UNIVERIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

MÉTODOS AVANZADOS PARA LA MEDIDA DE LA DISPERSIÓN CROMÁTICA A FRECUENCIAS ÓPTICAS

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

presentado ante la

UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO

como parte de los requisitos para optar al título de

INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES

REALIZADO POR	Sarabia Díaz, Eugenia Teresa
PROFESOR GUIA	Stefanelli, María Cristi
TUTOR UPC	Santos Blanco, María Concepción
FECHA	Caracas, Febrero de 2012

UNIVERIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

MÉTODOS AVANZADOS PARA LA MEDIDA DE LA DISPERSIÓN CROMÁTICA A FRECUENCIAS ÓPTICAS

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

presentado ante la

UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO

como parte de los requisitos para optar al título de

INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES

REALIZADO POR	Sarabia Díaz, Eugenia Teresa
PROFESOR GUIA	Stefanelli, María Cristi
TUTOR UPC	Santos Blanco, María Concepción
FECHA	Caracas, Febrero de 2012

UNIVERIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

MÉTODOS AVANZADOS PARA LA MEDIDA DE LA DISPERSIÓN CROMÁTICA A FRECUENCIAS ÓPTICAS

Este Jurado; una vez realizado el examen del presente trabajo ha evaluado su contenido con el resultado: Veinte puntos (20)

JURADO EXAMINADOR

Firma: Nombre: Mayra Narváez | Firma: Nombre: María Cristi Stefanelli | Firma: Nombre: Nicola Baronaino

REALIZADO POR	Sarabia Díaz, Eugenia Teresa
PROFESOR GUIA	Stefanelli, María Cristi
TUTOR UPC	Santos Blanco, María Concepción
FECHA	Caracas, Febrero de 2012

MÉTODOS AVANZADOS PARA LA MEDIDA DE LA DISPERSIÓN CROMÁTICA A FRECUENCIAS ÓPTICAS

Sarabia Díaz, Eugenia Teresa
eugenia_sarabia@yahoo.com

Actualmente los sistemas de transmisión usan como medio de transporte un híbrido cobre-fibra, pero se espera que en un futuro sea únicamente fibra óptica. El mayor inconveniente en la utilización de fibra óptica es que genera dispersión cromática, que deteriora la tasa de error y limita la capacidad de transmisión. Se plantea estudiar 4 métodos avanzados para la medida de la dispersión cromática a frecuencias ópticas basados en la modulación en radiofrecuencia de la señal portadora óptica. Primero se estudia el fenómeno de dispersión, y como observar su efecto sobre la fase y envolvente de la onda. Luego, el funcionamiento, configuración y modos del modulador Mach-Zehnder, fundamental para los métodos, este realiza la modulación de radiofrecuencia. Primeros los métodos convencionales: ***Modulation Phase Shift Method*** y Peucheret, que obtienen la dispersión a través de información contenida en la fase y amplitud, respectivamente, de la señal modulada. Estos 2 métodos usan el modulador en modo Push-Pull. Los métodos nuevos a introducir: ***Assymmetric Bias Controlled Method*** y ***RadioFrequency Scan*** se diferencian principalmente porque utilizan el modulador en modo Asimétrico, obtienen la información para el cálculo de la dispersión en la amplitud (ABCM) de la señal modulada, y RF-SCAN usa la amplitud y la fase para obtener medidas más precisas. MPSM es rápido, sencillo, pero la inexactitud de los saltos del láser introduce errores. ABCM requiere un largo tiempo de ejecución, y existe una relación entre la frecuencia RF que se utiliza y la precisión del delta de bias en el que se producen los mínimos de la función que afecta la calidad de la medición. Para RF-Scan se idealizó la señal y los desfasajes que producen en las bandas laterales, permitiendo un código de ubicación de ceros sencillo, pero el cálculo de la dispersión se realizó como si se hubiese desarrollado RF-Scan en el laboratorio.

Palabras Claves: Fibra óptica, Dispersión cromática, Mach-Zenhder, *Modulation Phase Shift Method*, *Assymmetric Bias Controlled Method*, Peucheret, *RadioFrequency Scan*,.

Dedicatoria

Este trabajo se lo dedico a mis padres, Marco y Teresa, a mi hermanito, Marco Luis, a mis abuelos: Marcos, Evelia, Corazón y mi Yeyita, a mi familia Sarabia Núñez, a mi familia Díaz Fernández y a todos mis amigos.

Agradecimientos

Gracias Dios mío, por seleccionar para mi unos padres y hermano especiales que con su amor, firmeza y acierto guiaron mis primeros pasos, e iluminados del Espíritu Santo supieron escoger las primeras aulas de mi formación académica que ahora culmino en la Universidad Católica Andrés Bello y en la Universitat Politècnica de Catalunya, baluartes de sabiduría, moral y justicia. Me permito mirar hacia atrás, y agradezco a las maestras de mi preescolar Las Aves, a mi colegio Champagnat y los Hermanos Maristas por su dedicación. Gracias a mis padres y a mi hermano, gracias a mis abuelos: Marcos, Evelia, Corazón y mi Yeyita, a mi familia Sarabia Núñez y a mi familia Díaz Fernández que me auparon con su mirada amorosa. A todos mis amigos, Ale, las Sillies y los 5 que siempre seremos 6, que siempre me acompañaron incluso mientras estuve lejos.

Muchísimas Gracias a la Ingeniero María Concepción Santos Blanco. Conchi gracias por la paciencia, comprensión, dedicación y ayuda que me brindaste durante la realización de este Proyecto Final de Carrera.

Índice General

Dedicatoria ix

Agradecimientos x

Índice General xi

Índice de Figuras xiv

Índice de Tablas xvii

Introducción xviii

Capítulo I 1

Planteamiento del Proyecto 1

I.1.- Planteamiento del Problema 1

I.2.- Objetivos del Proyecto 1

I.2.1.- Objetivo General 1

I.2.2.- Objetivos Específicos 2

I.3.- Alcance del Proyecto 2

I.4.- Limitaciones del Proyecto 3

I.5.- Justificación 3

Capítulo II 4

Marco Referencial 4

II.1.- Dispersión Cromática 4

II.2.- Modulador Mach-Zehnder 7

II.3.- Métodos de Medida Convencionales 12

II.3.1.- Modulation Phase Shift Method (MPSM) 13

II.3.2.- Método de Peucheret 15

II.4.- Métodos de Medida Nuevos 17

II.4.1.- Asymmetric Bias Controlled Method (ABCM) 19

II.4.2 RF-SCAN 21

Capítulo III 24

Metodología y Desarrollo 24

III.1.- Investigación teórica 24

III.2.- Desarrollo matemático 25

III.3.- Desarrollo práctico 25

III.4.- Simulación 26

Capítulo IV 27

Resultados 27

IV.1.- Modulador Mach-Zehnder 27

IV.2.- MPSM 33

IV.3.- ABCM 44

IV.4.- RF SCAN 52

Capítulo V 56

Conclusiones y Recomendaciones 56

BIBLIOGRAFÍA 59

APÉNDICES 60

Apéndice A - Análisis Matemático Modulador Mach-Zehnder 61

Apéndice B - Análisis Matemático Modulador Mach-Zehnder particularización para modo Push-Pull: 63

Apéndice C - Análisis Matemático Modulador Mach-Zehnder particularización para modo Asimétrico 66

Apéndice D – Código MATLAB para obtener la Función de Transferencia del modulador 69

Apéndice E – Código MATLAB de MPSM 75

Apéndice F – Código MATLAB de ABCM 84

Apéndice G – Código MATLAB de RF-SCAN 95

ANEXOS 102

Anexo A – Código MATLAB de otras funciones 103

Índice de Figuras

Figura 1 - Efecto de la dispersión cromática 4

Figura 2- Esquema del modulador Mach-Zehnder 8

Figura 3- Parámetros del modulador Mach-Zehnder 10

Figura 4 - Espectro RF-SCAN 23

Figura 5- Metodología empleada 24

Figura 6 - Montaje para obtener la función de transferencia 27

Figura 7 - Función de transferencia del modulador, en uW, en modo Asimétrico usando la entrada 1 29

Figura 8 - Función de transferencia del modulador, en dBm, en modo Asimétrico usando la entrada 1 30

Figura 9 - Función de transferencia del modulador, en uW, en modo Asimétrico usando la entrada 2 31

Figura 10 - Función de transferencia del modulador, en dBm, en modo Asimétrico usando la entrada 2 31

Figura 11- Función de transferencia del modulador, en uW, en modo Push-Pull 32

Figura 12 - Función de transferencia del modulador, en dBm, en modo Push-Pull ... 33

Figura 13 - Montaje usado para MPSM 34

Figura 14 - Carrete 1, fase medida sin DUT 36

Figura 15 – Carrete 1, fase medida con DUT 36

Figura 16 - Carrete 1, fase calibrada 37

Figura 17 - Carrete 1, retardo de grupo 37

Figura 18 - Carrete 1, dispersión calculada 38

Figura 19 - Carrete 2, fase medida sin DUT 39

Figura 20 - Carrete 2. fase medida con DUT 39

Figura 21 - Carrete 2, fase calibrada 40

Figura 22 - Carrete 2, retardo de grupo 40

Figura 23 - Carrete 2, dispersión calculada 41

Figura 24 - Carrete 3, fase medida sin DUT 42

Figura 25 - Carrete 3, fase medida con DUT 42

Figura 26 - Carrete 3, fase calibrada 43

Figura 27 - Carrete 3, retardo de grupo 43

Figura 28 - Carrete 3, dispersión calculada 44

Figura 29 - Montaje usado para ABCM 45

Figura 30 - Carrete 1, amplitud medida sin DUT 47

Figura 31 - Carrete 1, amplitud medida con DUT 47

Figura 32 - Carrete 1, amplitudes medidas con ABCM 48

Figura 33 - Carrete 2, amplitud medida sin DUT 49

Figura 34 - Carrete 2, amplitud medida con DUT 49

Figura 35 - Carrete 2, amplitudes medidas con ABCM 50

Figura 36 - Carrete 3, amplitud medida sin DUT 51

Figura 37 - Carrete 3, amplitud medida con DUT 51

Figura 38 - Carrete 3, amplitudes medidas con ABCM 52

Figura 39 - Retardo de grupo calculado con RF-SCAN 54

Figura 40 - Dispersión calculada con RF-SCAN 55

Índice de Tablas

Tabla 1- Valores iniciales para obtener la función de transferencia 28

Tabla 2 - Parámetros del modulador en modo Asimétrico usando la entrada 1 29

Tabla 3- Parámetros del modulador en modo Asimétrico usando la entrada 2 30

Tabla 4- Parámetros del modulador en modo Push-Pull 32

Tabla 5 - Parámetros del modulador en modo Push-Pull usado en MPSM 34

Tabla 6 - Valores iniciales para MPSM 35

Tabla 7 - Valores iniciales del laser y parámetros del modulador Asimétrico para ABCM 45

Tabla 8 - Valores iniciales para ABCM 46

Capítulo I

Planteamiento del Proyecto

I.1.- Planteamiento del Problema

El auge de la fibra óptica como medio de transmisión, y su creciente implementación requiere que se estudie los factores que afectan a las señales transmitidas por fibra. Un inconveniente de trabajar con fibra óptica es que esta introduce o genera dispersión cromática, la cual degrada la calidad de la trasmisión, ya que deteriora la tasa de error y la capacidad de transmisión.

La dispersión cromática puede, y debe, compensarse, pero para esto primero debe conocerse el valor a compensar, por lo que se requiere estudiar métodos para la medición de la dispersión cromática a frecuencias ópticas. En este Proyecto Final de Carrera se estudiarán métodos avanzados, de los cuales 2 son convencionales y se introducirán 2 métodos nuevos.

I.2.- Objetivos del Proyecto

I.2.1.- Objetivo General

Estudiar el funcionamiento del modulador Mach-Zehnder y estudiar, tanto teórica como prácticamente, 4 métodos avanzados para la medida de la dispersión cromática a frecuencias ópticas: los métodos convencionales (MPSM y Peucheret), y 2 métodos nuevos a introducir (ABCM y RF-SCAN).

I.2.2.- Objetivos Específicos

Comprender el funcionamiento de un elemento fundamental en los métodos a estudiar, el modulador Mach-Zehnder.

Estudiar el funcionamiento del método MPSM.

Realizar medidas de dispersión con el método MPSM en el laboratorio.

Estudiar el funcionamiento del método de Peucheret.

Estudiar el funcionamiento del método ABCM, su relación con el método de Peucheret y diferencia.

Realizar medidas de dispersión con el método ABCM en el laboratorio.

Estudiar el funcionamiento del método RF-SCAN, su relación con los métodos MPSM y ABCM.

Comprobar el funcionamiento del método RF-SCAN simulándolo a través de Matlab, de forma idealizada.

I.3.- Alcance del Proyecto

Estudiar el funcionamiento del modulador Mach-Zehnder. Estudiar y comprender el funcionamiento de los 4 métodos avanzados para la medida de la dispersión cromática a nivel teórico, considerando solo el caso de la señal sin sufrir distorsiones de amplitud. Comprobar prácticamente en el laboratorio el funcionamiento de los métodos MPSM y ABCM. Comprobar, mediante una

simulación idealizada, el funcionamiento del método RF-SCAN. Analizar las similitudes y diferencias entre los diferentes métodos.

I.4.- Limitaciones del Proyecto

El proyecto no incluye el estudio teórico ni práctico de los métodos considerando distorsiones de amplitud en la señal luego de pasar por un dispositivo dispersivo. Tampoco incluye la comprobación práctica en el laboratorio del método de Peucheret ni el método RF-SCAN. Este último solo se simulará mediante el uso del programa Matlab de forma idealizada.

I.5.- Justificación

Los sistemas de Transmisión que utilizan fibra óptica deben compensar la dispersión cromática, para evitar los inconvenientes que esta genera, como la disminución de la capacidad y deterioro de la tasa-de error. Para compensar la dispersión cromática, esta debe ser medida primero. Además el estudio de estos métodos, es introductorio al desarrollo de nuevos métodos, de los métodos tradicionales (MPSM y Peucheret) se desprende la idea de utilizar el modulador en otro modo para obtener los métodos nuevos (ABCM y RF-SCAN).

Este trabajo pertenece a la línea de investigación del Departamento de Comunicaciones y Teoría de Señales de la UPC, el cual dirige la Ingeniero Santos Blanco, con la finalidad de estudiar los métodos convencionales, que utilizan el modulador en modo Push-Pull, y estudiar métodos poco comunes, o nuevos, los cuales utilizan el modulador en modo Asimétrico.

Capítulo II

Marco Referencial

II.1.- Dispersión Cromática

Las señales ópticas sufren alteraciones a medida que viajan por la fibra, entre las alteraciones que sufren una de las más perjudiciales es la dispersión cromática, ya que causa un ensanchamiento en los pulsos transmitidos y puede causar que se superpongan pulsos continuos, deteriorándose la tasa de error, y ocasionando una limitación en la capacidad de transmisión.

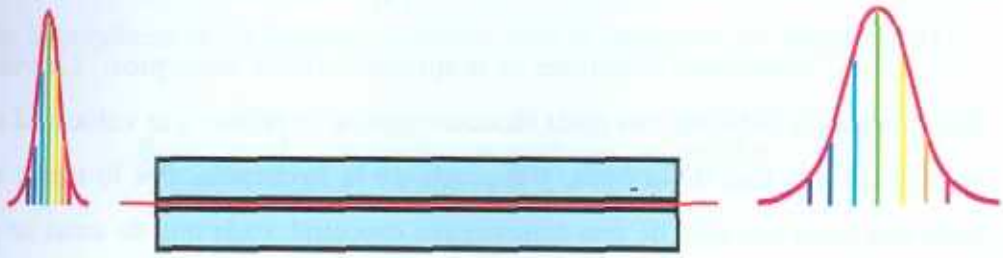

Figura 1 - Efecto de la dispersión cromática

Fuente: [5]

Para comprender mejor el fenómeno de dispersión cromática es necesario conocer los conceptos de velocidad de fase, retardo de grupo y velocidad de grupo.

$$F_{out}(\omega) = F_{in}(\omega) \cdot e^{-j\beta(\omega)z} \cdot e^{-jaz}$$

(1)

En la ecuación 1, se generaliza una señal que ha sido transmitida. $F_{in}(\omega)$ es la transformada de Fourier de la señal de entrada, $\beta(\omega)$ es la constante de fase del modo

de propagación fundamental, considerando propagación monomodal; y por último, e^{-jaz} representa la atenuación que sufre la señal. [1]

$$\beta(\omega) = \beta(\omega_0) + (\omega - \omega_0)\left.\frac{\partial\beta}{\partial\omega}\right|_{\omega_0} + \frac{(\omega - \omega_0)^2}{2}\left.\frac{\partial^2\beta}{\partial\omega^2}\right|_{\omega_0}$$

(2)

La ecuación 2, es el resultado de obtener la serie de Taylor de $\beta(\omega)$, si se asume que $\omega - \omega_0 \ll \omega_0$, entonces se pueden ignorar los factores de tercer orden y mayores. Esta ecuación es también común encontrarla en la forma de la ecuación 3: [1]

$$\beta(\omega) = \beta_0 + (\omega - \omega_0)\beta_1 + \frac{(\omega - \omega_0)^2}{2}\beta_2$$

(3)

De las ecuaciones anteriores se desprenden varios conceptos. La velocidad de fase, cuando se habla de una onda monocromática, se refiere a la velocidad con la que se propaga una fase de la onda, y depende de la frecuencia. Por lo tanto, cuando se tiene una onda con más de una componente espectral, cada una de estas se propaga a una velocidad diferente según su frecuencia. La velocidad de fase está relacionada con el primer término de la ecuación 3, mostrada anteriormente. [2]

$$\beta_0 = \left.\frac{2\pi}{\lambda}\right|_{\omega_0} = \left.\frac{2\pi f}{v_f}\right|_{\omega_0} = \left.\frac{\omega}{v_f}\right|_{\omega_0} = \frac{\omega_0}{v_f}$$

(4)

$$v_f = \frac{\omega_0}{\beta_0}$$

(5)

La velocidad de grupo es la velocidad con la cual se ha propagado la envolvente de la señal, no tiene porqué coincidir con la velocidad de fase. Las variaciones de esta velocidad ocasionan un retraso en la envolvente de la señal, conocido como retardo de grupo. La velocidad de grupo está relacionada con el segundo término de la ecuación 3, mostrada anteriormente. [2]

$$\beta_1 = \tau_g = \frac{1}{v_g} = \left.\frac{\partial\beta}{\partial\omega}\right|_{\omega_0}$$

(6)

$$v_g = \frac{1}{\tau_g} = \left(\left.\frac{\partial\beta}{\partial\omega}\right|_{\omega_0}\right)^{-1}$$

(7)

Si se realizara una gráfica de retardo de grupos para diferentes longitudes de onda, la pendiente de la función resultante sería el parámetro de dispersión (D).

$$\beta_2 = \left.\frac{\partial^2\beta}{\partial\omega^2}\right|_{\omega_0} = \left.\frac{\partial\beta_1}{\partial\omega}\right|_{\omega_0} = \frac{\partial\lambda}{\partial\omega}\left(\frac{\partial\beta_1}{\partial\lambda}\right) = \frac{\partial\lambda}{\partial\omega}D = -\frac{2\pi c}{\omega^2}$$

(4)

$$D = -\frac{2\pi c}{\lambda^2}\beta_2$$

(9)

Se distinguen 2 tipos de dispersión:

<u>Dispersión Modal o Intermodal</u>:

Ocurre en fibras multimodo, donde cada haz de luz viaja en un modo diferente, recorriendo un camino y distancia distinta, por lo tanto llegan al receptor en tiempos

diferentes. La dispersión intermodal depende del perfil de refracción de la fibra dentro y fuera del núcleo. [1]

Dispersión Cromática o Intramodal:

Es la variación en la velocidad de propagación según la longitud de onda en la energía acoplada a un modo concreto de propagación. Ocurre tanto en fibras monomodo como multimodo, y consiste en que los distintos componentes espectrales de la señal transmitida se retrasan respecto a los demás. Este tipo de dispersión es causado por:

Dispersión por material: La no homogeneidad de la fibra, el índice de refracción de la fibra varía en función de la longitud de onda. [1]

Dispersión por la guía de onda: Se refiere a la variación de la velocidad de propagación según la longitud de onda para un modo en particular, se refiere a que la señal óptica viaja más rápido en la cubierta que en el núcleo de la fibra, se sabe que el núcleo no encierra el 100% de la señal y siempre un porcentaje de esta se propaga al resto de la fibra, este porcentaje depende de la longitud de onda. [1]

II.2.- Modulador Mach-Zehnder

El modulador Mach- Zehnder, muy usado en comunicaciones ópticas, es un modulador electro/óptico para altas tasas digitales y transmisión de RF. Se basa en el efecto Pockels, donde el índice de refracción del medio es modificado de acuerdo a un voltaje aplicado, lo cual produce un cambio de fase por interferencia interferométrica, que en el campo óptico se transforma a una modulación de amplitud. [3]

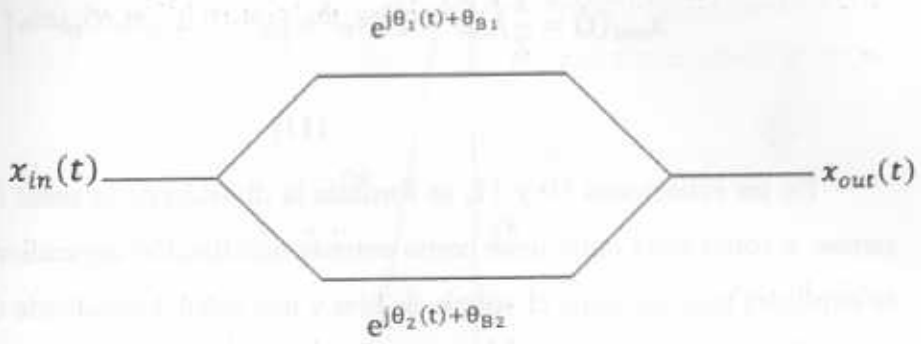

Figura 2- Esquema del modulador Mach-Zehnder

Fuente-: Propia

En general, el modulador, matemáticamente puede ser descrito de la siguiente forma:

$$x_{out}(t) = \frac{1}{2} A_0 e^{j\omega_0 t} e^{j\phi_0} \left[e^{j\frac{\pi}{V_{\pi 1}} V_1(t)} e^{j\frac{\pi}{V_{\pi 1}} V_{B1}} + e^{j\frac{\pi}{V_{\pi 2}} V_2(t)} e^{j\frac{\pi}{V_{\pi 2}} V_{B2}} \right]$$

(10)

Al realizarse las siguientes sustituciones, se obtiene la ecuación 11.

$$\theta_1(t) = \frac{\pi}{V_{\pi 1}} V_1(t) \qquad \theta_{B1} = \frac{\pi}{V_{\pi 1}} V_{B1}$$

$$\theta_2(t) = \frac{\pi}{V_{\pi 2}} V_2(t) \qquad \theta_{B2} = \frac{\pi}{V_{\pi 2}} V_{B2}$$

$$\Delta\theta_B = \theta_{B2} - \theta_{B1}$$

$$x_{out}(t) = \frac{1}{2}A_0 e^{j\omega_0 t} e^{j\phi_0} e^{j\theta_{B1}} \left[e^{j\theta_1(t)} + e^{j\theta_2(t)} e^{j\Delta\theta_B}\right]$$

(11)

En las ecuaciones 10 y 11, se formula la división de la señal óptica entre las 2 ramas, y como cada rama tiene como entrada una función dependiente de V_π, el cual se explicara más adelante, el voltaje de bias y una señal dependiente del tiempo.

Por aproximación Small-Signal, ecuación 12, y desarrollando, usando las sustituciones indicadas, se obtiene la ecuación 13:

$$x_{out}(t) = \frac{1}{2}A_0 e^{j\omega_0 t} e^{j\phi_0} e^{j\theta_{B1}} \left[1 + j\theta_1(t) - \frac{{\theta_1}^2(t)}{2} + e^{j\Delta\theta_B}\left(1 + j\theta_2(t) - \frac{{\theta_2}^2(t)}{2}\right)\right]$$

(12)

$$\theta_1(t) = \frac{\pi}{V_{\pi 1}} V_{RF1} \cos(\omega_{RF} t) \qquad \theta_{RF1} = \frac{\pi}{V_{\pi 1}} V_{RF1}$$

$$\theta_2(t) = \frac{\pi}{V_{\pi 2}} V_{RF2} \cos(\omega_{RF} t) \qquad \theta_{RF2} = \frac{\pi}{V_{\pi 2}} V_{RF2}$$

$$x_{out}(t) = \frac{1}{2}A_0 e^{j\omega_0 t} e^{j\phi_0} e^{j\theta_{B1}} e^{j\frac{\Delta\theta_B}{2}} \left[2\cos\left(\frac{\Delta\theta_B}{2}\right) + j\cos(\omega_{RF} t)\left(e^{-j\frac{\Delta\theta_B}{2}}\theta_{RF1} + e^{j\frac{\Delta\theta_B}{2}}\theta_{RF2}\right) - \cos^2(\omega_{RF} t)\left(e^{-j\frac{\Delta\theta_B}{2}}\frac{{\theta_{RF1}}^2}{2} + e^{j\frac{\Delta\theta_B}{2}}\frac{{\theta_{RF2}}^2}{2}\right)\right]$$

(13)

El modulador Mach-Zehnder tiene 3 valores que lo caracterizan, los cuales se pueden observar en su función de transferencia:

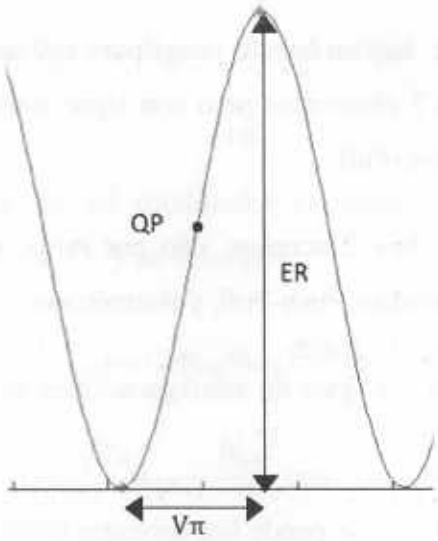

Figura 3- Parámetros del modulador Mach-Zehnder

Fuente: Propia

Voltaje de media onda, V_π: Es la diferencia entre los voltajes que generan los puntos de máxima y mínima potencia en la función de transferencia. Está relacionado con la eficiencia del modulador, ya que mientras más bajo sea, quiere decir que necesita menos tensión para conseguir un desfasaje de 180° entre las ramas. [3]

Punto de cuadratura, QP: Es el valor de voltaje donde la relación entre la potencia de salida y la tensión aplicada a los ramas se comporta de forma lineal en un margen de tensiones cercano, se corresponde con la mitad del voltaje de media onda. [3]

Extinction ratio, ER: Es relación entre la potencia máxima y mínima de la función de transferencia. Idealmente, si la señal se dividiese por igual en ambas ramas sería infinito. [3]

El modulador Mach-Zehnder tiene 2 posibles configuraciones:

Single Drive: hay un acceso único para ambas ramas, la señal eléctrica afec de igual forma los 2 electrodos pero con signo contrario. Con esta configuración trabaja en modo Push-Pull.

Dual Drive: hay 2 accesos, uno por rama, con esta configuración se pu trabajar en varios modos: Push-Pull, y Asimétrico.

De acuerdo a los tipos de configuraciones se puede trabajar en los siguien modos:

Modo Push-Pull: Se puede implementar tanto con configuraciones single con dual drive, las fases en cada rama cambian en igual magnitud pero en signo contrari de tal forma que la señal modulada será sin modulación de frecuencia.

$$\theta_{RF1} = -\theta_{RF2} = \theta_{RF}$$

(14)

Para obtener la ecuación del modulador en modo Push-Pull se realiza particularización de la ecuación 13, y se consigue:

$$x_{out}(t) = \frac{1}{2} A_0 e^{j\omega_0 t} e^{j\phi_0} e^{j\theta_{B1}} e^{j\frac{\Delta\theta_B}{2}} \left[2\cos\left(\frac{\Delta\theta_B}{2}\right) + 2\cos(\omega_{RF}t)\theta_{RF}\sin\left(\frac{\Delta\theta_B}{2}\right) - \cos^2(\omega_{RF}t)\theta_{RF}{}^2\cos\left(\frac{\Delta\theta_B}{2}\right)\right]$$

(15)

Modo Asimétrico: Solo se consigue con una configuración dual drive, la señ eléctrica o moduladora se aplica en solo una de las ramas del modulador, por lo tan solo una rama es modulada y en la otra se mantiene la portadora sin ningún cambi de fase.

$$\theta_{RF1} = \theta_{RF} \quad \theta_{RF2} = 0$$

(16)

Para obtener la ecuación del modulador en modo Asimétrico se realiza la particularización de la ecuación 13, y se consigue:

$$x_{out}(t) = \frac{1}{2} A_0 e^{j\omega_0 t} e^{j\phi_0} e^{j\theta_{B1}} e^{j\frac{\Delta\theta_B}{2}} \left[2\cos\left(\frac{\Delta\theta_B}{2}\right) + j\cos(\omega_{RF}t)\, e^{-j\frac{\Delta\theta_B}{2}} \theta_{RF} - \frac{{\theta_{RF}}^2}{2} \cos^2(\omega_{RF}t) e^{-j\frac{\Delta\theta_B}{2}} \right]$$

(17)

II.3.- Métodos de Medida Convencionales

Todos los métodos a describirse consisten inicialmente en modular una señal óptica (portadora) con una señal de RF (moduladora) que es un tono sinodal a una frecuencia fija. Esta señal modulada atraviesa un dispositivo dispersivo, y es captada por un receptor óptico y se devuelve al dominio eléctrico para captar su envolvente y fase.

El dispositivo dispersivo, o DUT (*Dispositive Under Study,* como se le llamará a partir de ahora), tiene como respuesta frecuencial la descrita en la ecuación 18, y genera cambios de fase en las bandas laterales de la señal modulada, en estos cambios de fase se enfocan los métodos para calcular el parámetro de dispersión, los métodos utilizan la semisuma y semidiferencia entre los desfasajes causados a la banda lateral superior e inferior, como se indica en las ecuaciones 19 y 20.

$$F(\omega) = e^{j\phi(\omega)}$$

(18)

$$\frac{\Sigma\phi}{2} = \frac{\phi^{+} + \phi^{-}}{2}$$

(19)

$$\frac{\Delta\phi}{2} = \frac{\phi^{+} - \phi^{-}}{2}$$

(20)

II.3.1.- Modulation Phase Shift Method (MPSM)

En el caso particular del MPSM, la modulación se realiza con un modulador externo, en este caso un modulador Mach-Zehnder en modo Push-Pull. Luego de atravesar el DUT, la ecuación 15 vista previamente sufre el efecto dispersivo del DUT:

$$x_{out}(t) = \frac{1}{2} A_0 e^{j\omega_0 t} e^{j\phi_0} e^{j\theta_{B1}} e^{j\frac{\Delta\theta_B}{2}} \left[2\cos\left(\frac{\Delta\theta_B}{2}\right) + \theta_{RF} \sin\left(\frac{\Delta\theta_B}{2}\right) \left(e^{j\omega_{RF}t} e^{j\phi^{+}} + e^{-j\omega_{RF}t} e^{j\phi^{-}}\right) - \cos\left(\frac{\Delta\theta_B}{2}\right) \frac{\theta_{RF}^{2}}{4} \left(e^{j2\omega_{RF}t} e^{j\phi^{+}} + e^{-j2\omega_{RF}t} e^{j\phi^{-}} + 2\right) \right]$$

(21)

Y al detectarla, se obtiene una señal descrita por la siguiente ecuación, 22, la cual está formada por un término continuo, uno de frecuencia RF doble, y el más importante a estudiar el que está en la frecuencia RF, para MPSM el factor de interés es el coseno cuyo argumento contiene la diferencia de fase que generó el DUT.

$$i_{out}(t) = \frac{{A_0}^2}{4}\left(\cos^2\left(\frac{\Delta\theta_B}{2}\right)\left(4 - 2{\theta_{RF}}^2\right)\right.$$
$$+ 8\theta_{RF}\cos\left(\frac{\Delta\theta_B}{2}\right)\sin\left(\frac{\Delta\theta_B}{2}\right)\cos\left(\frac{\Sigma\phi}{2}\right)\mathbf{cos}\left(\boldsymbol{\omega_{RF}t} + \frac{\boldsymbol{\Delta\phi}}{\mathbf{2}}\right)$$
$$+ 4{\theta_{RF}}^2\sin^2\left(\frac{\Delta\theta_B}{2}\right)\cos^2\left(\omega_{RF}t + \frac{\Delta\phi}{2}\right)$$
$$\left. - 2{\theta_{RF}}^2\cos^2\left(\frac{\Delta\theta_B}{2}\right)\cos\left(\frac{\Sigma\phi}{2}\right)\cos\left(2\omega_{RF}t + \frac{\Delta\phi}{2}\right)\right)$$

(22)

El retardo de grupo del DUT se obtiene midiendo el cambio de fase de la envolvente de una señal sinusoidal de RF modulada cuando se cambia la longitud de onda.

$$\tau_g = \frac{-\Delta\phi}{360°}\frac{1}{f_m}$$

(23)

Como el coeficiente de dispersión es la derivada del retardo de grupo respecto a la longitud de onda, el MPSM mide el retardo de grupo a diferentes longitudes de onda para encontrar una función que luego pueda ser derivada.

$$D = \frac{\partial\tau_g}{\partial\lambda} \approx \frac{\Delta\tau_g}{\Delta\lambda}$$

(24)

Mediante un barrido de longitudes de ondas con un laser sintonizable en el ancho de banda de interés se completa una curva de retardos de grupo, la dispersión cromática se puede calcular dividiendo la diferencia de retardos de grupos por la diferencia entre las longitudes de onda que lo estimulan.

$$D = \frac{\tau_g(\lambda_2) - \tau_g(\lambda_1)}{\Delta\lambda} \tag{25}$$

MPSM presenta unas limitaciones, en cuanto a la selección de la frecuencia de la señal moduladora y el paso frecuencial del laser sintonizable. Si se elige una frecuencia moduladora y un paso frecuencial muy elevado todas las aproximaciones de las derivadas mediante incrementos serán incorrectas. Si, al contrario, se eligen muy pequeñas, entonces el valor de dispersión medido será inexacto debido a imperfecciones del sistema y los posibles efectos del ruido tendrán una mayor relevancia. Existe un compromiso entre la precisión de la medida y la validez de la aproximación. [4]

II.3.2.- Método de Peucheret

Utiliza las mismas ecuaciones que MPSM, pero en lugar de medir la fase de la señal se enfoca en el término de amplitud de la corriente detectada. La dispersión cromática está fuertemente relacionada con los cambios de fases de las bandas laterales, y en este caso se tratará de calcularlo a través de la semisuma de los cambios de fase, la cual está contenida en la amplitud del término RF de la ecuación 22. [4]

$$i_{out}(t) = \frac{A_0{}^2}{4}\left(\cos^2\left(\frac{\Delta\theta_B}{2}\right)(4 - 2\theta_{RF}{}^2)\right.$$
$$+ 8\theta_{RF}\cos\left(\frac{\Delta\theta_B}{2}\right)\sin\left(\frac{\Delta\theta_B}{2}\right)\mathbf{cos}\left(\frac{\mathbf{\Sigma\phi}}{\mathbf{2}}\right)\cos\left(\omega_{RF}t + \frac{\Delta\phi}{2}\right)$$
$$+ 4\theta_{RF}{}^2\sin^2\left(\frac{\Delta\theta_B}{2}\right)\cos^2\left(\omega_{RF}t + \frac{\Delta\phi}{2}\right)$$
$$\left. - 2\theta_{RF}{}^2\cos^2\left(\frac{\Delta\theta_B}{2}\right)\cos\left(\frac{\Sigma\phi}{2}\right)\cos\left(2\omega_{RF}t + \frac{\Delta\phi}{2}\right)\right)$$

(22)

Debido a que existen elementos perturbantes en el canal como ruido, perdidas de inserción y atenuación, el método de Peucheret trabaja con los mínimos de la envolvente. Para obtener estos mínimos, con el método de Peucheret se realizan barridos en la frecuencia RF. Estos mínimos se encontraran cuando la semisuma de fases de las bandas laterales cause la anulación del término de amplitud, ecuación 26: [4]

$$\cos\left(\frac{\Sigma\phi}{2}\right) = 0$$

(26)

$$\frac{\Sigma\phi}{2} = (2n - 1)\frac{\pi}{2}$$

(27)

Por la teoría de dispersión se sabe que:

$$\Sigma\phi = \frac{2\pi D\lambda^2 f_m{}^2}{c}$$

(28)

$$D = \frac{\Sigma\phi\, c}{2\pi\lambda^2 {f_m}^2} = \frac{(2n-1)\pi c}{2\pi\lambda^2 {f_m}^2}$$

(29)

El método de Peucheret es considerado más robusto para caracterizar dispositivos dispersivos en comparación con MPSM. Sin embargo presenta un problema, dependiendo del valor de dispersión que introduce el DUT, la frecuencia RF necesaria para obtener un mínimo puede llegar a ser muy elevada, y por lo tanto el barrido en frecuencia para localizarla puede ser muy largo. El uso de estas frecuencias tan altas representa un problema debido que puede tenerse el caso de que el equipo no alcance estas frecuencias, y que además las bandas laterales estarían espectralmente más lejos de la portadora, perdiendo resolución y precisión en los cálculos. [4]

Peucheret trata de solventar este problema incluyendo una constante de dispersión offset antes del DUT, para que la cantidad de dispersión a medir sea alcanzada usando una frecuencia RF baja, y el nivel de dispersión deseado es ahora la diferencia en la dispersión total (DUT y offset). Sin embargo este procedimiento depende de la estabilidad de la dispersión offset, la cual es difícil de alcanzar en canales altamente dispersivos. [4]

II.4.- Métodos de Medida Nuevos

La principal diferencia entre los nuevos métodos y los convencionales es la utilización del modulador en modo Asimétrico, en lugar de Push-Pull. En los métodos a estudiar a continuación, se trabaja con las bandas laterales y sus

correspondientes fases, por lo cual es necesario conocer la relación entre estas y la dispersión.

$$\Sigma\phi = \phi^{+} + \phi^{-} = \phi(\omega + \Delta\omega) + \phi(\omega - \Delta\omega)$$

(30)

Realizando los desarrollos de Taylor de la fase se obtiene para las bandas superior e inferior:

$$\phi(\omega + \Delta\omega) = \phi(\omega) + \Delta\omega\frac{d\phi}{d\omega} + \frac{1}{2}\Delta\omega^{2}\frac{d^{2}\phi}{d\omega^{2}}$$

(31)

$$\phi(\omega - \Delta\omega) = \phi(\omega) - \Delta\omega\frac{d\phi}{d\omega} + \frac{1}{2}\Delta\omega^{2}\frac{d^{2}\phi}{d\omega^{2}}$$

(32)

Entonces:

$$\Sigma\phi = \phi^{+} + \phi^{-} = \phi(\omega + \Delta\omega) + \phi(\omega - \Delta\omega) = 2\phi(\omega) + \Delta\omega^{2}\frac{d^{2}\phi}{d\omega^{2}}$$

(33)

Si se considera en las diferencias de fases, que estas son respecto a la portadora, entonces la ecuación resulta:

$$\Sigma\phi = \phi^{+} + \phi^{-} = \phi(\omega + \Delta\omega) + \phi(\omega - \Delta\omega) = \Delta\omega^{2}\frac{d^{2}\phi}{d\omega^{2}} \approx -\beta_{2}\Delta\omega^{2}$$

(34)

$$\Sigma\phi = -\frac{\lambda^{2}D}{2\pi c}\Delta\omega^{2} = -\frac{2\pi D\lambda^{2}{f_m}^{2}}{c}$$

(35)

II.4.1.- Asymmetric Bias Controlled Method (ABCM)

Semejante al método de Peucheret consiste en encontrar los mínimos de la señal y luego a través de un desarrollo matemático, calcular el valor total de dispersión. La diferencia básica consiste en usar un modulador asimétrico, de esta forma la frecuencia a la que se producen los "ceros" se podrá ajustar modificando el voltaje de bias, ver ecuación 37. En el caso de ABCM no es necesario hacer un barrido de frecuencia RF. Se seleccionará una frecuencia fija apropiada y se hará un barrido en el voltaje de bias. [5]

La modulación de la señal se realiza con un modulador externo Mach-Zehnder en modo asimétrico, por lo cual a la salida del DUT se tendrá la ecuación 36:

$$x_{out}(t) = \frac{1}{2}A_0 e^{-j\omega_0 t} e^{-j\phi_0} e^{j\theta_{B1}} e^{j\frac{\Delta\theta_B}{2}} \left[2\cos\left(\frac{\Delta\theta_B}{2}\right) - \frac{{\theta_{RF}}^2}{4} e^{-j\frac{\Delta\theta_B}{2}} + j\frac{\theta_{RF}}{2} e^{-j\frac{\Delta\theta_B}{2}} \left(e^{j\omega_{RF}t} e^{j\phi^+} + e^{-j\omega_{RF}t} e^{-j\phi^-}\right) - \frac{{\theta_{RF}}^2}{8} e^{-j\frac{\Delta\theta_B}{2}} \left(e^{j2\omega_{RF}t} e^{j\phi^+} + e^{-j2\omega_{RF}t} e^{-j\phi^-}\right) \right]$$

(36)

Luego de ser detectada se obtiene la ecuación 37:

$$i_{out}(t) = \frac{{A_0}^2}{4} \left[\cos^2\left(\frac{\Delta\theta_B}{2}\right)\left(4 - {\theta_{RF}}^2\right) - 4\theta_{RF}\cos\left(\frac{\Delta\theta_B}{2}\right) \mathbf{sin}\left(\frac{\mathbf{\Sigma\phi}}{\mathbf{2}} - \frac{\mathbf{\Delta\theta_B}}{\mathbf{2}}\right)\cos\left(\omega_{RF}t + \frac{\Delta\phi}{2}\right) + {\theta_{RF}}^2\cos^2\left(\omega_{RF}t + \frac{\Delta\phi}{2}\right) - {\theta_{RF}}^2\cos\left(\frac{\Delta\theta_B}{2}\right)\cos\left(\frac{\Sigma\phi}{2} - \frac{\Delta\theta_B}{2}\right)\cos\left(2\omega_{RF}t + \frac{\Delta\phi}{2}\right) \right]$$

(37)

En la amplitud del segundo término, el coseno depende del voltaje de bias exclusivamente, generando "ceros" en posiciones fijas $V_b=(2n+1)V_\pi$, sin embargo, el argumento del seno depende además de la semisuma de las fases en las bandas laterales. La información buscada sobre dispersión se encuentra en este término, se necesita encontrar estos "ceros" generados por la función seno para calcular el valor de la dispersión, estos "ceros" se les llaman ceros móviles, ya que su ubicación dependerá de la dispersión introducida por el DUT. [5]

$$\sin\left(\frac{\phi^+ + \phi^-}{2} - \frac{\Delta\theta_B}{2}\right) = 0$$

(38)

$$\frac{\Sigma\phi}{2} - \frac{\Delta\theta_B}{2} = n\pi \qquad \Sigma\phi - \Delta\theta_B = 2n\pi$$

(39)

Sustituyendo la ecuación 35, se obtiene la ecuación necesaria para calcular el valor de la dispersión cromática en la ecuación 41:

$$-\frac{2\pi D\lambda^2 {f_m}^2}{c} - \Delta\theta_B = 2n\pi$$

(40)

$$D = -(2n\pi + \Delta\theta_B)\frac{c}{2\pi\lambda^2 {f_m}^2} = -\left(2n\pi + \pi\frac{V_b}{V_\pi}\right)\frac{c}{2\pi\lambda^2 {f_m}^2} = -\left(2n + \frac{V_b}{V_\pi}\right)\frac{c}{2\lambda^2 {f_m}^2}$$

(41)

II.4.2 RF-SCAN

Este método combina los principios de los métodos estudiados antes, MPSM y ABCM, con el objetivo de conseguir calcular el valor de la dispersión más eficazmente. Este método se llama RF-Scan, ya que su principal característica es que logra medir la dispersión en un rango de frecuencias ópticas, pero utilizando un barrido en radiofrecuencia. [6]

Al igual que con ABCM se utiliza un modulador Mach-Zehnder en modo Asimétrico, cuya salida ya afectada por los desfasajes en las bandas laterales se expresa en la ecuación 37.

$$i_{out}(t) = \frac{{A_0}^2}{4}\left[\cos^2\left(\frac{\Delta\theta_B}{2}\right)\left(4 - {\theta_{RF}}^2\right)\right.$$
$$- 4\theta_{RF}\cos\left(\frac{\Delta\theta_B}{2}\right)\mathbf{sin}\left(\frac{\boldsymbol{\Sigma\phi}}{\mathbf{2}} - \frac{\boldsymbol{\Delta\theta_B}}{\mathbf{2}}\right)\mathbf{cos}\left(\boldsymbol{\omega_{RF}t} + \frac{\boldsymbol{\Delta\phi}}{\mathbf{2}}\right)$$
$$\left. + {\theta_{RF}}^2\cos^2\left(\omega_{RF}t + \frac{\Delta\phi}{2}\right) - {\theta_{RF}}^2\cos\left(\frac{\Delta\theta_B}{2}\right)\cos\left(\frac{\Sigma\phi}{2} - \frac{\Delta\theta_B}{2}\right)\cos\left(2\omega_{RF}t + \frac{\Delta\phi}{2}\right)\right]$$

(37)

De la señal se necesita obtener tanto la suma de fase como la diferencia de fases. La primera se halla como en el método ABCM, para cada frecuencia RF se realiza un barrido de voltajes de bias, se buscan los mínimos de la señal, es decir, cuando se cumple:

$$\sin\left(\frac{\Sigma\phi}{2} - \frac{\Delta\theta_B}{2}\right) = 0$$

(38)

Por lo tanto, se conoce el valor de la semisuma de fases:

$$\frac{\Sigma\phi}{2} = n\pi + \frac{\Delta\theta_B}{2}$$

(42)

Y además, si para estas frecuencias donde se hallaron mínimos, se puede conseguir, así sea en otro voltaje de bias, una potencia de salida suficiente como para obtener su valor de diferencia de fase, se tendrían todos los datos necesarios para calcular el valor de la dispersión. [5] Esta diferencia de fases se encuentra en el término, parte de la ecuación 37:

$$\cos\left(\omega_{RF}t + \frac{\phi^+ - \phi^-}{2}\right)$$

(43)

Combinando estos dos valores, suma y diferencia de fase, a dos frecuencias moduladoras contiguas se puedo obtener la diferencia de fases de ambas bandas laterales, las cuales se observan en la figura 4, y sus ecuaciones 46 y 47. [5]

$$\psi_1{}^+ = \frac{\Sigma\phi_1}{2} + \frac{\Delta\phi_1}{2} = \left(\frac{\phi_1^+ + \phi_1^-}{2}\right) + \left(\frac{\phi_1^+ - \phi_1^-}{2}\right) = \phi_1^+$$

(44)

$$\psi_1{}^- = \frac{\Sigma\phi_1}{2} - \frac{\Delta\phi_1}{2} = \left(\frac{\phi_1^+ + \phi_1^-}{2}\right) - \left(\frac{\phi_1^+ - \phi_1^-}{2}\right) = \phi_1^-$$

(45)

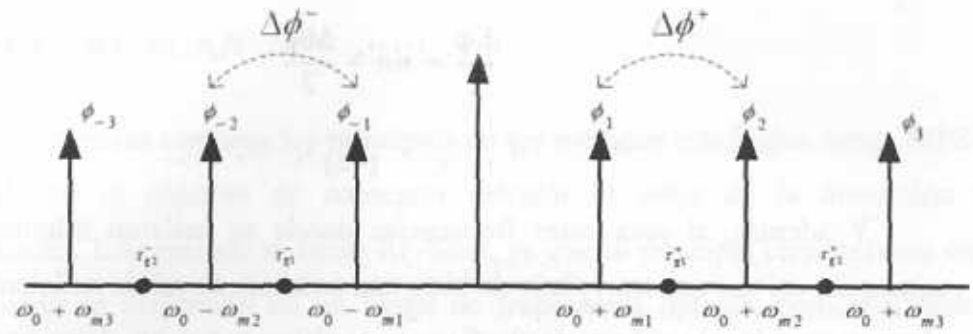

Figura 4 - Espectro RF-SCAN

Fuente: [4]

$$\Delta\phi^- = \psi_2{}^- - \psi_1{}^-$$

(46)

$$\Delta\phi^+ = \psi_2{}^+ - \psi_1{}^+$$

(47)

Al igual que cuando se trabaja con MPSM, una vez conocida la diferencia de fases, se puede calcular el retardo de grupo:

$$\tau_g^{\pm} = \frac{-\Delta\phi^{\pm}}{\Delta\omega}$$

(48)

Si se continúa el barrido en frecuencias, al obtenerse otros retardos de grupo, se calcula:

$$D = \frac{\Delta\tau_g}{\Delta\lambda}$$

(24)

Capítulo III

Metodología y Desarrollo

El esquema de la figura 5 muestra presenta la metodología utilizada para lograr los objetivos planteados en el proyecto.

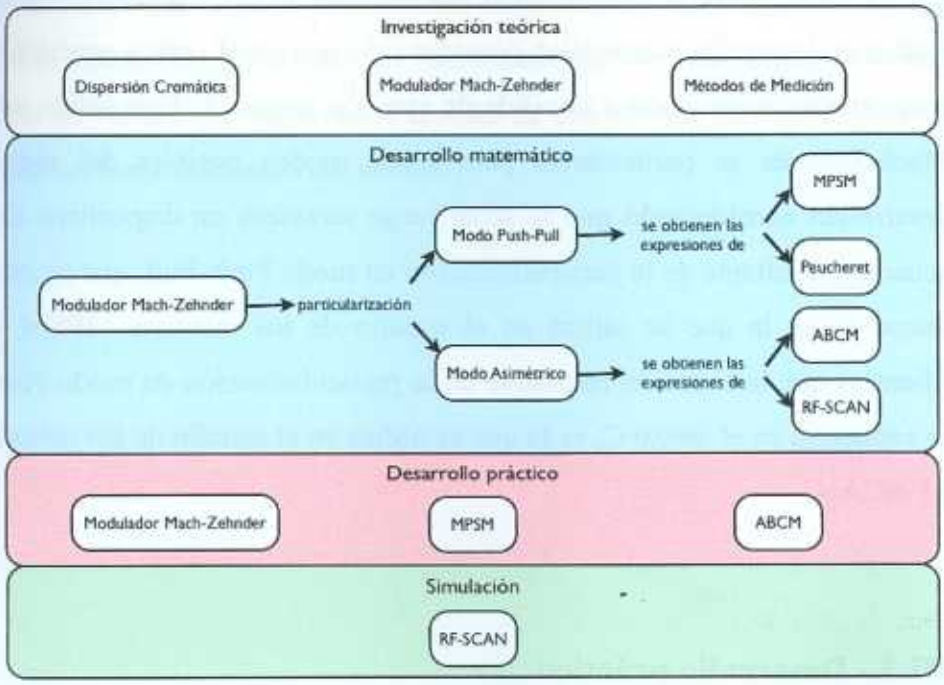

Figura 5- Metodología empleada

Fuente: Propia

III.1.- Investigación teórica

El proyecto se inició con la investigación del concepto de dispersión cromática, el efecto que esta tiene en la transmisión de señales ópticas y como se puede observar en la fase y envolvente. Luego, debido a que el modulador Mach-Zehnder es una parte fundamental de los métodos a estudiar, es importante dedicarle tiempo al estudio de su funcionamiento, configuración, modo y parámetros. El estudio teórico

continuo con la investigación del principio y funcionamiento de los 4 métodos avanzados: MPSM, Peucheret, ABCM y RF-SCAN.

III.2.- Desarrollo matemático

Una vez se ha comprendido el funcionamiento del modulador Mach-Zehnder se realiza el desarrollo matemático considerando una señal óptica genérica a la entrada, para obtener la ecuación a la salida de este, ver anexo A. Esta salida del modulador Mach-Zehnder se particulariza para los 2 modos posibles del modulador y se desarrollan considerando que la señal luego atraviesa un dispositivo dispersivo. La ecuación resultante de la particularización en modo Push-Pull, que se encuentra en el anexo B, es la que se utiliza en el estudio de los métodos MPSM y Peucheret. Mientras que la ecuación resultante de la particularización en modo Asimétrico, que se encuentra en el anexo C, es la que se utiliza en el estudio de los métodos ABCM y RF-SCAN.

III.3.- Desarrollo práctico

En esta fase, se trabaja en el laboratorio. En primer lugar se trabaja solo con los moduladores Mach-Zehnder, en modos Push-Pull y Asimétrico, y se colocan en funcionamiento para obtener los parámetros que los caracterizan, los cuales además son necesarios para la comprobación práctica de los métodos.

En segundo lugar, se comprueba prácticamente el funcionamiento de los métodos MPSM y ABCM. Primero se trabajó modulador en modo Push-Pull y se comprobó el funcionamiento del método MPSM, se realizaron mediciones sobre 3 carretes de fibra con diferentes valores de dispersión. Por último, se trabajó

modulador en modo Asimétrico y se comprobó el funcionamiento del método ABCM, se realizaron mediciones sobre 3 carretes de fibra con diferentes valores de dispersión.

III.4.- Simulación

Debido la relación entre los métodos comprobados anteriormente con el método RF-SCAN, se decidió comprobar el funcionamiento de este al final. Se realizó un programa en Matlab que idealizando la señal de entrada nos permite de forma simple comprobar el funcionamiento del método.

Capítulo IV

Resultados

IV.1.- Modulador Mach-Zehnder

En el laboratorio se trabajó con 2 moduladores Mach-Zehnder, uno de ellos en modo Push-Pull, es decir, solo con una entrada para ambas ramas; el otro en modo Asimétrico, tenía una entrada para cada una de las ramas. El análisis experimental de los moduladores se realizó con la finalidad de conocer sus funciones de transferencia, y de estas obtener parámetros que lo caracterizan: $V\pi$, QP, y ER. El conocimiento de estos parámetros resultó útil en el desarrollo de los métodos.

Para obtener la función de transferencia se realizó el siguiente montaje, mostrado en la figura 6:

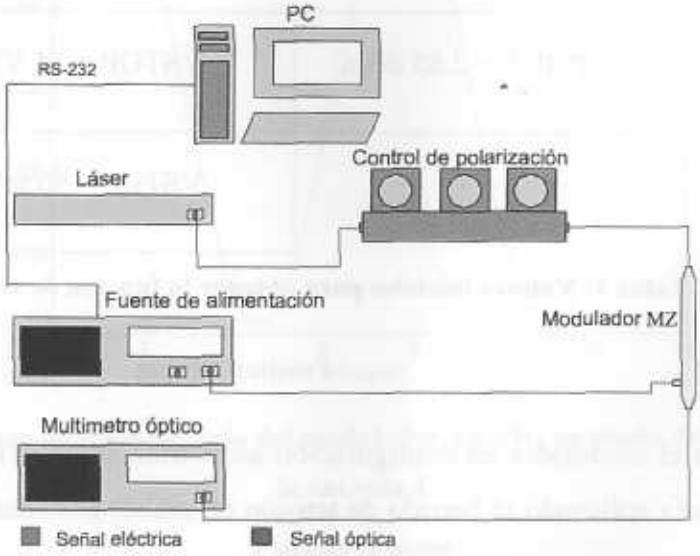

Figura 6 - Montaje para obtener la función de transferencia

Fuente: Propia

En el orden que recorre la señal óptica, el montaje inicia con el laser cuya salida está conectada a la entrada de un polarizador, y la salida de este a la entrada del modulador Mach-Zehnder. El polarizador había sido previamente ajustado hasta obtener la mayor potencia posible a la salida del modulador. Luego, el montaje continúa con la salida del modulador conectada a la entrada del multímetro óptico.

Además, en una de las 2 entradas al modulador se conectó una fuente programable de tensión, la cual controlada desde el ordenador realizó el barrido de voltajes necesario para obtener la función de transferencia.

Los parámetros iniciales utilizados para probar ambos moduladores Mach-Zehnder fueron:

Laser	Fuente de tensión
$\lambda = 1550$ nm	VSTART = 0 V
POUT = 2.85 dBm	VSTOP = 14 V
	VSTEP = 50 mV

Tabla 1- Valores iniciales para obtener la función de transferencia

Fuente: Propia

Para el modulador en configuración asimétrica se obtuvieron las funciones de transferencia aplicando el barrido de tensión en ambas entradas. Para la entrada 1 se obtuvo:

Entrada 1
ER = 34.303 dB
V_π = 3.250 V
QP = 1.625 V

Tabla 2 - Parámetros del modulador en modo Asimétrico usando la entrada 1

Fuente: Propia

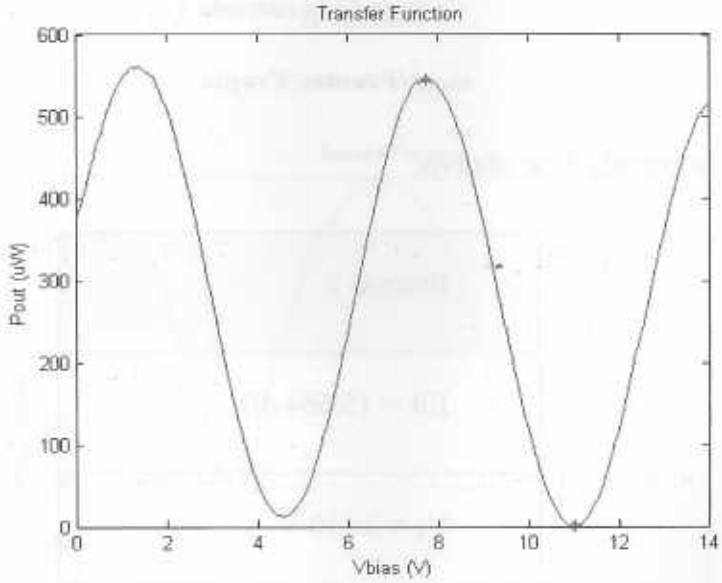

Figura 7 - Función de transferencia del modulador, en uW, en modo Asimétrico usando la entrada 1

Fuente: Propia

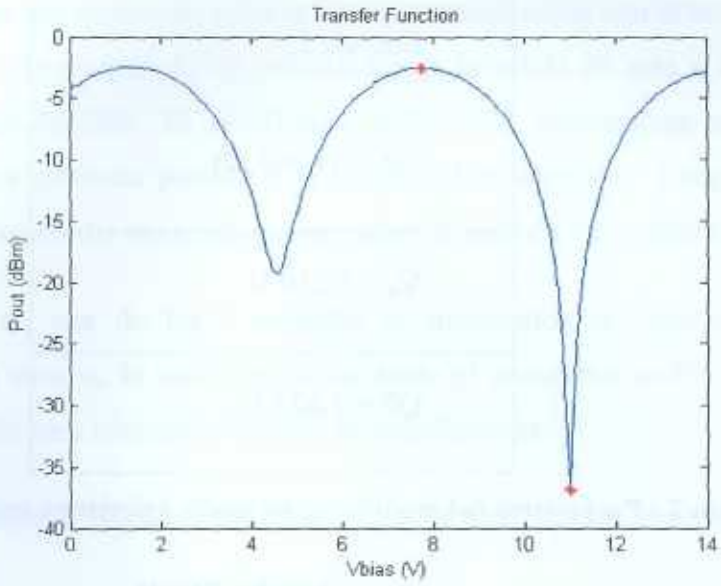

Figura 8 - Función de transferencia del modulador, en dBm, en modo Asimétrico usando la entrada 1

Fuente: Propia

Para la entrada 2, se obtuvo:

Entrada 2
ER = 15.684 dB
V_π = 3.350 V
QP = 1.672 V

Tabla 3- Parámetros del modulador en modo Asimétrico usando la entrada 2

Fuente: Propia

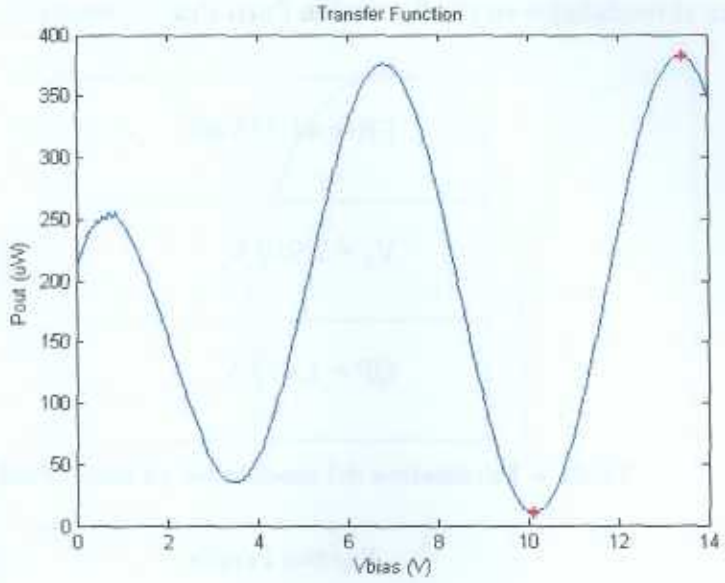

Figura 9 - Función de transferencia del modulador, en uW, en modo Asimétrico usando la entrada 2

Fuente: Propia

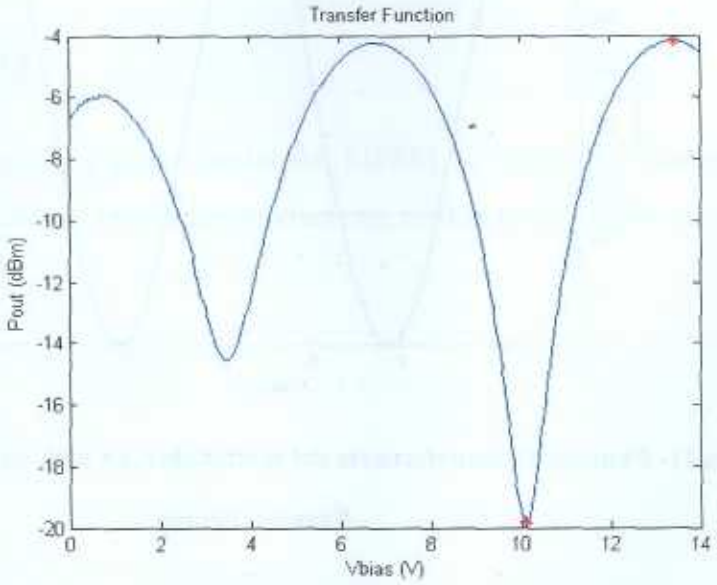

Figura 10 - Función de transferencia del modulador, en dBm, en modo Asimétrico usando la entrada 2

Fuente: Propia

Para el modulador en configuración Push-Pull se obtuvo:

ER = 41.555 dB
V_π = 2.950 V
QP = 1.475 V

Tabla 4- Parámetros del modulador en modo Push-Pull

Fuente: Propia

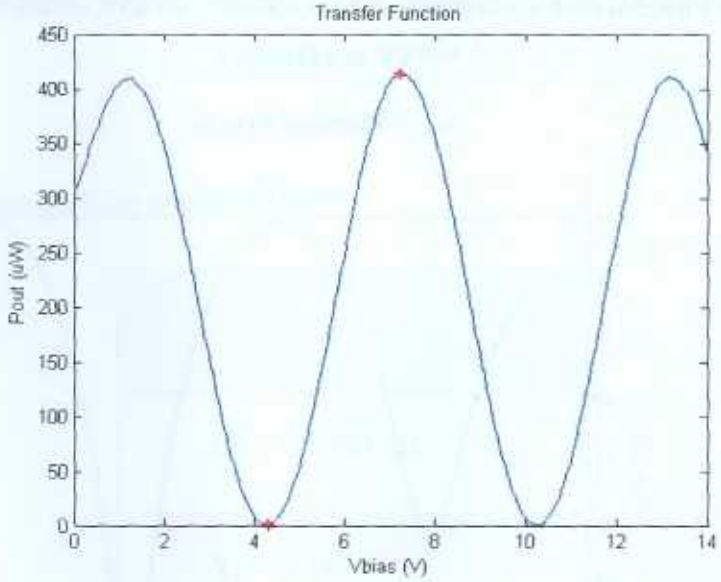

Figura 11- Función de transferencia del modulador, en uW, en modo Push-Pull

Fuente: Propia

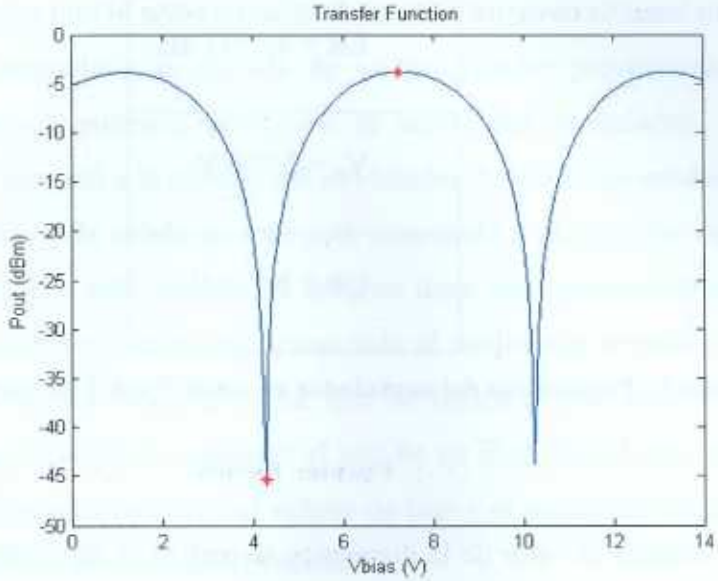

Figura 12 - Función de transferencia del modulador, en dBm, en modo Push-Pull

Fuente: Propia

IV.2.- MPSM

Para el análisis experimental del MPSM, se utilizó un modulador Push-Pull, cuyas características, obtenidas previamente mediante la función de transferencia son las siguientes:

ER = 41.555 dB
V_π = 2.950 V
QP = 1.475 V

Tabla 5 - Parámetros del modulador en modo Push-Pull usado en MPSM

Fuente: Propia

Para obtener el valor de la dispersión se realizó el siguiente montaje, mostrado en la figura 13:

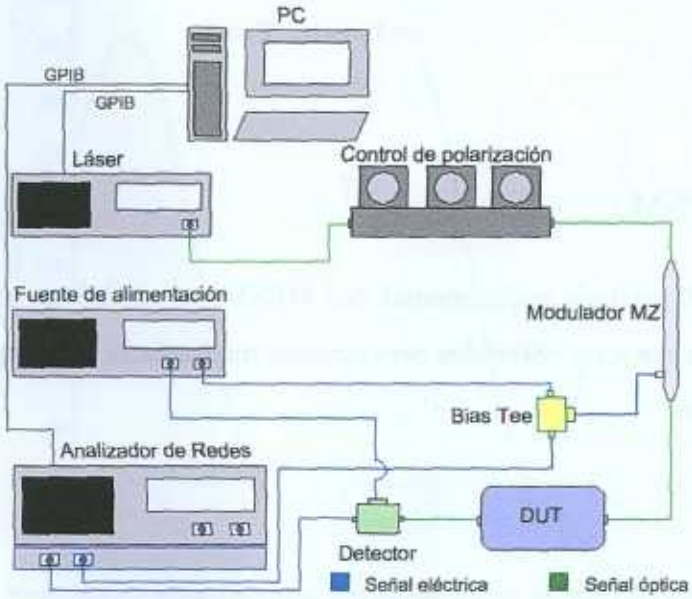

Figura 13 - Montaje usado para MPSM

Fuente: Propia

En el orden que la señal recorre, el montaje inicia en el laser sintonizable, cuya salida está conectada a la entrada de un polarizador previamente ajustado para obtener la mayor potencia posible a la salida del modulador. La salida del polarizador se conectó a la entrada del modulador, la salida del modulador a su vez se conecta al DUT, y la salida de este está conectada a un detector óptico, hasta este punto se trabaja con señal óptica. El detector tiene una conexión de alimentación a la fuente de tensión, y su salida está conectada al analizador de redes. En cuanto a la entrada eléctrica del modulador, ya que se necesita una señal RF y un voltaje continuo, estos se unifican mediante el uso de un Bias Tee al cual está conectado la fuente de tensión para controlar el voltaje de bias y el analizador de redes, el cual nos provee la señal de radio frecuencia necesaria.

Para obtener una medida más precisa se realiza una calibración de la siguiente forma, se ejecuta el programa primero eliminando el DUT del montaje, y luego se conecta y vuelve a ejecutarse el programa.

Para comprobar el método se contó con 3 carretes de fibra compensadora de diferentes valores de dispersión, estos valores se consideraron los valores teóricos de dispersión contra los cuales compararemos la efectividad de medición del método.

$\lambda_{START} = 1557.5$ nm	$F_{RF} = 500$ MHz
$\lambda_{STOP} = 1561$ nm	$P_{OUT} = 10$ dB
$\lambda_{STEP} = 0.05$ nm	$V_{BIAS} = 3$ V

Tabla 6 - Valores iniciales para MPSM

Fuente: Propia

Los resultados fueron, para el primer carrete:

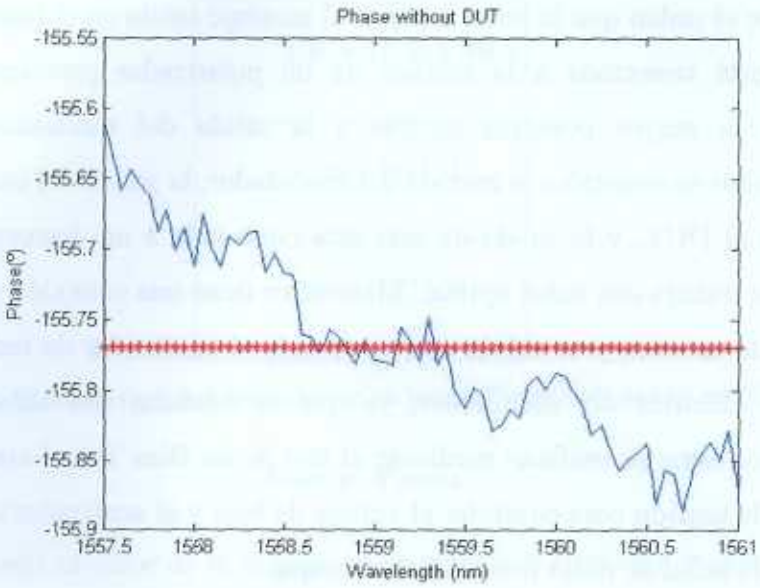

Figura 14 - Carrete 1, fase medida sin DUT

Fuente: Propia

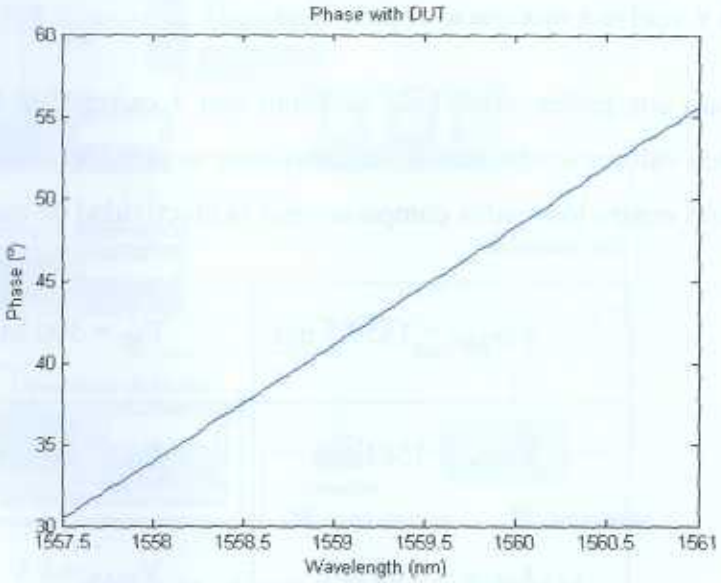

Figura 15 – Carrete 1, fase medida con DUT

Fuente: Propia

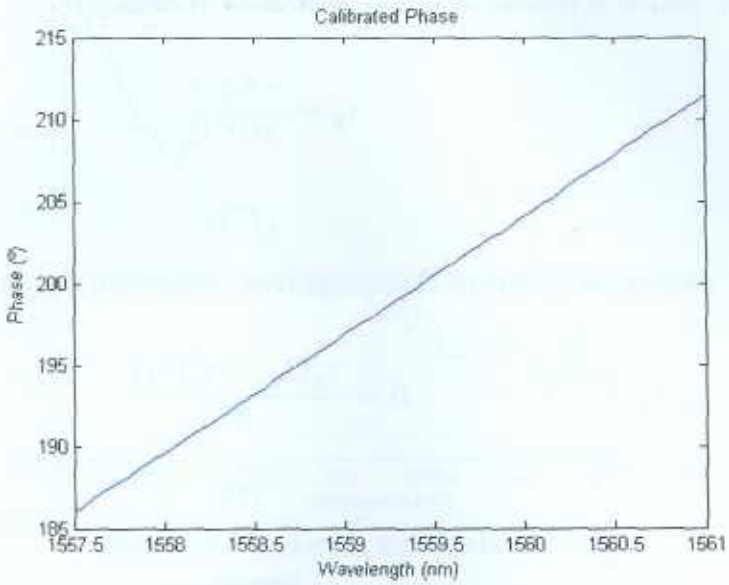

Figura 16 - Carrete 1, fase calibrada

Fuente: Propia

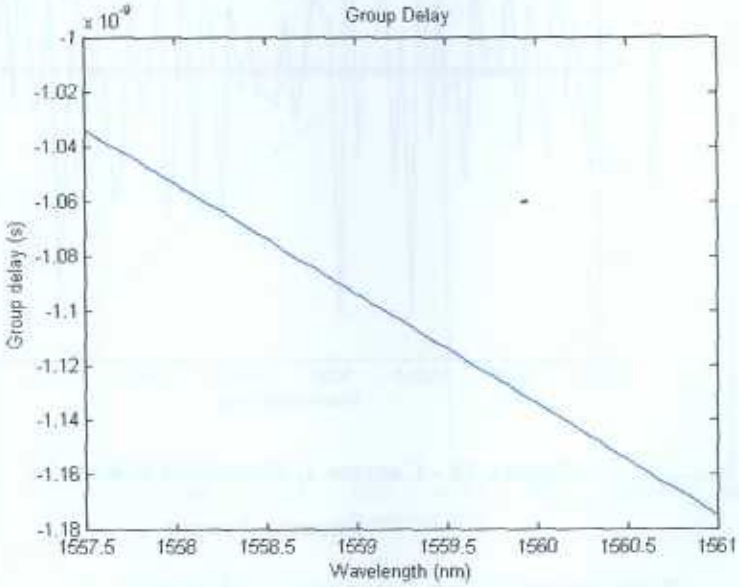

Figura 17 - Carrete 1, retardo de grupo

Fuente: Propia

Se obtuvo el retardo de grupo, utilizando al ecuación 23:

$$\tau_g = \frac{-\Delta\phi}{360^\circ}\frac{1}{f_m}$$

(23)

Y finalmente se obtuvo el parámetro de Dispersión, según:

$$D = \frac{\tau_g(\lambda_2) - \tau_g(\lambda_1)}{\Delta\lambda}$$

(25)

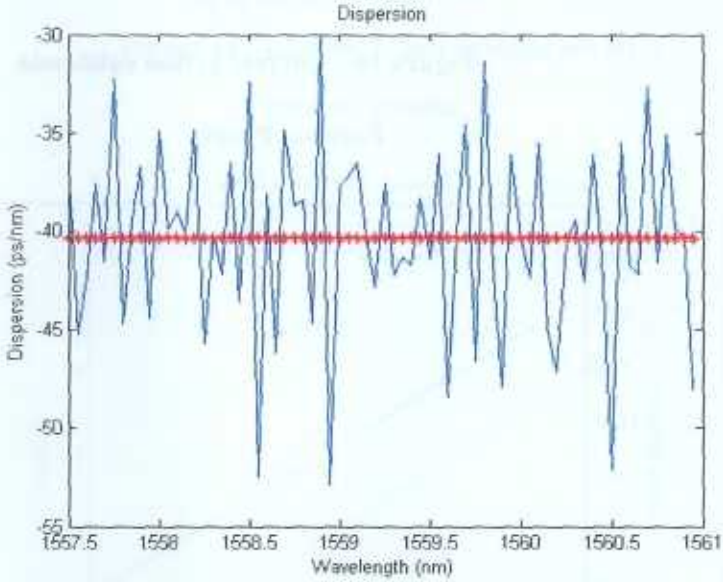

Figura 18 - Carrete 1, dispersión calculada

Fuente: Propia

El valor del parámetro de dispersión obtenido para el carrete 1, usando MPSM, fue D=40.3769 ps/nm. El valor conocido era -40 ps/nm.

Los resultados fueron, para el segundo carrete:

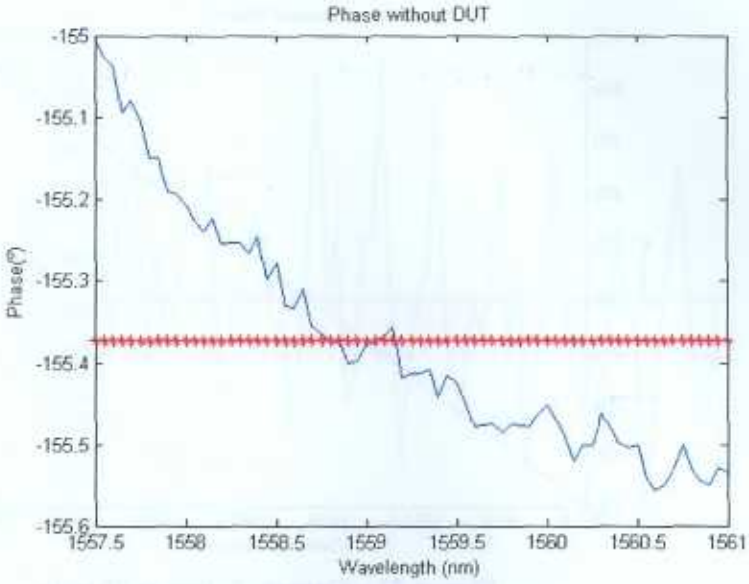

Figura 19 - Carrete 2, fase medida sin DUT

Fuente: Propia

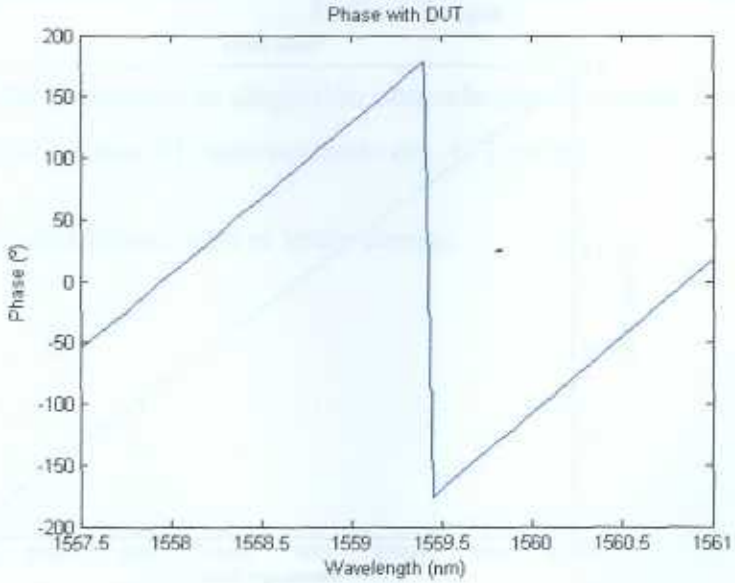

Figura 20 - Carrete 2. fase medida con DUT

Fuente: Propia

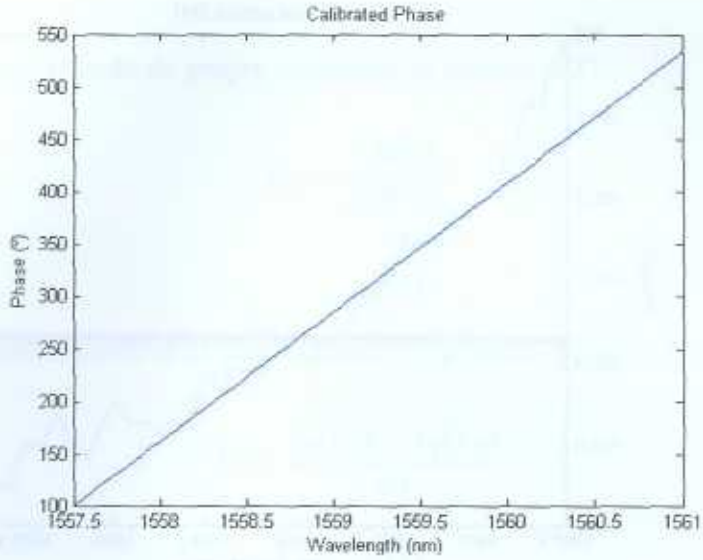

Figura 21 - Carrete 2, fase calibrada

Fuente: Propia

Luego, se obtuvo el retardo de grupo, utilizando la ecuación 23:

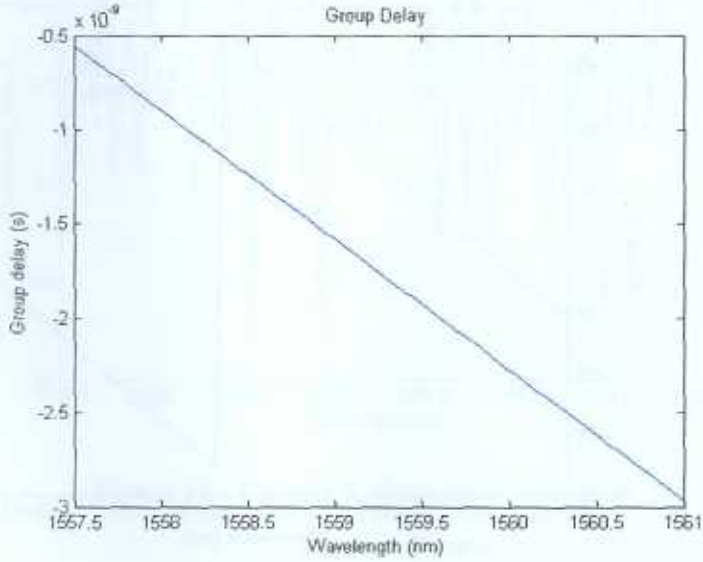

Figura 22 - Carrete 2, retardo de grupo

Fuente: Propia

Y finalmente se obtuvo el parámetro de Dispersión, según la ecuación 25.

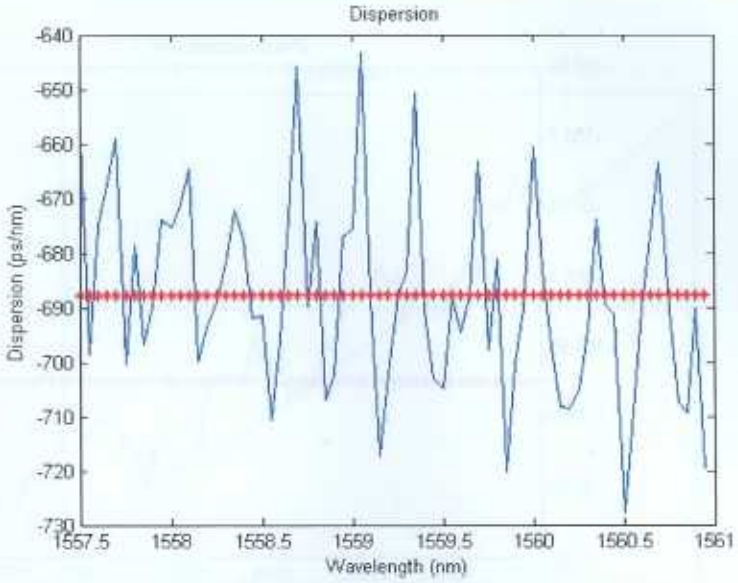

Figura 23 - Carrete 2, dispersión calculada

Fuente: Propia

El valor del parámetro de dispersión obtenido para el carrete 2, usando MPSM, fue D = -687.7805 ps/nm. El valor conocido era -671 ps/nm.

Los resultados fueron, para el tercer carrete:

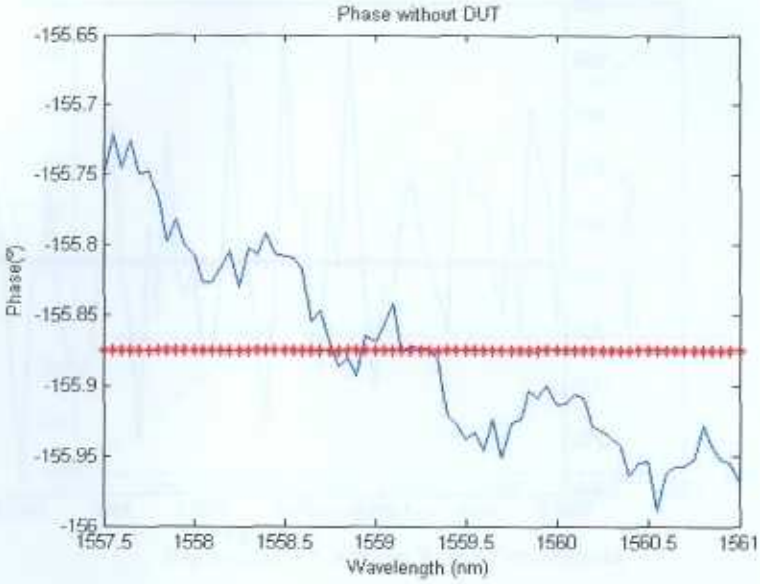

Figura 24 - Carrete 3, fase medida sin DUT

Fuente: Propia

Figura 25 - Carrete 3, fase medida con DUT

Fuente: Propia

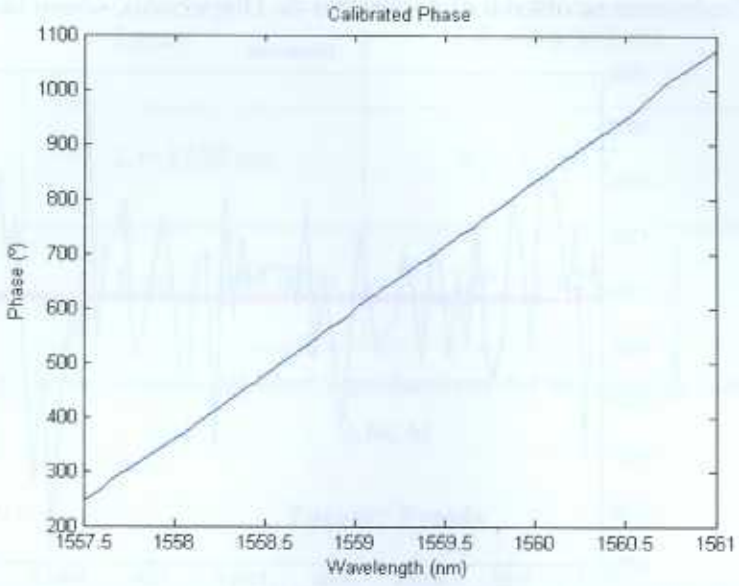

Figura 26 - Carrete 3, fase calibrada

Fuente: Propia

Luego, se obtuvo el retardo de grupo, utilizando la ecuación 23:

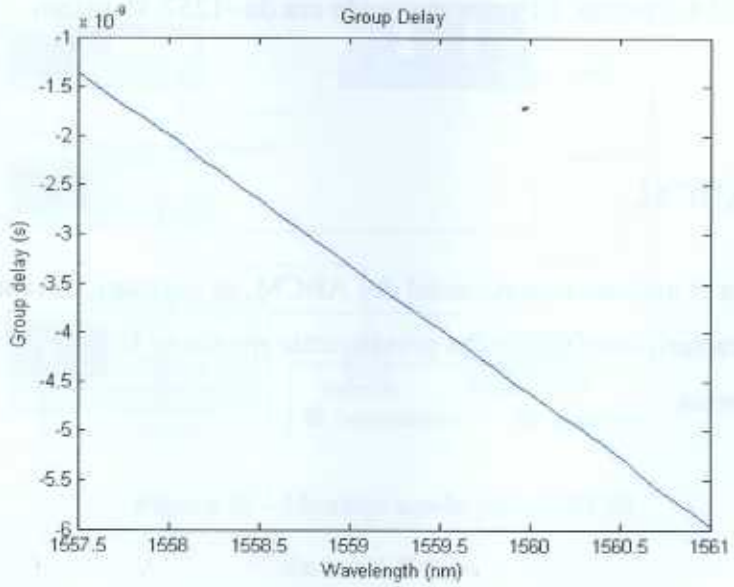

Figura 27 - Carrete 3, retardo de grupo

Fuente: Propia

Y finalmente se obtuvo el parámetro de Dispersión, según la ecuación 25.

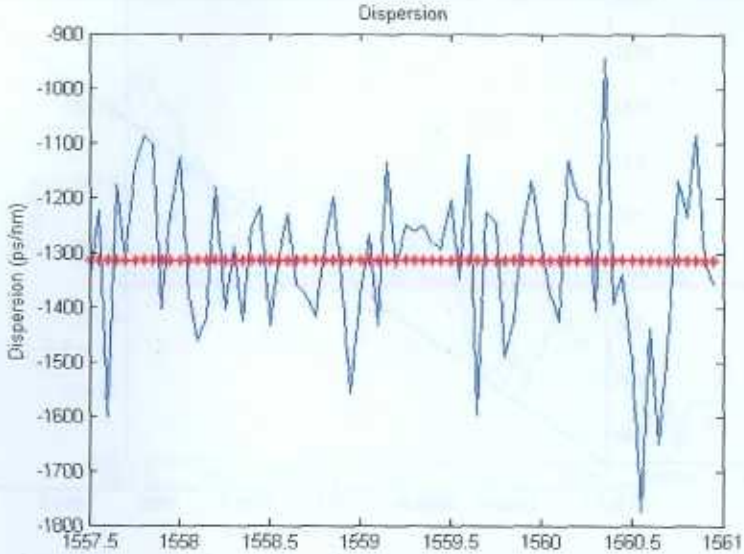

Figura 28 - Carrete 3, dispersión calculada

Fuente: Propia

El valor del parámetro de dispersión obtenido para el carrete 3, usando MPSM, fue D=-1314.2 ps/nm. El valor conocido era de -1252.35 ps/nm.

IV.3.- ABCM

Para el análisis experimental del ABCM, es necesario un modulador asimétrico, cuyas características, obtenidas previamente mediante la función de transferencia son las siguientes:

Laser	ER = 34.303 dB
$\lambda = 1550$ nm	$V_{\pi} = 3.250$ V
$P_{OUT} = 2.85$ dBm	QP = 1.625 V

Tabla 7 - Valores iniciales del laser y parámetros del modulador Asimétrico para ABCM

Fuente: Propia

Para obtener el valor de la dispersión se realizó el siguiente montaje, mostrado en la figura 29:

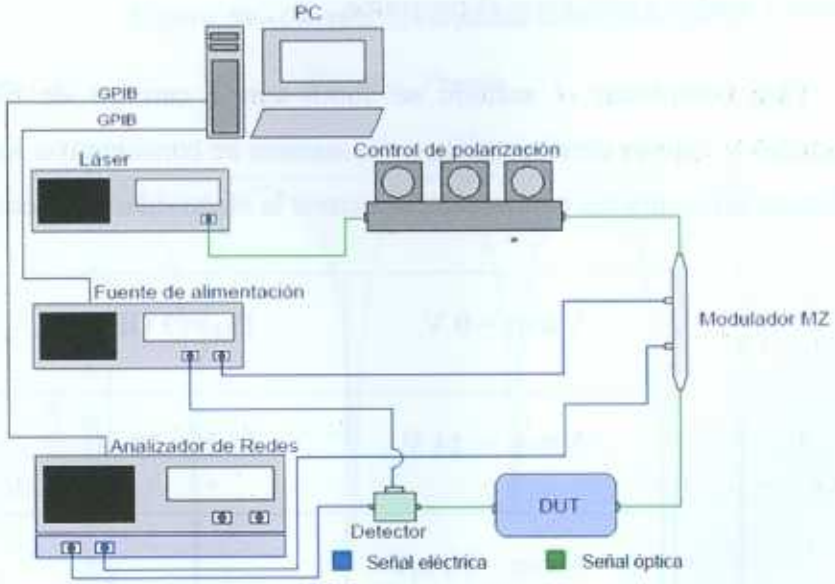

Figura 29 - Montaje usado para ABCM

Fuente: Propia

En el orden que la señal recorre, el montaje inicia en el laser, cuya salida esta conectada a la entrada de un polarizador previamente ajustado para obtener la mayor potencia posible a la salida del modulador. La salida del polarizador se conectó a la entrada del modulador, la salida del modulador se conecta al DUT, y la salida de este está conectada a un detector óptico, hasta este punto se trabaja con señal óptica. El detector tiene una conexión de alimentación a la fuente de tensión, y su salida está conectada al analizador de redes. En cuanto a las 2 entradas eléctricas del modulador, una está conectada a la fuente de tensión para controlar el voltaje de bias y la otra conectada al analizador de redes, el cual nos provee la señal de radio frecuencia necesaria.

Para obtener una medida más precisa se realiza una calibración de la siguiente forma, se ejecuta el programa primero eliminando el DUT del montaje, y luego se conecta y vuelve a ejecutarse el programa.

Para comprobar el método se contó con 3 carretes de fibra de diferentes longitudes y valores de dispersión, estos valores se consideraron los valores teóricos de dispersión contra los cuales compararemos la efectividad de medición del método.

Vstart = 0 V	F_{RF} = 3 GHz
Vstop = 14 V	Pout = 10 dB
Vstep = 50 mV	

Tabla 8 - Valores iniciales para ABCM

Fuente: Propia

Los resultados fueron, para el primer carrete:

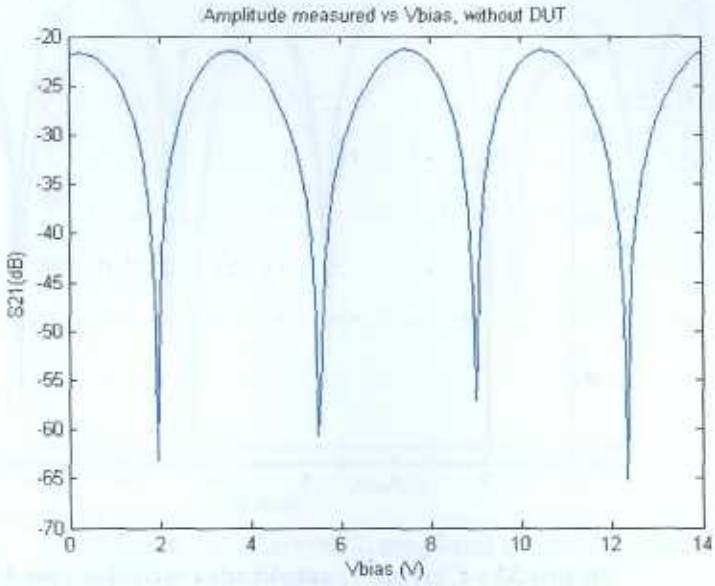

Figura 30 - Carrete 1, amplitud medida sin DUT

Fuente: Propia

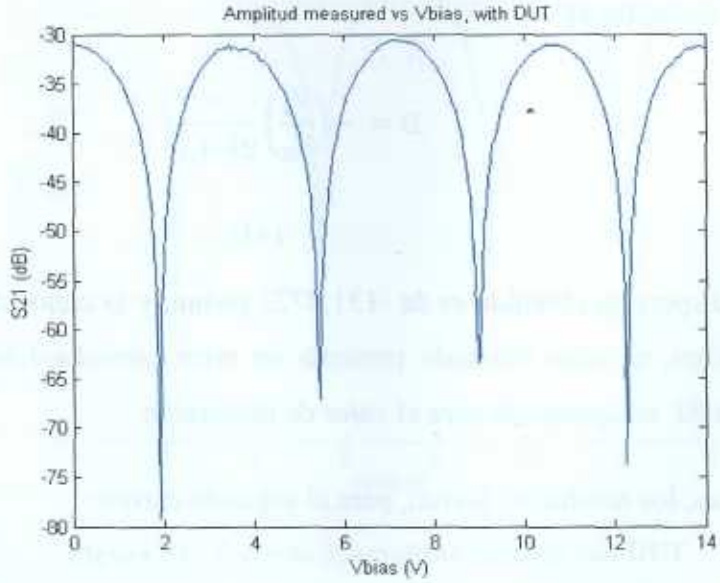

Figura 31 - Carrete 1, amplitud medida con DUT

Fuente: Propia

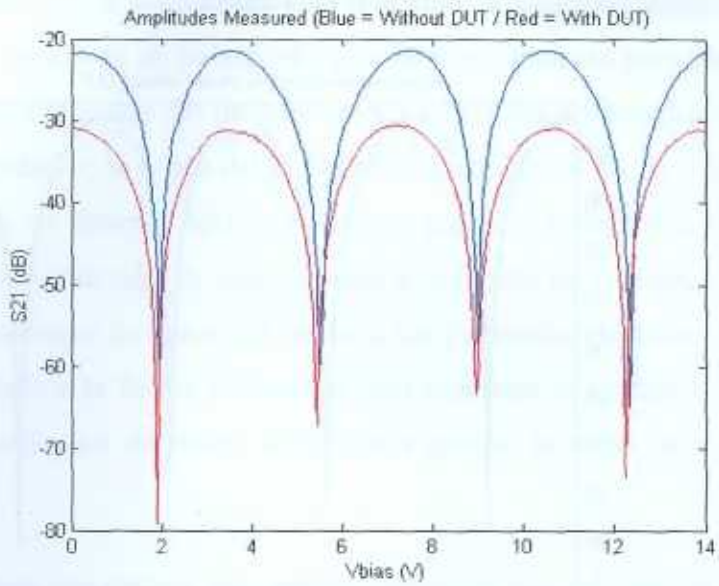

Figura 32 - Carrete 1, amplitudes medidas con ABCM

Fuente: Propia

Luego de ubicarse 2 mínimos consecutivos, se procedió a calcular la dispersión, usando la ecuación 41:

$$D = -\left(\frac{V_b}{V_\pi}\right)\frac{c}{2\lambda^2 {f_m}^2}$$

(41)

La dispersión obtenida es de -131,8722 ps/nm, y la conocida del primer carrete es -40 ps/nm, el valor obtenido presenta un error elevado debido que se usó una frecuencia RF no apropiada para el valor de dispersión.

Ahora, los resultados fueron, para el segundo carrete:

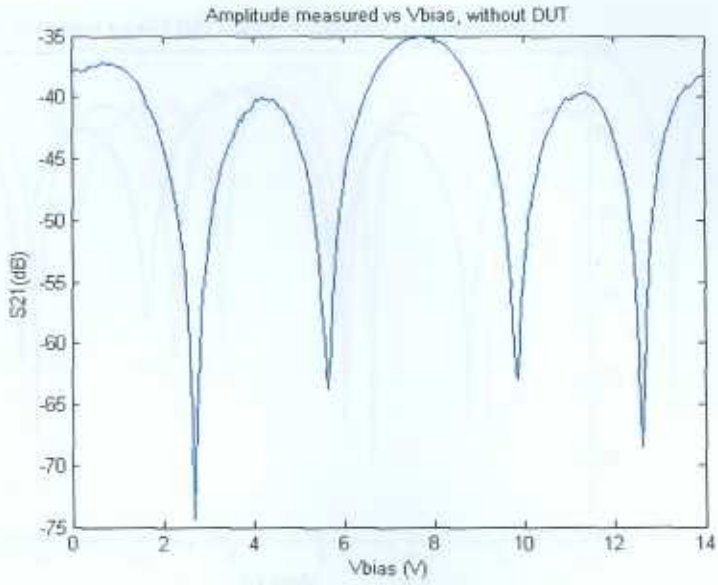

Figura 33 - Carrete 2, amplitud medida sin DUT

Fuente: Propia

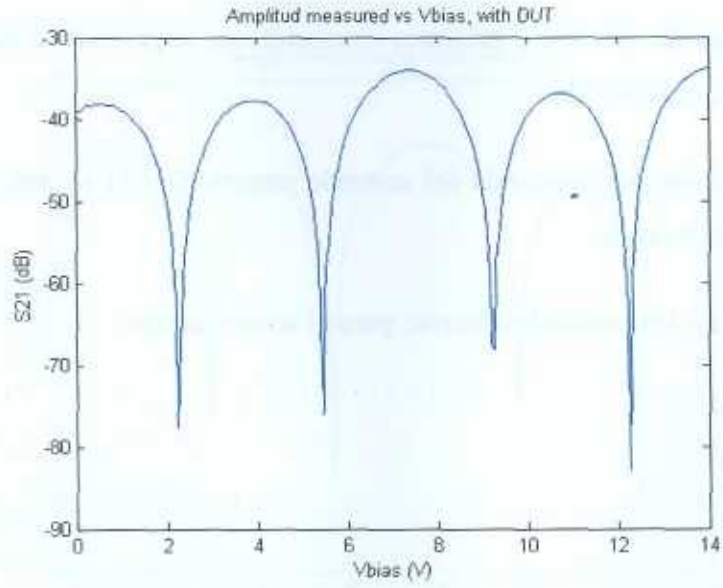

Figura 34 - Carrete 2, amplitud medida con DUT

Fuente: Propia

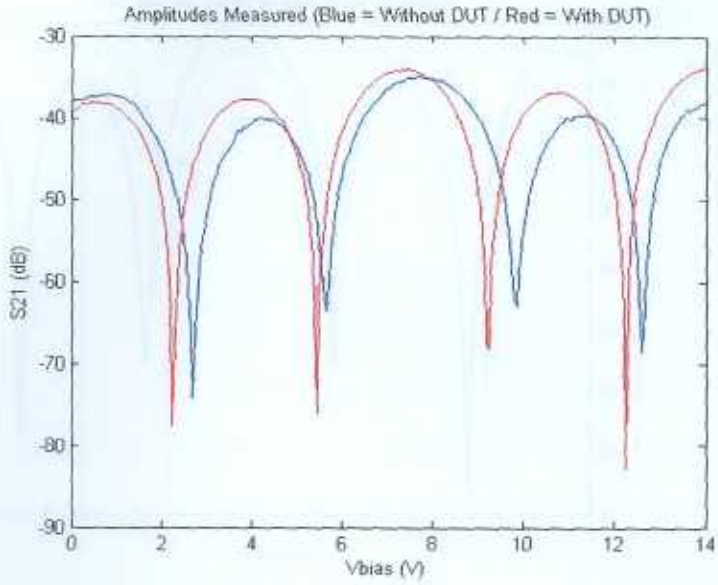

Figura 35 - Carrete 2, amplitudes medidas con ABCM

Fuente: Propia

Luego de ubicarse 2 mínimos consecutivos, se procedió a calcular la dispersión, usando la ecuación 41.

La dispersión conocida del segundo carrete es -671 ps/nm, el valor obtenido es de -843.9819 ps/nm.

Ahora, los resultados fueron, para el tercer carrete:

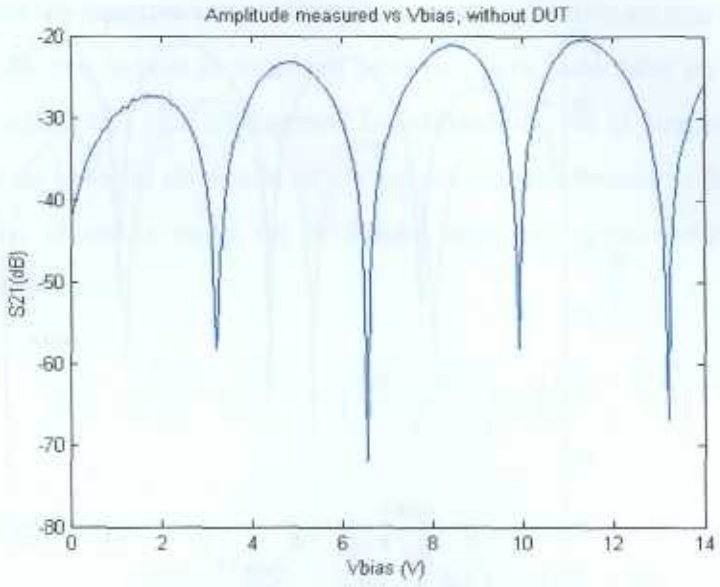

Figura 36 - Carrete 3, amplitud medida sin DUT

Fuente: Propia

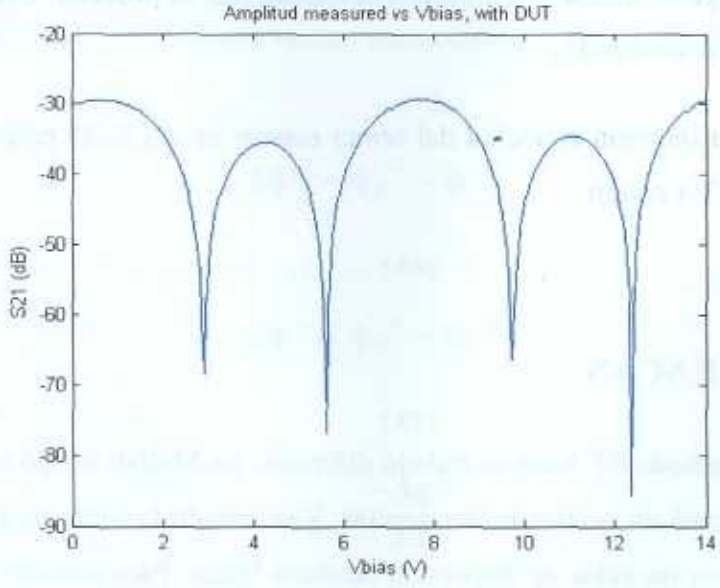

Figura 37 - Carrete 3, amplitud medida con DUT

Fuente: Propia

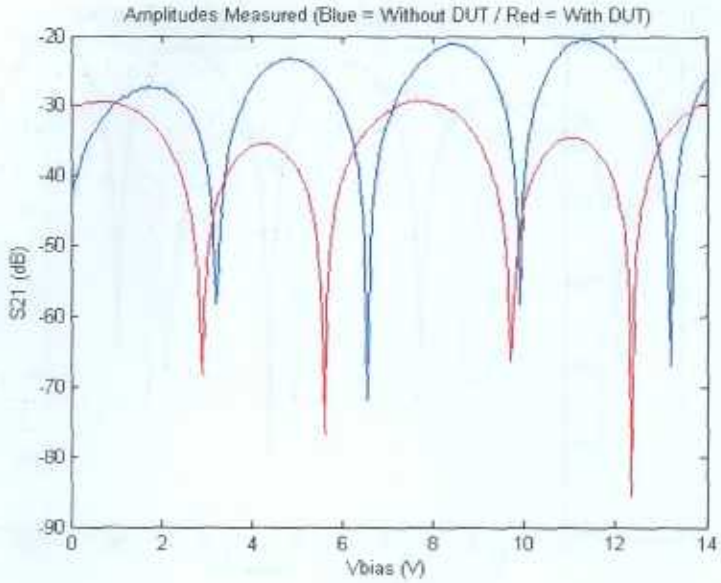

Figura 38 - Carrete 3, amplitudes medidas con ABCM

Fuente: Propia

Luego de ubicarse 2 mínimos consecutivos, se procedió a calcular la dispersión, usando la ecuación 41.

La dispersión conocida del tercer carrete es -1252.35 ps/nm, el valor obtenido es de -1227.4 ps/nm.

IV.4.- RF SCAN

El método RF-Scan se trabajó diferente, en Matlab se fijó una valor de longitud de onda, creó un vector de frecuencias, y se simuló la señal de entrada, la cual se ve afectada por un valor de dispersión también fijado. Para simular lo que se haría en el laboratorio se creó un vector de voltajes de bias a recorrer. Ver código en el Anexo G.

El método RF-Scan, como se dijo previamente, consiste en una combinación de MPSM y ABCM, por lo cual el siguiente paso fue, para cada valor de bias localizar el mínimo de la señal, del cual obtenemos la información de la semisuma de fases, y obtener la fase de la señal de donde se obtiene la semidiferencia de fases. Para luego calcular la fase eléctrica tanto de la banda superior, como inferior, usando las siguientes expresiones:

$$\psi_1{}^{+} = \frac{\Sigma\phi_1}{2} + \frac{\Delta\phi_1}{2} = \left(\frac{\phi_1^{+} + \phi_1^{-}}{2}\right) + \left(\frac{\phi_1^{+} - \phi_1^{-}}{2}\right)$$

(44)

$$\psi_1{}^{-} = \frac{\Sigma\phi_1}{2} - \frac{\Delta\phi_1}{2} = \left(\frac{\phi_1^{+} + \phi_1^{-}}{2}\right) - \left(\frac{\phi_1^{+} - \phi_1^{-}}{2}\right)$$

(45)

Luego se calculó la diferencia de fases tanto en la banda superior como inferior, las cuales se unifican en un mismo vector, para continuar con el cálculo del retardo de grupo.

$$\Delta\phi^{-} = \psi_2{}^{-} - \psi_1{}^{-}$$

(46)

$$\Delta\phi^{+} = \psi_2{}^{+} - \psi_1{}^{+}$$

(47)

$$\tau_g^{\pm} = \frac{-\Delta\phi^{\pm}}{\Delta\omega}$$

(48)

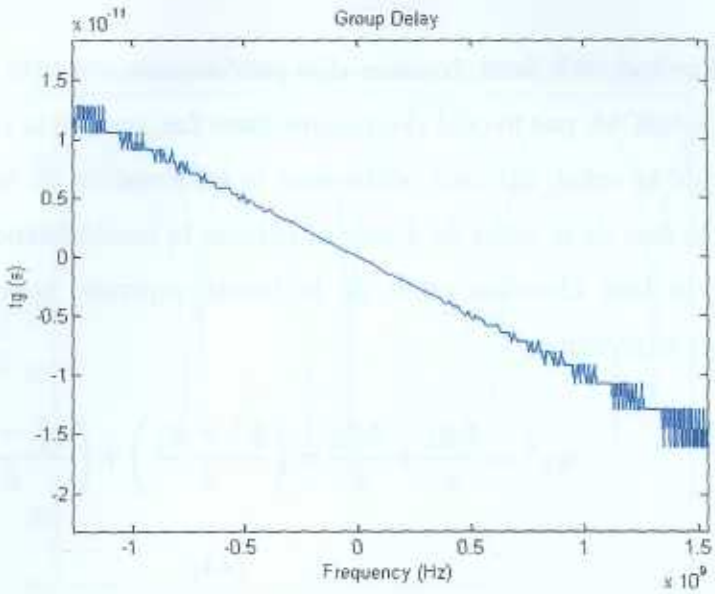

Figura 39 - Retardo de grupo calculado con RF-SCAN

Fuente: Propia

El vector de frecuencias creado, nos permite recorrer el espectro sin cambiar la longitud de onda, usando la relación siguiente:

$$D = \frac{\Delta\tau_g}{\Delta\lambda}$$

(24)

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda_o^2}{c}\Delta f$$

(49)

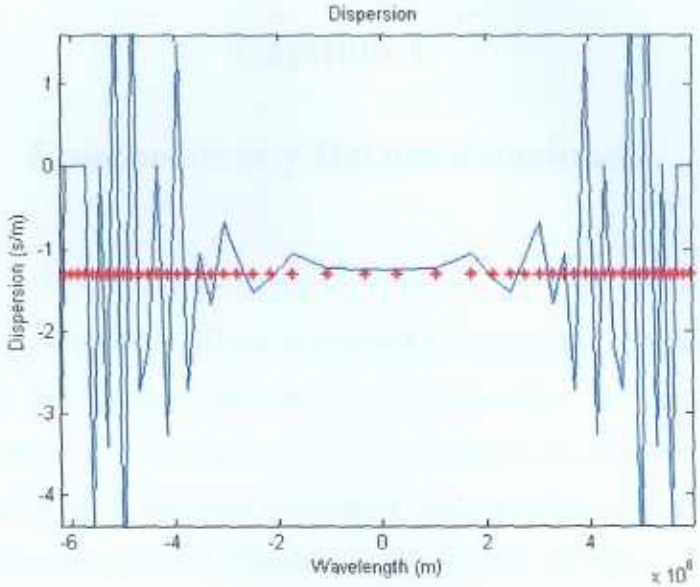

Figura 40 - Dispersión calculada con RF-SCAN

Fuente: Propia

Capítulo V

Conclusiones y Recomendaciones

La dispersión cromática afecta la transmisión de señales ópticas y debido al auge de estas en los sistemas actuales de comunicación, es importante estudiar métodos para conocer el valor de la dispersión y poder así contrarrestarla. En este Proyecto se estudiaron 4 métodos avanzados que permiten conocer el valor del coeficiente de dispersión: MPSM, Peucheret, ABCM y RF-SCAN.

En los métodos que se estudiaron, el modulador Mach-Zehnder tiene un papel fundamental, y es por esto que se le ha dedicado un tiempo a su estudio.

Se realizó el análisis matemático del modulador Mach-Zehnder, para ambos modos, considerando las distorsiones que introduce el DUT, se realizó con la finalidad de comprender el funcionamiento del modulador, y en los estudios de los métodos. Se estudió el modulador Mach-Zehnder, en sus 2 modos: Push-Pull y asimétrico, y sus parámetros característicos.

Se realizaron medidas experimentales para obtener las funciones de transferencia de los 2 moduladores, single drive y dual drive, que se tenían en el laboratorio.

Los métodos estudiados se enfocan en componentes diferentes de la señal, MPSM busca la diferencia de fases, Peucheret y ABCM la suma de fases. Y RF-SCAN es una mezcla de los 2 anteriores, pues necesita tanto la suma como la diferencia de fases de las bandas laterales.

Es importante comprender el funcionamiento de los métodos: MPSM y Peucheret, para comprender ABCM y RF-SCAN.

El método MPSM es un método rápido y sencillo, pero se requiere un laser sintonizable, el cual introduce errores en la medición debido a la inexactitud de sus saltos.

Además, MPSM presenta ciertas limitaciones, en cuanto a la selección de la frecuencia de la señal moduladora y el paso frecuencial del laser sintonizable. Si se elige una frecuencia moduladora y un paso frecuencial muy elevado todas las aproximaciones de las derivadas mediante incrementos serán incorrectas. Si, al contrario, se eligen muy pequeñas, entonces el valor de dispersión medido será inexacto debido a imperfecciones del sistema y los posibles efectos del ruido tendrán una mayor relevancia. Existe un compromiso entre la precisión de la medida y la validez de la aproximación.

El método ABCM y Peucheret comparten la finalidad de encontrar los "ceros" de la señal, la diferencia está en que cuando se utiliza el modulador en modo asimétrico se unifican en un solo argumento de la señal los desplazamientos de fase y el voltaje de bias que los provocó con lo que el voltaje de bias puede aprovecharse para provocar mínimos de amplitud de señal detectada para el valor concreto de dispersión a medir, a la frecuencia que se desee.

El método ABCM, como realiza barridos en el voltaje de bias, requiere de un largo tiempo de ejecución, para un salto de voltaje de bias de 50 mV aproximadamente 3 horas, si este se reduce el tiempo de ejecución aumenta, pero tampoco puede trabajarse con un paso muy pequeño porque se perdería precisión en la medida.

En ABCM hay una relación entre la frecuencia RF que se utiliza y la precisión de la diferencia de voltaje de bias en la que se producen los mínimos de la función, si se tiene una fuente de voltaje de alta precisión será indiferente la frecuencia con la que se trabaje, pero de lo contrario, ajustando la frecuencia se puede obtener un valor más preciso de las dispersión con una fuente menos precisa.

En el método RF-Scan se idealizó la señal y los desfasajes que producen en las bandas laterales. Lo que permite un código de ubicación de los ceros más sencillo. Pero el cálculo final del valor del retardo de grupo y la dispersión se realizó como se deberá realizar, si se continúa el desarrollo de RF-Scan, en el laboratorio.

El método RF-Scan permite hacer un recorrido en el espectro mayor sin necesidad de cambiar la longitud de onda, sin embargo este recorrido no es completo y es pequeño, si es necesario conocer el comportamiento de la dispersión en un mayor ancho de banda se puede implementar un recorrido en longitudes de onda.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Möller, K.D., "Optics", University Science Books, California, 1998.

[2] Binh L. N. y Shraga I., "An Optical Fiber Dispersion Measurement Technique and System", Tech. Rep. MECSE-14-2005, Monash University, 2005.

[3]. Ferrer Picón, X., y Moral Cerezo, F., "Diseño y puesta en marcha de un banco de medidas de dispersión a frecuencias ópticas", TFC-UPC, (2009)

[4] Moreno Ramos, M., y Vázquez Núñez, M., "Optimización de técnicas de medida de dispersión cromática a frecuencias ópticas", TFC-UPC, (2010)

[5] Obando Velazco, C.A., "New Methods For Measuring And Monitoring Chromatic Dispersion In Optical Communication", PFC-UPC, (2010)

[6] Santos, M.C., De Bernardo-Rodi, S.P. and Mitre-Gutiérrez, M.A., "New Modulation Zero-Shift Method to Characterize Fast Group Delay Ripple of Dispersion-Compensating Fiber Bragg Gratings", *IEEEPhotonics Technology Letters*, 1298-1300, Vol. 19, N. 17, 2007.

APÉNDICES

Apéndice A - Análisis Matemático Modulador Mach-Zehnder

$$x_{out}(t) = \frac{1}{2}A_0 e^{j\omega_0 t} e^{j\phi_0}\left[e^{j\frac{\pi}{V_{\pi 1}}V_1(t)} e^{j\frac{\pi}{V_{\pi 1}}V_{B1}} + e^{j\frac{\pi}{V_{\pi 2}}V_2(t)} e^{j\frac{\pi}{V_{\pi 2}}V_{B2}}\right]$$

Sustituyendo los siguientes datos en la Ecuación anterior:

$$\theta_1(t) = \frac{\pi}{V_{\pi 1}}V_1(t)\theta_{B1} = \frac{\pi}{V_{\pi 1}}V_{B1}$$

$$\theta_2(t) = \frac{\pi}{V_{\pi 2}}V_2(t)\theta_{B2} = \frac{\pi}{V_{\pi 2}}V_{B2}$$

Se obtiene:

$$x_{out}(t) = \frac{1}{2}A_0 e^{j\omega_0 t} e^{j\phi_0}\left[e^{j\theta_1(t)} e^{j\theta_{B1}} + e^{j\theta_2(t)} e^{j\theta_{B2}}\right]$$

Si se saca un factor común:

$$\Delta\theta_B = \theta_{B2} - \theta_{B1}$$

Resulta:

$$x_{out}(t) = \frac{1}{2}A_0 e^{j\omega_0 t} e^{j\phi_0} e^{j\theta_{B1}}\left[e^{j\theta_1(t)} + e^{j\theta_2(t)} e^{j\Delta\theta_B}\right]$$

Por aproximación Small-Signal:

$$e^{j\varphi(t)} = 1 + j\varphi(t) - \frac{\varphi^2(t)}{2}$$

$$x_{out}(t) = \frac{1}{2} A_0 e^{j\omega_0 t} e^{j\phi_0} e^{j\theta_{B1}} \left[1 + j\theta_1(t) - \frac{{\theta_1}^2(t)}{2} + e^{j\Delta\theta_B} \left(1 + j\theta_2(t) - \frac{{\theta_2}^2(t)}{2} \right) \right]$$

$$\theta_1(t) = \frac{\pi}{V_{\pi 1}} V_{RF1} \cos(\omega_{RF} t) \qquad \theta_{RF1} = \frac{\pi}{V_{\pi 1}} V_{RF1}$$

$$\theta_2(t) = \frac{\pi}{V_{\pi 2}} V_{RF2} \cos(\omega_{RF} t) \qquad \theta_{RF2} = \frac{\pi}{V_{\pi 2}} V_{RF2}$$

$$x_{out}(t) = \frac{1}{2} A_0 e^{j\omega_0 t} e^{j\phi_0} e^{j\theta_{B1}} \left[1 + j\theta_{RF1} \cos(\omega_{RF} t) - \frac{{\theta_{RF1}}^2}{2} \cos^2(\omega_{RF} t) \right.$$
$$\left. + e^{j\Delta\theta_B} (1 + j\theta_{RF2} \cos(\omega_{RF} t) - \frac{{\theta_{RF2}}^2}{2} \cos^2(\omega_{RF} t)) \right]$$

$$x_{out}(t) = \frac{1}{2} A_0 e^{j\omega_0 t} e^{j\phi_0} e^{j\theta_{B1}} \left[\left(1 + e^{j\Delta\theta_B}\right) + j\cos(\omega_{RF} t) \left(\theta_{RF1} + e^{j\Delta\theta_B} \theta_{RF2}\right) \right.$$
$$\left. - \cos^2(\omega_{RF} t) \left(\frac{{\theta_{RF1}}^2}{2} + e^{j\Delta\theta_B} \frac{{\theta_{RF2}}^2}{2} \right) \right]$$

$$x_{out}(t) = \frac{1}{2} A_0 e^{j\omega_0 t} e^{j\phi_0} e^{j\theta_{B1}} e^{j\frac{\Delta\theta_B}{2}} \left[\left(e^{-j\frac{\Delta\theta_B}{2}} + e^{j\frac{\Delta\theta_B}{2}} \right) \right.$$
$$+ j\cos(\omega_{RF} t) \left(e^{-j\frac{\Delta\theta_B}{2}} \theta_{RF1} + e^{j\frac{\Delta\theta_B}{2}} \theta_{RF2} \right)$$
$$\left. - \cos^2(\omega_{RF} t) \left(e^{-j\frac{\Delta\theta_B}{2}} \frac{{\theta_{RF1}}^2}{2} + e^{j\frac{\Delta\theta_B}{2}} \frac{{\theta_{RF2}}^2}{2} \right) \right]$$

$$x_{out}(t) = \frac{1}{2} A_0 e^{j\omega_0 t} e^{j\phi_0} e^{j\theta_{B1}} e^{j\frac{\Delta\theta_B}{2}} \left[2\cos\left(\frac{\Delta\theta_B}{2}\right) \right.$$
$$+ j\cos(\omega_{RF} t) \left(e^{-j\frac{\Delta\theta_B}{2}} \theta_{RF1} + e^{j\frac{\Delta\theta_B}{2}} \theta_{RF2} \right)$$
$$\left. - \cos^2(\omega_{RF} t) \left(e^{-j\frac{\Delta\theta_B}{2}} \frac{{\theta_{RF1}}^2}{2} + e^{j\frac{\Delta\theta_B}{2}} \frac{{\theta_{RF2}}^2}{2} \right) \right]$$

Apéndice B - Análisis Matemático Modulador Mach-Zehnder particularización para modo Push-Pull:

$$\theta_{RF1} = -\theta_{RF2} = \theta_{RF}$$

$$x_{out}(t) = \frac{1}{2}A_0 e^{j\omega_0 t} e^{j\phi_0} e^{j\theta_{B1}} e^{j\frac{\Delta\theta_B}{2}} \left[2\cos\left(\frac{\Delta\theta_B}{2}\right)\right.$$

$$\left. + j\cos(\omega_{RF}t)\theta_{RF}\left(e^{-j\frac{\Delta\theta_B}{2}} - e^{j\frac{\Delta\theta_B}{2}}\right) - \cos^2(\omega_{RF}t)\frac{\theta_{RF}^2}{2}\left(e^{-j\frac{\Delta\theta_B}{2}} + e^{j\frac{\Delta\theta_B}{2}}\right)\right]$$

$$x_{out}(t) = \frac{1}{2}A_0 e^{j\omega_0 t} e^{j\phi_0} e^{j\theta_{B1}} e^{j\frac{\Delta\theta_B}{2}} \left[2\cos\left(\frac{\Delta\theta_B}{2}\right)\right.$$

$$\left. + 2\cos(\omega_{RF}t)\theta_{RF}\left(\frac{e^{j\frac{\Delta\theta_B}{2}} - e^{-j\frac{\Delta\theta_B}{2}}}{2j}\right) - 2\cos^2(\omega_{RF}t)\frac{\theta_{RF}^2}{2}\left(\frac{e^{-j\frac{\Delta\theta_B}{2}} + e^{j\frac{\Delta\theta_B}{2}}}{2}\right)\right]$$

$$x_{out}(t) = \frac{1}{2}A_0 e^{j\omega_0 t} e^{j\phi_0} e^{j\theta_{B1}} e^{j\frac{\Delta\theta_B}{2}} \left[2\cos\left(\frac{\Delta\theta_B}{2}\right)\right.$$

$$\left. + 2\cos(\omega_{RF}t)\theta_{RF}\sin\left(\frac{\Delta\theta_B}{2}\right) - \cos^2(\omega_{RF}t)\theta_{RF}^2\cos\left(\frac{\Delta\theta_B}{2}\right)\right]$$

$$x_{out}(t) = \frac{1}{2}A_0 e^{j\omega_0 t} e^{j\phi_0} e^{j\theta_{B1}} e^{j\frac{\Delta\theta_B}{2}} \left[2\cos\left(\frac{\Delta\theta_B}{2}\right)\right.$$

$$\left. + \theta_{RF}\sin\left(\frac{\Delta\theta_B}{2}\right)\left(e^{j\omega_{RF}t} + e^{-j\omega_{RF}t}\right) - \cos\left(\frac{\Delta\theta_B}{2}\right)\frac{\theta_{RF}^2}{4}\left(e^{j\omega_{RF}t} + e^{-j\omega_{RF}t}\right)^2\right]$$

$$x_{out}(t) = \frac{1}{2}A_0 e^{j\omega_0 t} e^{j\phi_0} e^{j\theta_{B1}} e^{j\frac{\Delta\theta_B}{2}} \left[2\cos\left(\frac{\Delta\theta_B}{2}\right)\right.$$

$$\left. + \theta_{RF}\sin\left(\frac{\Delta\theta_B}{2}\right)\left(e^{j\omega_{RF}t} + e^{-j\omega_{RF}t}\right) - \cos\left(\frac{\Delta\theta_B}{2}\right)\frac{\theta_{RF}^2}{4}\left(e^{j2\omega_{RF}t} + e^{-j2\omega_{RF}t} + 2\right)\right]$$

Después del DUT:

$$x_{out}(t) = \frac{1}{2}A_0 e^{j\omega_0 t} e^{j\phi_0} e^{j\theta_{B1}} e^{j\frac{\Delta\theta_B}{2}} \left[2\cos\left(\frac{\Delta\theta_B}{2}\right) \right.$$

$$+ \theta_{RF} \sin\left(\frac{\Delta\theta_B}{2}\right) \left(e^{j\omega_{RF}t} e^{j\phi^+} + e^{-j\omega_{RF}t} e^{j\phi^-}\right)$$

$$\left. - \cos\left(\frac{\Delta\theta_B}{2}\right) \frac{{\theta_{RF}}^2}{4} \left(e^{j2\omega_{RF}t} e^{j\phi^+} + e^{-j2\omega_{RF}t} e^{j\phi^-} + 2\right) \right]$$

$$x_{out}(t) = \frac{1}{2}A_0 e^{j\omega_0 t} e^{j\phi_0} e^{j\theta_{B1}} e^{j\frac{\Delta\theta_B}{2}} \left[\cos\left(\frac{\Delta\theta_B}{2}\right) \left(2 - \frac{{\theta_{RF}}^2}{2}\right) \right.$$

$$+ \theta_{RF} \sin\left(\frac{\Delta\theta_B}{2}\right) e^{j\frac{\phi^+ + \phi^-}{2}} \left(e^{j\omega_{RF}t} e^{j\frac{\phi^+ - \phi^-}{2}} + e^{-j\omega_{RF}t} e^{-j\frac{\phi^+ - \phi^-}{2}}\right)$$

$$\left. - \cos\left(\frac{\Delta\theta_B}{2}\right) \frac{{\theta_{RF}}^2}{4} e^{j\frac{\phi^+ + \phi^-}{2}} \left(e^{j2\omega_{RF}t} e^{j\frac{\phi^+ - \phi^-}{2}} + e^{-j2\omega_{RF}t} e^{-j\frac{\phi^+ - \phi^-}{2}}\right) \right]$$

$$\frac{\Delta\phi}{2} = \frac{\phi^+ - \phi^-}{2} \frac{\Sigma\phi}{2} = \frac{\phi^+ + \phi^-}{2}$$

$$x_{out}(t) = \frac{1}{2}A_0 e^{j\omega_0 t} e^{j\phi_0} e^{j\theta_{B1}} e^{j\frac{\Delta\theta_B}{2}} \left[\cos\left(\frac{\Delta\theta_B}{2}\right) \left(2 - \frac{{\theta_{RF}}^2}{2}\right) \right.$$

$$\left. + 2\theta_{RF} \sin\left(\frac{\Delta\theta_B}{2}\right) e^{j\frac{\Sigma\phi}{2}} \cos\left(\omega_{RF}t + \frac{\Delta\phi}{2}\right) - \frac{{\theta_{RF}}^2}{2} \cos\left(\frac{\Delta\theta_B}{2}\right) e^{j\frac{\Sigma\phi}{2}} \cos\left(2\omega_{RF}t + \frac{\Delta\phi}{2}\right) \right]$$

<u>Detección:</u> $|x_{out}(t)|^2$

$$i_{out}(t) = \frac{{A_0}^2}{4}\left(\left\{\cos\left(\frac{\Delta\theta_B}{2}\right)\left(2 - \frac{{\theta_{RF}}^2}{2}\right)\right.\right.$$
$$+ 2\theta_{RF}\sin\left(\frac{\Delta\theta_B}{2}\right)\cos\left(\frac{\Sigma\phi}{2}\right)\cos\left(\omega_{RF}t + \frac{\Delta\phi}{2}\right)$$
$$\left.\left. - \frac{{\theta_{RF}}^2}{2}\cos\left(\frac{\Delta\theta_B}{2}\right)\cos\left(\frac{\Sigma\phi}{2}\right)\cos\left(2\omega_{RF}t + \frac{\Delta\phi}{2}\right)\right\}^2\right.$$
$$+ \left\{2\theta_{RF}\sin\left(\frac{\Delta\theta_B}{2}\right)\sin\left(\frac{\Sigma\phi}{2}\right)\cos\left(\omega_{RF}t + \frac{\Delta\phi}{2}\right)\right.$$
$$\left.\left. - \frac{{\theta_{RF}}^2}{2}\cos\left(\frac{\Delta\theta_B}{2}\right)\sin\left(\frac{\Sigma\phi}{2}\right)\cos\left(2\omega_{RF}t + \frac{\Delta\phi}{2}\right)\right\}^2\right)$$

$$i_{out}(t) = \frac{{A_0}^2}{4}\left(\cos^2\left(\frac{\Delta\theta_B}{2}\right)\left(4 - 2{\theta_{RF}}^2\right)\right.$$
$$+ 4{\theta_{RF}}^2\sin^2\left(\frac{\Delta\theta_B}{2}\right)\cos^2\left(\frac{\Sigma\phi}{2}\right)\cos^2\left(\omega_{RF}t + \frac{\Delta\phi}{2}\right)$$
$$+ 8\theta_{RF}\cos\left(\frac{\Delta\theta_B}{2}\right)\sin\left(\frac{\Delta\theta_B}{2}\right)\cos\left(\frac{\Sigma\phi}{2}\right)\cos\left(\omega_{RF}t + \frac{\Delta\phi}{2}\right)$$
$$- 2{\theta_{RF}}^2\cos^2\left(\frac{\Delta\theta_B}{2}\right)\cos\left(\frac{\Sigma\phi}{2}\right)\cos\left(2\omega_{RF}t + \frac{\Delta\phi}{2}\right)$$
$$\left. + 4{\theta_{RF}}^2\sin^2\left(\frac{\Delta\theta_B}{2}\right)\sin^2\left(\frac{\Sigma\phi}{2}\right)\cos^2\left(\omega_{RF}t + \frac{\Delta\phi}{2}\right)\right)$$

$$i_{out}(t) = \frac{{A_0}^2}{4}\left(\cos^2\left(\frac{\Delta\theta_B}{2}\right)\left(4 - 2{\theta_{RF}}^2\right)\right.$$
$$+ 8\theta_{RF}\cos\left(\frac{\Delta\theta_B}{2}\right)\sin\left(\frac{\Delta\theta_B}{2}\right)\cos\left(\frac{\Sigma\phi}{2}\right)\cos\left(\omega_{RF}t + \frac{\Delta\phi}{2}\right)$$
$$+ 4{\theta_{RF}}^2\sin^2\left(\frac{\Delta\theta_B}{2}\right)\cos^2\left(\omega_{RF}t + \frac{\Delta\phi}{2}\right)$$
$$\left. - 2{\theta_{RF}}^2\cos^2\left(\frac{\Delta\theta_B}{2}\right)\cos\left(\frac{\Sigma\phi}{2}\right)\cos\left(2\omega_{RF}t + \frac{\Delta\phi}{2}\right)\right)$$

Apéndice C - Análisis Matemático Modulador Mach-Zehnder particularización para modo Asimétrico

$$\theta_{RF1} = \theta_{RF}$$

$$\theta_{RF2} = 0$$

$$x_{out}(t) = \frac{1}{2} A_0 e^{j\omega_0 t} e^{j\phi_0} e^{j\theta_{B1}} e^{j\frac{\Delta\theta_B}{2}} \left[2\cos\left(\frac{\Delta\theta_B}{2}\right) + j\cos(\omega_{RF} t)\, e^{-j\frac{\Delta\theta_B}{2}} \theta_{RF} - \frac{\theta_{RF}{}^2}{2} \cos{}^2(\omega_{RF} t) e^{-j\frac{\Delta\theta_B}{2}} \right]$$

$$x_{out}(t) = \frac{1}{2} A_0 e^{j\omega_0 t} e^{j\phi_0} e^{j\theta_{B1}} e^{j\frac{\Delta\theta_B}{2}} \left[2\cos\left(\frac{\Delta\theta_B}{2}\right) + j\frac{\theta_{RF}}{2} e^{-j\frac{\Delta\theta_B}{2}} \left(e^{j\omega_{RF} t} + e^{-j\omega_{RF} t}\right) - \frac{\theta_{RF}{}^2}{8} e^{-j\frac{\Delta\theta_B}{2}} \left(e^{j2\omega_{RF} t} + e^{-j2\omega_{RF} t} + 2\right) \right]$$

$$x_{out}(t) = \frac{1}{2} A_0 e^{j\omega_0 t} e^{j\phi_0} e^{j\theta_{B1}} e^{j\frac{\Delta\theta_B}{2}} \left[2\cos\left(\frac{\Delta\theta_B}{2}\right) - \frac{\theta_{RF}{}^2}{4} e^{-j\frac{\Delta\theta_B}{2}} + j\frac{\theta_{RF}}{2} e^{-j\frac{\Delta\theta_B}{2}} \left(e^{j\omega_{RF} t} + e^{-j\omega_{RF} t}\right) - \frac{\theta_{RF}{}^2}{8} e^{-j\frac{\Delta\theta_B}{2}} \left(e^{j2\omega_{RF} t} + e^{-j2\omega_{RF} t}\right) \right]$$

Después del DUT:

$$x_{out}(t) = \frac{1}{2} A_0 e^{-j\omega_0 t} e^{-j\phi_0} e^{j\theta_{B1}} e^{j\frac{\Delta\theta_B}{2}} \left[2\cos\left(\frac{\Delta\theta_B}{2}\right) - \frac{{\theta_{RF}}^2}{4} e^{-j\frac{\Delta\theta_B}{2}} \right.$$

$$+ j\frac{\theta_{RF}}{2} e^{-j\frac{\Delta\theta_B}{2}} \left(e^{j\omega_{RF}t} e^{j\phi^+} + e^{-j\omega_{RF}t} e^{-j\phi^-}\right)$$

$$\left. - \frac{{\theta_{RF}}^2}{8} e^{-j\frac{\Delta\theta_B}{2}} \left(e^{j2\omega_{RF}t} e^{j\phi^+} + e^{-j2\omega_{RF}t} e^{-j\phi^-}\right) \right]$$

$$x_{out}(t) = \frac{1}{2} A_0 e^{-j\omega_0 t} e^{-j\phi_0} e^{j\theta_{B1}} e^{j\frac{\Delta\theta_B}{2}} \left[2\cos\left(\frac{\Delta\theta_B}{2}\right) - \frac{{\theta_{RF}}^2}{4} e^{-j\frac{\Delta\theta_B}{2}} \right.$$

$$+ j\frac{\theta_{RF}}{2} e^{-j\frac{\Delta\theta_B}{2}} e^{j\frac{\phi^+ + \phi^-}{2}} \left(e^{j\omega_{RF}t} e^{j\frac{\phi^+ - \phi^-}{2}} + e^{-j\omega_{RF}t} e^{-j\frac{\phi^+ - \phi^-}{2}}\right)$$

$$\left. - \frac{{\theta_{RF}}^2}{8} e^{-j\frac{\Delta\theta_B}{2}} e^{j\frac{\phi^+ + \phi^-}{2}} \left(e^{j2\omega_{RF}t} e^{j\frac{\phi^+ - \phi^-}{2}} + e^{-j2\omega_{RF}t} e^{-j\frac{\phi^+ - \phi^-}{2}}\right) \right]$$

$$\frac{\Delta\phi}{2} = \frac{\phi^+ - \phi^-}{2} \quad \frac{\Sigma\phi}{2} = \frac{\phi^+ + \phi^-}{2}$$

$$x_{out}(t) = \frac{1}{2} A_0 e^{-j\omega_0 t} e^{-j\phi_0} e^{j\theta_{B1}} e^{j\frac{\Delta\theta_B}{2}} \left[2\cos\left(\frac{\Delta\theta_B}{2}\right) - \frac{{\theta_{RF}}^2}{4} e^{-j\frac{\Delta\theta_B}{2}} \right.$$

$$+ j\theta_{RF} e^{-j\frac{\Delta\theta_B}{2}} e^{j\frac{\Sigma\phi}{2}} \cos\left(\omega_{RF}t + \frac{\Delta\phi}{2}\right)$$

$$\left. - \frac{{\theta_{RF}}^2}{4} e^{-j\frac{\Delta\theta_B}{2}} e^{j\frac{\Sigma\phi}{2}} \cos\left(2\omega_{RF}t + \frac{\Delta\phi}{2}\right) \right]$$

<u>Detección:</u> $|x_{out}(t)|^2$

$$i_{out}(t) = \frac{A_0{}^2}{4}\left[\left\{\cos\left(\frac{\Delta\theta_B}{2}\right)\left(2-\frac{\theta_{RF}{}^2}{4}\right) - \theta_{RF}\sin\left(\frac{\Sigma\phi}{2}-\frac{\Delta\theta_B}{2}\right)\cos\left(\omega_{RF}t+\frac{\Delta\phi}{2}\right)\right.\right.$$
$$\left.-\frac{\theta_{RF}{}^2}{4}\cos\left(\frac{\Sigma\phi}{2}-\frac{\Delta\theta_B}{2}\right)\cos\left(2\omega_{RF}t+\frac{\Delta\phi}{2}\right)\right\}^2$$
$$+\left\{\frac{\theta_{RF}{}^2}{4}\sin\left(\frac{\Delta\theta_B}{2}\right) + \theta_{RF}\cos\left(\frac{\Sigma\phi}{2}-\frac{\Delta\theta_B}{2}\right)\cos\left(\omega_{RF}t+\frac{\Delta\phi}{2}\right)\right.$$
$$\left.\left.-\frac{\theta_{RF}{}^2}{4}\sin\left(\frac{\Sigma\phi}{2}-\frac{\Delta\theta_B}{2}\right)\cos\left(2\omega_{RF}t+\frac{\Delta\phi}{2}\right)\right\}^2\right]$$

$$i_{out}(t) = \frac{A_0{}^2}{4}\left[\cos^2\left(\frac{\Delta\theta_B}{2}\right)\left(4-\theta_{RF}{}^2\right) + \theta_{RF}{}^2\sin^2\left(\frac{\Sigma\phi}{2}-\frac{\Delta\theta_B}{2}\right)\cos^2\left(\omega_{RF}t+\frac{\Delta\phi}{2}\right)\right.$$
$$-4\theta_{RF}\cos\left(\frac{\Delta\theta_B}{2}\right)\sin\left(\frac{\Sigma\phi}{2}-\frac{\Delta\theta_B}{2}\right)\cos\left(\omega_{RF}t+\frac{\Delta\phi}{2}\right)$$
$$-\theta_{RF}{}^2\cos\left(\frac{\Delta\theta_B}{2}\right)\cos\left(\frac{\Sigma\phi}{2}-\frac{\Delta\theta_B}{2}\right)\cos\left(2\omega_{RF}t+\frac{\Delta\phi}{2}\right)$$
$$\left.+\theta_{RF}{}^2\cos^2\left(\frac{\Sigma\phi}{2}-\frac{\Delta\theta_B}{2}\right)\cos^2\left(\omega_{RF}t+\frac{\Delta\phi}{2}\right)\right]$$

$$i_{out}(t) = \frac{A_0{}^2}{4}\left[\cos^2\left(\frac{\Delta\theta_B}{2}\right)\left(4-\theta_{RF}{}^2\right)\right.$$
$$-4\theta_{RF}\cos\left(\frac{\Delta\theta_B}{2}\right)\sin\left(\frac{\Sigma\phi}{2}-\frac{\Delta\theta_B}{2}\right)\cos\left(\omega_{RF}t+\frac{\Delta\phi}{2}\right)$$
$$\left.+\theta_{RF}{}^2\cos^2\left(\omega_{RF}t+\frac{\Delta\phi}{2}\right)-\theta_{RF}{}^2\cos\left(\frac{\Delta\theta_B}{2}\right)\cos\left(\frac{\Sigma\phi}{2}-\frac{\Delta\theta_B}{2}\right)\cos\left(2\omega_{RF}t+\frac{\Delta\phi}{2}\right)\right]$$

Apéndice D – Código MATLAB para obtener la Función de Transferencia del modulador

```
%HP8153A measures the power and the AG34970A is the voltage source

clc
clear all

vstart=0;
vstop=14;
vpaso=50;

%A file is created to save the data

[fitxer,path]=uiputfile('*.dat','Save');
if isequal(fitxer,0)
return
else
fitxer=sprintf('%s%s',path,fitxer);
fi=fopen(fitxer,'wt');
end

j=1;
k=1;
maximo=-Inf;
minimo=Inf;
vpaso=vpaso*1e-3;
```

```
%Data Acquisition

for x=vstart:vpaso:vstop
  s1=serial('COM1');
fopen(s1);
fprintf(s1, 'CHAN1:VOLT %g ;CURR 1.0',x);
pause(2)
fprintf(s1, '*VOLT?');
voltage = fscanf(s1);
fclose(s1);
delete(s1);
clear s1;
pause(5)

  % Power measure in W
  Potencia = HP8153A_pow1;
  % Power measure in mW
potencia = Potencia*1e3;
  % Power measure inn dBm
potencia1=10*log10(potencia/1e3);

pot(j) = potencia;
pot1(k)=potencia1;
  j=j+1;
  k=k+1;
end

%Find minimum and maximum
```

```
v = pot;
delta = 30;
x = vbias;
maxtab = [];
mintab = [];

mn = Inf;
mx = -Inf;
mnpos = NaN;
mxpos = NaN;

lookformax = 1;

for ie=1:length(v)
this = v(ie);
if this > mx
mx = this;
mxpos = x(ie);
end
if this < mn
mn = this;
mnpos = x(ie);
end

if lookformax
if this < mx-delta
maxtab = [maxtab ; mxpos mx];
mn = this;
```

```
mnpos = x(ie);
lookformax = 0;
end
else
if this > mn+delta
mintab = [mintab ; mnpos mn];
mx = this;
mxpos = x(ie);
lookformax = 1;
end
end
end

[minimo,ps2] = min(mintab);
minimo = minimo(2);
pos2 = mintab(ps2(2),2);
[maximo,ps1] = max(maxtab);
maximo = maximo(2);
pos1 = mintab(ps1(2),2);

% Calculate ER, Vpi,QP
ER = (maximo/minimo);
ER2 = 10*log10(ER)
Vpi = abs(pos2-pos1)
QP = abs(Vpi/2)

%Graphic generation

vbias=[vstart:vpaso:vstop];
```

```
figure(1)
plot(vbias,pot)
hold on
plot(pos1,maximo,'r*')
hold on
plot(pos2,minimo,'r*')
title('Transfer Function');
zoom on
ylabel('Pout (uW)');
xlabel('Vbias (V)');

figure(2)
plot(vbias,pot1)
hold on
plot(pos1,10*log10(maximo/1e3),'r*')
hold on
plot(pos2,10*log10(minimo/1e3),'r*')
title('Transfer Function');
zoom on
ylabel('Pout (dBm)');
xlabel('Vbias (V)');

%Write date in the file
fprintf(fi,'Initial_Vbias(V):\t%g',vstart);
fprintf(fi,'\nFinal_Vbias(V):\t%g',vstop);
fprintf(fi,'\nResolution(V):\t%g',vpaso);
fprintf(fi,'\nER(dB):\t%g',ER2);
fprintf(fi,'\nVpi(V):\t%g',Vpi);
fprintf(fi,'\nQP(V):\t%g',QP);
```

```
fprintf(fi,'\n\n\t\t\tVbias(V)\tPout(?W)\tVbias(V)\tPout(dBm)\n');
tamano=length(vbias);
for h=1:tamano
fprintf(fi,'\t\t\t%g\t\t',vbias(h));
fprintf(fi,'%7.3f',pot(h));
fprintf(fi,'\t\t%g\t\t',vbias(h));
fprintf(fi,'%7.3f\n',pot1(h));
end
st=fclose(fi);
```

Apéndice E – Código MATLAB de MPSM

```
close all
clear all
clc

%% Part 1 - Generates the graphic: Phase of the detected signal vs Wavelength
% WITHOUT DUT

wlstart = 1557.5;
wlstop = 1561;
wlstep =0.05;
frf = 500;
frf1 = frf*1e6;
pow =  10;

% A file is created to save the data

[fitxer,path] = uiputfile('*.dat','Save');
if isequal(fitxer,0)
return
else
fitxer = sprintf('%s%s',path,fitxer);
fi = fopen(fitxer,'wt');
end

% Configurates the network analizer
```

```
g = gpib('ni',0,19);
fopen(g)
fprintf(g,'CWFREQ')
% RF frequency
fprintf(g,'cwfreq;%g',frf1)
fprintf(g,'POWER')
% Power of the RF signal
fprintf(g,'power;%g',pow)
% Number of points in screen
fprintf(g,'poin;100')
% Creates a Marker and position it in the center of the screen
fprintf(g,'MARK1')
fprintf(g,'STAR?')
TSTART = fscanf(g,'%g');
fprintf(g,'STOP?')
TSTOP = fscanf(g,'%g');
center = (TSTOP-TSTART)/2;
fprintf(g,'mark1;%g',center)
fclose(g)
delete(g)
clear g

% Data acquisition

for i = wlstart:wlstep:wlstop
  % Sets the wavelength
  h = gpib('ni',0,16);
fopen(h)
fprintf(h, ':WAVE %g',i);
```

```
pause(5)
fclose(h);
delete(h);
clear h;
pause(5)

% Measures the phase of the detected signal
modul=HP8753Dm('mesura');
fprintf(fi,'\n%s',modul);
pause(0.02)
modul=HP8753Dm('mesura');
fprintf(fi,',%s',modul);
pause(0.02)
modul=HP8753Dm('mesura');
fprintf(fi,',%s',modul);
pause(0.02)
end

st=fclose(fi);

% Saves the 1st, 4th and 7th columns in the vectors: fmodul1, fmodul2 y fmodul3.
[fmodul1,fmodul2,fmodul3] = textread(fitxer,'%n%*n%*n%n%*n%*n%n%*[^\n]','delimiter',',');

% Calculates the average of the 3 columns
fmodul_wodut = (fmodul1+fmodul2+fmodul3)./3;

l=[wlstart:wlstep:wlstop];
```

```
figure(1)
plot(l,fmodul_wodut)
hold on
plot(l,mean(fmodul_wodut),'r*')
title('Phase without DUT')
ylabel('Phase(°)');
xlabel('Wavelength (nm)');

fi=fopen(fitxer,'wt');
fprintf(fi,'Initial_Wavelength(nm):\t%g',wlstart);
fprintf(fi,'\nFinal_Wavelength(nm):\t%g',wlstop);
fprintf(fi,'\nResolution(nm):\t%g',wlstep);
fprintf(fi,'\nFrequency_RF(GHz):\t%g',frf);
fprintf(fi,'\nPower_level(dBm):\t%g',pow);
fprintf(fi,'\n\n\t\t\tWavelength(nm):');
fprintf(fi,'\t\tPhase(Â°):');
tamano=length(l);
for h=1:tamano
fprintf(fi,'\n\t\t\t%g',l(h));
fprintf(fi,'\t\t\t%g',fmodul_wodut(h));
end
st=fclose(fi);

gbox('Connect the DUT')

t 2 - Generates the graphic: Phase of the detected signal vs Wavelength
DUT

ted to save the data
```

```
[fitxer,path]=uiputfile('*.dat','Save');
if isequal(fitxer,0)
return
else
fitxer=sprintf('%s%s',path,fitxer);
fi=fopen(fitxer,'wt');
end

% Configurates the network analizer

g = gpib('ni',0,19);
fopen(g)
fprintf(g,'CWFREQ')
% RF frequency
fprintf(g,'cwfreq;%g',frf1)
fprintf(g,'POWER')
% Power of the RF signal
fprintf(g,'power;%g',pow)
% Number of points in screen
fprintf(g,'poin;100')
% Creates a Marker and position it in the center of the screen
fprintf(g,'MARK1')
fprintf(g,'STAR?')
TSTART = fscanf(g,'%g');
fprintf(g,'STOP?')
TSTOP = fscanf(g,'%g');
center = (TSTOP-TSTART)/2;
fprintf(g,'mark1;%g',center)
```

```
fclose(g)
delete(g)
clear g

% Data acquisition

for i = wlstart:wlstep:wlstop
  % Sets the wavelength
  h=gpib('ni',0,16);
fopen(h)
fprintf(h, ':WAVE %g',i);
pause(5)
fclose(h);
delete(h);
clear h;
pause(5)

  % Measures the phase of the detected signal
modul=HP8753Dm('mesura');
fprintf(fi,'\n%s',modul);
pause(0.02)
modul=HP8753Dm('mesura');
fprintf(fi,',%s',modul);
pause(0.02)
modul=HP8753Dm('mesura');
fprintf(fi,',%s',modul);
pause(0.02)
end
```

```
st=fclose(fi);

% Saves the 1st, 4th and 7th columns in the vectors: fmodul1, fmodul2 y
fmodul3.

[fmodul1,fmodul2,fmodul3]=textread(fitxer,'%n%*n%*n%n%*n%*n%n%*[^\
n]','delimiter',',');

% Calculates the average of the 3 columns

fmodul_withdut=(fmodul1+fmodul2+fmodul3)./3;
fmodul_withdut1=(180/pi)*unwrap((fmodul_withdut*pi)/180);

l=[wlstart:wlstep:wlstop];
figure(2)
plot(l,fmodul_withdut);
title('Phase with DUT')
ylabel('Phase (º)');
xlabel('Wavelength (nm)');

fi=fopen(fitxer,'wt') ;
fprintf(fi,'Initial_Wavelength(nm):\t%g',wlstart);
fprintf(fi,'\nFinal_Wavelength(nm):\t%g',wlstop);
fprintf(fi,'\nResolution(nm):\t%g',wlstep);
fprintf(fi,'\nFrequency_RF(MHz):\t%g',frf);
fprintf(fi,'\nPower_level(dBm):\t%g',pow);
fprintf(fi,'\n\n\t\t\tWavelength(nm):');
fprintf(fi,'\t\tFase(Âº):');
tamano=length(l);
```

```
for h=1:tamano
fprintf(fi,'\n\t\t\t%g',l(h));
fprintf(fi,'\t\t\t%g',fmodul_withdut1(h));
end
st=fclose(fi);
```

%% Part 3 - Generates the graphic: Group Delay, Calibrated Phase and Dispersion vs Wavelength

```
% Calculates and represents the calibrated phase

l=[wlstart:wlstep:wlstop];
fmodul = fmodul_withdut1 - fmodul_wodut;
figure(3)
plot(l,fmodul);
title('Calibrated Phase')
ylabel('Phase (°)');
xlabel('Wavelength (nm)');

% Calculates and represents the Group Delay

tg = -(fmodul/(frf1*360));
figure(4)
plot(l,tg);
title('Group Delay')
ylabel('Group delay (s)');
xlabel('Wavelength (nm)');
```

```
% Calculates and represents the Dispersion (D)

D = (tg(2:length(tg))-tg(1:length(tg)-1))/(wlstep*10^-9); %s/m
D = D*10^3 %ps/nm
Disp = mean(D) %ps/nm
figure(5)
plot(l(1:(length(tg)-1)),D);
hold on
plot(l(1:(length(tg)-1)),Disp,'r*');
title('Dispersion')
ylabel('Dispersion (ps/nm)');
xlabel('Wavelength (nm)');
```

Apéndice F – Código MATLAB de ABCM

%% Part 1 - Generates the graphic: Amplitude vs Bias Voltage WITHOUT DUT

```
vstart = 0;
vstop = 14;
vstep = 50;
frf = 2;
frf1 = frf*1e9;
pow = 10;

% A file is created to save the data

[fitxer,path] = uiputfile('*.dat','Save');
if isequal(fitxer,0)
return
else
fitxer = sprintf('%s%s',path,fitxer);
fi = fopen(fitxer,'wt');
end

% Configures the Network Analizer

g = gpib('ni',0,19);
fopen(g)
% Modulator frequency
fprintf(g,'CWFREQ')
```

```
fprintf(g,'cwfreq;%g',frf1)
% Signal power
fprintf(g,'POWE')
fprintf(g,'powe;%g',pow)
% Number of points in the scrren
fprintf(g,'poin;100')
% Creates a Marker and position it in the center of the screen
fprintf(g,'MARK1')
fprintf(g,'STAR?')
TSTART = fscanf(g,'%g');
fprintf(g,'STOP?')
TSTOP = fscanf(g,'%g');
center = (TSTOP-TSTART)/2;
fprintf(g,'mark1;%g',center)
delete(g)
clear g

% Data acquisition

vstep = vstep*1e-3;

for i = vstart:vstep:vstop
  s1 = serial('COM1');
fopen(s1);
fprintf(s1, 'CHAN1:VOLT %g ;CURR 1.0',i);
pause(2)
fprintf(s1, '*VOLT?');
voltage = fscanf(s1);
fclose(s1);
```

```
delete(s1);
clear s1;
pause(5)
modul=HP8753Da('mesura');
fprintf(fi,'\n%s',modul);
pause(0.02)
modul=HP8753Da('mesura');
fprintf(fi,',%s',modul);
pause(0.02)
modul=HP8753Da('mesura');
fprintf(fi,',%s',modul);
pause(0.02)
end

st=fclose(fi);
```

% Saves the 1st, 4th and 7th columns in the vectors: fmodul1, fmodul2 y fmodul3.

```
[fmodul1,fmodul2,fmodul3] =
textread(fitxer,'%n%*n%*n%n%*n%*n%n%*[^\n]','delimiter',',');
```

% Calculates the average of the 3 columns

```
fmodul_wodut = (fmodul1+fmodul2+fmodul3)./3;
```

% Generates the graphic: Amplitude vs Bias voltage

```
vbias = [vstart:vstep:vstop];
```

```
figure(1)
plot(vbias,fmodul_wodut)
title('Amplitude measured vs Vbias, without DUT')
zoom on
ylabel('S21(dB)');
xlabel('Vbias (V)');

% Writes in the file created
fi=fopen(fitxer,'wt');
fprintf(fi,'Initial_Vbias(V):\t%g',vstart);
fprintf(fi,'\nFinal_Vbias(V):\t%g',vstop);
fprintf(fi,'\nResolution(V):\t%g',vstep);
fprintf(fi,'\nFrequency_RF(GHz):\t%g',frf);
fprintf(fi,'\nPower_level(dBm):\t%g',pow);
fprintf(fi,'\n\n\t\t\tVbias(V)');
fprintf(fi,'\t\tS21(dB)');
tamano=length(vbias);
for h=1:tamano
fprintf(fi,'\n\t\t\t%g',vbias(h));
fprintf(fi,'\t\t\t%g',fmodul_wodut(h));
end
st=fclose(fi);

msgbox('Connect the DUT')

%% Part 2 - Generates the graphic: Amplitude vs Bias Voltage WITH DUT

% A file is created to save the data
```

```
[fitxer,path] = uiputfile('*.dat','Save');
if isequal(fitxer,0)
return
else
fitxer = sprintf('%s%s',path,fitxer);
fi = fopen(fitxer,'wt');
end

% Configures the Network Analizer

g = gpib('ni',0,19);
fopen(g)
fprintf(g,'CWFREQ')
% Modulator frequency
fprintf(g,'cwfreq;%g',frf1)
fprintf(g,'POWER')
% Signal power
fprintf(g,'power;%g',pow)
fprintf(g,'poin;100')
% Number of points in the screen
fprintf(g,'MARK1')
% Creates a Market and position it in the center of the screen
fprintf(g,'STAR?')
TSTAR = fscanf(g,'%g');
fprintf(g,'STOP?')
TSTOP = fscanf(g,'%g');
center = (TSTOP-TSTAR)/2;
fprintf(g,'mark1;%g',center)
```

```
fclose(g)
delete(g)
clear g

% Data acquisition

for i = vstart:vstep:vstop
  s1 = serial('COM1');
fopen(s1);
fprintf(s1, 'CHAN1:VOLT %g ;CURR 1.0',i);
pause(2)
fprintf(s1, '*VOLT?');
voltage = fscanf(s1);
fclose(s1);
delete(s1);
clear s1;
  pause(5)
  modul=HP8753Da('mesura');
  fprintf(fi,'\n%s',modul);
  pause(0.02)
  modul=HP8753Da('mesura');
  fprintf(fi,',%s',modul);
  pause(0.02)
  modul=HP8753Da('mesura');
  fprintf(fi,',%s',modul);
  pause(0.02)
end

st=fclose(fi);
```

```
%Se guardan la primera, cuarta y séptima columnas en los vectores fmodul1, fmodul2 y fmodul3.
[fmodul1,fmodul2,fmodul3]=textread(fitxer,'%n%*n%*n%n%*n%*n%n%*[^\n]','delimiter',',');

%Se realiza la media de las tres medidas
fmodul_withdut=(fmodul1+fmodul2+fmodul3)./3;

vbias=[vstart:vstep:vstop];
figure(2)
plot(vbias,fmodul_withdut);
title('Amplitud measured vs Vbias, with DUT')
zoom on
ylabel('S21 (dB)');
xlabel('Vbias (V)');

% Writes in the file created
fi=fopen(fitxer,'wt');
fprintf(fi,'Initial_Vbias(V):\t%g',vstart);
fprintf(fi,'\nFinal_Vbias(V):\t%g',vstop);
fprintf(fi,'\nResolution(V):\t%g',vstep);
fprintf(fi,'\nFrequency_RF(MHz):\t%g',frf);
fprintf(fi,'\nPower_level(dBm):\t%g',pow);
fprintf(fi,'\n\n\t\t\tVbias(V):');
fprintf(fi,'\t\tS21(dB):');
tamano=length(vbias);
for h=1:tamano
fprintf(fi,'\n\t\t\t%g',vbias(h));
```

```
fprintf(fi,'\t\t\t%g',fmodul_withdut(h));
end
st=fclose(fi);
```

%% Part 3 - Generates the graphic: Amplitude With DUT and Without DUT vs Bias Voltage, Calculates and represents the Dispersion (D)

```
figure(3)
plot(vbias,fmodul_wodut,'b',vbias,fmodul_withdut,'r');
title('Amplitudes Measured (Blue = Without DUT / Red = With DUT)')
ylabel('S21 (dB)');
xlabel('Vbias (V)');


%Esta función nos da el valor de la dispersión


for xs =1:1:2

if xs == 1
    v = fmodul_wodut;
else
    v = fmodul_withdut;
end

delta = 20;
x = vbias;
mintab = [];
```

```
mn = Inf;
mx = -Inf;
mnpos = NaN;
mxpos = NaN;

lookformax = 1;

for ie=1:length(v)
this = v(ie);
if this > mx
mx = this;
mxpos = x(ie);
end
if this < mn
mn = this;
mnpos = x(ie);
end

if lookformax
if this < mx-delta
mn = this;
mnpos = x(ie);
lookformax = 0;
end
else
if this > mn+delta
mintab = [mintab ; mnpos];
mx = this;
mxpos = x(ie);
```

```
lookformax = 1;
end
end
end

if xs == 1
minwo = mintab';
else
minwd = mintab';
end

end

vvb = [];

if length(minwo) > length(minwd)
for xs=length(minwd):-1:1
vvb(xs) = minwo(xs+1)-minwd(xs);
end
else
if length(minwo) == length(minwd)
for xs=1:1:length(minwd)
vvb(xs) = minwo(xs)-minwd(xs);
end
else
for xs=length(minwo):-1:1
vvb(xs) = minwo(xs)-minwd(xs+1);
end
end
```

```
end

vb = mean(vvb);

%calculamos la dispersión
vpi=3.25;
long=1550;
long_=(long*1e-9)^2;
rf2=(frf*1e9)^2;
c=3*1e8;
D=-(c*vb)/(2*vpi*(long_)*(rf2))
D1=D*1000
```

Apéndice G – Código MATLAB de RF-SCAN

```
clc
clear all
close all

% Find the Value of Dispersion using RF-SCAN method

cont_bias = 0;

%Dispersion value

D = 2.568; %s/m

pi = 3.1416;
c = 3*10^8; %m/s
wl = 1550*10^-9; %m

npoint = 5000;
freq_start = 3*10^3; %3KHz
freq_end = 6*10^9; %6GHz
freq_step = (freq_end - freq_start)/(npoint - 1);
freq = [freq_start:freq_step:freq_end];

vpi = 3.25;

continf = npoint;
delta = 20;
```

```
min = 0.3;
result(1,1:npoint)=Inf; %Frequency
result(2,1:npoint)=Inf; %Vbias of zeros
result(3,1:npoint)= Inf; %Min amplitude
result(4,1:npoint)=Inf; %Phase

vbias_start = 3.5;
vbias_end = 2*vpi;
vbias_step = 0.001;
vbias_end_new = 0;

pos = 1;

finish = false;
min_curve = 0;

while (finish == false)

  %% Vbias
if vbias_end == vbias_end_new
    vbias_end = 2*vbias_end;
end

if vbias_end < vbias_start
    vbias_step = -vbias_step;
else
    vbias_step = abs(vbias_step);
end
```

```
vbias = [vbias_start:vbias_step:vbias_end];

for vb = 1:length(vbias)

    cont_bias = cont_bias+1;

    %% Signal
    Av = pi * (vbias(vb)/vpi);
    Sig = 20*log10(sin((pi*D*(freq.^2)*(wl^2))/c + Av/2));

    amp_out = real(Sig);

    diff_phase(1:npoint) = 0;

    min_compare = max(amp_out) - delta;

for k = 1:1:npoint
if (amp_out(k) < min_compare)
if(amp_out(k) < min_curve)
            min_curve = amp_out(k);
pos = k;
end
end
end

result(3,pos) = min_curve;
result(1,pos) = freq(pos); %freq
result(2,pos) = pi *(1 - (vbias(vb)/(2*vpi))); %sum phase
```

```
result(4,pos) = diff_phase(pos); %phase

    min_curve = 0;
end

    %% Find new Vbias

first = true;
second = false;
for cd = 1:npoint
if first
if (result(2,cd) == Inf)
if cd == 1
                vbias_start = 0;
first = false;
else
                vbias_start = result(2,cd-1);
first = false;
end
end
else
if ((result(2,cd) < Inf) & (second == false))
            vbias_end_new = result(2,cd);
second = true;
end
end
end

    %% Find if we have finished
```

```
continf = 0;
for f = 1:npoint
if result(3,f) < Inf
continf = continf + 1;
end
end
endi = npoint*0.2;

if (continf >= endi)
finish = true;
else
finish = false;
end

end

d=1;
for f = 1:npoint
if result(2,f) < Inf
    ef_up(d) = result(2,f) + result(4,f);
    ef_down(d) = result(2,f) - result(4,f);
    freq_r(d) = freq(f);
    d =d+1;
end
end

%% Calculates the Group Delay
```

```
dphi_pos = ef_up(2:length(ef_up))- ef_up(1:length(ef_up)-1);
dphi_neg = -fliplr(ef_down(2:length(ef_down))- ef_down(1:length(ef_down)-
1));

dphi = [dphi_neg, 0, dphi_pos];

% For calculation
df = freq_r(2:length(freq_r)) - freq_r(1:length(freq_r)-1);
ddf = [fliplr(df),2*freq_r(1),df];

%For plot
f_sum = (freq_r(2:length(freq_r)) + freq_r(1:length(freq_r)-1))/2;
df_p = [-fliplr(f_sum),0,f_sum];

tg = - dphi./(2*pi*ddf);
figure(1)
plot(df_p, tg)
title('Group Delay')
xlabel('Frequency (Hz)')
ylabel('tg (s)')

%% Calculates the dispersion

% For plot
Df_p = (df_p(2:length(df_p)) + df_p(1:length(df_p)-1))/2;
% For calculation
Df_c = df_p(2:length(df_p)) - df_p(1:length(df_p)-1);

Atg = tg(2:length(tg)) - tg(1:length(tg)-1);
```

```
Disp = Atg ./ ((Df_c)*(wl^2/c));
figure(2)
plot(Df_p, Disp)
title('Dispersion')
Dp = mean(Disp)
hold on
plot(Df_p,Dp,'*r')
xlabel('Wavelength (m)')
ylabel('Dispersion (s/m)')
```

ANEXOS

Anexo A – Código MATLAB de otras funciones

```
% Esta función entrega la potencia del multímetro HP8153A en Watts

function [Potencia]=HP8153A_pow1()
%global HP8153A_pow1;
% Se crea un objeto gpib
multimeter=gpib('ni', 0, 22);
% Se abre el objeto
fopen(multimeter);
% Se pide la identificación del instrumento
fprintf(multimeter,'*idn?');
instrument=fscanf(multimeter);
%Se toman tres mediciones de potencia y se promedian
fprintf(multimeter,'READ:pow?')
Potencia1=fscanf(multimeter,'%g');
%Pasamos la medida de dbm a mW:
PmW1=10^(Potencia1/10);
fprintf(multimeter,'READ:pow?')
Potencia2=fscanf(multimeter,'%g');
%Pasamos la medida de dbm a mW:
PmW2=10^(Potencia2/10);
fprintf(multimeter,'READ:pow?')
Potencia3=fscanf(multimeter,'%g');
%Pasamos la medida de dbm a mW:
PmW3=10^(Potencia3/10);

Potencia=(PmW1+PmW2+PmW3)/3; %Potencia en mW.
```

```
fclose(multimeter)
delete(multimeter)
clear multimeter
```

%HP8703D(mesura): Esta función devuelve el resultado de la medida realizada en el marker, que tiene que estar activada previamente.

% El parámetro mesura es un string. Nos devuelve la amplitud.

```
function[resultat]=HP8753D(mesura)
%Se crea y se abre el objeto GBIP
g=gpib('ni',0,19);
fopen(g)
%Se define el tipo de medida a realizar.
%La medida será en formato ASCII (form4)
fprintf(g,'chan2;S21;logm;form4;OUTPMARK;')
resultat=fscanf(g,'%s');
fclose(g)
delete(g)
clear g
```

%HP8703D(mesura): Esta función devuelve el resultado de la medida realizada en el marker, que tiene que estar activada previamente.

% El parámetro mesura es un string. Nos devuelve la fase.

```
function[resultat2]=HP8753D_2(mesura)
  %Se crea y se abre el objeto GBIP
  g=gpib('ni',0,19);
fopen(g) %Se define el tipo de medida a realizar (en este caso la fase).
  %La medida será en formato ASCII (form4)
```

```
fprintf(g,'chan1;S21;phase;form4;OUTPMARK;')
  resultat2=fscanf(g,'%s');
fclose(g)
delete(g)
clear g
```

%HP8703D(mesura): Esta función devuelve el resultado de la medida realizada en el marker, que tiene que estar activada previamente.

```
% El parámetro mesura es un string. Nos devuelve la amplitud.
function[resultat]=HP8753Da(mesura)
%Se crea y se abre el objeto GBIP
g=gpib('ni',0,19);
fopen(g)
%Se define el tipo de medida a realizar (en este caso la amplitud).
%La medida será en formato ASCII (form4)
%fprintf(g,'chan2;S21;logm;form4;OUTPMARK;')
fprintf(g,'logm;form4;OUTPMARK;')
resultat=fscanf(g,'%s');
fclose(g)
delete(g)
clear g
```

%HP8703D(mesura): Esta función devuelve el resultado de la medida realizada en el marker, que tiene que estar activada previamente.

```
% El parámetro mesura es un string. Nos devuelve la fase.

function[resultat]=HP8753Dm(mesura)
%Se crea y se abre el objeto GBIP
g=gpib('ni',0,19);
```

```
fopen(g)
%Se define el tipo de medida a realizar (en este caso la fase).
%La medida será en formato ASCII (form4)
fprintf(g,'phas;form4;OUTPMARK;')
resultat=fscanf(g,'%s');
fclose(g)
delete(g)
clear g
```