la señal senoidal de un $V_{PP} = 219 \text{ mV}$ donde el punto mínimo está en 354 mV entrega un $V_{RL} = 631.7 \text{ mV}$ y el punto máximo está en 573 mV entrega un $V_{RL} = 773.6 \text{ mV}$.

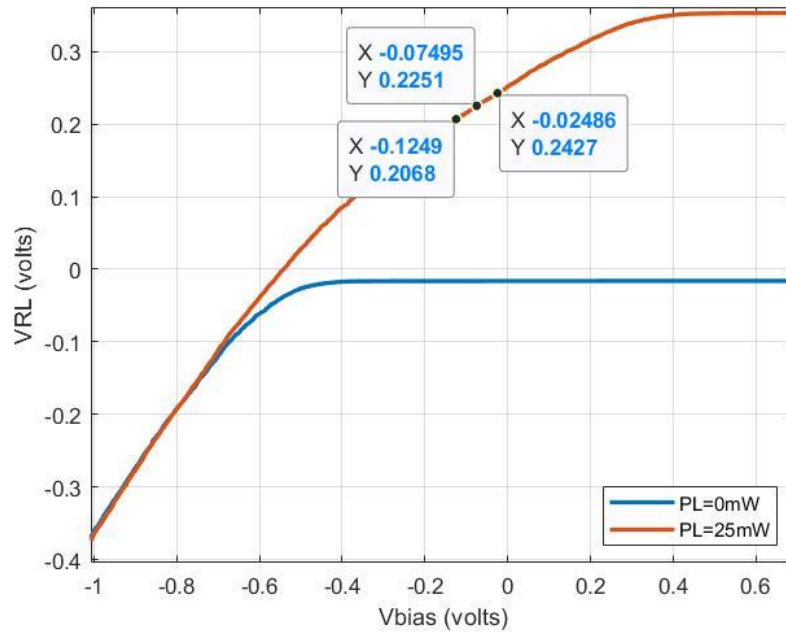


Figura 20. Punto de operación (FDS02), $R_L = 50 \Omega$ y $P = 25 \text{ mW}$.

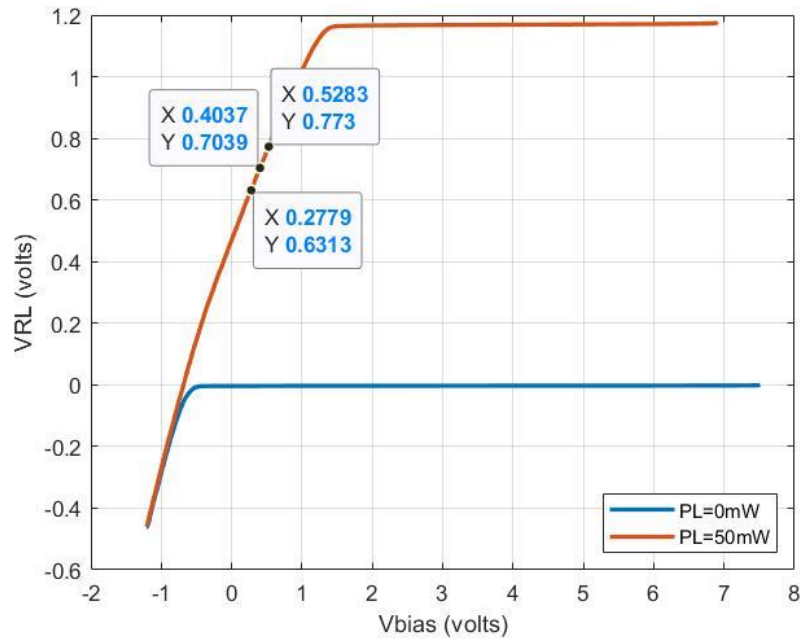


Figura 21. Punto de operación (FDS02), $R_L = 100 \Omega$ y $P = 50 \text{ mW}$.

2.2.3 Fotodiodo QPhotonics QPDI-40

Para el caso de este fotodiodo también se tuvo que incrementar V_{bias} para compensar la carga generada por el fotodiodo, vemos que, debido al comportamiento de la curva (Figura 22), al utilizar un V_{bias} el fotodiodo entrega un V_{RL} mucho mas grande en su respuesta.

Con un de $V_{bias} = -95 \text{ mV}$ se obtiene un $V_{RL} = 108.8 \text{ mV}$, se encontró una excursión de la señal senoidal de un $V_{PP} = 60 \text{ mV}$ donde el punto mínimo está en -125 mV entrega un $V_{RL} = 92.3 \text{ mV}$ y el punto máximo está en -65 mV entrega un $V_{RL} = 124.2 \text{ mV}$, este punto de operación fue encontrado para el caso de carga RL de 50Ω y una potencia óptica de 50 mW .

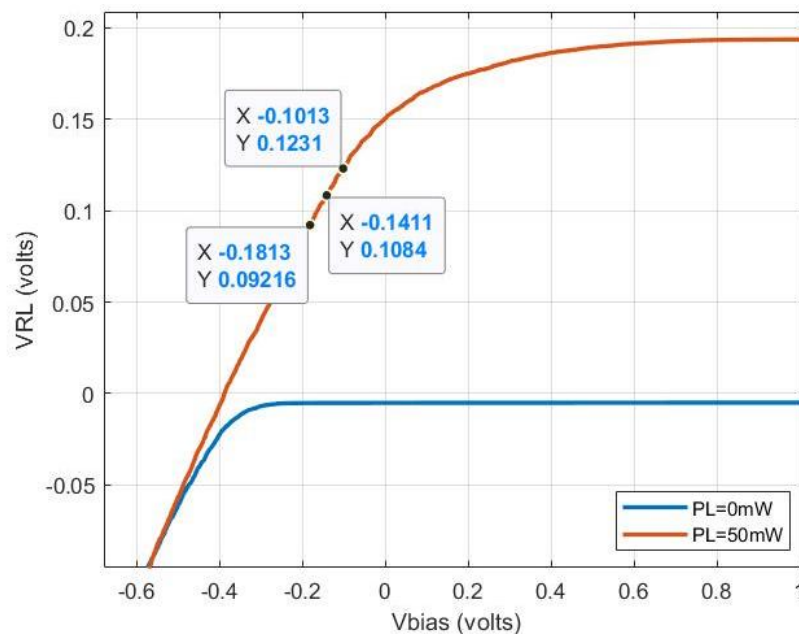


Figura 22. Punto de operación (QPDI-40), RL = 50Ω y P = 50 mW .

2.2.4 Fotodiodo OEMARKET PD-850

Como se mencionó, se tuvo que compensar el V_{bias} para poder obtener el V_{RL} indicado por las curvas características, pero vemos que el V_{bias} se tuvo que incrementar, también vemos que la región lineal para este fotodiodo es muy grande, la característica que tiene este fotodiodo es, aunque se utilice un V_{bias} grande la respuesta en V_{RL} será pequeña.

Caso con carga R_L de 50Ω (Figura 23)

Con un de $V_{bias} = 3.2 V$ se obtiene un $V_{RL} = 228.2 mV$, se encontró una excursión de la señal senoidal de un $V_{PP} = 600 mV$ donde el punto mínimo está en $2.9 V$ entrega un $V_{RL} = 209.3 mV$ y el punto máximo está en $3.5 V$ entrega un $V_{RL} = 246.6 mV$ este punto de operación fue encontrado para el caso de carga R_L de 50Ω y una potencia óptica de $25 mW$.

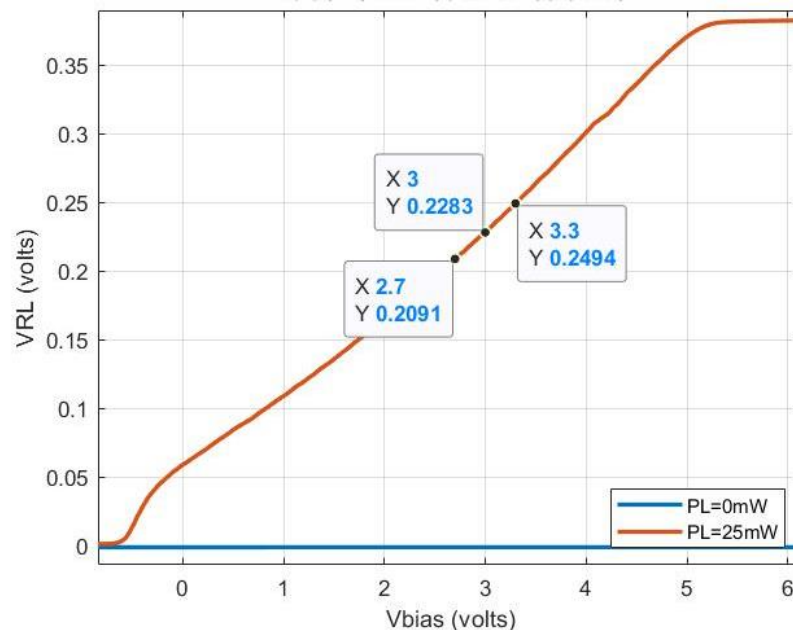


Figura 23. Punto de operación (PD-850), $R_L = 50 \Omega$ y $P = 25 mW$.



2.3 Análisis de la respuesta en frecuencia

La respuesta en frecuencia (variación de la ganancia de voltaje, conforme cambia la frecuencia). Se sabe que ningún dispositivo tiene la misma ganancia de voltaje a todas las frecuencias, si bien en su mayoría tienen una ganancia bastante constante dentro de un cierto intervalo de frecuencias, como se sabe no tienen pérdida en cuanto a baja frecuencia y solo debe uno ocuparse de la disminución de la ganancia a medida que la frecuencia aumenta. Tanto la frecuencia como la ganancia se representan gráficamente sobre una escala logarítmica.

Recordemos que, en todo circuito, sea integrado o de componentes discretos, hay conductores metálicos separados de otros conductores metálicos por un material aislante. Quiere decir que habrá alguna capacitancia parásita distribuida debida al alambrado, también en toda unión de semiconductores tienen alguna capacitancia. A medida que la frecuencia aumenta, esas capacitancias parásitas derivan a tierra una parte cada vez mayor de la señal de corriente alterna (CA), hasta que, a cierta frecuencia, toda la señal de CA pasa a tierra a través de la capacitancia parásita y ninguna llega a la carga.

El análisis de la respuesta en frecuencia para este caso se realiza polarizando el fotodiodo con una señal senoidal, la cual tendrá un offset y una amplitud pico a pico que se encontró mediante el programa de punto de operación, el fotodiodo debe recibir un haz constante de luz a una potencia determinada, debido a que se está polarizando con una señal senoidal y un haz constante, la respuesta del fotodiodo será una señal senoidal. Se deben tomar mediciones de la señal de entrada como la de salida, se toma el voltaje pico a pico, frecuencias de ambas señales, ya que se tenga la configuración lista, se incrementa de manera logarítmica la frecuencia de un punto inicial a un punto final, debido al gran número de muestras deseadas, este proceso fue automatizado por medio de un programa de Matlab.

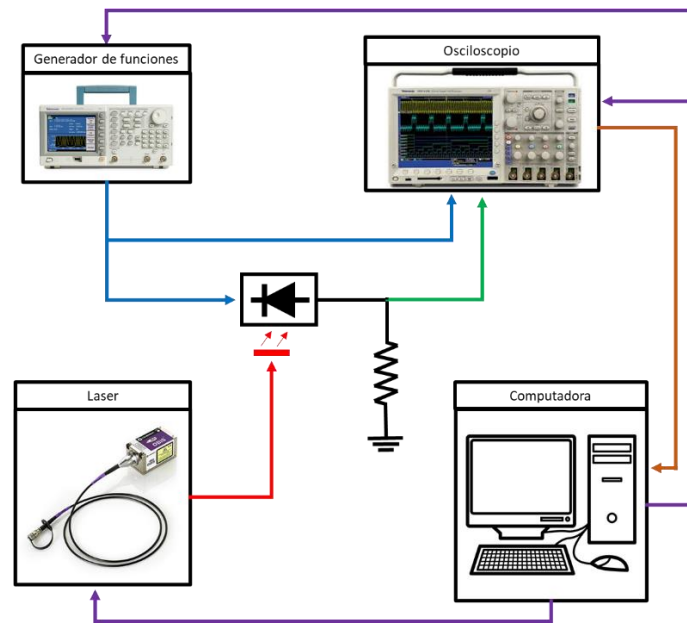


Figura 24. Diagrama de bloques para la respuesta en frecuencia.

2.3.1 Programa de Matlab para la respuesta en frecuencia

Este programa fue desarrollado para automatizar la prueba de la respuesta en frecuencia de los fotodiodos a utilizar, cabe aclarar que este análisis no se está haciendo a los pulsos de la respuesta del fotodiodo en cuestión sino que se está polarizando con una señal senoidal y se analiza cómo cambia esa señal senoidal con el aumento de la frecuencia, debido a la aplicación del proyecto, se necesita muestrear señales analógicas lo que significa que se debe encontrar la frecuencia máxima de la señal analógica con la que se estará polarizando el fotodiodo, básicamente debemos encontrar su frecuencia de corte.

Como se mencionó, debido a la gran cantidad de muestras que se desean tomar, dicho proceso fue automatizado, la conexión es simple como se muestra en la Figura 24, se utiliza un osciloscopio para tomar las mediciones, un generador de funciones que generara la señal senoidal y va aumentando la frecuencia de dicha señal, el láser que se



utiliza con una señal constante y potencia óptica fija y el circuito con el fotodiodo. Los dispositivos mencionados tienen la capacidad de conectarse a un ordenador. Lo primero que realiza el programa es conectarse con los dispositivos, luego configura dichos dispositivos (osciloscopio, generador y laser), se eligió un rango de frecuencias que van desde 100 KHz hasta 100 MHz, el programa toma un total de 100 muestras, cabe mencionar que el osciloscopio mide la señal de entrada y la respuesta del fotodiodo, se miden simultáneamente y los datos son enviados al ordenador, con estos datos se hace una conversión a decibeles y se grafica (Figura 25).

```
tic
Vbias=22e-3;
Vpp=156e-3;
%R=50;      %Impedancia del generador

%===== SetUp Gen2
set(Gen1.Waveform, 'Shape', 'sin');
%set(Gen1.Output(1), 'Impedance', R);
set(Gen1.Output(1), 'Impedance', 'Infinity');
set(Gen1.Voltage(1), 'Amplitude', Vpp);
set(Gen1.Voltage(1), 'Offset', Vbias);
set(Gen1.Frequency(1), 'Frequency', 100e3);

%=====Setup de laser
fprintf(LASER, 'source:am:internal CWP');
fprintf(LASER, 'source:power:level:immediate:amplitude 0.075');

pause(2);
set(Gen1.Output(1), 'State', 'On');
fprintf(LASER, 'source:am:state on');

%=====Setup de canales de osciloscopio

set(DvcOsci.Measurement(1), 'Source', 'channel1');
set(DvcOsci.Measurement(2), 'Source', 'channel1');
%set(DvcOsci.Measurement(3), 'Source', 'channel1');
set(DvcOsci.Measurement(1), 'MeasurementType', 'frequency');
set(DvcOsci.Measurement(2), 'MeasurementType', 'Amplitude');
%set(DvcOsci.Measurement(3), 'MeasurementType', 'Phase');

set(DvcOsci.Measurement(3), 'Source', 'channel2');
set(DvcOsci.Measurement(4), 'Source', 'channel2');
set(DvcOsci.Measurement(5), 'Source', 'channel2');
set(DvcOsci.Measurement(3), 'MeasurementType', 'frequency');
set(DvcOsci.Measurement(4), 'MeasurementType', 'Amplitude');
set(DvcOsci.Measurement(5), 'MeasurementType', 'Phase');

f=logspace(5, 8, 100);
T=1./f;
T = T*1.5; %cantidad de periodos deseado
T = T/10;
T = timebase_fun(T);
set(DvcOsci.Acquisition(1), 'Timebase', T(1));
```



```
%=====Variables canal 1
Feq_out =zeros(1,length(f));
Vpp_out =zeros(1,length(f));
Ph1 =zeros(1,length(f));
%=====Variables canal 2
Feq_in=zeros(1,length(f));
Vpp_in =zeros(1,length(f));
Ph2 =zeros(1,length(f));
for i=1:length(f)
    set(Gen1.Frequency(1), 'Frequency', f(i));%Frecuencia de la onda seno
    set(DvcOsci.Acquisition(1), 'Timebase', T(i));
    pause(5)
    set(DvcOsci.Acquisition(1), 'Control', 'single');
    %=====Datos Canal 1
    Feq_out(i) = get(DvcOsci.Measurement(1), 'Value');
    Vpp_out(i) = get(DvcOsci.Measurement(2), 'Value');
    %=====Datos Canal 2
    Feq_in(i) = get(DvcOsci.Measurement(3), 'Value');
    Vpp_in(i) = get(DvcOsci.Measurement(4), 'Value');
    Ph2(i) = get(DvcOsci.Measurement(5), 'Value');
    pause(3)
    BaseName='FEQ=';
    j=f(i);
    Dest1 = ['E:',BaseName,num2str(j),'.png']
    fprintf(IntOsci,['SAVE:IMAGE ',num2str(Dest1)] );
    pause(5);
    Dest2 = ['E:',BaseName,num2str(j),'.csv']
    fprintf(IntOsci,['SAVE:WAVEFORM ALL,',num2str(Dest2)] );
    pause(10);
    set(DvcOsci.Acquisition(1), 'Control', 'run-stop');
    pause(2)
    set(DvcOsci.Acquisition(1), 'State', 'run');
    pause(2)
end
%=====apagar salida del generador
set(Gen1.Output(1), 'State', 'off');
fprintf(LASER,'source:am:state off');
%=====Datos de canal 1
Feq_out = Feq_out';
Vpp_out = Vpp_out';
%=====Datos de nacal 2
Feq_in = Feq_in';
Vpp_in = Vpp_in';
Ph2 = Ph2;
%=====Se guardan datos como archivo de matlab
save('Med.mat','Feq_out','Vpp_out','Feq_in','Vpp_in','Ph2');
clearvars -except DvcOsci Gen1 Gen2 IntOsci LASER
toc
```

El programa de Matlab entrega una gráfica como en la Figura 25, esta grafica se obtiene comparando el voltaje de la señal de entrada y la señal de salida, posteriormente ese factor se convirtió decibeles. Cuando la respuesta se atenúa un 30% en ese punto se considera la frecuencia de corte.

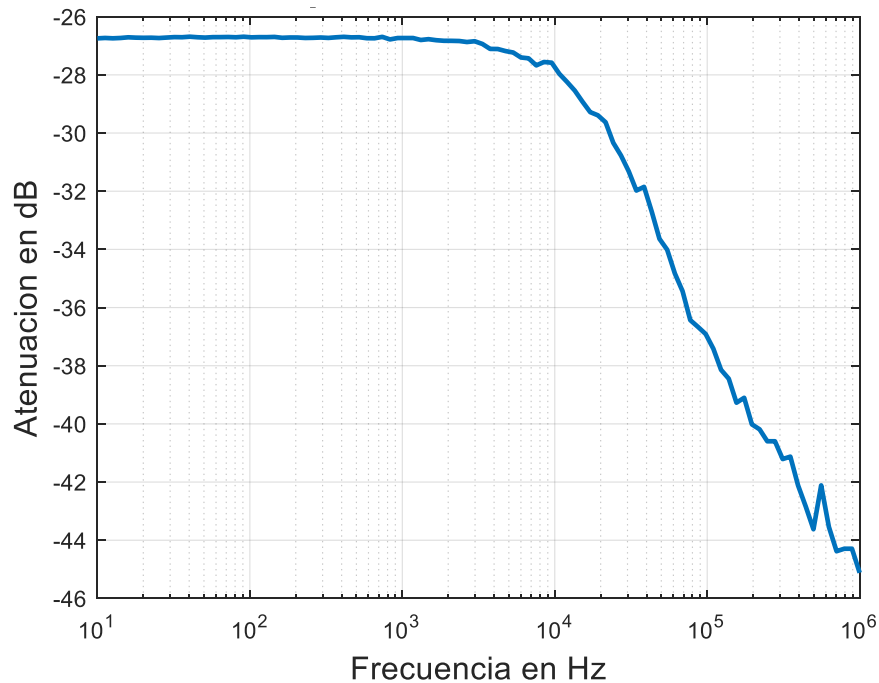


Figura 25. Ejemplo de respuesta en frecuencia.

2.3.2 Fotodiodo Thorlabs FDS02

El fotodiodo fue probado bajo la configuración de una carga RL de 50 Ω y una potencia óptica de 50 mW, con un punto de operación de una señal senoidal centrada en 174 mV y con una excursión de 70 mV, estos datos fueron entregados por el programa de punto de operación.

Como se puede ver en la Figura 26, tiene un comportamiento como se esperaba sin embargo conforme aumenta la frecuencia vemos una subida en la gráfica, una vez que la señal se atenúa un 30%, en ese punto establecemos la frecuencia de corte, para este fotodiodo tiene una frecuencia de corte de 46.42 MHz, lo que significa que solo podemos muestrear señales analógicas con una frecuencia máxima de 46 MHz.

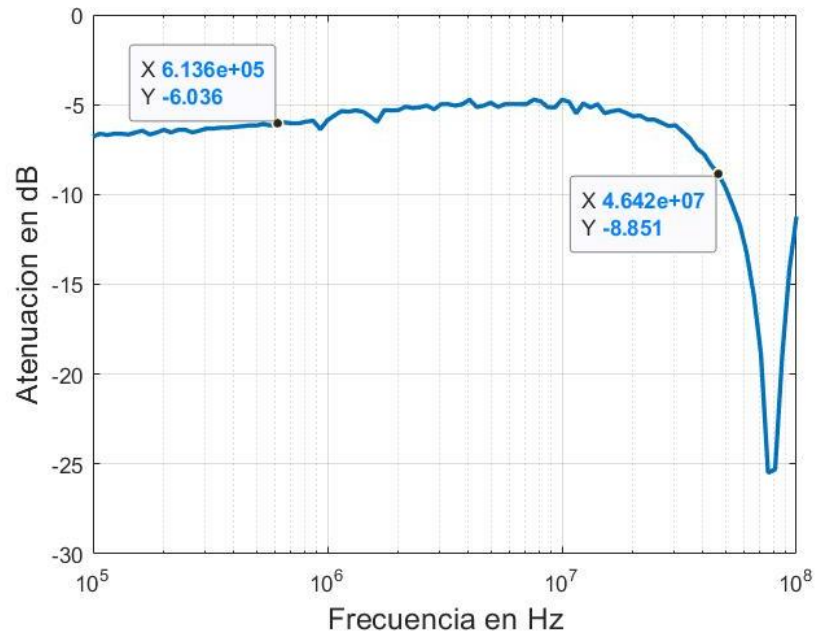


Figura 26. Resp. freq. (FDS02), $R_L = 50 \Omega$, $P = 50 \text{ mW}$, $V_{\text{bias}} = 174 \text{ mV}$ y $V_{\text{pp}} = 70 \text{ mV}$.

2.3.3 Fotodiodo QPhotonics QPDI-40

El fotodiodo fue probado bajo la configuración de una carga R_L de 50Ω y una potencia óptica de 50 mW , con un punto de operación de una señal senoidal centrada en -95 mV y con una excursión de 60 mV , estos datos fueron entregados por el programa de punto de operación.

Como se ve en la Figura 27, vemos un comportamiento deseado sin embargo vemos una ligera subida en la curva lo que significa que la atenuación en ese punto de la señal comenzó a disminuir y luego regreso a su comportamiento normal, conforme aumentó la frecuencia, la señal se atenúa un poco mas pero sin embargo alcanzó una frecuencia de corte de 53.37 MHz , este fotodiodo tiene una frecuencia de corte un poco más grande que el fotodiodo FDS02.

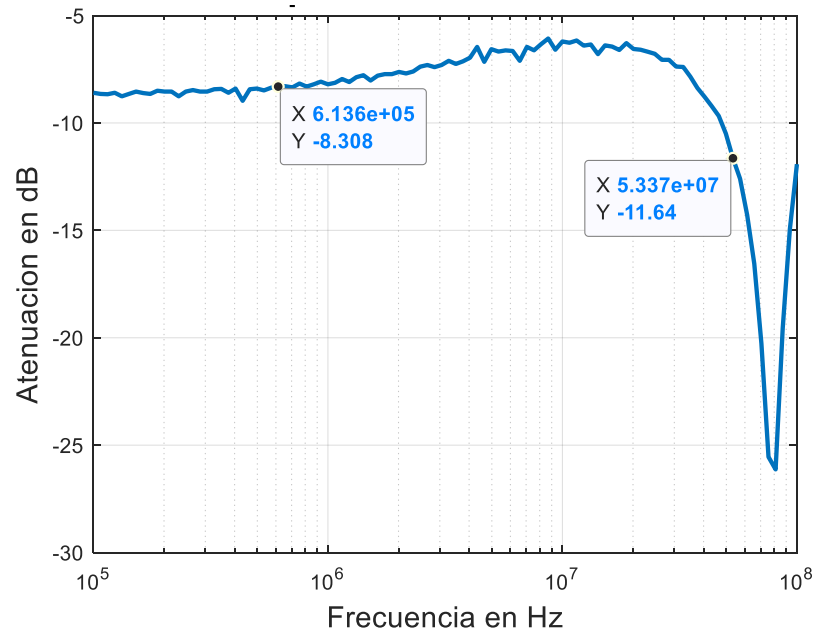


Figura 27. Resp. feq. (QPDI-40), $R_L = 50 \Omega$, $P = 50 \text{ mW}$, $V_{\text{bias}} = -95 \text{ mV}$ y $V_{\text{pp}} = 60 \text{ mV}$.

2.3.4 Fotodiodo OEMARKET PD-850

El fotodiodo fue probado bajo la configuración de una carga R_L de 50Ω y una potencia óptica de 25 mW , con un punto de operación de una señal senoidal centrada en 3.2 V y con una excursión de 600 mV , estos datos fueron entregados por el programa de punto de operación.

Como se ve en la Figura 28, vemos que este fotodiodo tiene una frecuencia de corte de aproximadamente 49.77 MHz , si lo comparamos con los fotodiodos FDS02 y QPDI-40, podemos decir que son bastante similares en cuanto a la frecuencia de corte.

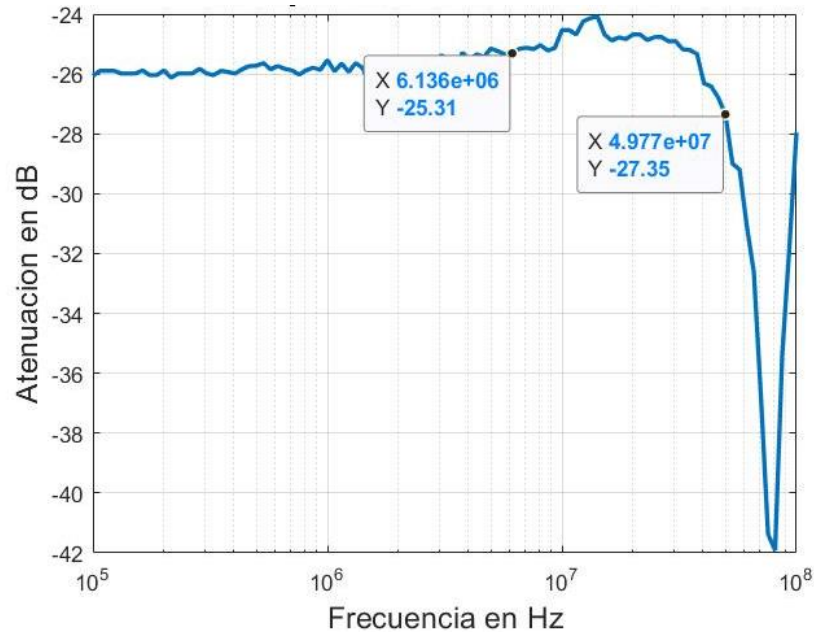


Figura 28. Resp. freq. (PD-850), $R_L = 50 \Omega$, $P = 25 \text{ mW}$, $V_{\text{bias}} = 3.2 \text{ V}$ y $V_{\text{pp}} = 600 \text{ mV}$.

Capítulo 3. Respuesta transitoria y muestreo

En este capítulo se estudiará la respuesta transitoria y muestreo del circuito al aplicársele como señal de activación de conmutación un tren de pulsos ópticos, con la finalidad de estudiar los tiempos de reacción del circuito.

Los datos más importantes que se van a revisar son los tiempos de subida y baja, debido a que necesitamos que el circuito responda de una manera rápida, los tiempos de subida y baja son los que harán que el pulso de respuesta sea más ancho o igual que el pulso óptico.

Una vez terminada la caracterización de los fotodiodos, conocemos las características o rangos de operación para diferentes configuraciones de resistencias y potencia óptica, una vez obtenidos los puntos de operación para los diferentes fotodiodos y la respuesta en frecuencia, con todos estos datos conocemos a la perfección los límites a donde se puede



llevar al fotodiodo. Como se desea armar un circuito de conmutación a altas frecuencias para la conversión analógica a digital, debemos analizar y conocer el comportamiento de la respuesta de los fotodiodos ya que de ese dependerá si dicho fotodiodo será viable para el proyecto.

3.1 Laser

Antes de realizar las pruebas de la respuesta transitoria y muestreo para cada fotodiodo, debemos conocer y analizar el tren de pulsos ópticos que se usará para realizar la conmutación del circuito.

Para efectos del estudio de la respuesta transitoria se seleccionó un rango de frecuencias para el tren de pulsos, las frecuencias seleccionadas son 10 KHz, 50 KHz, 100 KHz, 250 KHz, 500 KHz, 1 MHz, 2.5 MHz y 5 MHz. Se selecciono un rango de frecuencias con la intención de comparar la respuesta transitoria, así como el muestreo de un fotodiodo contra otro, para así poder elegir el fotodiodo con la mejor respuesta, por mejor respuesta nos referimos a que los tiempos de subida y bajada de la respuesta deben ser muy rápidos, para así saber que fotodiodo puede trabajar a altas frecuencias obligándolo a trabajar en el cuarto cuadrante.

Además de trabajar con un rango de frecuencias también se usaron con diferentes ciclos de trabajo, debido a que el objetivo de este proyecto es doblar la frecuencia usando dispositivos pasivos, por este motivo sabemos que no podemos usar un ciclo de trabajo del 50% (Figura 31), ya que esto no nos permitiría doblar la frecuencia, lo que significa que debemos usar un ciclo de trabajo mucho más pequeño por lo que se realizó el análisis de la respuesta transitoria y muestreo con 2 ciclos de trabajo, ciclo del 16% (Figura 32) y 2% (Figura 33), estos ciclos nos permitirían doblar la frecuencia siempre y cuando la respuesta de los fotodiodos sean rápidas.



Como se mencionó, primero debemos conocer el tren de pulsos ópticos con las frecuencias y ciclos de trabajo antes mencionados.

Una desventaja que tiene este laser que se está utilizando es que debe ser disparado o activado por una señal eléctrica externa lo que significa que se debe contar con un generador de funciones o algún otro dispositivo que puede entregar un tren de pulsos con las características de frecuencia y ciclo de trabajo antes mencionados. El láser debe ser activado con una señal eléctrica la cual debe sobrepasar 1.1 V para activarse, pero el punto máximo que puede alcanzar dicha señal es de 3 V, si el pulso eléctrico se encuentra en cualquier punto de este rango, el láser se activa y cualquier valor por debajo de 1.1 V provocara que el láser deje de emitir, si la señal eléctrica sobrepasa el rango mencionado, puede provocar algún daño en el láser.

Este laser no está diseñado para generar un tren de pulsos muy delgados. Cuando se empezó a utilizar este laser, solo se utilizaba con un ciclo del 50% pero se descubrió que el ancho del pulso disminuía conforme se aumentaba la frecuencia. Por ejemplo, si se deseaba un tren de pulsos a 50 MHz con realmente un ciclo de trabajo del 50%, en la señal eléctrica externa que activa el láser, debía de tener un ancho de pulso más grande para así compensar la frecuencia y que el láser genere lo que se desea. Este pequeño descubrimiento abrió la posibilidad de generar pulsos muy pequeños, cabe mencionar que el láser genera un tren de pulsos igual a la señal con la que se activa, por lo tanto si se cuenta con el equipo adecuado, se pueden generar pulsos muy pequeños pero además de esto, si se elige la señal eléctrica adecuada y además se mueve el offset de la señal eléctrica se pueden generar anchos de pulsos mucho más pequeños que la señal con la que se activa, esto significa que si no se cuenta con un dispositivo que genera pulsos muy pequeños aun así se pueden generar, solo es encontrar una tren de pulsos no importa que



no sea muy delgados pero si se mueve el offset de la señal podremos genera pulsos ópticos más delgados que la señal eléctrica que lo activa.

Activar el láser de esta forma presenta dos desventajas una de ellas es que, debido a que el láser no está diseñado para generar pulsos muy delgados, obligar al láser a hacer esto provoca que la amplitud de los pulsos ópticos no es totalmente uniforme y encontramos muy pequeñas pero notable diferencia de amplitud entre un pulso y el siguiente, esto es aún más visible cuando el tren de pulsos ópticos es visto en un analizador de redes, pero una vez que se utiliza un fotodiodo, esta diferencias de amplitudes entre los pulsos ópticos son mucho más pequeñas pero aun así se alcanzan a apreciar un poco. La segunda desventaja es que mover el offset de la señal eléctrica que activa el láser tiene un límite, conforme se aumenta la frecuencia este rango se va haciendo más pequeño, cabe destacar que la señal que activa el láser puede ser una señal senoidal, por ejemplo: Si se cuenta con una generador de funciones arbitrarias y este puede generar un tren de pulsos hasta con una frecuencia de 50 MHz (Ciclo 50/50), pero puede generar una señal senoidal de 100 MHz, probando diferentes amplitudes y offset para la señal senoidal solo se pudo conseguir que el láser genere un tren de pulsos ópticos con un ciclo de trabajo de 16% aproximadamente. A frecuencias por debajo de los 50MHz se pueden generar ciclos de trabajo de hasta 2%.

Cabe mencionar que, si se contara con el equipo adecuado, el tren de pulsos ópticos para la conmutación del circuito podría llegar a frecuencias muy altas. Si se contara con un láser autodisparado, lo que significa es que no necesita de una señal eléctrica externa para activarse, por ende, se eliminaría un dispositivo extra y no se estaría limitando a la capacidad del dispositivo que genera la señal externa. Normalmente los laser autodisparados, cuentan con una frecuencia de repetición fija, algunos tienen una frecuencia 100 MHz y entre más elaborados y costosos, esta frecuencia van en aumento



hasta el orden de gigas pero lo más importante es que este tipo de laser pueden generar pulsos muy delgados, algunos laser de este tipo que trabajan a 100 MHz pueden generar pulsos de aproximadamente 100 fs de ancho, con un tren de pulsos ópticos con estas características, la frecuencia se puede doblar sin problema y el ancho de los pulsos no sería un problema.

3.1.1 Tren de pulsos ópticos

Para poder visualizar o medir los pulsos ópticos se utilizó un analizador de redes HP modelo 83480A, en la Figura 29 podemos ver un diagrama de bloque de la conexión. Este cuenta con un ancho de banda de 3 GHz en el puerto óptico y el fotodiodo está diseñado para 850 nm por lo que la señal original tendrá una atenuación, además el puerto óptico del analizador solo permite una potencia óptica máxima de 5 mW por lo tanto se utilizó un atenuador pasivo de 5dB a 1300nm, que el atenuador este diseñado para una longitud de onda de 1300 nm nos favoreció por el hecho que, solo un atenuador redujo la señal aproximadamente 90 veces, sumando la atenuación provocada por el fotodiodo del analizador la señal original se atenuó aproximadamente 95 veces, por ejemplo: a la salida de la fibra óptica del láser se cuenta con una potencia óptica de 60mW y en el analizador se mide una potencia óptica de aproximadamente de 598 μ W.

La Figura 30, fue adquirida del analizador de redes, esta solo es una muestra de todos los datos obtenidos, cabe mencionar que la potencia óptica que se tomó en esta imagen presenta una atenuación de 95 veces con respecto a la señal original.

Para cada tren de pulsos se tomó una imagen de la pantalla del analizador de redes, así como los datos para poder graficar usando cualquier software.

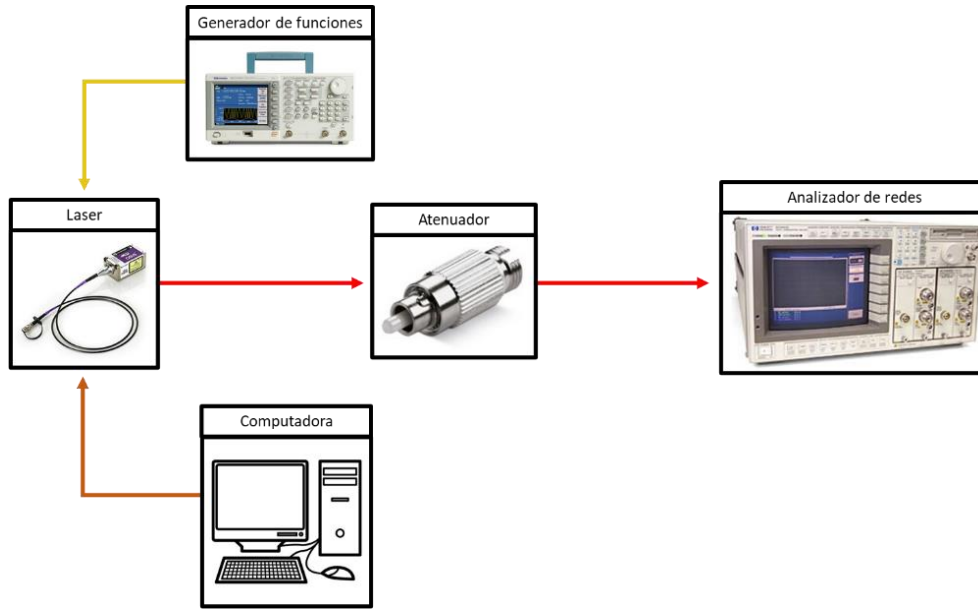


Figura 29. Diagrama de bloques para utilización del analizador de redes.

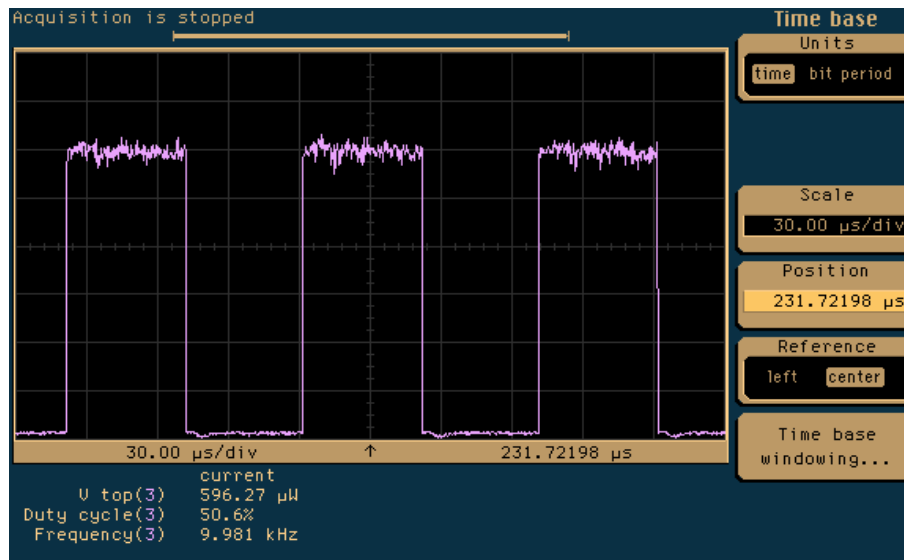


Figura 30. Ejemplo de la medición del tren de pulsos.

3.1.1.1 Tren de pulsos ópticos con ciclo de trabajo del 50%

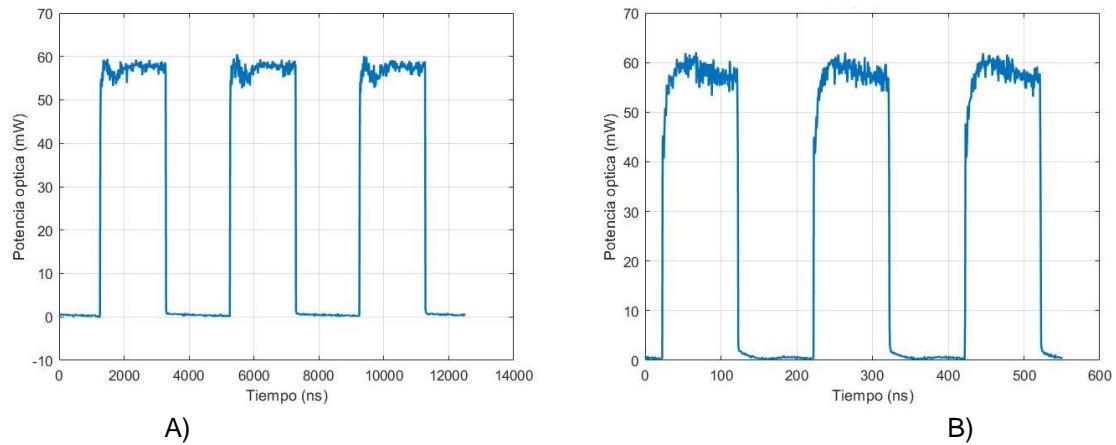


Figura 31. Pulsos ópticos (Ciclo 50%), A) Feq = 250 KHz, B) Feq = 5 MHz

3.1.1.2 Tren de pulsos ópticos con ciclo de trabajo del 16%

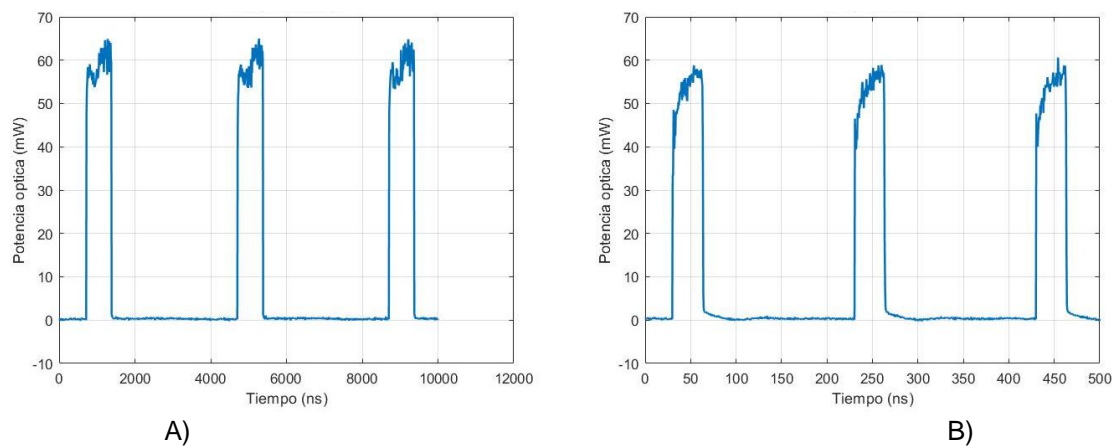


Figura 32. Pulsos ópticos (Ciclo 16%), A) Feq = 250 KHz, B) Feq = 5 MHz.

3.1.1.3 Tren de pulsos ópticos con ciclo de trabajo del 2%

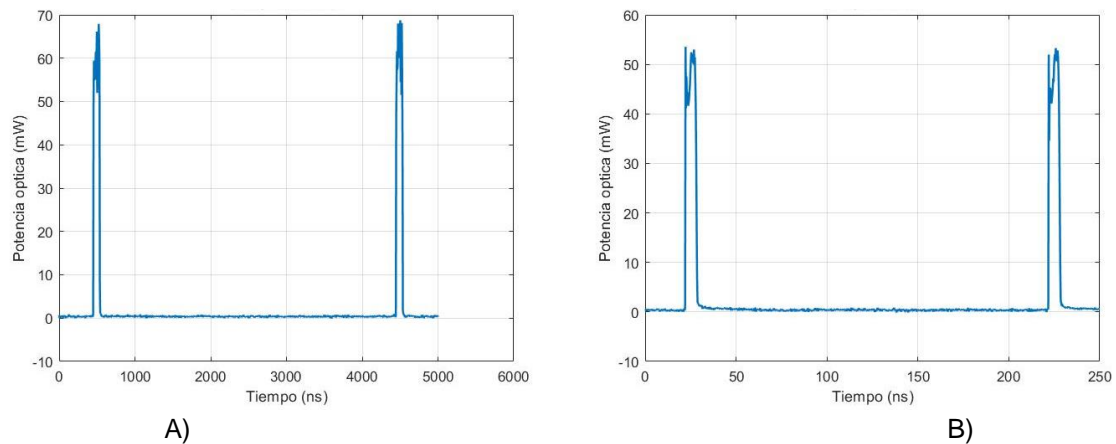


Figura 33. Pulsos ópticos (Ciclo 2%), A) Feq = 250 KHz, B) Feq = 5 MHz



3.2 Programa para la respuesta transitoria y muestreo

Debido a la cantidad de pruebas, también se automatizaron estas mediciones, para este caso se usan dos generadores de funciones Tektronix modelos AFG3101, uno para polarizar el fotodiodo y el otro para activar el láser, se utiliza un osciloscopio Tektronix modelos MSO 4034, contamos con el láser Coherent modelo ObisXL 660 y un ordenador, todos los dispositivos están conectados al ordenador, la conexión se muestra en la Figura 34. Primero se establece una comunicación entre el ordenador y los dispositivos, lo siguiente que realiza el programa es configurar los dispositivos, el programa está diseñado para ajustar automáticamente la escala de tiempo y voltaje del osciloscopio, también el programa ya tiene establecido el rango de frecuencias que se usará. Para usar el programa solo se conectan los dispositivos y se ingresan algunos datos como V_{bias} , V_{PP} y el valor de la carga RL, todos los demás datos ya están establecidos en el programa, de manera general lo que hace el programa es cambiar la frecuencia del tren de pulsos ópticos así como cambiar el V_{bias} y V_{PP} , para cada caso de frecuencia y voltaje el osciloscopio guarda los datos de la onda para poder graficar y también toma una captura de pantalla del osciloscopio y datos como voltaje, tiempos de subida y baja así como frecuencia, cabe mencionar que esto es realizado para la región lineal y región de saturación así como también se realiza para un ciclo de trabajo del 16% y del 2%, todo esto es realizado en el mismo programa.

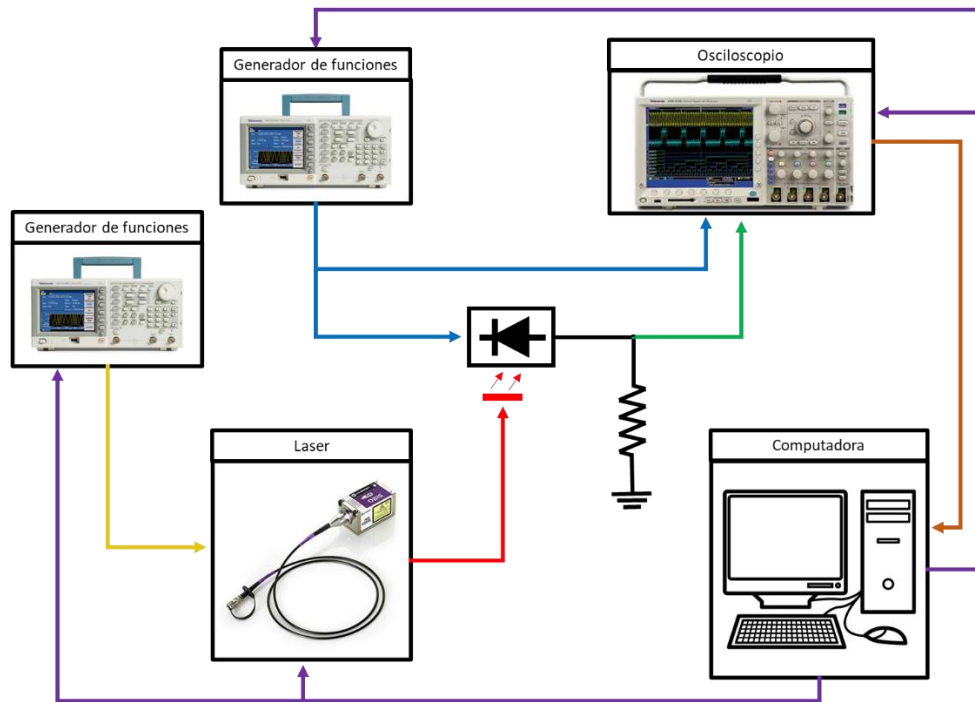


Figura 34. Diagrama de bloques, resp. transitoria y muestro

```

clc;
f = [10e3,50e3,100e3,250e3,500e3,1e6,2.5e6,5e6]; %Frecuencias a estudiar
T = [4e-5,8e-6,4e-6,2e-6,1e-6,4e-7,2e-7,1e-7]; %Base de tiempo frecuencias
T2=[200e-6,40e-6,20e-6,8e-6,4e-6,2e-6,1e-6,400e-9]; %Base tiempo para muestreo
Width=[2.1e-6,420e-9,220e-9,90e-9,50e-9,27e-9,15e-9,9.8e-9];
Offset_Gen1=[0.459,0.459,0.461,0.466,0.466,0.476,0.476,0.480];

Vbias=22e-3; %Vbias para region lineal
Vpp=156e-3; %Vpp de senoidal a muestrear
R='Infinity'; %Impedancia del generador
R=50;
SC=70e-3; %Escala del canal del osci
tig=0.1; %Trigger
Vsat=5; %Voltaje de saturacion

%====Gen de caja control del laser====Setup Gen1 con onda seno o cuadrada
set(Gen1.Waveform, 'Shape', 'Sin');
set(Gen1.Output(1), 'Impedance', 23.0);
set(Gen1.Voltage(1), 'Amplitude', 0.890);
set(Gen1.Voltage(1), 'Offset', Offset_Gen1(1));
set(Gen1.Frequency(1), 'Frequency', f(1));

%===== Setup Gen2 con señal DC
set(Gen2.Waveform, 'Shape', 'DC');
set(Gen2.Output(1), 'Impedance', R);
% set(Gen2.Output(1), 'Impedance', 'Infinity');
set(Gen2.Voltage(1), 'Offset', Vbias);

%=====Setup de laser
fprintf(LASER,'source:am:external digital');
fprintf(LASER,'source:power:level:immediate:amplitude 0.075');

```



```
%=====Encender salida
set(Gen1.Output(1), 'State', 'On');
set(Gen2.Output(1), 'State', 'On');
fprintf(LASER, 'source:am:state on');

%=====Setup de canales de osciloscopio
set(DvcOsci.Measurement(1), 'Source', 'channel1');
set(DvcOsci.Measurement(1), 'MeasurementType', 'Max');

%=====Setting de escala del canal 1
n=length(f);
%n=2;
% T=1./f2;
% T = T.*2; %cantidad de periodos deseado
% T = (T./10);
% T = timebase_fun(T);
set(DvcOsci.Acquisition(1), 'Timebase', T(1));
pause(2);
set(DvcOsci.Channel(1), 'Position', -4.5);
set(DvcOsci.Trigger(1), 'Source', 'channel1');
set(DvcOsci.Trigger(1), 'Level', tig);
pause(5);

j=1;
BaseName='tek000';

set(DvcOsci.Channel(1), 'Scale', SC);
pause(1);

% REGION LINEAL CON ANCHO DE PULSO DEL 16%
%=====
for i=1:n
    set(Gen1.Frequency(1), 'Frequency', f(i));
    set(DvcOsci.Acquisition(1), 'Timebase', T(i));
    set(Gen1.Voltage(1), 'Offset', Offset_Gen1(i));
    pause(2)
    V2 = get(DvcOsci.Measurement(1), 'Value');
    Vc2 = V2/9;
    set(DvcOsci.Channel(1), 'Scale', Vc2);
    pause(2)

    if j>9
        BaseName='tek00';
    end

    Dest1 = ['E:', BaseName, num2str(j), '.png'];
    fprintf(IntOsci, ['SAVE:IMAGE ', num2str(Dest1)] );
    pause(3);

    Dest2 = ['E:', BaseName, num2str(j), '.csv'];
    fprintf(IntOsci, ['SAVE:WAVEFORM CH1,', num2str(Dest2)] );
    pause(7);
    j=j+1;
end

% REGION LINEAL CON ANCHO DE PULSO DEL 2%
%=====
set(Gen1.Waveform, 'Shape', 'Pulse');
set(Gen1.Voltage(1), 'Amplitude', 1.2);
set(Gen1.Voltage(1), 'Offset', 0.680);
```



Desarrollo de un sistema de muestreo optoelectrónico polifásico por medio de fotodiodos, red de fibra óptica y un solo laser pulsado



```
set(Gen1.Frequency(1), 'Frequency', f(1));
pause(2);
set(DvcOsci.Channel(1), 'Scale', SC);
pause(1)
for k=1:n
    set(Gen1.Frequency(1), 'Frequency', f(k));
    set(DvcOsci.Acquisition(1), 'Timebase', T(k));
    set(Gen1.Pulse(1), 'Width', Width(k));
    pause(2)
    V2 = get(DvcOsci.Measurement(1), 'Value');
    Vc2 = V2/9;
    set(DvcOsci.Channel(1), 'Scale', Vc2);
    pause(2)

    if j>9
        BaseName='tek00';
    end

    Dest1 = ['E:',BaseName,num2str(j),'.png']
    fprintf(IntOsci,['SAVE:IMAGe ',num2str(Dest1)] );
    pause(2);

    Dest2 = ['E:',BaseName,num2str(j),'.csv']
    fprintf(IntOsci,['SAVE:WAVEFORM CH1,',num2str(Dest2)] );
    pause(7);
    j=j+1;
end
```

end

% REGION SATURACION CON ANCHO DE PULSO DEL 16%

=====

```
set(DvcOsci.Channel(1), 'Scale', SC);
pause(2)
set(Gen1.Waveform, 'Shape', 'Sin');
set(Gen1.Voltage(1), 'Amplitude', 0.890);
set(Gen1.Voltage(1), 'Offset', Offset_Gen1(1));
set(Gen1.Frequency(1), 'Frequency', f(1));
set(Gen2.Voltage(1), 'Offset', Vsat);
pause(1);
i=0;
for i=1:n
    set(Gen1.Frequency(1), 'Frequency', f(i));
    set(DvcOsci.Acquisition(1), 'Timebase', T(i));
    set(Gen1.Voltage(1), 'Offset', Offset_Gen1(i));
    pause(2)
    V2 = get(DvcOsci.Measurement(1), 'Value');
    Vc2 = V2/9;
    set(DvcOsci.Channel(1), 'Scale', Vc2);
    pause(2)

    if j>9
        BaseName='tek00';
    end

    Dest1 = ['E:',BaseName,num2str(j),'.png']
    fprintf(IntOsci,['SAVE:IMAGe ',num2str(Dest1)] );
    pause(2);

    Dest2 = ['E:',BaseName,num2str(j),'.csv']
    fprintf(IntOsci,['SAVE:WAVEFORM CH1,',num2str(Dest2)] );
    pause(7);
end
```



```
j=j+1;

end

% REGION SATURACION CON ANCHO DE PULSO DEL 2%
%=====
set(DvcOsci.Channel(1), 'Scale', SC);
set(Gen1.Waveform, 'Shape', 'Pulse');
set(Gen1.Voltage(1), 'Amplitude', 1.2);
set(Gen1.Voltage(1), 'Offset', 0.680);
set(Gen1.Frequency(1), 'Frequency', f(1));
pause(1)
k=0;
for k=1:n
    set(Gen1.Frequency(1), 'Frequency', f(k));
    set(DvcOsci.Acquisition(1), 'Timebase', T(k));
    set(Gen1.Pulse(1), 'Width', Width(k));
    pause(2)
    V2 = get(DvcOsci.Measurement(1), 'Value');
    Vc2 = V2/9;
    set(DvcOsci.Channel(1), 'Scale', Vc2);
    pause(2)

    if j>9
        BaseName='tek00';
    end

    Dest1 = ['E:',BaseName,num2str(j),'.png']
    fprintf(IntOsci,['SAVE:IMAGe ',num2str(Dest1)] );
    pause(2);

    Dest2 = ['E:',BaseName,num2str(j),'.csv']
    fprintf(IntOsci,['SAVE:WAVEFORM CH1,',num2str(Dest2)] );
    pause(7);
    j=j+1;

end

%MUESTREO
%=====
% REGION LINEAL CON ANCHO DE PULSO DEL 16%
%=====
set(Gen1.Waveform, 'Shape', 'Sin');
set(Gen1.Frequency(1), 'Frequency', f(1));
set(Gen1.Voltage(1), 'Amplitude', 0.890);
set(Gen1.Voltage(1), 'Offset', Offset_Gen1(1));

set(DvcOsci.Acquisition(1), 'Timebase', T2(1));

set(Gen2.Voltage(1), 'Offset', Vbias);
set(Gen2.Waveform, 'Shape', 'sin');
set(Gen2.Frequency(1), 'Frequency', 10e3);
set(Gen2.Voltage(1), 'Amplitude', Vpp);
pause(2)

set(DvcOsci.Channel(1), 'Scale', (SC/2));
pause(1);
V2 = get(DvcOsci.Measurement(1), 'Value');
Vc2 = V2/7;
set(DvcOsci.Channel(1), 'Scale', Vc2);
i=0;
```



```
k=0;
BaseName='M-tek000';
j=1;
for i=1:n
    set(Gen1.Frequency(1), 'Frequency', f(i));
    set(Gen1.Voltage(1), 'Offset', Offset_Gen1(i));
    F2=f(i)/10;
    set(Gen2.Frequency(1), 'Frequency', F2);
    set(DvcOsci.Acquisition(1), 'Timebase', T2(i));
    pause(3)
    set(DvcOsci.Acquisition(1), 'Control', 'single');

    if j>9
        BaseName='M-tek00';
    end

    Dest1 = ['E:',BaseName,num2str(j),'.png']
    fprintf(IntOsci,['SAVE:IMAGe ',num2str(Dest1)] );
    pause(2);

    Dest2 = ['E:',BaseName,num2str(j),'.csv']
    fprintf(IntOsci,['SAVE:WAVEFORM CH1,',num2str(Dest2)] );
    pause(7);
    j=j+1;
    set(DvcOsci.Acquisition(1), 'Control', 'run-stop');
    set(DvcOsci.Acquisition(1), 'State', 'run');

end
```

```
% REGION LINEAL CON ANCHO DE PULSO DEL 2%
%=====
set(Gen1.Waveform, 'Shape', 'Pulse');
set(Gen1.Voltage(1), 'Amplitude', 1.2);
set(Gen1.Voltage(1), 'Offset', 0.680);
set(Gen1.Frequency(1), 'Frequency', f(1));

set(DvcOsci.Acquisition(1), 'Timebase', T2(1));
set(DvcOsci.Channel(1), 'Scale', (SC/2));
pause(1)
V2 = get(DvcOsci.Measurement(1), 'Value');
Vc2 = V2/7;
set(DvcOsci.Channel(1), 'Scale', Vc2);
pause(1)
for k=1:n
    set(Gen1.Frequency(1), 'Frequency', f(k));
    set(DvcOsci.Acquisition(1), 'Timebase', T2(k));
    set(Gen1.Pulse(1), 'Width', Width(k));
    pause(2)
    F2=f(k)/10;
    set(Gen2.Frequency(1), 'Frequency', F2);
    pause(2)
    set(DvcOsci.Acquisition(1), 'Control', 'single');

    if j>9
        BaseName='M-tek00';
    end

    Dest1 = ['E:',BaseName,num2str(j),'.png']
    fprintf(IntOsci,['SAVE:IMAGe ',num2str(Dest1)] );
    pause(2);
```



```
Dest2 = ['E:',BaseName,num2str(j),'.csv'];
fprintf(IntOsci,['SAVE:WAVEFORM CH1,',num2str(Dest2)] );
pause(7);
j=j+1;
set(DvcOsci.Acquisition(1), 'Control', 'run-stop');
set(DvcOsci.Acquisition(1), 'State', 'run');

end

%=====apagar salida del generador
set(Gen1.Output(1), 'State', 'Off');
set(Gen2.Output(1), 'State', 'off');
fprintf(LASER,'source:am:state off');

clearvars -except DvcOsci Gen1 Gen2 IntOsci LASER
```

3.3 Respuesta transitoria

Ya que los fotodiodos se utilizarán en un circuito de conmutación y este será activado por un tren de pulsos ópticos a altas frecuencias, se debe analizar el comportamiento del fotodiodo bajo diferentes configuraciones de potencia óptica y carga RL, para así conocer cómo será la respuesta del fotodiodo además de analizar el comportamiento de la amplitud y tiempos de subida y baja de la respuesta del fotodiodo, así como el ciclo de trabajo generado por la respuesta. Los datos más importantes que se deben analizar son los tiempos de subida y baja ya que esos tiempos definirán si un fotodiodo sea viable para usar en el circuito conmutador además los tiempos de subida y baja pueden provocar que el ancho del pulso de la respuesta del fotodiodo sea muy diferente al ancho del pulso óptico. Es por ese motivo que se debe analizar la respuesta transitoria de los diferentes fotodiodos y así poder encontrar los límites de cada uno de ellos.



Fotodiodo	RL (Ohms)	Potencia Óptica (mW)	Vbias (mV)
FDS02	50	25	-26
	100	50	461
QPDI-40	50	50	-95
OE Market	50	25	3,200

Tabla 2. Configuraciones para la respuesta transitoria

En la tabla 2 podemos encontrar las configuraciones de carga RL, potencia óptica y V_{bias} , Recordemos que el punto de operación fue obtenido mediante las curvas características y el programa de punto de operación. Por el momento solo nos centraremos en el análisis de la respuesta transitoria del fotodiodo. el objetivo de estas pruebas es conocer el comportamiento del fotodiodo conforme se aumenta la frecuencia.

Los datos que serán medidos son el voltaje pico a pico de la señal generada por el fotodiodo, los tiempos de subida y baja de dicha señal, así como el ciclo de trabajo generado por dicha señal.

Cuando se menciona que se está utilizando una carga RL de 50 Ω , estas mediciones son realizadas utilizando solo la carga interna generada del canal del osciloscopio (50 Ω), debido a que sabemos que la respuesta más rápida se obtiene bajo esta configuración ya que no se conecta ningún resistor en serie en serie del circuito.

Para poder doblar la frecuencia, lo cual se explicará más adelante, es necesario el análisis de la respuesta transitoria con diferentes ciclos de trabajo del 16% y 2%, ya que necesitamos que el tren de pulsos generado por el fotodiodo tenga un ancho de pulsos muy pequeño, lo ideal sería que la respuesta sea lo más parecida al tren de pulsos ópticos. A continuación, se mostrarán los resultados obtenidos.



3.3.1 Fotodiodo Thorlabs FDS02

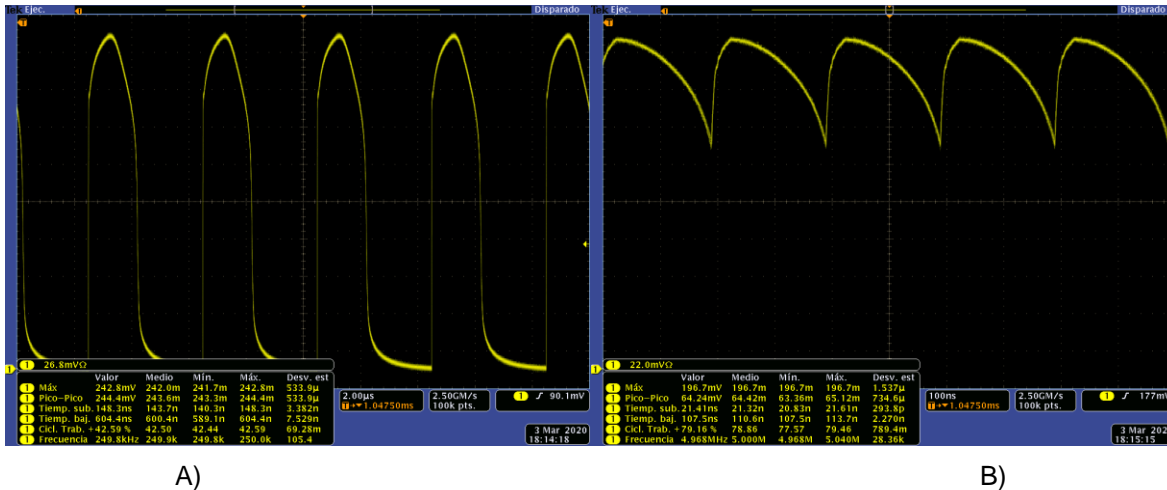
3.3.1.1 Carga RL de 50 Ω y ciclo de trabajo del 16%

En tabla 3 se presentan los tiempos de subida y bajada, así como la amplitud de la respuesta del fotodiodo, con V_{bias} de -26 mV, este V_{bias} fue seleccionado en base al programa que analiza las curvas y encuentra el V_{bias} que corresponde al V_d seleccionado en base a la curva característica.

Como se observa en tabla 3, los tiempos de subida y bajada en la región lineal son relativamente altos, se observa que los tiempos de subida son mucho más rápidos que los tiempos de bajada. Como se observa, los tiempos de bajada disminuyen conforme se aumenta la frecuencia, pero no disminuyen lo suficientemente rápido, si los comparamos con los tiempos de subida, vemos que son muy lentos. En los tiempos de bajada podemos ver una clara tendencia a generar una caída exponencial provocada por la lenta descarga del fotodiodo, esto provoca que en algún momento la bajada sea tan lenta que no alcance su punto mínimo, entonces como el pulso no llego al punto mínimo inmediatamente detecta el siguiente pulso, debido a que la señal óptica es mucho más rápida provocando lo que se ve en la Figura 35B.

RL=50 Ohms, P=25 mW, Ciclo 16%						
FEQ	Lineal (-26mV)			Saturacion (5V)		
	Ts (ns)	Tb (ns)	Amp (mV)	Ts (ns)	Tb (ns)	Amp (V)
10 KHz	247	877.5	251.4	21.25	12.76	1.22
50 KHz	226.6	832.3	253.5	19.35	10.89	1.24
100 KHz	219.1	774.7	253.5	19.19	10.96	1.24
250 KHz	148.3	604.4	244.4	19.61	10.67	1.24
500 KHz	86.31	423.7	229.8	19.87	10.61	1.23
1 MHz	35.92	274.7	212.5	20.12	10.85	1.23
2.5 MHz	10.76	150.7	174.2	19.94	11.31	1.23
5 MHz	31.41	107.5	64.24	20.06	12.13	1.21

Tabla 3. (FDS02) Tiempos de subida y baja, ciclo de 16% y RL = 50 Ω.



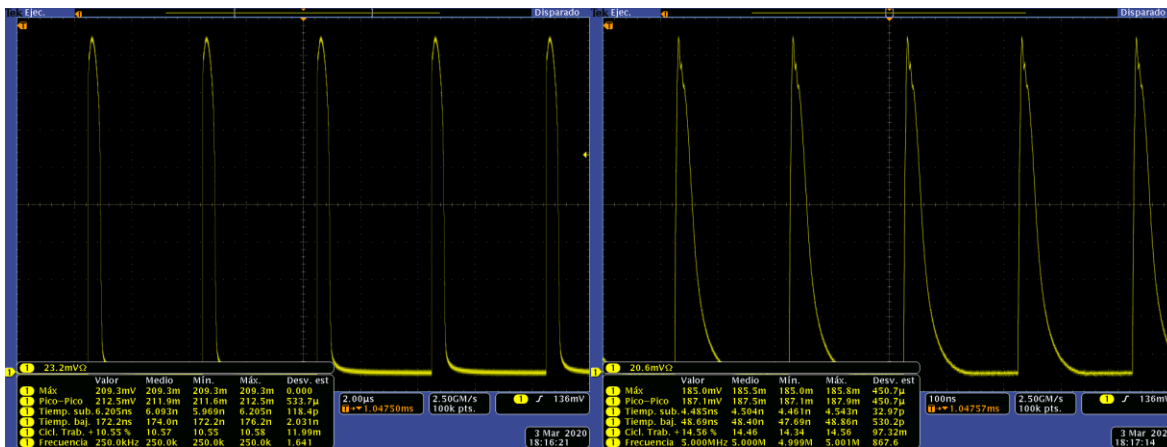
A) B)
 Figura 35. Resp. Transitoria (FDS02), $R_L = 50 \Omega$, ciclo 16% A) $F_{eq} = 250 \text{ KHz}$ y B) $F_{eq} = 5 \text{ MHz}$

3.3.1.2 Carga R_L de 50Ω y ciclo de trabajo del 2%

En tabla 4 se presentan los tiempos de subida y bajada bajo la misma configuración que el caso anterior, pero con la única diferencia es que, el ciclo de trabajo del tren de pulsos ópticos es más pequeño específicamente del 2%. Es evidente que, si los comparamos con el caso de ciclo de 16%, vemos que los tiempo de subida y bajada son mucho más rápidos y eso es justo lo que se está buscando, los tiempo de subida siguen siendo muy rápidos igual que en el caso de 16% pero la diferencia más grande está en los tiempo de baja en la región lineal, siguen la misma tendencia de ser más rápidos conforme se aumenta la frecuencias además de tener el mismo comportamiento exponencial en la bajada (Figura 36B) pero aun así la bajada es mucho más rápida que en el caso de 16%, vemos que en altas frecuencias los tiempo son el doble de rápido y además la respuesta tiene un ciclo de trabajo bastante delgado comparado con el caso anterior, tener una respuesta de este tipo permitiría doblar la frecuencia sin problemas.

RL=50 Ohms, P=25 mW, Ciclo 2%						
FEQ	Lineal (-26mV)			Saturacion (5V)		
	Ts (ns)	Tb (ns)	Amp (mV)	Ts (ns)	Tb (ns)	Amp (V)
10 KHz	250.4	871.9	250.4	20.76	11.96	1.24
50 KHz	113.7	535.8	237.4	19.2	10.4	1.24
100 KHz	61.46	376.5	229	20.18	11.38	1.24
250 KHz	6.205	172.2	212.5	20.47	11.35	1.23
500 KHz	5.209	119.9	201.6	21	11.19	1.23
1 MHz	5.408	107	200.6	15.77	11.49	1.13
2.5 MHz	5.185	73.7	198	8.291	10.33	0.894
5 MHz	4.485	48.69	187.1	4.03	8.917	0.697

Tabla 4. (FDS02) Tiempos de subida y baja, ciclo de 2% y RL = 50 Ω.



A)

B)

Figura 36. Resp. Transitoria (FDS02), RL = 50 Ω, ciclo 2% A) Feq = 250 KHz y B) Feq = 5 MHz

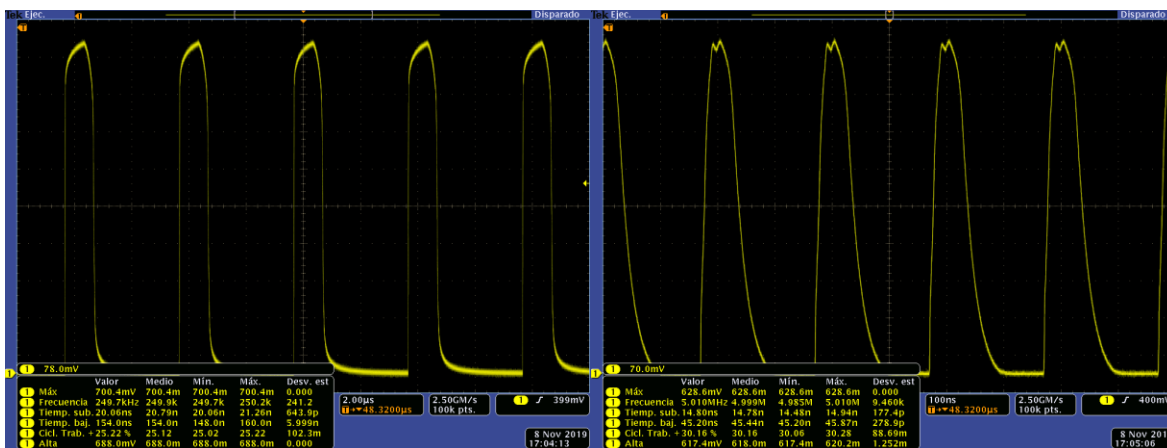
3.3.1.3 Carga RL de 100 Ω y ciclo de trabajo del 16%

Los tiempos de subida y bajada que se encuentran en la tabla 5, se obtuvieron con una carga RL en serie con el fotodiodo, sabemos que al incrementar la carga RL tiene una ventaja y una desventaja, la ventaja es que la amplitud de la respuesta se duplicará y por consecuencia la región lineal será mucho más grande, pero la desventaja es que debido a la carga RL los tiempos de subida y bajada aumentarán, el tiempo de baja será el más

afectado debido a la carga RL. La intención de probar esta configuración es que, con una potencia óptica baja podemos obtener una amplitud buena con la que se pueda trabajar a pesar de la baja potencia óptica. En la tabla 5 podemos ver que la amplitud de la respuesta se duplicó, además vemos en la Figura 37B que, a pesar de tener una frecuencia de 5 MHz, se cuenta un tren de pulsos bien definidos, debido a la carga RL el tiempo de bajada es lento y por esa razón la bajada tiene ese comportamiento exponencial, cabe mencionar que, con este comportamiento, es evidente que no podrá soportar frecuencias más altas.

RL=100 Ohms, P=50 mW, Ciclo 16%						
FEQ	Lineal (461mV)			Saturacion (5V)		
	Ts (ns)	Tb (ns)	Amp (mV)	Ts (ns)	Tb (ns)	Amp (V)
10 KHz	54.64	311.6	711.3	21.37	15.21	1.23
50 KHz	51.27	285.7	715.7	20.21	14.2	1.23
100 KHz	35.03	241.1	712.6	20.23	14.03	1.23
250 KHz	20.06	154	700.4	20.31	14.19	1.24
500 KHz	18.63	104	687	20.24	14.5	1.24
1 MHz	17.98	79.66	666	20.7	14.65	1.23
2.5 MHz	16.43	58.72	646.5	19.62	16.77	1.23
5 MHz	14.8	45.2	628.6	18.84	15.74	1.2

Tabla 5. (FDS02) Tiempos de subida y baja, ciclo de 16% y RL = 100 Ω.



A)

B)

Figura 37. Resp. Transitoria (FDS02), RL = 100 Ω, ciclo 16% A) Feq = 250 KHz y B) Feq = 5 MHz



3.3.2 Fotodiodo QPhotonics QPDI-40

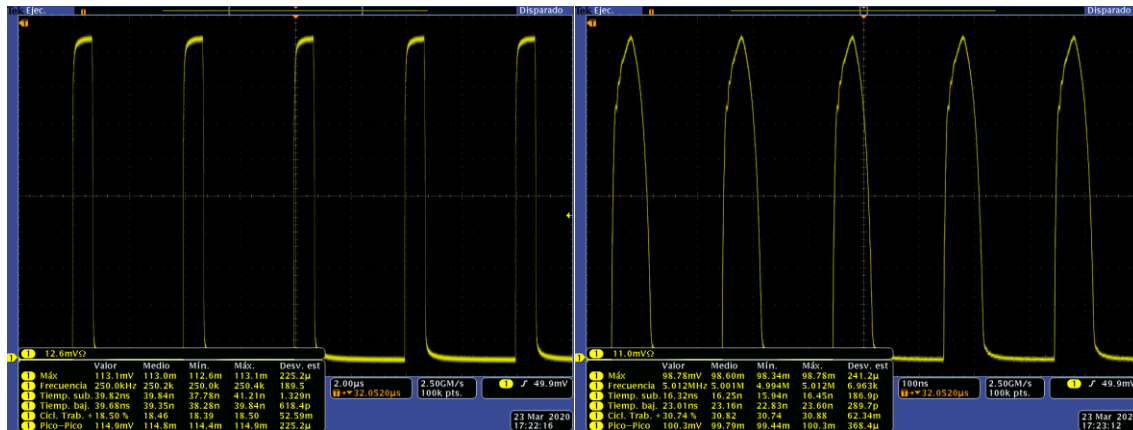
3.3.2.1 Carga RL de 50 Ω y ciclo de trabajo del 16%

Una vez que el fotodiodo fue caracterizado y se encontró que el punto de operación es un V_{bias} de -95 mV, este es un dato entregado por el programa analizado en el capítulo 2, con este voltaje nos aseguramos que el fotodiodo trabaje en la región lineal, se cuenta con una carga RL de 50 Ω , potencia óptica de 50 mW y un tren de pulsos con un ciclo de trabajo del 16%.

Como se sabe con una carga RL de 50 Ω se obtiene la respuesta más rápido del fotodiodo pero debido a la resposividad de este fotodiodo, tendremos amplitud pequeña en la respuesta del fotodiodo, como se puede ver en la tabla 6, vemos que la amplitud de la respuesta es de aproximadamente de 110 mV en promedio, cuando con el fotodiodo FDS02 con la mitad de potencia óptica teníamos 250 mV, tenemos una diferencia de voltaje del doble, pero como se mencionó esto es debido a la responsividad, que para este fotodiodo está centrada en 1550 nm. Aun así, se puede apreciar a simple vista que este fotodiodo es 4 o 5 veces más rápido que el FDS02, para el QPDI-40 los tiempos de bajada son en promedio 36 ns pero en el FDS02 son en promedio 505 ns, como se ve en la Figura 38B, donde cuenta con una frecuencia de 5 MHz, podemos apreciar pulsos muy bien definidos sin mencionar que tenemos unos pulsos delgados.

RL=50 Ohms, P=50 mW, Ciclo 16%						
FEQ	Lineal (-95mV)			Saturacion (5V)		
	Ts (ns)	Tb (ns)	Amp (mV)	Ts (ns)	Tb (ns)	Amp (mV)
10 KHz	38.57	43.07	112.5	7.806	4.808	211.7
50 KHz	40.05	43.03	112.9	6.74	2.241	213.2
100 KHz	39.9	41.04	113.1	6.549	2.159	213.7
250 KHz	39.82	39.68	113.1	6.67	2.166	213.7
500 KHz	35.93	36.08	112.3	6.375	2.187	213.8
1 MHz	34.11	34.07	110.9	6.126	2.205	212.9
2.5 MHz	26.21	28.86	106.4	5.687	2.253	212.9
5 MHz	16.32	23.01	98.78	5.688	2.402	212.9

Tabla 6. (QPDI-40) Tiempos de subida y baja, ciclo de 16% y 50 Ω .



A)

B)

Figura 38. Resp. Transitoria (QPDI-40), RL = 50 Ω , ciclo 16% A) Feq = 250 KHz y B) Feq = 5 MHz.

3.3.2.2 Carga RL de 50 Ω y ciclo de trabajo del 2%

Para este caso el fotodiodo fue probado bajo la misma configuración de potencia óptica, carga RL y punto de operación, la única diferencia es que se cambió el ciclo de trabajo del tren de pulsos ópticos, para este caso, se usó un ciclo del 2% para así poder ver las diferencias entre ambos casos, sin mencionar que, debido a la aplicación de este proyecto, entre más delgados sean los pulsos será mucho mejor.



Si comparamos los tiempos de bajada de la tabla 6 y 7 podemos ver que para este caso la respuesta del fotodiodo es mucho más rápida que en el caso anterior pero tenemos una pequeña desventaja y es que debido al ancho del pulso, conforme aumenta la frecuencia, se pierde un poco más de amplitud, en la tabla 7 podemos ver como decae rápidamente la amplitud de la respuesta, esto es en parte por la responsividad del fotodiodo pero también en parte al laser, ya que el láser no está diseñado para generar pulsos tan delgados pero vemos en la Figura 39 que la respuesta tiene pulsos muy delgados, el tren de pulsos ópticos tiene un ciclo de trabajo del 2% y la respuesta tiene una ciclo del 7% vemos que si hay una diferencia pero aun así es posible doblar la frecuencia.

RL=50 Ohms, P=50 mW, Ciclo 2%						
FEQ	Lineal (-95mV)			Saturacion (5V)		
	Ts (ns)	Tb (ns)	Amp (mV)	Ts (ns)	Tb (ns)	Amp (mV)
10 KHz	41.71	42.38	112.6	7.695	4.426	213
50 KHz	39.6	40.73	112	6.714	2.683	213.7
100 KHz	39	36.48	111.4	7.389	2.503	214.6
250 KHz	39.62	31.44	107.8	7.271	2.545	215.6
500 KHz	22.64	26.47	102.4	6.482	2.558	213.7
1 MHz	12.12	20.97	93.32	6.04	2.535	210
2.5 MHz	6.293	15.09	84.46	5.24	2.357	204.8
5 MHz	4.699	12.21	76.09	3.185	2.292	185

Tabla 7. (QPDI-40) Tiempos de subida y baja, ciclo de 2% y RL = 50 Ω.

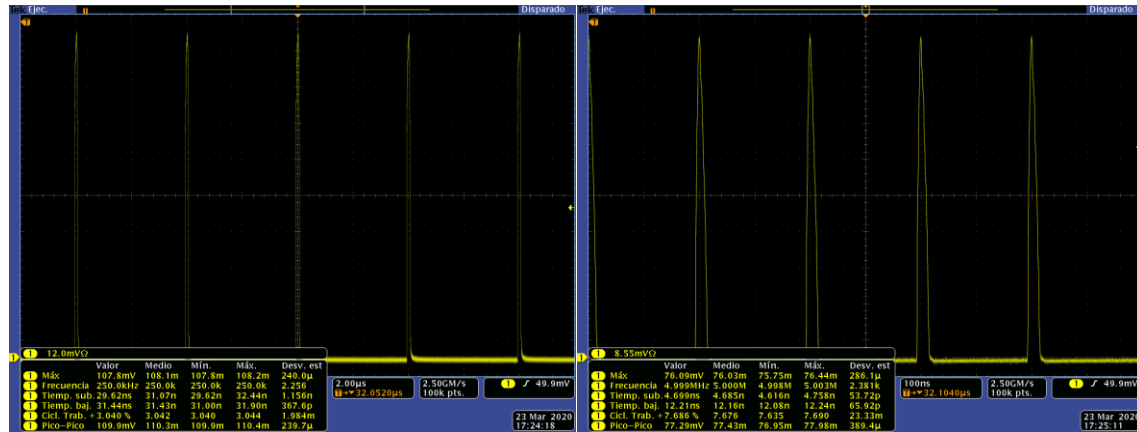


Figura 39. Resp. Transitoria (QPDI-40), $R_L = 50 \Omega$, ciclo 2% A) $F_{eq} = 250 \text{ KHz}$ y B) $F_{eq} = 5 \text{ MHz}$.

3.3.3 Fotodiodo OE Market PD-850

3.3.3.1 Carga R_L de 50Ω y ciclo de trabajo del 16%

Este fotodiodo se probó bajo la configuración de una carga R_L de 50Ω , una potencia óptica de 25 mW, tren de pulsos con ciclo de trabajo del 16% y con un punto de operación de 3.2 V, como se ve en la tabla 8, los tiempo de subida y bajada son mucho más rápidos que los otros fotodiodos, también vemos en la Figura 40, que a pesar del incremento de la frecuencia, el ancho y forma del pulso permanece casi igual que al tren de pulsos ópticos y es justo lo que se necesita, que el ancho del pulso de la respuesta del fotodiodo sea lo más similar posible al pulso óptico, sin mencionar que la amplitud de la respuesta del fotodiodo es bastante buena en comparación al QPDI-40, lo que significa que si se mantiene este comportamiento, es posible llevar a este fotodiodo a trabajar con frecuencias mucho más altas.

RL=50 Ohms, P=25 mW, Ciclo 16%						
FEQ	Lineal (3.2V)			Saturacion (5V)		
	Ts (ns)	Tb (ns)	Amp (mV)	Ts (ns)	Tb (ns)	Amp (Vm)
10 KHz	5.692	5.883	264.9	8.995	5.496	373.5
50 KHz	1.745	3.99	265.1	6.796	1.888	371.6
100 KHz	1.683	4.13	262.1	6.859	1.751	371.8
250 KHz	1.73	4.003	255	6.961	1.703	370.1
500 KHz	1.729	3.835	253	6.916	1.609	369.8
1 MHz	1.823	3.87	248.2	6.983	1.76	369.6
2.5 MHz	1.88	3.811	246.1	5.171	1.78	366.4
5 MHz	1.988	3.982	245	5.166	1.649	366.2

Tabla 8. (PD-850) Tiempos de subida y baja, ciclo de 16% y RL = 50 Ω.

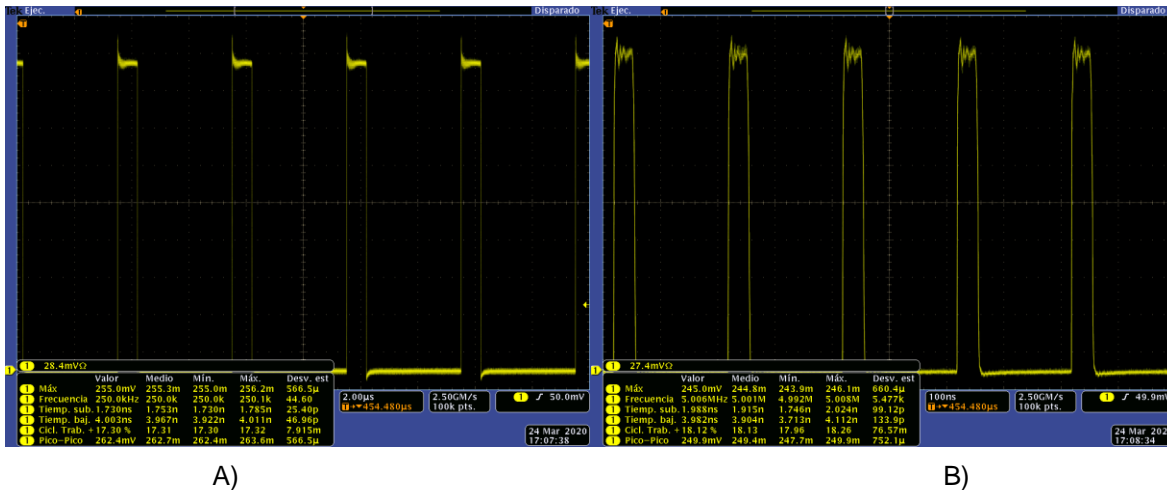


Figura 40. Resp. Transitoria (PD-850), RL = 50 Ω, ciclo 16% A) Feq = 250 KHz y B) Feq = 5 MHz

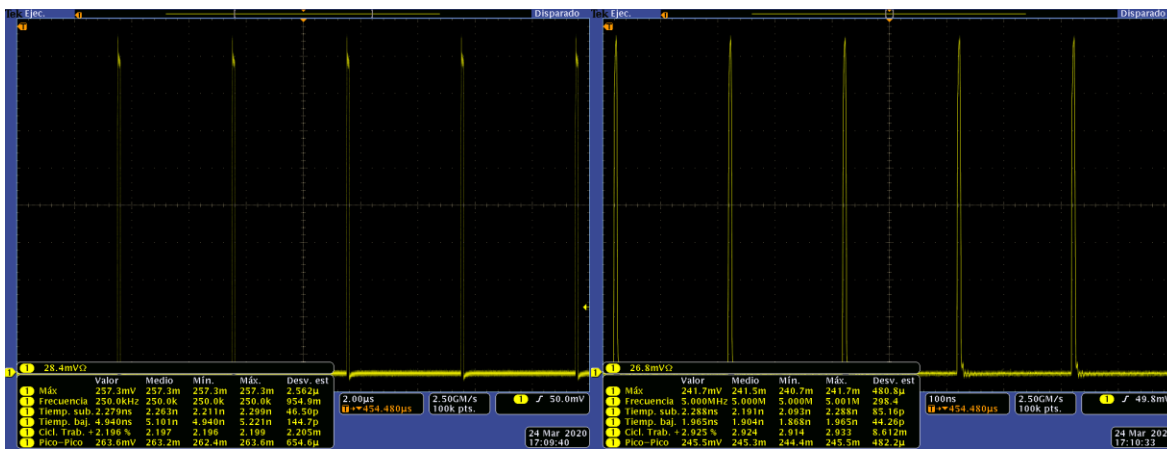
3.3.3.2 Carga RL de 50 Ω y ciclo de trabajo del 2%

En este caso se probó bajo misma configuración pero con la pequeña diferencia que el tren de pulsos ópticos tiene un ciclo de trabajo del 2%, como se ve en la tabla 9, los tiempo de subida y bajada se mantienen muy rápidos y también se mantiene la amplitud de la respuesta del fotodiodo, también esto lo podemos ver en la Figura 41, independientemente de la frecuencia que se utilice, el ancho de los pulsos de la repuesta del fotodiodo

permanecen muy delgados y muy parecidos al pulso óptico, también se puede ver en la Figura 41B, que el ancho de la respuesta es de aproximadamente 2.9% cuando el pulso óptico tiene un ciclo del 2%.

RL=50 Ohms, P=25 mW, Ciclo 2%						
FEQ	Lineal (3.2V)			Saturacion (5V)		
	Ts (ns)	Tb (ns)	Amp (mV)	Ts (ns)	Tb (ns)	Amp (Vm)
10 KHz	5.061	803.1	261.6	10.64	6.745	372.9
50 KHz	2.301	285.9	264.6	7.566	2.245	373.4
100 KHz	2.27	5.84	261	7.424	2.045	371.8
250 KHz	2.279	4.94	257.3	7.402	1.944	371.8
500 KHz	2.196	4.69	253.7	7.498	1.959	373.3
1 MHz	2.238	4.303	251.9	6.927	1.618	362.6
2.5 MHz	2.247	3.216	246.7	4.854	1.463	344.8
5 MHz	2.288	1.965	241.7	2.388	1.508	303.5

Tabla 9. (PD-850) Tiempos de subida y baja, ciclo de 2% y RL = 50 Ω.



A)

B)

Figura 41. Resp. Transitoria (PD-850), RL = 50 Ω, ciclo 2% A) Feq = 250 KHz y B) Feq = 5 MHz



3.4 Muestreo de señales

En el procesamiento de señales, el muestreo es la conversión de una señal de tiempo continuo a una señal de tiempo discreto. Un ejemplo común es la conversión de una onda de sonido (una señal continua) en una secuencia de muestras (una señal de tiempo discreto). Una muestra es un valor o conjunto de valores en un punto en el tiempo y / o espacio. Un muestreador es un subsistema u operación que extrae muestras de una señal continua.

Ya que se pretende utilizar fotodiodos para realizar la conmutación de señales a altas frecuencias, la frecuencia de muestreo será entregada por el láser ya que con esta señal activaremos el fotodiodo lo que permitirá o no el paso de la señal analógica, además al utilizar un muestreo activado fónicamente contamos con la ventaja como ya se mencionó que se puede doblar la frecuencia de la señal del láser utilizando elementos pasivos como fibra óptica y divisores ópticos pero también tiene la ventaja que la desviación estándar en el tren de pulsos generados por el láser es muy pequeña lo que significa que la calidad del muestreo será alta.

Es por este motivo que se debe analizar el comportamiento de los fotodiodos seleccionados para así poder conocer los límites de cada uno de ellos además también de conocer como responderán los fotodiodos con señales analógicas de diferentes frecuencias.

Con el análisis de la respuesta transitoria conocemos como es la respuesta de los fotodiodos trabajando en un punto determinado de V_{bias} pero muestrear una señal analógica significa que ese punto de operación estará variando y de esta manera se podrá conocer cómo responde el fotodiodo bajo estas condiciones y también se podrá ver cómo es la respuesta en base a la frecuencia.



3.4.1 Fotodiodo Thorlabs FDS02

3.4.1.1 Carga RL de 50 Ω y ciclo de trabajo del 16%

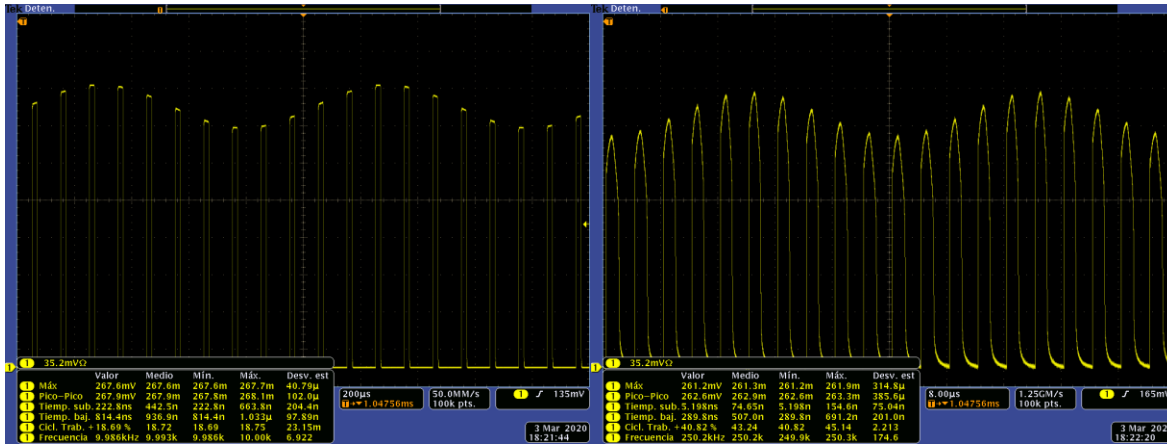
El primer caso para estudiar será con una configuración de carga RL de 50 Ω , cabe mencionar que esta carga es la generada por el canal del osciloscopio, se utiliza una potencia óptica de 50 mW. se estará muestreando una señal senoidal con un $V_{bias} = -26\text{ mV}$ y un $V_{pp} = 65\text{ mV}$ la cual contará con diferentes frecuencias. Para este caso y los siguientes se utiliza una frecuencia que nos permita muestrear a 10 pulsos por ciclo de la señal senoidal, esto con la intención de poder observar la señal de una manera más detallada, así como la forma de los pulsos.

En la Figura 42A se está utilizando una tasa de repetición de 10 KHz con ciclo de trabajo del 16% y se está muestreando una señal analógica con una frecuencia de 1 KHz y podemos ver que se tiene un muestreo muy bien definido y de buena calidad, claro esto es debido a las bajas frecuencias, también vemos pulsos cuadrados y un comportamiento senoidal perfecto.

En el caso de la Figura 42B se está utilizando una tasa de repetición de 250 KHz con ciclo de trabajo del 16% y se está muestreando una señal analógica con una frecuencia de 25 KHz y vemos que el muestreo es bueno, pero ya se comienza a notar que la frecuencia de muestreo le afecta a la respuesta del fotodiodo aun así se puede observar un comportamiento senoidal bien definido de la señal pero el ancho de los pulsos cambió y vemos una pequeña deformación en el punto máximo de los pulsos.

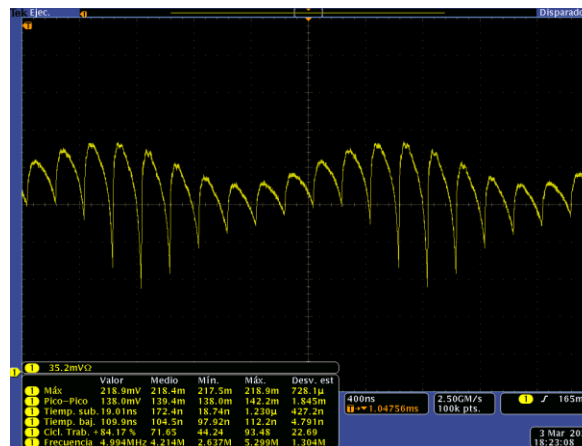
En la Figura 42C se está utilizando una tasa de repetición de 5 MHz con ciclo de trabajo del 16% y se está muestreando una señal analógica con una frecuencia de 500 KHz, definitivamente vemos que la respuesta del fotodiodo es muy lenta y la señal de

respuesta está totalmente deformada, no fue lo suficientemente rápido el fotodiodo como para seguir teniendo pulsos.



A)

B)



C)

Figura 42. FDS02, RL = 50 Ω, muestreo a A) Freq = 10 KHz, B) Freq = 250 KHz y C) Freq = 5 MHz con ciclo 16%.



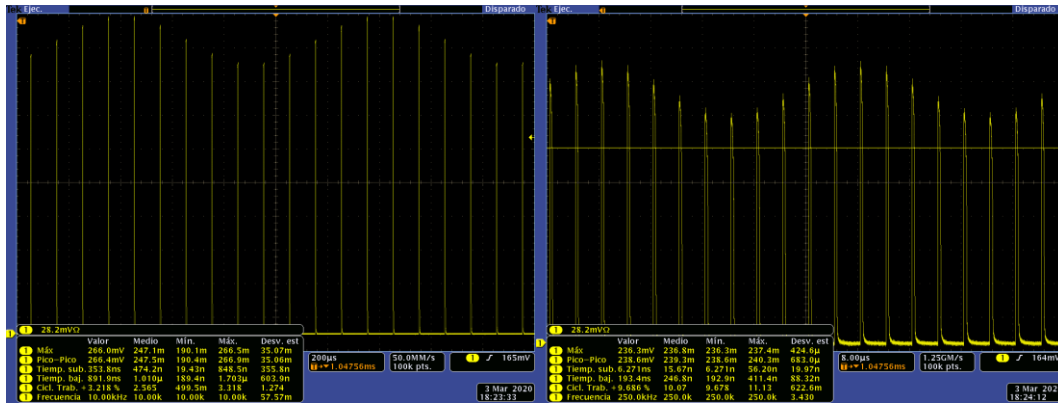
3.4.1.2 Carga RL de 50 Ω y ciclo de trabajo del 2%

En esta configuración se utiliza carga RL de 50 Ω , cabe mencionar que esta carga es la generada por el canal del osciloscopio, se utiliza una potencia óptica de 50 mW, se estará muestreando una señal senoidal con un $V_{bias} = -26\text{ mV}$ y un $V_{pp} = 65\text{ mV}$ la cual contará con diferentes frecuencias.

Figura 43A se está utilizando una tasa de repetición de 10 KHz con ciclo de trabajo del 2% y se está muestreando una señal analógica con una frecuencia de 1 KHz y podemos ver que se tiene un muestreo muy bien definido y de buena calidad, se cuentan con pulsos muy delgados y con una buena amplitud, pero lo más importante que se cuenta con un comportamiento senoidal perfectamente definido.

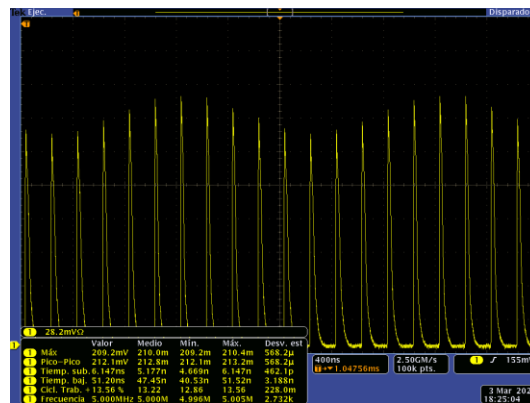
Figura 43B se está utilizando una tasa de repetición de 250 KHz con ciclo de trabajo del 2% y se está muestreando una señal analógica con una frecuencia de 25 KHz, como ya se sabía del caso anterior el muestreo con este fotodiodo es muy bueno, pero se observa que mejoró mucho utilizando un ciclo de trabajo mucho más pequeño.

Figura 43C se está utilizando una tasa de repetición de 5 MHz con ciclo de trabajo del 2% y se está muestreando una señal analógica con una frecuencia de 500 KHz. Si comparamos con la Figura 42C vemos una gran diferencia, en este caso vemos un muestreo muy bueno y bien definido, se cuenta con pulsos delgados y esto fue provocado solo con cambiar el ciclo de trabajo.



A)

B)



C)

Figura 43. FDS02, RL = 50 Ω, muestro a A) Feq = 10 KHz, B) Feq = 250 KHz y C) Feq = 5 MHz

con ciclo 2%.



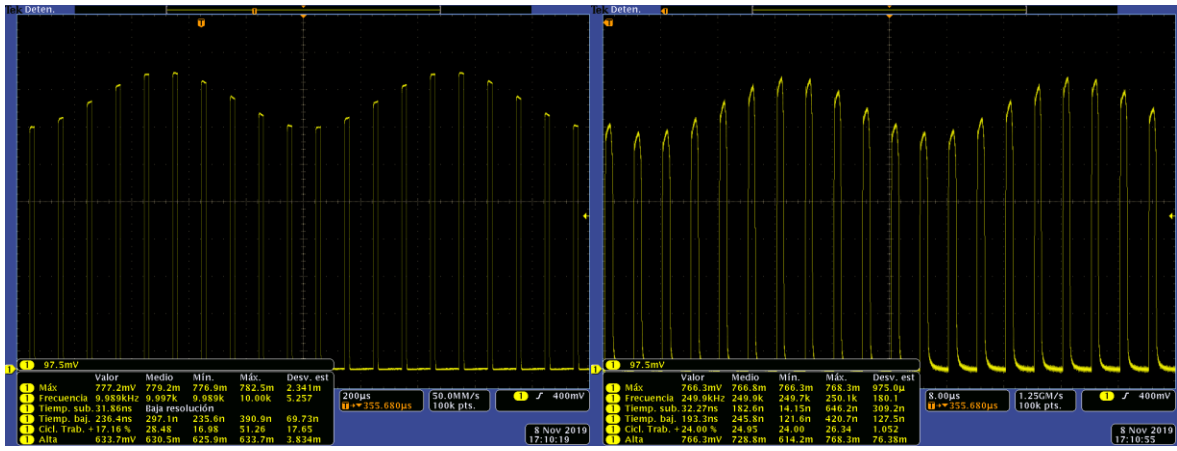
3.4.1.3 Carga RL de 100 Ω y ciclo de trabajo del 16%

Para este caso se utiliza una configuración de carga RL de 100 Ω , una potencia óptica de 50 mW, se estará muestreando una señal senoidal con un $V_{bias} = 461\text{ mV}$ y un $V_{PP} = 219\text{ mV}$ la cual contará con diferentes frecuencias.

Figura 44A se está utilizando una tasa de repetición de 10 KHz con ciclo de trabajo del 16% y se está muestreando una señal analógica con una frecuencia de 1 KHz, se puede ver que a bajas frecuencias contamos un muestreo excelente y la ventaja es que la amplitud de la respuesta aproximadamente es el doble que en el caso con carga RL de 50 Ω .

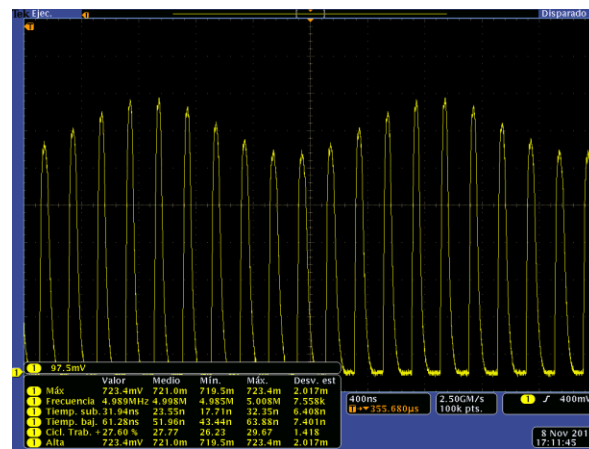
Figura 44B se está utilizando una tasa de repetición de 250 KHz con ciclo de trabajo del 16% y se está muestreando una señal analógica con una frecuencia de 25 KHz, se puede ver que el muestreo sigue siendo excelente, pero se puede notar en la bajada de los pulsos que la frecuencia le comienza a afectar.

Figura 44C se está utilizando una tasa de repetición de 5 MHz con ciclo de trabajo del 16% y se está muestreando una señal analógica con una frecuencia de 500 KHz y vemos un buen muestreo y bien definido pero los pulsos ya no son lo suficientemente rápidos ya que el ancho de los pulsos cambió y esto no permitiría doblar la frecuencia, esto se esperaba debido al incremento en la carga RL.



A)

B)



C)

Figura 44. FDS02, $R_L = 100 \Omega$, muestro a A) $F_{eq} = 10 \text{ KHz}$, B) $F_{eq} = 250 \text{ KHz}$ y C) $F_{eq} = 5 \text{ MHz}$ con ciclo 16%.



3.4.2 Fotodiodo QPhotonics QPDI-40

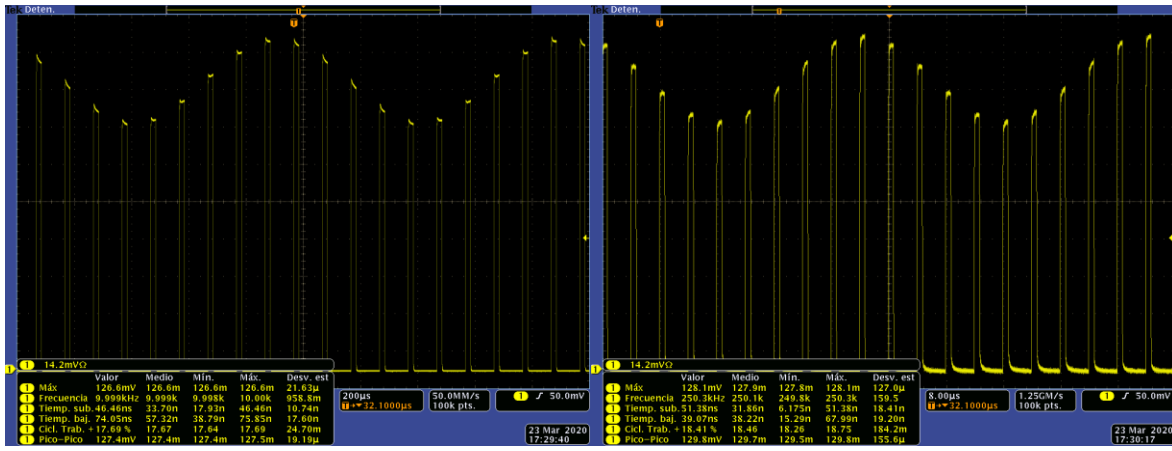
3.4.2.1 Carga RL de 50 Ω y ciclo de trabajo del 16%

Para este muestreo se utiliza una configuración de carga RL de 50 Ω , una potencia óptica de 50 mW. se estará muestreando una señal senoidal con un $V_{bias} = -95\text{ mV}$ y un $V_{PP} = 60\text{ mV}$ la cual contará con diferentes frecuencias.

Figura 45A se está utilizando una tasa de repetición de 10 KHz con ciclo de trabajo del 16% y se está muestreando una señal analógica con una frecuencia de 1 KHz y se puede ver como en los casos anteriores el muestreo es excelente debido a las bajas frecuencias.

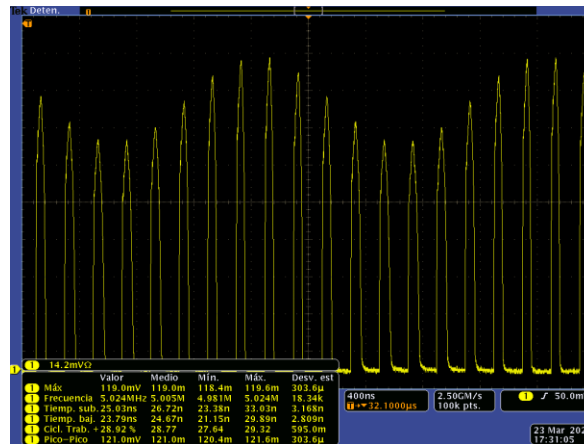
Figura 45B se está utilizando una tasa de repetición de 250 KHz con ciclo de trabajo del 16% y se está muestreando una señal analógica con una frecuencia de 25 KHz, vemos que la frecuencia no le ha afectado al fotodiodo y realiza un muestreo excelente, esto era lo que se esperaba ya que la respuesta transitoria es muy rápida.

Figura 45C se está utilizando una tasa de repetición de 5 MHz con ciclo de trabajo del 16% y se está muestreando una señal analógica con una frecuencia de 500 KHz y vemos que realiza un muestreo excelente a pesar de la frecuencia, pero vemos que los pulsos cambiaron un poco de forma, así como en el ancho, pero sigue siendo suficiente para doblar la frecuencia.



A)

B)



C)

Figura 45. QPDI-40, $R_L = 50 \Omega$, muestro a A) $F_{eq} = 10 \text{ KHz}$, B) $F_{eq} = 250 \text{ KHz}$ y C) $F_{eq} = 5 \text{ MHz}$ con ciclo 16%.



3.4.2.2 Carga RL de 50 Ω y ciclo de trabajo del 2%

Para este muestreo se utiliza una configuración de carga RL de 50 Ω , una potencia óptica de 50 mW. se estará muestreando una señal senoidal con un $V_{bias} = -95\text{ mV}$ y un $V_{PP} = 60\text{ mV}$ la cual contará con diferentes frecuencias.

Figura 46A se está utilizando una tasa de repetición de 10 KHz con ciclo de trabajo del 2% y se está muestreando una señal analógica con una frecuencia de 1 KHz y se puede ver como en los casos anteriores el muestreo es excelente y además genera pulsos muy delgados, igual que el pulso óptico, pero como sabemos es por las bajas frecuencias.

Figura 46B se está utilizando una tasa de repetición de 250 KHz con ciclo de trabajo del 2% y se está muestreando una señal analógica con una frecuencia de 25 KHz, vemos que el muestreo sigue siendo excelente, a pesar del ciclo de trabajo, vemos que en la respuesta que el ancho del pulso incrementó un poco, aun así, contamos con una señal excelente.

Figura 46C se está utilizando una tasa de repetición de 5 MHz con ciclo de trabajo del 2% y se está muestreando una señal analógica con una frecuencia de 500 KHz, a pesar de la frecuencia podemos ver un excelente muestreo con pulsos muy delgados el problema es que debido al ancho del pulso óptico y a la responsividad del fotodiodo, podemos ver que la amplitud de la señal disminuyó un poco.

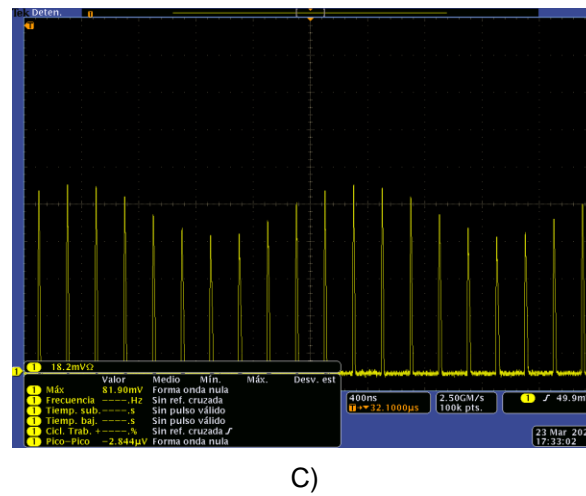
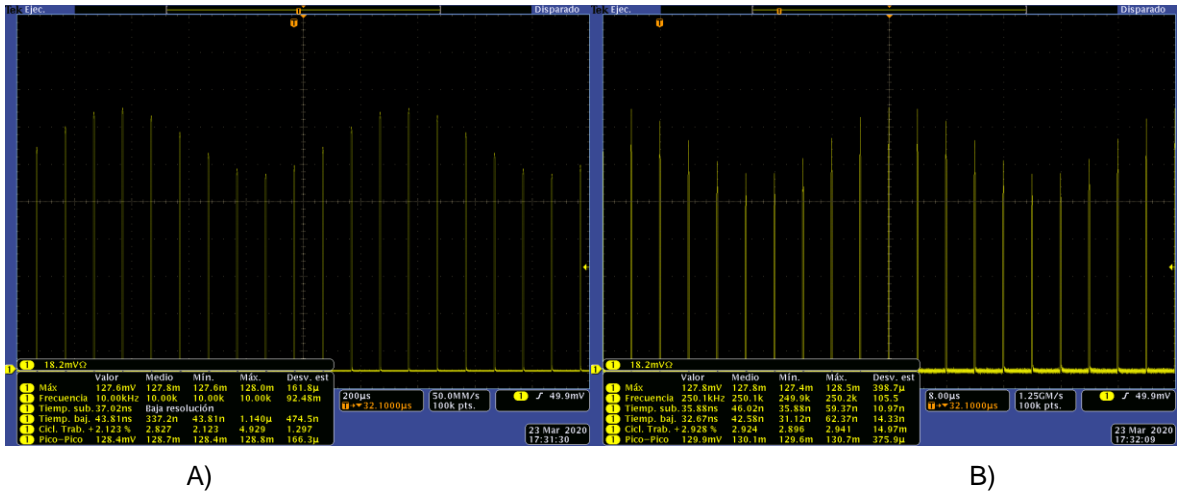


Figura 46. QPDI-40, $R_L = 50 \Omega$, muestro a A) $F_{eq} = 10 \text{ KHz}$, B) $F_{eq} = 250 \text{ KHz}$ y C) $F_{eq} = 5 \text{ MHz}$ con ciclo 2%.



3.4.3 Fotodiodo OE Market PD-850

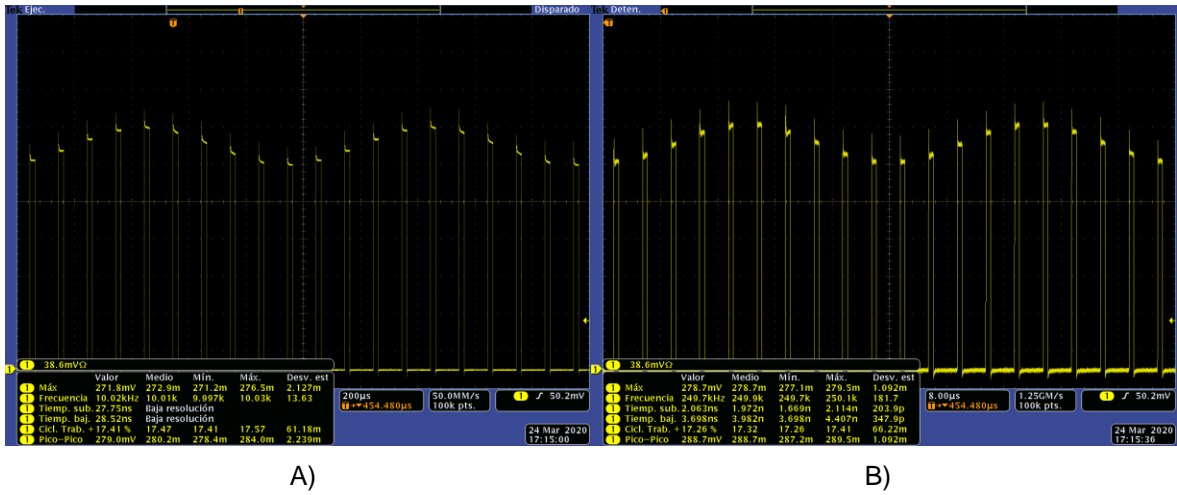
3.4.3.1 Carga RL de 50 Ω y ciclo de trabajo del 16%

Para este muestreo se utiliza una configuración de carga RL de 50 Ω , una potencia óptica de 50 mW. se estará muestreando una señal senoidal con un $V_{bias} = 3.2 V$ y un $V_{PP} = 600 mV$ la cual contará con diferentes frecuencias.

Figura 47A se está utilizando una tasa de repetición de 10 KHz con ciclo de trabajo del 16% y se está muestreando una señal analógica con una frecuencia de 1 KHz y se puede ver como en los casos anteriores el muestreo es excelente y además genera pulsos muy delgados, igual que el pulso óptico, pero como sabemos es por las bajas frecuencias.

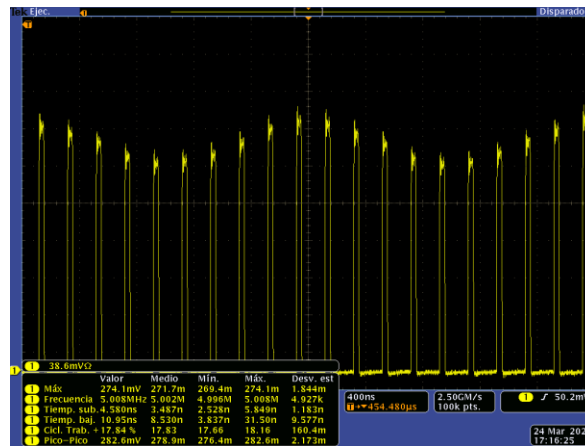
Figura 47B se está utilizando una tasa de repetición de 250 KHz con ciclo de trabajo del 16% y se está muestreando una señal analógica con una frecuencia de 25 KHz, vemos que el muestreo sigue siendo excelente y además los pulsos siguen manteniendo el mismo ancho que del pulso óptico.

Figura 47C se está utilizando una tasa de repetición de 5 MHz con ciclo de trabajo del 16% y se está muestreando una señal analógica con una frecuencia de 500 KHz, a pesar de la frecuencia podemos ver un excelente muestreo con pulsos muy delgados y bien definidos, confirmamos una vez más que este fotodiodo cuenta con la respuesta más rápida.



A)

B)



C)

Figura 47. PD-850, $R_L = 50 \Omega$, muestro a A) $F_{eq} = 10 \text{ KHz}$, B) $F_{eq} = 250 \text{ KHz}$ y C) $F_{eq} = 5 \text{ MHz}$ con ciclo 16%.



3.4.3.2 Carga RL de 50 Ω y ciclo de trabajo del 2%

Para este muestreo se utiliza una configuración de carga RL de 50 Ω , una potencia óptica de 50 mW. se estará muestreando una señal senoidal con un $V_{bias} = 3.2 V$ y un $V_{PP} = 600 mV$ la cual contará con diferentes frecuencias.

Figura 48A se está utilizando una tasa de repetición de 10 KHz con ciclo de trabajo del 2% y se está muestreando una señal analógica con una frecuencia de 1 KHz y se puede ver como en los casos anteriores el muestreo es excelente y además genera pulsos muy delgados, igual que el pulso óptico, pero como sabemos es por las bajas frecuencias.

Figura 48B se está utilizando una tasa de repetición de 250 KHz con ciclo de trabajo del 2% y se está muestreando una señal analógica con una frecuencia de 25 KHz, vemos un muestreo excelente y además los pulsos siguen manteniendo el mismo ancho que del pulso óptico lo que nos permitir llevar este fotodiodo a frecuencias mucho más altas.

Figura 48C se está utilizando una tasa de repetición de 5 MHz con ciclo de trabajo del 2% y se está muestreando una señal analógica con una frecuencia de 500 KHz, a pesar de la frecuencia podemos ver un excelente muestreo con pulsos muy delgados y bien definidos, como en el caso del QPDI-40, debido al ancho del pulso óptico, en la respuesta vemos que la amplitud disminuyó, pero se puede incrementar el ancho del pulso óptico para así compensar la pérdida de amplitud.

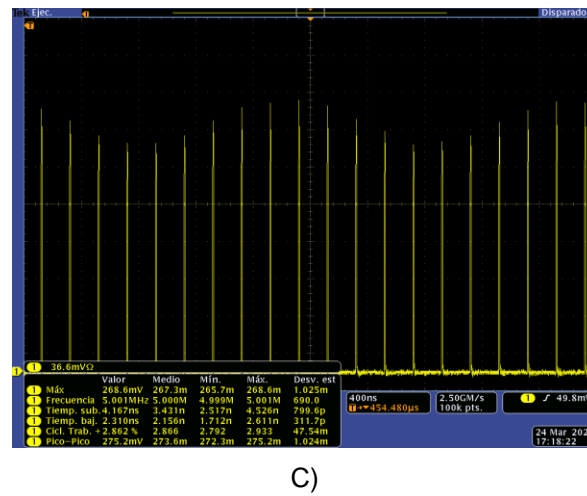
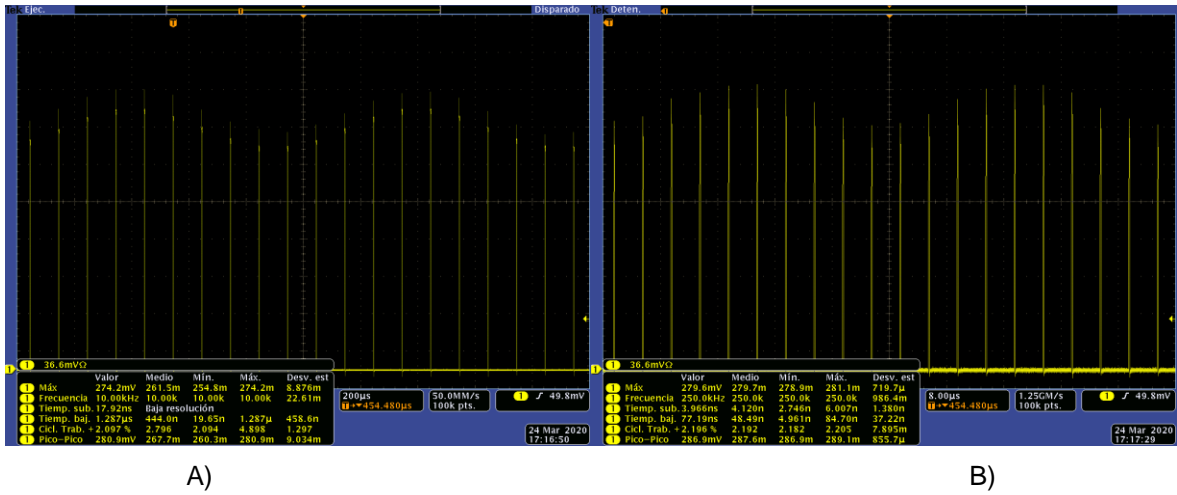


Figura 48. PD-850, RL = 50 Ω, muestro a A) Feq = 10 KHz, B) Feq = 250 KHz y C) Feq = 5 MHz con ciclo 2%.



Capítulo 4.- Reloj óptico

Este capítulo se proporciona el diseño, la implementación práctica y los resultados experimentales del reloj de red óptica utilizado para activar (disparar) y sincronizar las diferentes etapas de muestreo, demultiplexación y multiplexación en la arquitectura general del ADC.

4.1 Circuito para doblado de frecuencia con retardo y retroalimentación

La Figura 49 muestra el diagrama esquemático de un circuito básico para el doblado de la frecuencia. El circuito está compuesto por un divisor óptico (optical splitter) (S) y una línea pasiva de retardo óptica (DL). En el circuito, la señal óptica de entrada se alimenta a la entrada inferior de S. La señal de salida se obtiene de la salida inferior de S. El funcionamiento de este circuito consiste en que cuando el tren de pulsos ópticos con una tasa de repetición F es alimentada a la entrada inferior de S, cada pulso óptico se dividido en 2 y cada pulso dividido va a una salida de S. La señal de pulsos de salida en la terminal superior de S es retrasada la mitad del periodo en consecuencia de la distancia de DL y retroalimentado a S. La señal de pulsos ópticos retrasada se superpone con la señal óptica de entrada, generando en la salida inferior un nuevo tren de pulsos ópticos con una tasa de repetición de $2F$.

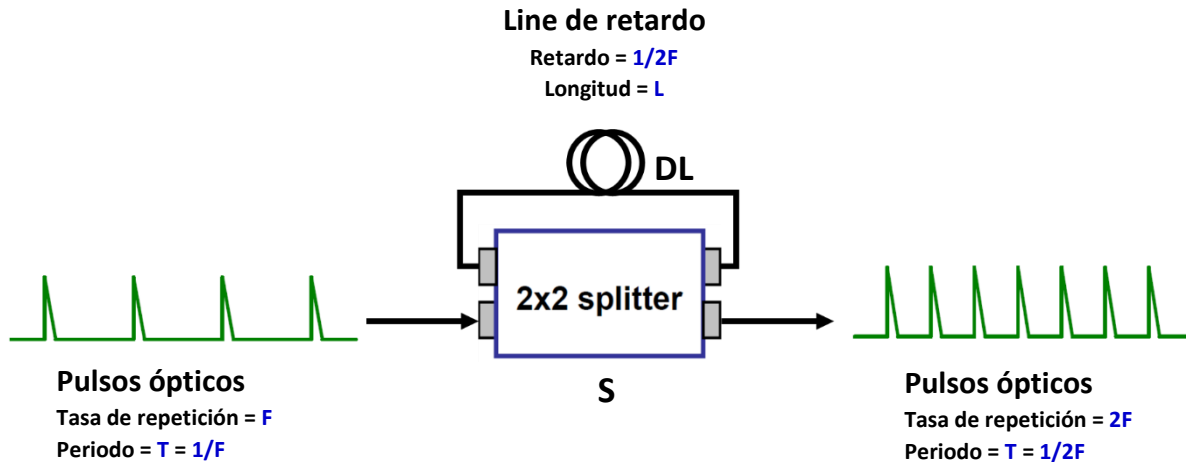


Figura 49. Circuito básico para doblado de frecuencia.

4.2 Caracterización de fibra óptica

Como se muestra en la Figura 49, para doblar la frecuencia utilizando elementos pasivos, se usan tramos de fibra óptica, como sabemos la velocidad propagación de una onda electromagnética cambia dependiendo del medio donde se propague, esto nos favorece porque deseamos retrasar una de las señales. Como se mencionó en la sección anterior para poder doblar la frecuencia, el tren de pulsos de entrada es dividido en dos señales y se retrasa una con respecto a la otra, como se mencionó se pueden utilizar tramos de fibra óptica para realizar este retraso en la señal, conforme se aumente la longitud de la fibra óptica el retraso va creciendo. Por lo tanto, para poder implementar el circuito de la Figura 49, primero se tiene que encontrar la longitud adecuada de fibra óptica para provocar el retraso deseado en la señal, por esa razón se caracterizó la fibra óptica con la que se cuenta, cabe mencionar que los datos que se presentarán a continuación son únicos lo que significa que estos datos son exclusivos para el tipo de fibra óptica y laser utilizados. Se utiliza un láser del fabricante Coherent modelo Obis XL a 660 nm y se cuentan con tramos de fibra óptica del fabricante Corning modelo SMF-28 Ultra fiber. Si por alguna razón se



cambia la longitud de onda del láser o el tipo de fibra, estos datos cambiarán, cabe recalcar que estos datos aplican solo para 660 nm y el tipo de fibra antes mencionado.

Para realizar la caracterización de la fibra óptica, se utilizaron dos fotodiodos iguales, la señal óptica se dividió en dos y cada una de estas señales llegó a un fotodiodo, para tener una referencia, primero se probaron bajo las mismas condiciones (Figura 50), específicamente con la misma longitud de fibra óptica para saber si estarían perfectamente sincronizados y así resulto, las respuestas de los fotodiodos estaban perfectamente sincronizadas como se puede ver en la Figura 52A, una vez confirmado que bajo las mismas condiciones los fotodiodo están sincronizados, el siguiente paso es agregar un tramo de fibra óptica, esto solo se hace en un fotodiodo y el otro de deja con la configuración inicial, esto con la intención de tener una referencia. Como se observa en la Figura 51, se agregó un tramo de fibra óptica a uno de los fotodiodos, para esta caracterización se insertaron de tramos de 1 m hasta llegar a 10 m de fibra óptica y de ahí de 5 m hasta llegar a 20 m. Cuando se agregó el tramo de 1 m provocando un retardo aproximadamente de 5 ns, se colocó un tramo de 2 m y provoco un retardo de 10 ns, se siguió probando esto hasta completar los 20 metros de fibra óptica, una vez realizadas las pruebas sabemos que se provoca un retardo aproximadamente de 5 ns por metro de fibra óptica, el incremento del retardo tiene un comportamiento lineal y esto se puede apreciar en la tabla 10, cabe aclarar que estos retardos solo funcionan con el tipo de láser y fibra utilizados en este proyecto. También podemos ver en las Figura 52B, 52C y 52D, que agregar estos retardos no modifica el tren de pulsos ópticos ni la respuesta del fotodiodo, se sigue teniendo una señal clara y bien definida, es por lo que se tomó la decisión de utilizar este método para realizar estos retardos.

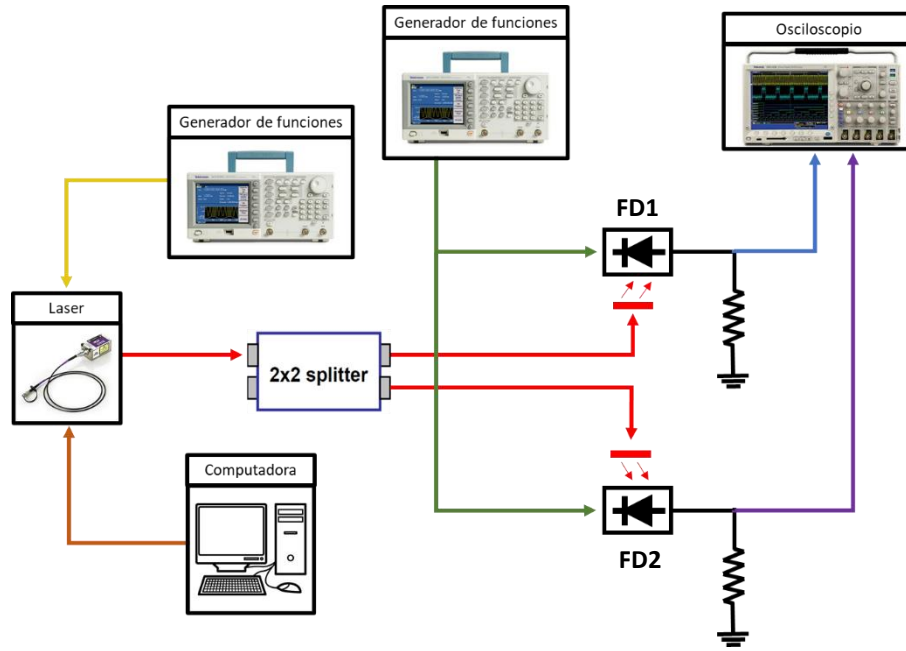


Figura 50. Diagrama bloques, retardo con la misma longitud de fibra óptica

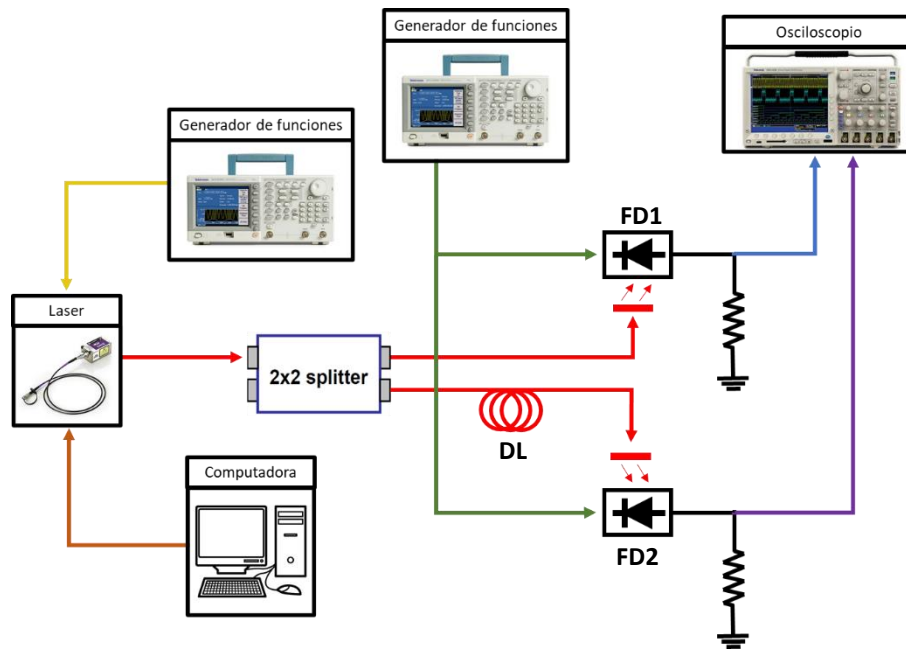


Figura 51. Diagrama de bloque, retardo con diferentes longitudes de fibra óptica

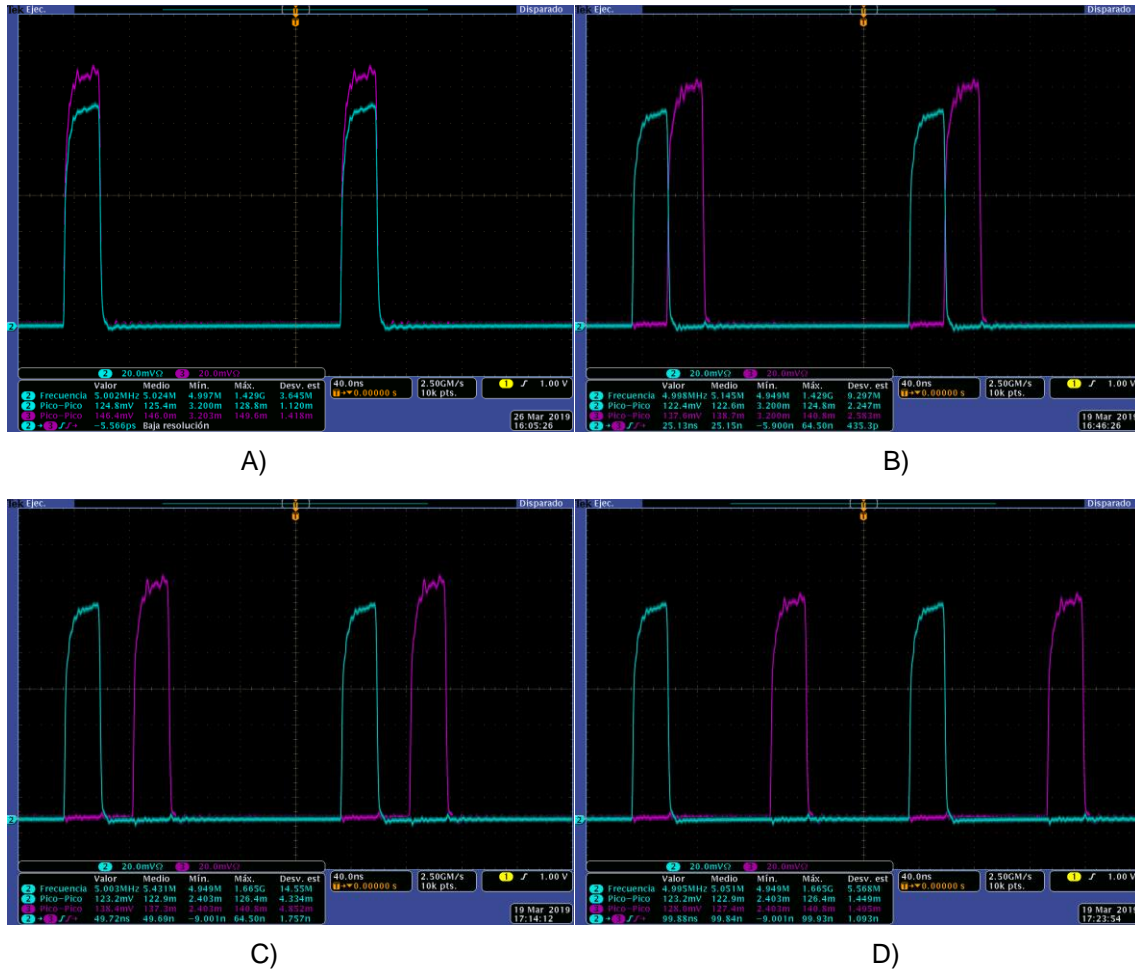


Figura 52. Retardos provocados por A) misma longitud, B) 5 metros, C) 10 metros y D) 20 metros de fibra óptica.

Fotodiodo 1		Fotodiodo 2		Tiempo retardo FD2 ref FD1	Fibra óptica Distancia
Feq	Vpp	Feq	Vpp		
5MHz	120.9mV	5MHz	139.3mV	5.463ns	1m
5MHz	121.3mV	5MHz	137.8mV	10.25ns	2m
5MHz	119.8mV	5MHz	125mV	15.29ns	3m
5MHz	121.8mV	5MHz	118.7mV	20.60ns	4m
5MHz	122.4mV	5MHz	138.4mV	25.12ns	5m
5MHz	124.8mV	5MHz	124mV	30.55ns	6m
5MHz	123.2mV	5MHz	120.8mV	35.37ns	7m
5MHz	123.2mV	5MHz	121.6mV	40.34ns	8m
5MHz	123.2mV	5MHz	113.6mV	45.63ns	9m
5MHz	124mV	5MHz	138.4mV	49.74ns	10m
5MHz	123.2mV	5MHz	122.4mV	74.93ns	15m
5MHz	124.1mV	5MHz	127.2mV	99.86ns	20m

Tabla 10. Retardos de fibra óptica



4.2.1 Aplicación del circuito

Siguiendo los pasos antes mencionados se experimentó con el circuito para el doblado de la frecuencia (Figura 53), contamos con divisores ópticos 2X2 (dos entradas, dos salidas) con proporción 50%/50%, se armó el circuito como se explicó anteriormente, teniendo en cuenta que se usó el divisor con la proporción antes mencionada, contamos con una laser de 660 nm con una potencia óptica de 75 mW. Se realizó la primera prueba teniendo un tren de pulsos con una tasa de repetición de 5 MHz, con el circuito la frecuencia se debe duplicar a 10 MHz. Previo al armado del circuito de para doblar la frecuencia se caracterizaron los tramos de fibra óptica, con 5 MHz se tiene un periodo de 200 ns lo que significa que para duplicar la frecuencia a 10 MHz tenemos que provocar un retardo de 100 ns en la señal que se va a retroalimentar en el divisor óptico, se introduce una fibra óptica con una longitud de 20 m que provocara el retardo deseado de 100 ns.

Contamos con pulsos ópticos a 5MHz con una potencia óptica de 75mW que serán alimentados a la entrada inferior de S, como se mencionó la señal será dividida en dos, debido a que la proporción del S es 50/50 contaremos con dos señales de 5MHz con potencia de 37.5 mW, la señal óptica de la salida superior será retroalimentada pero a esta salida se conectara el tramo de 20mts de fibra óptica (DL) el cual provocara el retraso en la señal, una vez que la señal óptica pase por DL esta estará retrasada $1/2F$ con respecto a la señal de entrada, DL es conectado a la entrada superior de S, una vez que las señales ópticas son superpuestas en la salida inferior obtendremos una señal con frecuencia 10MHz y una potencia óptica de 37.5mW. Aquí se presenta un problema muy grande, debido a que una señal se retroalimenta, significa que la señal retrasada vuelve a pasar por S y dicha señal se divide de nuevo, lo que significa que el pulso superpuesto en la señal original no tendrá la mitad de la potencia original si no que dicho pulso tendrá una cuarta parte de la potencia original, como se mencionó esto es debido a que la señal original se divide una vez, por lo

tanto el tren de pulsos obtenido tendrá un pulso que tendrá la $\frac{1}{2}$ y otro pulso tendrá un $\frac{1}{4}$ de la potencia original (Figura 54). Este problema es originado por el divisor óptico debido a que su proporción es 50/50, por lo tanto con esta configuración no se pueden alinear las potencias ópticas, esto es porque la única señal que se puede atenuar o amplificar es la señal retroalimentada, pero ya que el objetivo de este reloj es usar solo dispositivos pasivos para realizar dicho reloj y por las altas frecuencias no se pueden utilizar amplificadores ópticos debido a que son dispositivos activos y no soportan las altas frecuencias, en cambio sí se puede atenuar la señal óptica sin utilizar dispositivos activos, para este caso sería suficiente separar un poco la conexión entre la salida superior de S y DL, esto provoca una atenuación en la potencia ya que se cambia un poco el ángulo en el que incide la haz en DL, también hay otro método para atenuar la potencia y eso es doblar en algún punto la fibra óptica, realizando un ángulo 45 grados o menor, esto provoca que cambie ángulo con el que rebota el haz dentro del núcleo, cambiando el ángulo donde se encuentra la máxima reflexión y esto provoca que una parte del haz salga del núcleo atenuando así la potencia óptica.

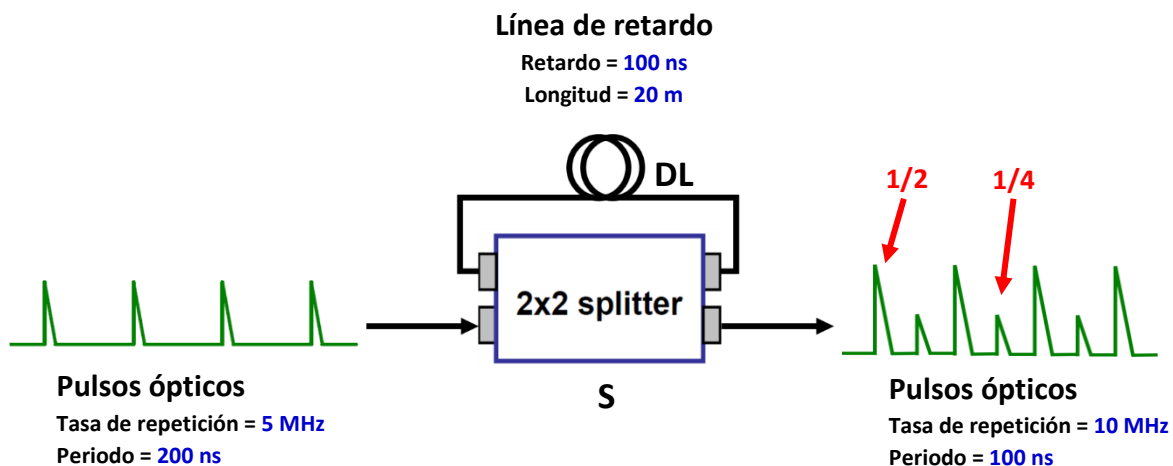


Figura 53. Circuito y configuración utilizada en el doblado de frecuencia.

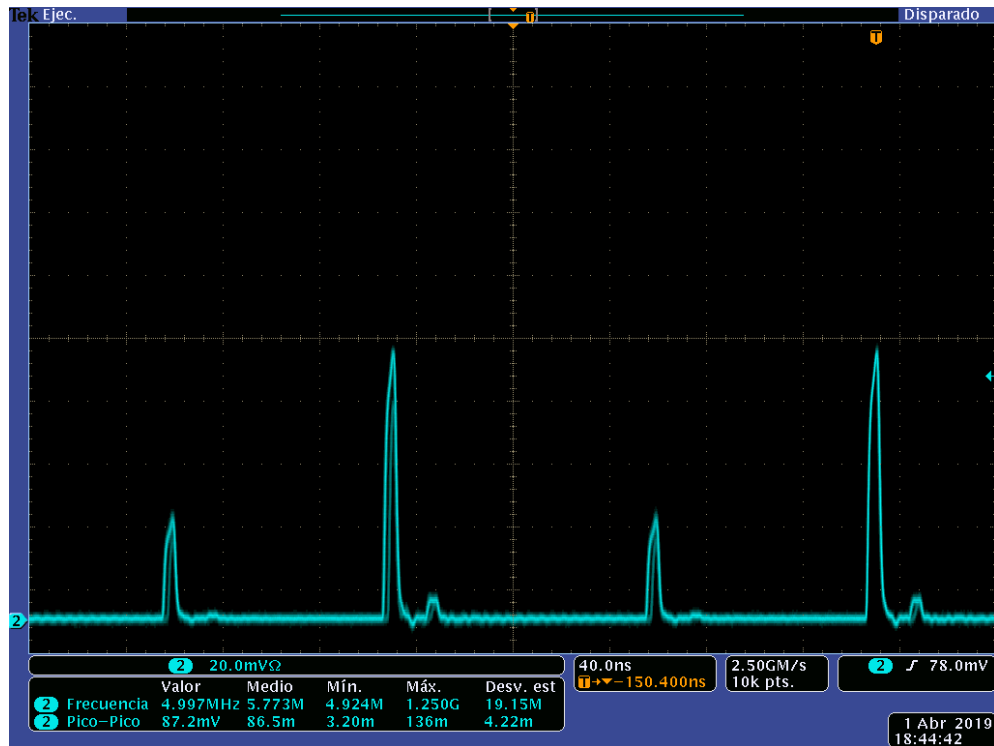


Figura 54. Señal generada por el circuito para doblar la frecuencia.

4.2.2 Circuito para doblado de frecuencia con retraso directo

Debido al problema antes mencionado, no se puede alinear la amplitud de los pulsos y debido a eso se encontró una alternativa para poder doblar la frecuencia del tren de pulsos ópticos (Figura 55), para este caso se usarán dos divisores ópticos, como bien se sabe al usar un divisor óptico como su nombre lo dice un haz de luz es dividido en dos, pero también hace lo opuesto, si contamos con dos señales de luz podemos juntarlas. La señal de pulsos ópticos es alimentada a la entrada inferior de S1, la señal es dividida, la señal de la salida inferior se conecta directo a la entrada inferior de S2, luego la salida superior de S1 se conecta a DL para retrasar la señal y DL se conecta a la entrada superior de S2 y S2 juntará ambas señales y en la señal de la salida inferior de S2 contamos con una señal con el doble de la frecuencia (Figura 56), pero lo más importante es que debido a que las señales están en

conexiones independientes muy fácilmente se pueden alinear las potencias ópticas de ambas señales.

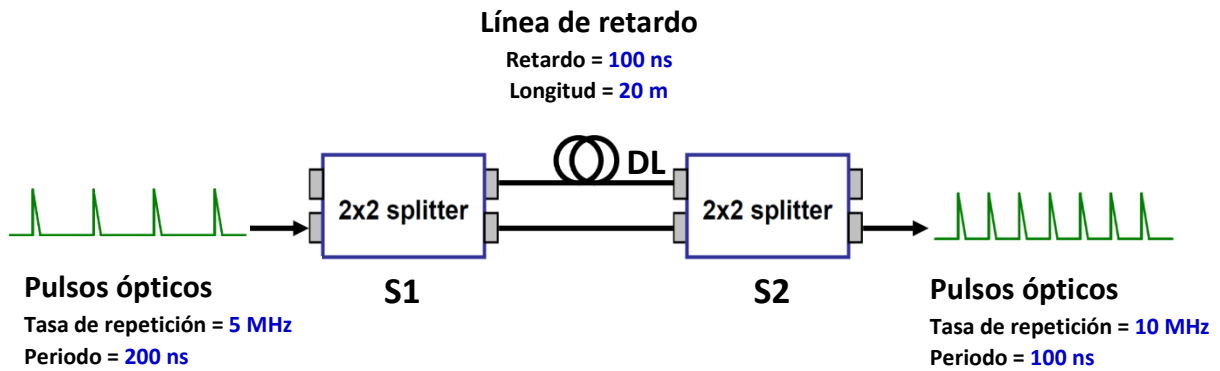


Figura 55. Circuito para doblar la frecuencia con dos divisores.

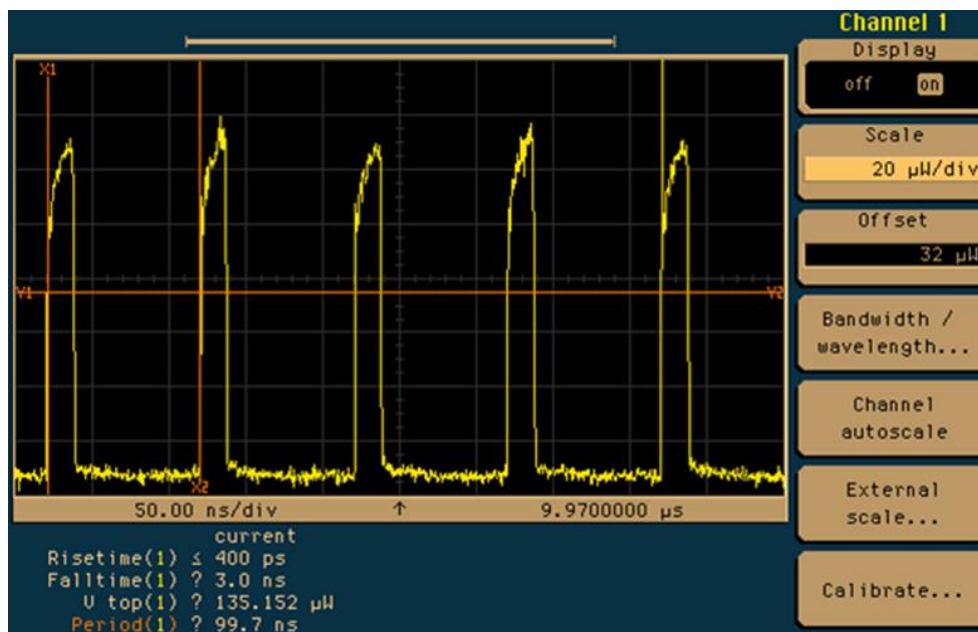


Figura 56. Tren de pulsos opticos a 10 MHz utilizando un doblador.



4.3 Circuito del reloj óptico

Como ya vimos, podemos doblar la frecuencia de un tren de pulsos sin problemas y lo más importante es que se puede alinear las amplitudes de los pulsos ópticos de una manera sencilla. Para el circuito del reloj óptico sabemos que debido a las capacidades de los convertidores y para reducir la carga o la velocidad de procesamiento para los convertidores, la señal muestreada debe ser separada en dos señales par e impar, ambas señales con la mitad de la frecuencia de la señal principal pero en fases diferentes, esto con la intención de reducir la velocidad con la que deben trabajar los convertidores, entonces ya vimos que podemos doblar la frecuencia pero ahora necesitamos separar la señal principal en dos señales y con fases diferentes.

Para este circuito se usarán cuatro divisores ópticos, como sabemos dos de ellos se utilizará para doblar la frecuencia de la señal principal y los otros dos se utilizarán para obtener las señales secundarias (par e impar). La señal óptica es alimentada en la entrada inferior de S1, este divisor lo usamos para separar la señal ya que una se usará para doblar la frecuencias y obtener la señal principal y la otra se usará para obtener las señales secundarias, entonces la salida superior de S1 se conecta a la entrada inferior de S3, la señal de la salida inferior de S3 se conecta directo a la entrada inferior de S4 pero la salida superior de S3 se conecta a DL1 y este a su vez se conecta a la entrada superior de S4, recordemos que DL1 es el tramo de fibra óptica que provocará el retardo en la señal, en la salida inferior de S4 se cuenta con una señal de pulsos ópticos con una tasa de repetición de $2F$, la cual será nuestra señal principal para activar el convertidor. La salida inferior de S1 se conecta a la entrada superior de S2, la señal de la salida superior de S2 se conecta a DL2 luego en la salida inferior de S2 se conecta DL3, aquí hay un detalle muy importante las salidas de S2 son nuestras señales secundarias, DL1 y DL3 son iguales debido a que deben provocar el mismo retardo en la señal pero DL2 es un tramo de fibra que se usó para



compensar S4 esto es para poder sincronizar las señales, a la salida de S2 y S3 las condiciones de las señales son iguales, por lo tanto estarán sincronizadas pero a S3 se está conectando a S4 lo que agrega fibra óptica extra, por lo tanto las señales a las salida de S2 no estarán sincronizadas con la señal de la salida de S4 por esa razón y tomando en cuenta el modelo del divisor óptico, este mide aproximadamente 2 m longitud, dicho esto DL2 debe ser un tramo de fibra de 2 m, pero también a DL3 se le deben sumar estos 2 m, independientemente de cuál sea la longitud para provocar el retardo adecuado se le deben agregar 2 m de fibra para compensar a S4.

En la Figura 58 podemos ver la configuración del reloj óptico, se está trabajando con una frecuencia base de 10 MHz y se desea duplicar a 20 MHz, para poder realizar esto se necesita provocar un retardo en la señal de 50 ns, como nos indica la tabla 10, con un tramo de fibra óptica de 10 m se provocará el retardo deseado por lo tanto los tramos de fibra óptica quedan de la siguiente forma $DL1 = 10$ m, $DL2 = 2$ m y $DL3 = 12$ m. Una vez que se tienen los elementos necesarios es sencillo armar el circuito como lo podemos ver en la Figura 59, es una foto real del circuito armado.

Figura 60 nos muestra las señales secundarias (par e impar), podemos ver que la potencia de cada señal es diferente y eso es debido a la proporción de los divisores ópticos, por ese motivo se tendrá una señal con potencia óptica más grande que la otra pero además de la diferencia de potencia óptica podemos ver que los pulsos ópticos tienen exactamente la misma forma, conectar todo estos elementos ópticos no afecta ni modifica el tren de pulsos generados por el láser como se mencionó en la Figura 60 vemos las señales secundarias a una frecuencia de 10 MHz respectivamente pero en la Figura 61 podemos ver la señal principal con una frecuencia de 20 MHz la cual será empleada para la activación y sincronización del ADC, una vez más se confirma que los elementos ópticos usados no

modifican la señal óptica y además también vemos que es muy sencillo alinear la potencia óptica de los pulsos, vemos que el tren de pulsos ópticos está perfectamente alineados.

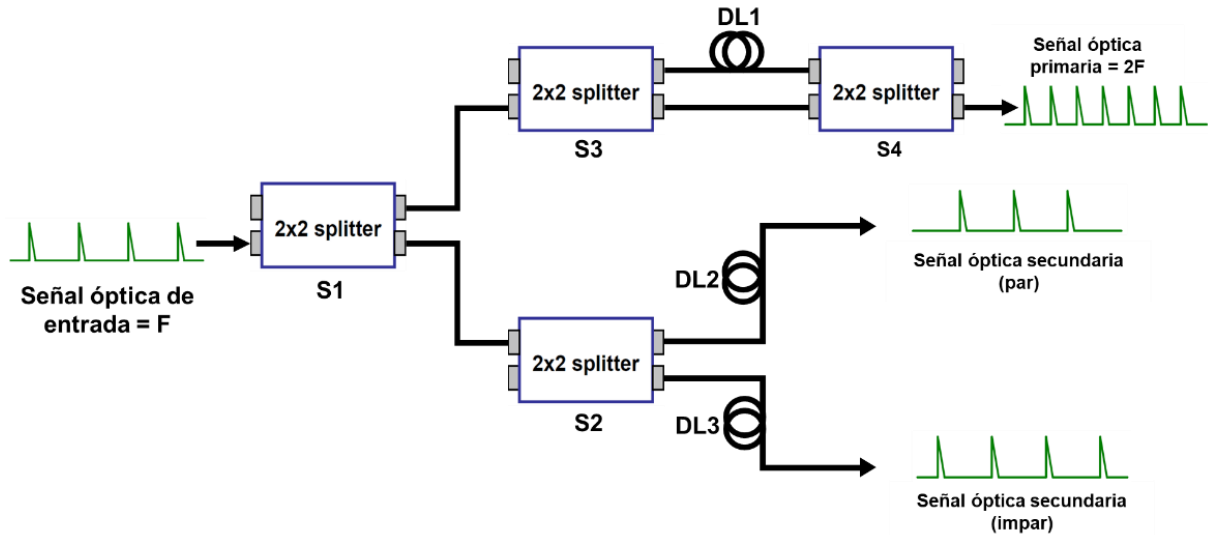


Figura 57. Circuito basico del reloj óptico.

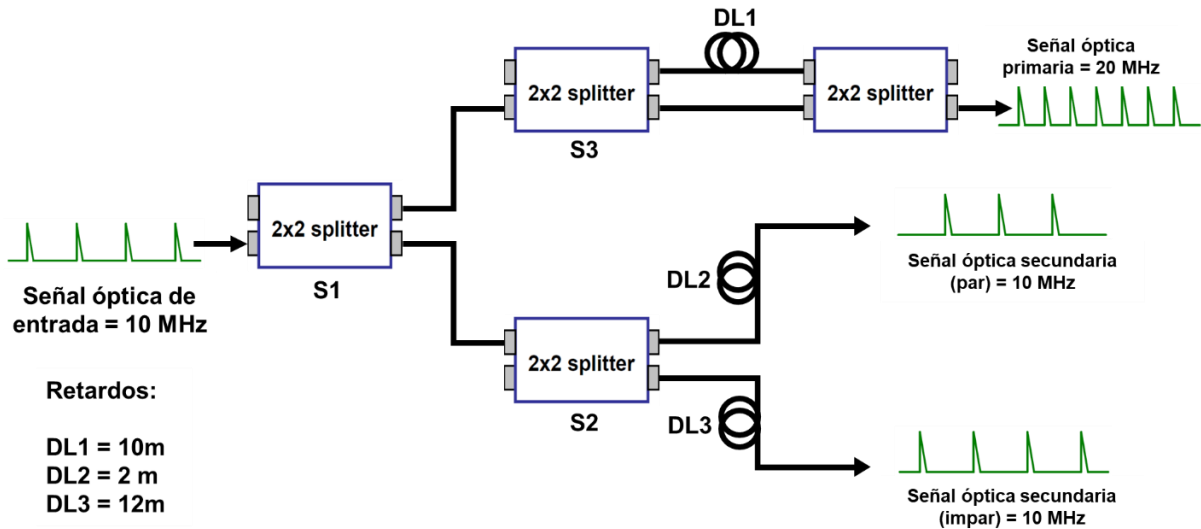


Figura 58. Configuración del reloj óptico.

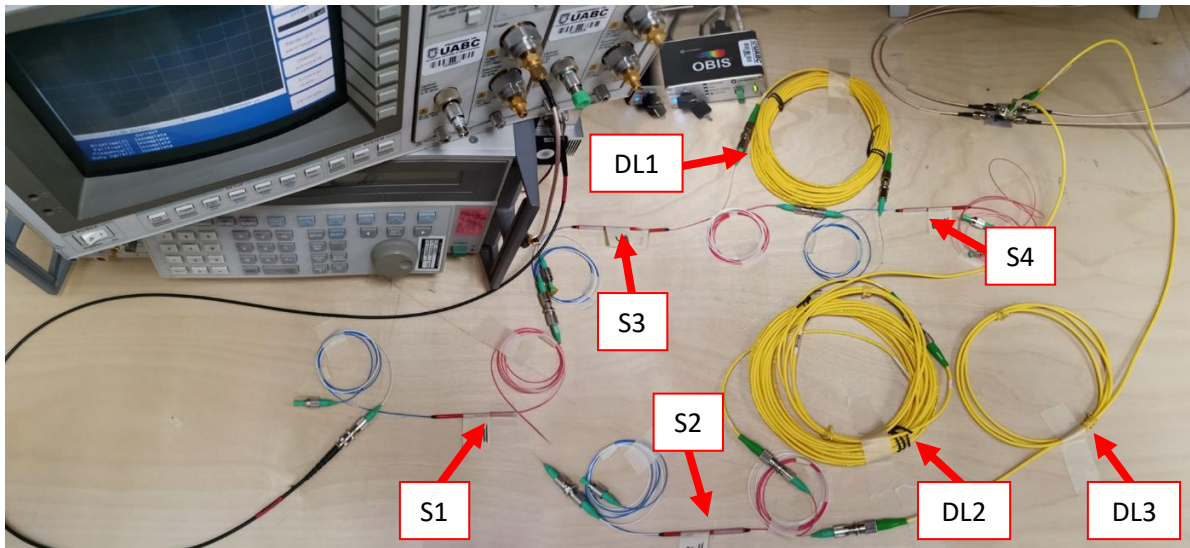


Figura 59. Foto real del circuito del reloj óptico.

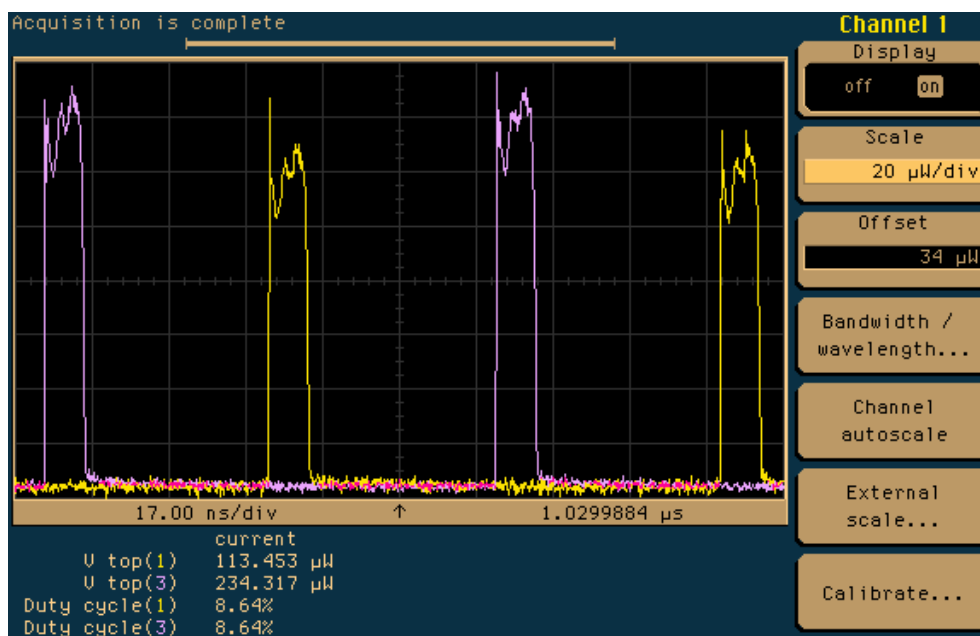


Figura 60. Señal par e impar del reloj óptico.

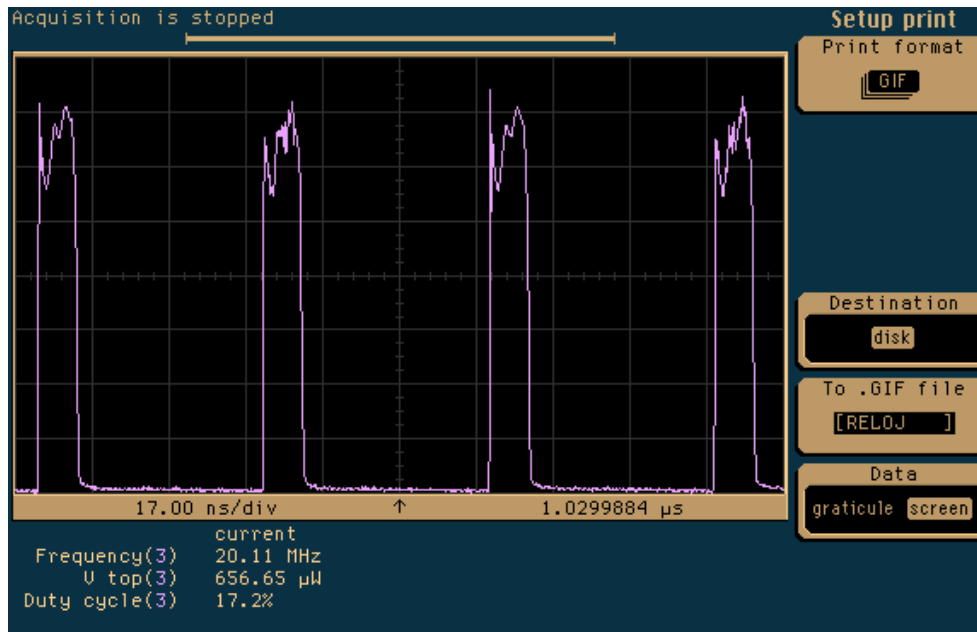


Figura 61. Señal principal para la activación del convertidor.

Capítulo 5.- Resultados y conclusiones

Analizando los datos obtenidos podemos concluir que los fotodiodos probados en este proyecto son lo suficientemente rápidos para trabajar a altas frecuencias. Como vimos el capítulo 2, en las curvas obtenidas para el fotodiodo FDS02, vemos que cuenta con una región lineal bastante grande y esto es debido a que la responsividad de este fotodiodo está centrada en aproximadamente 750 nm por esta razón también se obtiene un V_{RL} alto, con estas características es un buen candidato para utilizar. Con respecto al fotodiodo QPDI-40 vemos que debido a la responsividad que está centrada en aproximadamente 1550 nm, cuenta con una región lineal muy pequeña lo que significa que solo se podrán muestrear señales analógicas de una amplitud pequeña y además se obtiene un V_{RL} pequeño. El último fotodiodo que se probó fue el PD-850, el cual tiene una responsividad centrada en aproximadamente en 850 nm, la ventaja que tiene este fotodiodo es que la región lineal es muy grande, la peculiar curva V_{RL} Vs V_{bias} nos indica que el fotodiodo puede ser polarizado



con señales analógicas de amplitud muy grande pero como resultado se obtiene un V_{RL} mas pequeño que en el caso del FDS02 pero más grande que el QPDI-40, lo que también hace un excelente candidato a este fotodiodo. También sabemos que los tres fotodiodos tienen una frecuencia de corte bastante altas, cabe mencionar que esta frecuencia es la máxima frecuencia que puede tener la señal analógica que será muestreada por los fotodiodos, aproximadamente los tres están en el orden de 50 MHz, lo cual es suficiente para este proyecto.

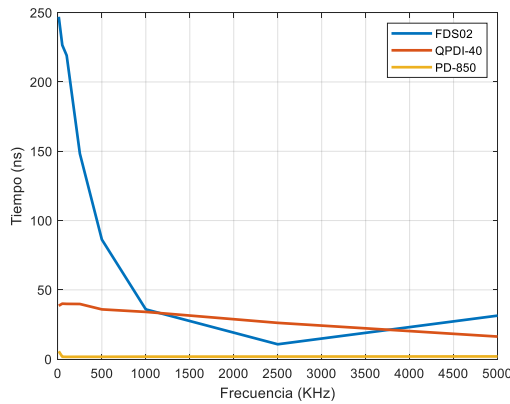
En base al análisis de la respuesta transitoria del capítulo 3 podemos ver que los fotodiodos seleccionados son lo bastante rápidos, claro teniendo en cuenta unos son más rápidos que otros y eso es lo que podemos ver en la Figura 62 en la cual se está utilizando un ciclo de trabajo del 16% en el tren de pulsos ópticos, queda claro que el fotodiodo más lento es el FDS02 pero tiene la ventaja que su responsividad está centrada en 750 nm por lo tanto con una potencia óptica baja, entregará señales con una amplitud manejable, podemos ver en la Figura 62 que los tiempos tanto de subida como de bajada del FDS02 tienden a ser más rápidos conforme se aumenta la frecuencia pero no son lo suficientemente rápidos como se esperaría, en cambio si vemos los otros fotodiodos, los tiempos de respuesta de ambos son muy rápidos en comparación el FDS02, sabemos que a 5 MHz el FDS02 tiene un tiempo de bajada de 107 ns, QPDI-40 tiene un tiempo de 43 ns y el tiempo de bajada del PD-850 es de 3.9 ns, podemos ver que hay diferencias entre ellos. Esto es algo que ya se esperaba, por esa razón se probaron los fotodiodos con un ciclo de trabajo del 2% y es lo que podemos ver en la Figura 63, simplemente con realizar este pequeño cambio podemos ver que tanto lo tiempo de subida como de bajada del FDS02 son mucho más rápido si los comparamos con la Figura 62, aun así tanto el QPDI-40 como el PD-850 son mucho más rápidos, entonces concluimos que el fotodiodo FDS02 es el más lento de los 3 pero podemos ver en la Figura 63A que el PD-850 es ligeramente más rápido



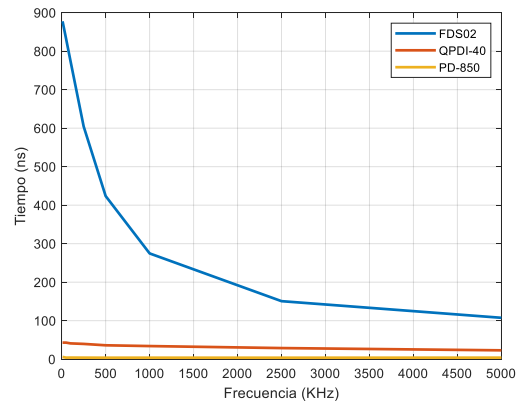
que el QPDI-40, el PD-850 a 5 MHz tiene un tiempo de subida de 2.2 ns y en el QPDI-40 es de 4.6 ns pero si también analizamos los tiempos de bajada en la misma frecuencia (Figura 63B) podemos ver que el PD-850 tiene un tiempo de 1.9 ns y en el QPDI-40 es de 12 ns. Con estos datos podemos concluir que el fotodiodo más rápido en los tiempo de respuesta es el PD-850, el segundo más rápido es el QPDI-40 y el fotodiodo más lento es el FDS02 pero también hay un dato importante que se debe revisar y ese es la caída de amplitud en función de la frecuencia, como se ve en la Figura 64A en la cual se está utilizando un ciclo de trabajo del 16%, los fotodiodos QPDI-40 y PD-850 a lo largo del rango de frecuencias, podemos ver que efectivamente sí hay una ligera caída de amplitud pero era de esperarse debido al incremento de la frecuencia. El QPDI-40 comenzó con una amplitud de 112 mV y terminó con 98 mV y en caso del PD-850 comenzó con 264 mV y termino con 245 mV, como podemos ver en el PD-850 vemos una caída más pronunciada en comparación con el QPDI-40. Como era de esperarse, la gran caída de amplitud del FDS02 es debido a la lenta respuesta ya que, cuando se llega a la frecuencia de 5 MHz, el tiempo de bajada es tan lento que lo pulsos no llegan su punto mínimo y se empalmen entonces dejamos de tener un tren de pulsos. Otra historia es la que sucede cuando se utiliza un ciclo de trabajo del 2% en el tren de pulsos ópticos, podemos ver en la Figura 64B que en este caso también tenemos una caída de amplitud en todos los fotodiodos, la caída es un poco más pronunciada debido a que el pulso óptico es muy delgado lo que también provoca que el pulso óptico pierda un poco de potencia, podemos ver que el fotodiodo que tiene la perdida más grande es el FDS02 pero ya no es tan grande como con el ciclo de 16%, como sabemos esto es debido a que los tiempos mejoraron y se continua teniendo un tren de pulsos, para este caso y vemos que el FDS02 comienza con una amplitud de 250 mV y termina con 187 mV, para el QPDI-40 comienza con 112 mV y termina con 76 mV y para el PD-850 comienza con 261 mV y termina con 241 mV, con estos datos podemos ver que el fotodiodo que tuvo la menor pérdida de amplitud es el PD-850 ya que



hay una diferencia de solo 20 mV, también sabemos que si se aumenta un poco el ciclo de trabajo podemos compensar esta pérdida y concluimos que el mejor fotodiodo de los 3 es el OE Market PD-850, ya que tiene la respuesta más rápido y tiene la menor caída de amplitud.

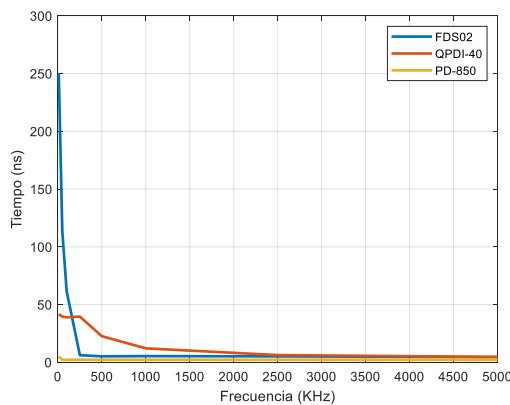


A)

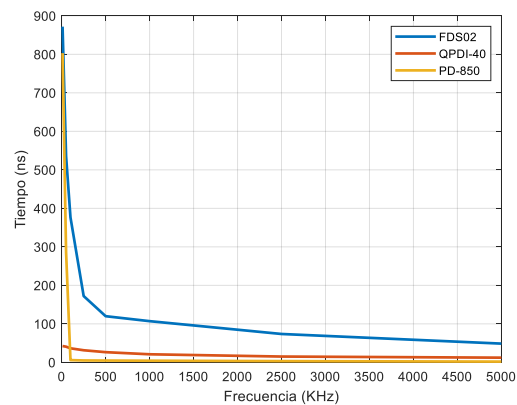


B)

Figura 62. Tiempos de A) subida y B) bajada con $RL = 50 \Omega$ y ciclo del 16%



A)



B)

Figura 63. Tiempos de A) subida y B) bajada con $RL = 50 \Omega$ y ciclo del 2%

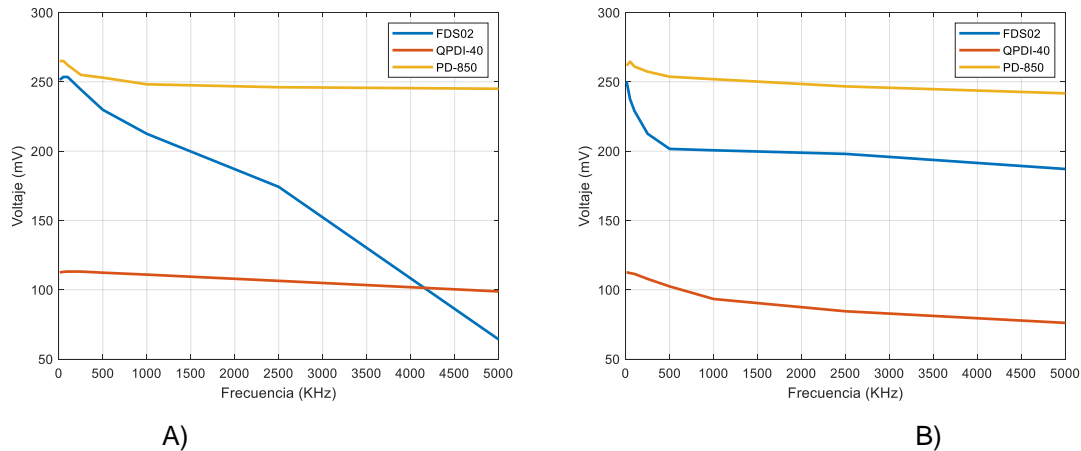


Figura 64. Caída de amplitud con A) ciclo del 16% y B) ciclo del 2%.

También se observó que con los tres fotodiodos se puede realizar un muestreo muy bueno, claro que con algunas diferencias entre ellos, como se mencionó debido al tiempo lento de bajada del FDS02, en el muestrear vemos que, cuando llega al punto mínimo de la señal senoidal, los pulsos en eso momento son un poco más lentos y vemos que el ancho también aumenta un poco si los comparamos cuando llegan al punto máximo de la señal senoidal pero esto es normal debido a que el voltaje de polarización cambia debido a la señal, si el fotodiodo es lento, en estos puntos mínimos puede provocar que el pulso no llegue a cero y provocará que la señal también se comience a modular en la parte de abajo, esto es muy evidente para este fotodiodo cuando se trabaja con un tren de pulsos ópticos con un ciclo de trabajo del 16%, si se utiliza el ciclo de 2%, casi se elimina por completo este comportamiento y es precisamente por el ancho de los pulsos, en cambio con los otros dos fotodiodos no sucede esto ya que son mucho más rápidos que el FDS02, con el QPDI-40 y PD-850, no se modula la señal en la parte de abajo pero aun así vemos cuando en la señal senoidal llega a su punto mínimo, vemos como el pulso es un poco más ancho pero como son mucho más rápidos esto no afecta, para estos fotodiodos, realizan un muy buen muestreo de la señal analógica aunque se esté utilizando un tren de pulsos ópticos con un ciclo de trabajo muy pequeño, no hay deformaciones en la señal y vemos un



comportamiento senoidal muy bien definido, como sabemos con el fotodiodo PD-850 obtenemos una señal muestreada con pulsos mucho más delgados lo cual nos permitirá doblar la frecuencia sin problemas.

Una vez que se analizó la respuesta transitoria y el muestreo de los fotodiodos seleccionados, como se mencionó, el más adecuado o el mejor fotodiodo es el PD-850.

Para poder aplicar el circuito de la Figura 58 necesitamos dos fotodiodos iguales debido a que contaremos con 2 señales secundarias con fases diferentes y estas señales son con las que se estará muestreando. Actualmente solo se cuenta con un fotodiodo de PD-850 y un QPDI-40 por lo tanto no se pueden usar estos fotodiodos en el reloj óptico ya que se necesita al menos 2, actualmente se cuentan con 4 fotodiodos FDS02 por lo tanto para la aplicación del reloj óptico se usará este fotodiodo, como sabemos no es fotodiodo con la respuesta más rápida, pero tiene una respuesta transitoria y muestreo muy buenos.

En el capítulo 4 se explicó a detalle el doblado de la frecuencia, así como el reloj óptico además se armaron y probaron sin problemas. Las dos señales secundarias cuentan con una buena potencia óptica además de estar desfasadas la mitad periodo entre ellas. Como se mencionó se necesitan 2 fotodiodos, pero como sabemos, aunque sean del mismo modelo, los fotodiodos no responderán exactamente igual, siempre habrá pequeñas diferencias entre ellos debido a las características intrínsecas, actualmente contamos con cuatro FDS02, debido a las características de potencia óptica y el ancho de los pulsos, este fotodiodo es adecuado porque tiene la región lineal más grande debido a la responsividad que está más cercana a 660 nm por lo tanto la amplitud de la respuesta de los fotodiodos será mucho más grande.

Como se mencionó entre los fotodiodos habrá diferencias en la respuesta por lo que se probaron parejas de fotodiodos, contamos con 4 (FD1, FD2, FD3 y FD4), así fueron



identificados y marcados los fotodiodos, por lo que se probaron en parejas para así encontrar la pareja que tenga la respuesta más parecida, se encontró que los fotodiodos que fueron marcados como FD1 y FD2 tienen la respuesta más parecida, también se encontró que FD2 tiene una responsividad más cercana a 660 nm ya que tiene una mayor amplitud en su respuesta que FD1.

Como sabemos, las señales secundarias no tienen la misma potencia óptica debido a la proporción del divisor óptico no es exacto, por lo tanto contamos con 2 señales de diferente potencia óptica, fueron marcadas como F1 y F2 respectivamente, los fotodiodos adecuados fueron FD1 y FD2, ya que hay una diferencia en la responsividad, debido a esta diferencia y la diferencia en la potencia óptica no es necesario atenuar tanto una de las señales para alinear la amplitud de la respuesta de los fotodiodos, en este caso FD2 tiene la responsividad más cercana a 660 por lo tanto a este fotodiodo se conectó la fibra óptica con la potencia óptica más pequeña (F2). FD1 tiene la responsividad más alejada de 660 por lo tanto a este fotodiodo se le conectó la señal óptica con mayor potencia (F1). Debido a la diferencia en la responsividad de cada fotodiodo, la respuesta con la mayor amplitud, la entrega FD2 como se ve en la Figura 65, señal azul, aunque recibe una menor potencia óptica que el FD1 y esto es debido a que está más cercana a los 660nm.

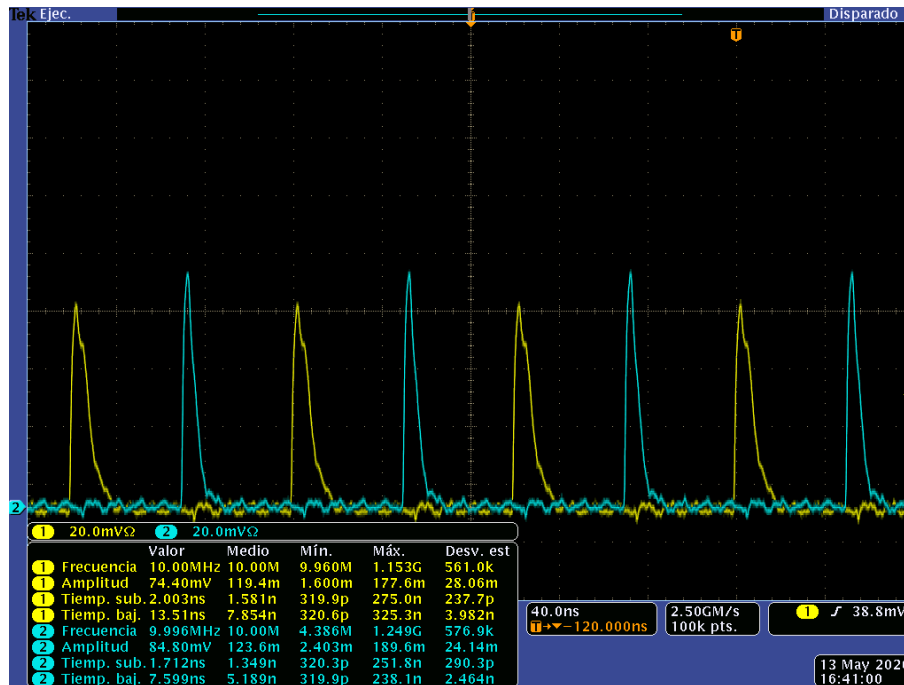


Figura 65. FDS02, Resp. Transitoria, señales secundarias, sin alinear amplitud.

A la salida de la fibra óptica del láser contamos con una potencia óptica medida de 83mW en constante. Se cuenta con las siguientes potencias ópticas en las fibras F1 = 16.9 mW y F2 = 15 mW

El láser se activa con un tren de pulsos con frecuencia de 10 MHz, Amp = 1.1 V, Offset = 600 mV y un ancho de pulso de 13.9 ns.

Lo siguiente es alinear las amplitudes de los FD, en este caso como FD2 tiene la responsividad más cercada a 660nm, este tiene la amplitud más grande, por lo tanto, se va a atenuar esta señal. Atenuaremos la señal separando un poco el lazo de fibra óptica de la conexión del divisor óptico, esto hace que cambie un poco el ángulo de incidencia en la punta de fibra provocando una atenuación ligera, cuanto más se separa del conector, la atenuación aumenta, se va separando hasta alinear la amplitud de FD2 con la del FD1 ya que este tiene la amplitud más pequeña Figura 66, cabe mencionar que los fotodiodos están polarizados un con un voltaje de 1 V. Una vez alineada la amplitud de la respuesta de ambos

fotodiodos, se obtuvieron las curvas V_{RL} Vs V_{bias} de ambos fotodiodos como se ve en la Figura 67, en esta gráfica se aprecia la curva de cada fotodiodo, cabe mencionar que se grafican juntas debido a que deseamos encontrar una región en la que ambos fotodiodos tengan el mismo comportamiento, ya que la respuesta de ambos debe ser igual o por lo menos muy parecida, también vemos en la Figura 67 que debido a la baja potencia óptica, contamos con una región lineal muy pequeña, a pesar que la responsividad de este fotodiodo es muy cercana a 660 nm, aun así dicha región es muy pequeña, lo que nos deja una región muy pequeña pero suficiente para muestrear algunas señales analógicas de poca amplitud.

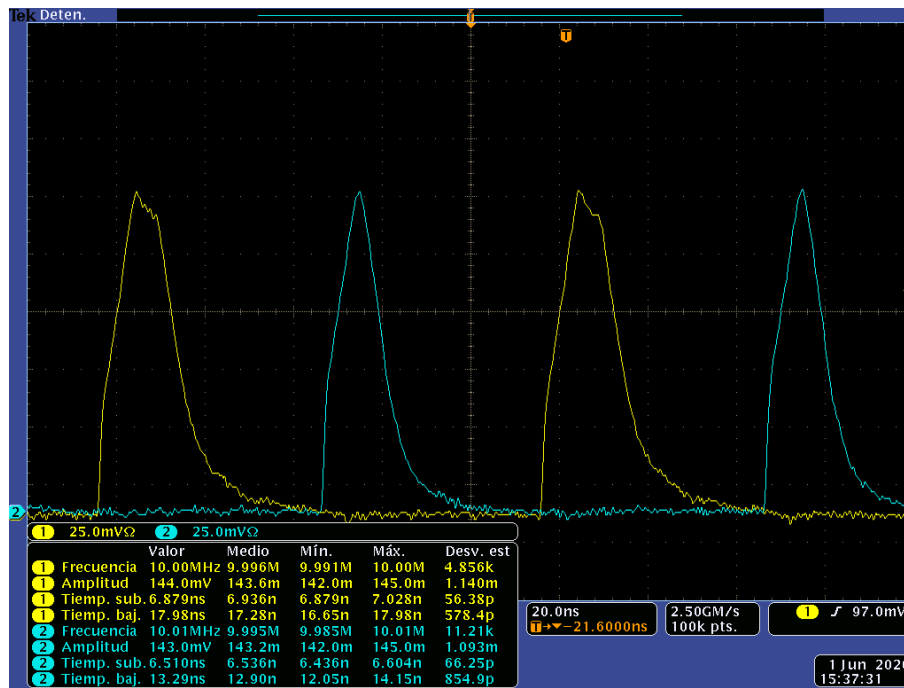


Figura 66. FDS02, Resp. Transitoria, señales secundarias, amplitud alineada.

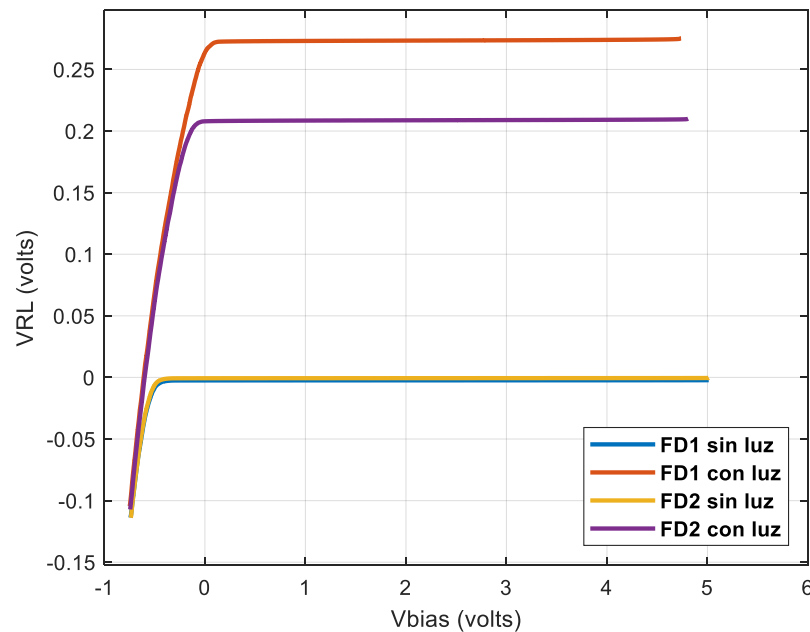


Figura 67. Curva V_{RL} Vs V_{bias} de fotodiodos a usar con el reloj óptico.

Mientras se realizaban las pruebas iniciales de la respuesta transitoria, utilizando el reloj óptico, se descubrió que la curva obtenida en la Figura 67 no concuerda con los datos medidos, cambió el comportamiento del fotodiodo, para este caso se está probando con una frecuencia de 10 MHz. Cuando se realizaron las pruebas iniciales se utilizó una frecuencia de 5 MHz, creemos que la frecuencia, así como el ancho de los pulsos cambió el comportamiento del fotodiodo.

Debido a esta diferencia se midió la curva V_{RL} Vs V_{bias} de una forma diferente, normalmente se obtienen las curvas manteniendo un haz constante en el fotodiodo y se varía el voltaje de polarización y así se obtienen los datos pero, con este método las curvas no concuerdan con las mediciones reales, se tuvo que obtener la curva con un método alternativo, para este método ya no se utiliza un haz constante sino usamos el tren de pulsos ópticos a la frecuencia deseada, en este caso 10 MHz y se varía manualmente el voltaje de polarización de un valor inicial y un valor final y se toman datos de la amplitud de la

respuesta del fotodiodo, se generan tablas con los datos y después se grafican (Figura 68), cabe mencionar que esto se obtuvo midiendo la amplitud de la respuesta de los fotodiodos, este método es más confiable debido a que la amplitud que estamos midiendo es la de los pulsos y con el otro método se alimenta el FD con un haz continuo, por lo que, las mediciones reales pueden diferir de la curva obtenida sin mencionar que la curva que se obtiene de forma tradicional es polarizando el FD con una señal triangular a muy baja frecuencia también por eso se cree que hay diferencia entre la curva que se obtiene de manera tradicional y la curva se obtiene de forma manual, pero estamos seguros que el comportamiento del fotodiodo es consistente con el segundo método para obtener la curva.

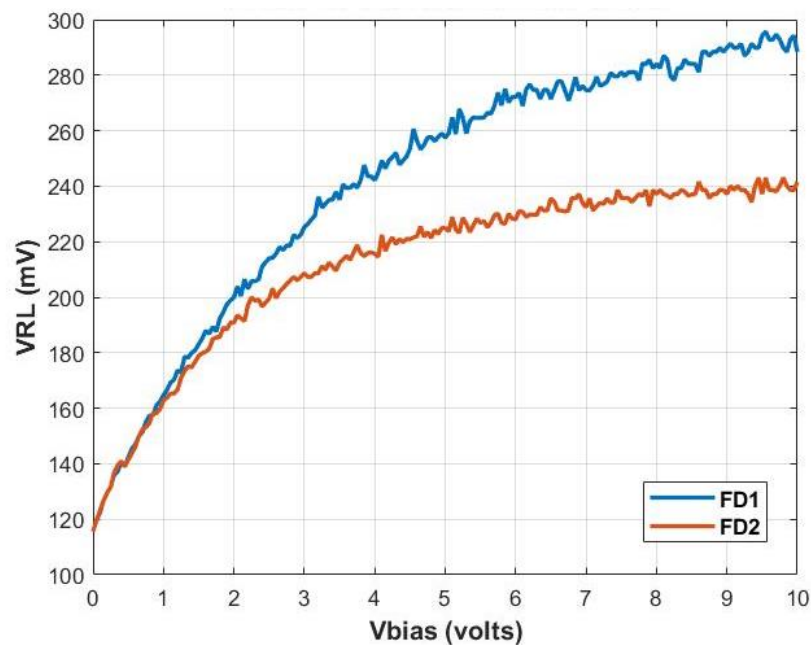


Figura 68. Curva V_{RL} Vs V_{bias} de fotodiodos utilizando nuevo metodo.

Si comparamos la Figura 67 y Figura 68, podemos ver que son curvas totalmente diferentes pero lo más importante es que en la Figura 68 tiene una región lineal muy grande, lo cual es bueno para la aplicación deseada, como se mencionó se cree que esto sucedió debido a la frecuencia y al ancho de pulso utilizado, después de analizar los datos y verificar



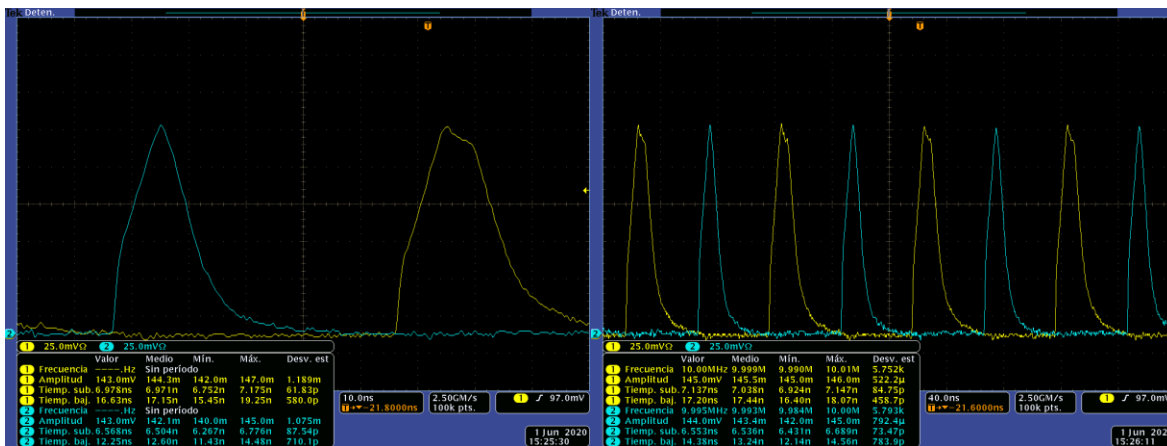
con las mediciones, la curva que se utilizará para el análisis de la respuesta transitoria y muestreo será la Figura 68.

En base a la curva obtenida (Figura 68) con el método alternativo y la alineación que se realizó, se encontró que contamos con un rango de 1 V que va desde 0 V hasta 1 V en el cual ambos fotodiodos tienen o generan una respuesta con la misma amplitud.

El punto de operación seleccionado para tomar datos de la respuesta transitoria y muestreo es con un V_{bias} de 500 mV y para el muestreo se hará con una señal senoidal con un V_{PP} de 1V a 350 KHz.

Analizando la respuesta transitoria con el punto de operación seleccionado, vemos que tiene un comportamiento como se esperaba, con $V_{bias} = 500 \text{ mV}$ hay una diferencia de 1.5mV entre las respuestas de los fotodiodos, lo cual era lo que se esperaba, provocado por las características intrínsecas de los fotodiodos pero, aun teniendo esta pequeña diferencia vemos en la Figura 69 que el tren de pulsos generados por ambos fotodiodos son muy buenos, además están casi perfectamente alineados, tenemos pulsos bien definidos y con un ancho de pulso pequeño además también están sincronizados, como ya sabíamos los tiempos de bajada de este fotodiodo son un poco lentos es por eso que la bajada de los pulsos tienen un comportamiento exponencial pero debido al ancho de pulso y la baja potencia óptica la respuesta del fotodiodo es mucho más rápida y la respuesta a 10 MHz es excelente pero si se pretende llevar a frecuencias más altas, este fotodiodo no podría responder, como vemos en la Figura 69B si se quisiera doblar la frecuencia una vez más, vemos que el pulso al ser insertado se empalmaría con los otros lo que provocaría que ya no tuviéramos un tren de pulsos sino una señal un poco extraña, es por esa razón, que para efectos de probar la teoría se tomó la decisión de aplicarlo de 20 MHz.

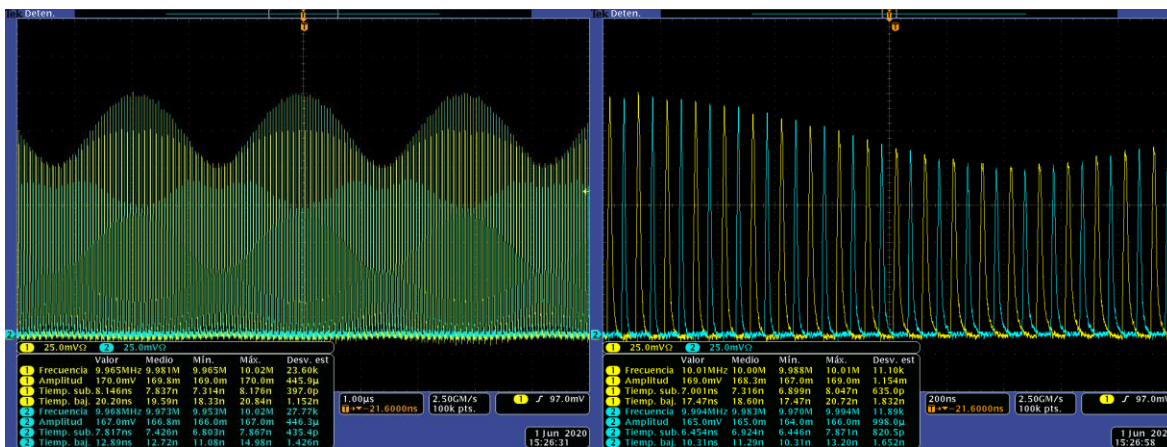
En cuanto al muestreo de la señal senoidal es muy buena, el punto máximo y el punto mínimo de cada fotodiodo están casi perfectamente alineados, se está muestreando en fases diferentes, cada fotodiodo muestrea a 10 MHz pero al final debido a que están desfasados tenemos un muestreo total de 20MHz, vemos en la Figura 70A que tenemos un tren de pulsos con un comportamiento senoidal muy bien definido, en la Figura 70B vemos como en el punto mínimo de la senoidal, el ancho del pulso incrementa un poco si los comparamos con los que están el punto máximo pero a pesar de ese pequeño detalle, tenemos un muy buen muestreo.



A)

B)

Figura 69. FDS02, Resp. trans. en fases diferentes con escala de tiempo en A) 10 ns y B) 40 ns.



A)

B)

Figura 70. FDS02, muestreo en fases diferentes con escala de tiempo en A) 1 μs y B) 200 ns.



En la Figura 70B podemos ver que el muestreo a 20 MHz es muy bueno pero si se deseara incrementar la frecuencia de muestreo, este fotodiodo ya no la soportaría debido a que el tiempo de descarga del fotodiodo es muy alto, este fotodiodo alcanzo su limite a 20 MHz, también se cuenta con los fotodiodos QPDI-40 y PD-850, los cuales ya se concluyó que tienen una respuesta muy rápida, lo tiempos de subida y bajada son muy rápidos pero el problema es que actualmente solo se cuenta con uno de cada uno por ese motivo es que no se utilizaron para muestrear en fases diferentes ya que se necesitaban dos, por esta razón se planea conseguir al menos un fotodiodo más del PD-850 para así poder muestrear en fases diferentes con este fotodiodo que sabemos que es el más rápido, al hacer esto abriría la posibilidad de incrementar aún más la frecuencia a la que se está muestreando, como ya vimos en el capítulo 3 la respuesta de este fotodiodo es muy rápida por lo que permitiría llegar a frecuencias del orden de 200 MHz, 400 MHz o incluso más.

Actualmente se está trabajando con un láser el cual debe ser activado con una señal eléctrica externa lo que implica que también debemos de tener un generador de funciones que entregue la señal deseada, lo que significa que si el generador o fuente no genera pulsos muy delgados no podremos tener el tren de pulsos ópticos deseado para doblar la frecuencia, sabemos que actualmente contamos un fotodiodo que es muy rápido y se planean comprar más. Con el generador que se tiene para activar el láser solo se puede generar un tren de pulsos óptico con un ciclo del 16% a 100 MHz, además el láser no está diseñado para generar pulsos tan delgados pero aun así se puede trabajar con esto, entonces el siguiente paso es conseguir un generador de funciones o algún dispositivo que pueda generar un tren de pulsos muy delgado a 100 MHz para así poder usar todo el ancho de banda del láser, en caso que al menos se consiga un dispositivo que genere pulsos con un ciclo de trabajo del 2% a 100 MHz nos permitiría doblar la frecuencia una o dos veces, se podría llegar a los 400 MHz.



Unos de los objetivos más importantes del trabajo a futuro que se planea realizar es conseguir un láser que sea autodisparado, sabemos que un láser de este tipo no necesita una señal externa para ser activado lo que eliminaría un dispositivo pero lo más importante es que con este tipo de láser genera pulsos muy delgados a frecuencias altas, la mayoría de estos láseres tienen una frecuencia fija por ejemplo, algunos trabajan a 100 MHz pero genera pulsos con un ancho de 100 fs, contar con un láser de este tipo nos permitiría doblar la frecuencias 5 o 6 veces o incluso más, como se mencionó uno de los principales objetivos es conseguir un láser de este tipo para así llevar el proyecto a una escala mayor pero durante ese transcurso de tiempo hay algunas pruebas nuevas que se pueden realizar con el equipo que se tiene actualmente y una de ellas como ya se menciono es comprar y utilizar el fotodiodo PD-850 y llevar este fotodiodo una frecuencia de muestreo de al menos 200 MHz.

Con el equipo que se tiene actualmente fue suficiente para probar la teoría y se obtuvieron muy buenos resultados los cuales se presentaron en este documento, pero cabe mencionar que con el equipo adecuado específicamente láser y fotodiodos adecuados el alcance o magnitud de este proyecto es muy grande ya que el objetivo es llegar a muestrear en el orden de GHz o incluso más.



Referencias

- [1] M. Caulton, A. Rosen, P. Stabile y A. Gombar, «P-I-N Diodes for Low-Frequency High-Power Switching Applications,» *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 30, nº 6, pp. 875-885, 1982.
- [2] R. Caverly y G. Hiller, «Establishing the minimum reverse bias for a p-i-n diode in a high-power switch,» *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 38, nº 12, pp. 1938 - 1943, 1990.
- [3] G. Hiller y R. Caverly, «The reverse bias requirement for pin diodes in high power switches and phase shifters,» Dallas, TX, USA, 1990.
- [4] C. Villa, I. O. Hernandez, R. Villa y E. Donkor, «Frequency spurious aversion by minimal reverse bias selection of a high-speed optically triggered sampling circuit based on a positive–intrinsic–negative photodiode,» *Applied Optics*, vol. 51, nº 22, pp. 5412 - 5418, 2012.
- [5] R. H. Walden, «Analog-to-Digital Conversion in the Early Twenty-First Century,» *Wiley Encyclopedia of Computer Science and Engineering*, 2008.
- [6] G. C. Valley, «Photonic analog-to-digital converters,» *Optics Express*, vol. 15, nº 5, pp. 1955 - 1982, 2007.
- [7] A. Khilo, S. J. Spector, M. E. Grein, A. H. Nejadmalayeri, C. W. Holzwarth, M. Y. Sander, M. S. Dahlem, M. Y. Peng, M. W. Geis, N. A. DiLello, J. U. Yoon, A. Motamedi, J. S. Orcutt, J. P. Wang y M. Cheryl, «Photonic ADC: overcoming the bottleneck of electronic jitter,» *Optics Express*, vol. 20, nº 4, pp. 4454 - 4469, 2012.
- [8] C. Villa, P. Kumavor y E. Donkor, «Demonstration of a Self-Synchronized Polyphase Sampling and Demultiplexing Scheme for Radio-Frequency Analog Signals,» *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 20, nº 6, pp. 452 - 454, 2008.
- [9] C. Villa-Angulo, I. O. Hernandez-Fuentes, R. Villa-Angulo, S. E. Ahumada-Valdez, R. A. RamosIrigoyen y E. Donkor, «Implementation of a 10.24 GS/s 12-bit Optoelectronics Analog-to-Digital Converter Based on a Polyphase Demultiplexing Architecture,» *Journal of Applied Research and Technology*, vol. 11, nº 1, pp. 115 - 123, 2013.
- [10] C. Villa, P. Kumavor y E. Donkor, «Optoelectronics Encoder for a 12-bit 1.28-GSPS Analog-to-Digital Converter,» *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 21, nº 17, pp. 1238 - 1240, 2009.
- [11] C. Villa-Angulo, I. O. Hernandez-Fuentes, R. Villa-Angulo y E. Donkor, «Bit-Resolution Improvement of an Optically Sampled Time-Interleaved Analog-to-Digital Converter Based on Data Averaging,» *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 61, nº 4, pp. 1099 - 1104, 2012.



- [12] I. O. Hernández-Fuentes, C. Villa-Angulo, R. Villa-Angulo y E. Donkor, «Linear Operation Range for an Optically Triggered Switch Based on a p-i-n Photodiode,» *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 26, nº 18, pp. 1813 - 1816, 2014.
- [13] I. O. Hernández Fuentes, Desarrollo de técnicas para la caracterización de dispositivos de conmutación rápida con activación óptica basados en fotodiodos tipo PIN, Editorial UABC, 2019.
- [14] J.-M. Liu, *Photonic Devices*, Cambridge University Press, 2005.
- [15] J.-P. Goure and I. Verrier, *Optical Fibre Devices*, Institute of Physics, 2002.
- [16] C. A. Balanis, *Advanced Engineering Electromagnetics*, John Wiley & Sons, Inc., 2012.