



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERA EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

**TEMA: EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO Y OPTIMIZACIÓN DE
UNA RED DE ACCESO MULTISERVICIO BASADA EN
ARQUITECTURA WDM-TDM/PON ENFOCADA AL
DESARROLLO URBANO SOSTENIBLE (SMART CITY).**

AUTORA: ORTIZ CASILLAS, DAYSI ADRIANA

DIRECTOR: ING. SÁENZ ENDERICA, FABIÁN GUSTAVO

SANGOLQUÍ

2020



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, **“EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO Y OPTIMIZACIÓN DE UNA RED DE ACCESO MULTISERVICIO BASADA EN ARQUITECTURA WDM-TDM/PON ENFOCADA AL DESARROLLO URBANO SOSTENIBLE (SMART CITY)”** fue realizado por la señorita **ORTIZ CASILLAS, DAYSI ADRIANA**, el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 20 de enero de 2020

.....
Ing. Fabián Gustavo Sáenz Enderica

C.C. 0102343985



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, *Ortiz Casillas, Daysi Adriana*, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: *Evaluación del desempeño y optimización de una red de acceso multiservicio basada en arquitectura WDM-TDM/PON enfocada al desarrollo urbano sostenible (smart city)* es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 24 de enero de 2020

Daysi Adriana Ortiz Casillas

CC.: 1722756101



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

AUTORIZACIÓN

Yo, *Ortiz Casillas, Daysi Adriana* autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: *Evaluación del desempeño y optimización de una red de acceso multiservicio basada en arquitectura WDM-TDM/PON enfocada al desarrollo urbano sostenible (smart city)* en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 24 de enero de 2020

Una firma manuscrita en tinta azul sobre una línea punteada.

Daysi Adriana Ortiz Casillas

CC.: 1722756101

DEDICATORIA

Cada sacrificio tiene su recompensa, la culminación de mis estudios universitarios es el resultado del esfuerzo y el apoyo brindado por mi familia, por ello este logro va dedicado a mis padres y mi hermano.

Ha sido un camino largo, lleno de tropiezos y dificultades, y en aquellos momentos difíciles Dios estuvo presente para brindarme la fuerza y el empuje necesario para llegar a mi objetivo.

Este mundo se vuelve maravilloso gracias a las personas que conoces, y quiero expresar mi eterno agradecimiento a dos personas muy especiales que partieron de este mundo, pero se con certeza que desde el cielo me guiaron, me dieron su valor, su entereza, su ánimo para seguir adelante y no desfallecer.

Esto es por y para ustedes.

AGRADECIMIENTO

A Dios primeramente por haberme dado la fuerza para levantarme cada vez que caí, por haberme bendecido con una gran familia, gracias por estar presente en aquellos momentos tan difíciles.

A mis padres por su infinito apoyo en cada una de las etapas de mi vida, porque gracias a ellos estoy donde estoy y soy quien soy, les agradezco enormemente por su preocupación y su cariño. Gracias a su esfuerzo, sacrificio y dedicación pudieron darme una excelente educación, pero sobre todo me inculcaron valores, me enseñaron sobre la consideración y el trato justo hacia los demás y por ello les estoy eternamente agradecida.

A mi hermano por su ayuda, por esas palabras de aliento que muchas veces me ayudaron a no decaer.

A mi familia que a la distancia me apoyaron con sus palabras y buenos deseos.

A mi abuelita Carmen, aunque partió de este mundo hace varios años sé que ella me dio la fuerza para seguir luchando por mis objetivos. Y a mi querida Eli, gracias por haber sido esa luz en aquellos momentos tan oscuros de mi vida, gracias por enseñarme a no decaer a pesar de las difíciles circunstancias, gracias por enseñarme a volar contra el viento.

A esos profesores que demostraron ser excelentes profesionales, y un agradecimiento muy especial al Ing. Fabian Sáenz que gracias a su guía, paciencia y conocimientos este trabajo de investigación se pudo desarrollar y finalizarlo con éxito.

Adry.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDA.....	ii
AUTORIZACIÓN.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTO.....	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vi
ÍNDICE DE TABLAS	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
RESUMEN.....	xix
ABSTRACT	xx
CAPITULO I.....	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Justificación e importancia.....	5
1.3 Alcance del proyecto.....	6
1.4 Objetivos	7
1.4.1 Objetivo General	7
1.4.2 Objetivo Específico	7
1.5 Contenido de capítulos.....	8
CAPITULO II	9
ESTADO DEL ARTE.....	9

2.1	Redes PON	9
2.1.1	Arquitectura, funcionamiento y características	9
2.1.2	Funcionamiento general de una red PON	11
2.1.3	Tecnologías	13
2.1.4	Ventajas y desventajas de las redes PON	15
2.2	Red TDM-PON	16
2.3	Red WDM-PON	19
2.4	Red híbrida WDM-TDM/PON	20
2.5	Efectos no lineales	22
2.5.1	Efectos no lineales causados por el índice de refracción	24
2.5.2	Efectos no lineales causados por el Estimulado de Scattering	28
2.6	Asignación de ancho de banda en redes ópticas	32
CAPITULO 3		35
ANALISIS DE ALGORITMOS HEURISTICOS DE AGRUPAMIENTO PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE LA RED		35
3.1	Métodos heurísticos	35
3.2	Análisis de conglomerados (clúster)	35
3.2.1	Etapas de Análisis de Clúster	36
3.2.2	Similitud y distancia métrica	38
3.3	Métodos de agrupamiento	40
3.4	Métodos Jerárquicos	42

3.5 Métodos no Jerárquicos.....	43
3.5.1 Método K-Medias	44
3.5.2 Características	45
3.5.3 Desventajas.....	45
3.5.4 Complejidad	45
3.5.5 Desarrollo del algoritmo.....	46
3.6 Métodos de interpolación.....	46
3.7 Diagrama de Voronoi.....	47
3.7.1 Método Voronoi-Clúster, basado en los círculos de Voronoi	47
3.7.2 Características.....	48
3.7.3 Desventajas.....	49
3.7.4 Complejidad	49
3.7.5 Desarrollo del algoritmo.....	49
3.8 Simulación y comparación entre los métodos de K-means y Método del Diagrama de Voronoi basado en sus círculos.	52
3.8.1 Pruebas método K-means	54
3.8.2 Pruebas método Voronoi-Clúster.....	67
3.9 Comparación de los dos métodos.....	77
CAPITULO 4	80
EVALUACION DEL ESCENARIO PROPUESTO, SIMULACIONES	80
4.1 Dimensionamiento de la red en base al método heurístico escogido.....	80

4.2 Simulación de la red WDM-TDM/PON en OptSim	84
4.2.1 Configuración de la red híbrida WDM-TDM/PON	84
4.2.2 Simulación de la Red híbrida WDM/TDM-PON sin efectos no lineales.....	97
4.2.3 Simulación de la Red híbrida WDM/TDM-PON bajo el efecto no lineal causado por el índice de refracción FWM (Mezclado de cuatro ondas).	110
4.2.4 Simulación de la Red híbrida WDM/TDM-PON bajo el efecto no lineal causado por SBS (Dispersión Estimulada de Brillouin).....	116
4.3 Introducción a OMNeT++, configuración de bloques de la red híbrida WDM-TDM/PON	122
4.3.1 Modulo Server	123
4.3.2 Modulo OLT o Nodo Terminal de Línea Óptico	126
4.3.3 Modulo AWG	128
4.3.4 Módulo ONU o Unidad de Red Óptica.....	128
4.3.5 Modulo Host	129
4.3.6 Configuración del fichero omnetpp.ini.....	130
4.3.7 Creación de ficheros .cc, .h y .msg	131
4.4 Simulación de la Red híbrida WDM/TDM-PON sin efectos de no linealidad, análisis de la calidad de servicio con OMNeT++	131
4.5 Simulación de la Red híbrida WDM/TDM-PON bajo el efecto no lineal causado por el Estimulado de Scattering SBS (Dispersión Estimulada de Brillouin).	136
4.6 Simulación de la Red híbrida WDM/TDM-PON bajo el efecto no lineal causado	

por el índice de refracción FWM (Mezclado de cuatro ondas).....	139
4.7 Simulación de la Red híbrida WDM/TDM-PON usando algoritmo de asignación dinámico de ancho de banda DBA.....	142
4.8 Simulación de la Red híbrida WDM/TDM-PON usando esquema de asignación dinámico de ancho de banda IPACT.....	145
CAPITULO V	150
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	150
5.1 Conclusiones	150
5.2 Recomendaciones.....	151
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	153
ANEXOS.....	157

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Elementos que componen una red PON</i>	9
Tabla 2 <i>Elementos pasivos</i>	12
Tabla 3 <i>Tabla comparativa de tecnologías PON</i>	13
Tabla 4 <i>Ventajas y desventajas de las redes PON</i>	15
Tabla 5 <i>Ventajas y desventajas de la red TDM-PON</i>	18
Tabla 6 <i>Ventajas y desventajas de la red WDM-PON</i>	20
Tabla 7 <i>Ventajas y desventajas de una red híbrida WDM-TDM/PON</i>	22
Tabla 8 <i>Descripción de las fases de la Metodología de agrupamiento</i>	37
Tabla 9 <i>Medidas de Asociación</i>	38
Tabla 10 <i>Técnicas de cluster</i>	42
Tabla 11 <i>Algoritmo del método jerárquico</i>	43
Tabla 12 <i>Etapas del algoritmo K-means</i>	44
Tabla 13 <i>Clasificación de los métodos de interpolación</i>	47
Tabla 14 <i>Funcionamiento del algoritmo basado en los círculos de Voronoi</i>	48
Tabla 15 <i>Definición de variables y funciones, método basado en los círculos de Voronoi</i>	49
Tabla 16 <i>Tiempo de distribución del método Voronoi-cluster, 38 puntos</i>	67
Tabla 17 <i>Tiempo de distribución del método Voronoi-cluster. 121 puntos</i>	71
Tabla 18 <i>Tiempo de distribución del método Voronoi-cluster, 213 puntos</i>	74
Tabla 19 <i>Tabla comparativa promedio del tiempo de ejecución de K-means y Voronoi-cluster</i>	77
Tabla 20 <i>Parámetros a tomar en cuenta para la distribución de elementos ópticos</i>	80
Tabla 21 <i>Descripción de los elementos internos que forman el bloque transmisor</i>	86

Tabla 22 <i>Configuración del bloque transmisor</i>	87
Tabla 23 <i>Tabla de las diferentes frecuencias que manejan los 8 bloques transmisores</i>	88
Tabla 24 <i>Descripción de los elementos que forman parte del enlace de fibra óptica</i>	91
Tabla 25 <i>Configuración enlace fibra óptica</i>	91
Tabla 26 <i>Descripción de los elementos internos que forman el bloque receptor</i>	95
Tabla 27 <i>Configuración del bloque receptor</i>	95
Tabla 28 <i>Descripción de los módulos simples y compuestos del modulo Server</i>	124
Tabla 29 <i>Módulos simples que forman el modulo OLT</i>	127
Tabla 30 <i>Módulos simples que forman la ONU</i>	129
Tabla 31 <i>Configuración de parámetros de toda la red hibrida en el archivo omnetpp</i>	130
Tabla 32 <i>Descripción ficheros .cc, .h., .msg</i>	131
Tabla 33 <i>Parámetros configurados en al archivo omnetpp.ini</i>	132

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.</i> IoT (Internet de las Cosas)	1
<i>Figura 2.</i> Servicios que se pueden brindar dentro de una Smart City, mediante el IoT.....	2
<i>Figura 3.</i> Red híbrida WDM-TDM/PON	4
<i>Figura 4.</i> Arquitectura red TDM-PON.....	18
<i>Figura 5.</i> Arquitectura red WDM-PON	20
<i>Figura 6.</i> Arquitectura red híbrida WDM-TDM/PON	22
<i>Figura 7.</i> Clasificación de los efectos no lineales	24
<i>Figura 8.</i> Efecto de FWM en tres señales equidistantes.....	26
<i>Figura 9.</i> Onda dispersada generada por efecto SBS.	29
<i>Figura 10.</i> Clasificación de los algoritmos de asignación de ancho de banda.	33
<i>Figura 11.</i> Metodología de agrupamiento.	36
<i>Figura 12.</i> Clasificación de las Técnicas Clúster.	41
<i>Figura 13.</i> Escenario para realizar las pruebas.....	52
<i>Figura 14.</i> Puntos. Latitud y longitud.....	53
<i>Figura 15.</i> Coordenadas tomadas en el mapa.....	53
<i>Figura 16.</i> Escenario formado por 38 puntos	54
<i>Figura 17.</i> Tiempo vs Número de Iteraciones, K-means, 38 puntos.....	55
<i>Figura 18.</i> Promedio de miembros en cada clúster, K-means.....	56
<i>Figura 19.</i> Método K-means empleado en el escenario con 38 puntos.....	58
<i>Figura 20.</i> Escenario formado por 121 puntos	59
<i>Figura 21.</i> Tiempo vs Número de Iteraciones, K-means, 121 puntos.....	60
<i>Figura 22.</i> Promedio de miembros en cada clúster, K-means.....	60

Figura 23: Método K-means empleado en el escenario con 121 puntos	62
Figura 24. Escenario formado por 213 puntos	63
Figura 25. Número de Iteraciones vs Tiempo, K-means, 213 puntos	64
Figura 26. Promedio de miembros en cada clúster, K-means	64
Figura 27. Método K-means empleado en el escenario con 213 puntos.....	66
Figura 28. Diagrama de Voronoi, escenario 38 puntos.....	68
Figura 29. Método Voronoi-clúster, escenario 38 puntos.....	71
Figura 30. Diagrama de Voronoi	72
Figura 31: Método Voronoi-clúster, escenario 121	74
Figura 32. Diagrama de Voronoi	75
Figura 33. Método K-means empleado en el escenario con 213 puntos.....	77
Figura 34. Escenario 121 puntos.....	79
Figura 35. Zona del Norte de Quito, delimitada por las calles Edmundo Carvajal, Av., de la Prensa, Av. Brasil y calle Zamora	81
Figura 36. Malla colocada sobre la zona de Quito, formada por 38 puntos.....	82
Figura 37. Aplicación del método K-means para la distribución de componentes, 2AWG	82
Figura 38. Aplicación del método K-means para la distribución de componentes, 3AWG	83
Figura 39. Entorno Grafico software de simulación OptSim.....	84
Figura 40. Arquitectura de la red Híbrida WDM-TDM/PON.....	85
Figura 41. Vista interna de un transmisor	86
Figura 42. Configuración en el bloque transmisor.....	88

Figura 43. Vista interna del primer bloque transmisor	89
Figura 44. Estructura del transmisor de la red PON hibrida WDM/TDM-PON	90
Figura 45. Enlace de fibra óptica	91
Figura 46. Configuración de la ganancia en el amplificador óptico	92
Figura 47. Parámetros de configuración de la fibra óptica.	93
Figura 48. Bloque receptor de la red hibrida.....	94
Figura 49. Vista interna del bloque receptor	94
Figura 50. Parámetros de configuración del bloque receptor.....	96
Figura 51. Vista interna del receptor de la red hibrida.....	97
Figura 52. Espectro de frecuencia del bloque transmisor 1	98
Figura 53. Datos transmitidos por el bloque transmisor 1	99
Figura 54. Grupo de 8 frecuencias de la red WDM/TDM-PON	100
Figura 55. Grupo de 8 Frecuencias a la salida del amplificador óptico	101
Figura 56. Espectro de frecuencia a la salida del filtro óptico	102
Figura 57. Datos ópticos a la salida del filtro óptico.....	102
Figura 58. Diagrama de ojo en el receptor.....	104
Figura 59. Datos recibidos a la salida del receptor	104
Figura 60. Diagrama de ojo medido a la salida del receptor de un único usuario	105
Figura 61. Distancia vs BER, potencia de 10mW, tasa de transmisión de 10Gbps	106
Figura 62. Distancia vs BER, potencia de 10mW, tasa de transmisión de 20Gbps	107
Figura 63. Distancia vs BER, potencia de 10mW y 20 mW, tasa de transmisión de 10Gbps	108
Figura 64. Velocidad de transmisión vs BER, longitud de fibra óptica 20 Km,	

P_{TX} 10 mW.	109
Figura 65. Distancia vs Potencia recibida, con una potencia de 10mW	110
Figura 66. Modulador de amplitud utilizado para simular el efecto FWM.....	111
Figura 67. Ventana de configuración del modulador de amplitud.....	111
Figura 68. Efecto no lineal FWM visto en las 8 frecuencias de la red hibrida WDM-TDM/PON.....	112
Figura 69. Distancia vs BER, efecto no lineal FWM, $P_{TX}=10mW$, 10 Gbps, con frecuencia portadora 0.1THz	113
Figura 70. Distancia vs BER, efecto no lineal FWM, $P_{TX}=10mW$, frecuencia portadora 0.3THz.....	114
Figura 71. Distancia vs BER, efecto no lineal FWM, $P_{TX}=20mW$, frecuencia portadora 0.3THz.....	115
Figura 72. Distancia vs Potencia recibida, potencia 10mW, frecuencia portadora 0.3THz.....	116
Figura 73. Cuadro de propiedades de la fibra óptica, efecto SBS.....	117
Figura 74. Grupo de frecuencias mostrando potencia crítica de SBS	119
Figura 75. Distancia vs BER, potencia de transmisión 30mW, 10Gbps.....	120
Figura 76. Distancia vs BER, potencia de transmisión 20mW, 20Gbps.....	121
Figura 77. Distancia vs Potencia recibida, con una potencia de 20mW	122
Figura 78. Red hibrida WDM-TDM/PON, diseñada con el simulador OMNeT++	123
Figura 79. Modulo Server, vista interior (módulos simples y compuestos)	124
Figura 80. Modulo OLT, vista módulos simples	127
Figura 81. Módulo AwgDemux	128

<i>Figura 82:</i> Módulo ONU, vista módulos simples	129
<i>Figura 83.</i> Modulo Host, vista de módulos simples y compuestos	130
<i>Figura 84.</i> Escenario presentado al realizar la simulación en OMNeT++	132
<i>Figura 85.</i> Throughput visto en cada usuario.....	132
<i>Figura 86.</i> Throughput de toda la red.....	133
<i>Figura 87.</i> Jitter visto en cada usuario.....	134
<i>Figura 88.</i> Jitter de toda la red.....	134
<i>Figura 89.</i> Delay visto en cada usuario	135
<i>Figura 90.</i> Delay de toda la red	135
<i>Figura 91.</i> Throughput visto en cada usuario.....	136
<i>Figura 92.</i> Throughput de toda la red.....	136
<i>Figura 93.</i> Jitter visto en cada usuario.....	137
<i>Figura 94.</i> Jitter de toda la red.....	137
<i>Figura 95.</i> Delay visto en cada usuario	138
<i>Figura 96.</i> Delay de toda la red	138
<i>Figura 97.</i> Throughput visto en cada usuario.....	139
<i>Figura 98:</i> Throughput de toda la red	139
<i>Figura 99.</i> Jitter visto en cada usuario.....	140
<i>Figura 100.</i> Jitter de toda la red.....	140
<i>Figura 101.</i> Delay visto en cada usuario	141
<i>Figura 102.</i> Delay de toda la red	141
<i>Figura 103.</i> Throughput visto en cada usuario.....	142
<i>Figura 104.</i> Throughput de toda la red.....	142

<i>Figura 105.</i> Asignación dinámica de ancho de banda, red sin efectos no lineales.....	143
<i>Figura 106.</i> Jitter visto en cada usuario.....	143
<i>Figura 107.</i> Jitter de toda la red.....	144
<i>Figura 108.</i> Delay visto en cada usuario	144
<i>Figura 109.</i> Delay de toda la red	145
<i>Figura 110.</i> Throughput visto en cada usuario.....	145
<i>Figura 111.</i> Throughput de toda la red.....	146
<i>Figura 112.</i> Jitter visto en cada usuario.....	146
<i>Figura 113.</i> Jitter de toda la red.....	147
<i>Figura 114.</i> Delay visto en cada usuario	147
<i>Figura 115.</i> Delay de toda la red	148
<i>Figura 116:</i> Comparación de Throughput algoritmo DBA e IPACT	148
<i>Figura 117.</i> Comparación del Delay algoritmo DBA e IPACT	149

RESUMEN

Con la aparición de nuevas aplicaciones, el continuo uso de Internet y el crecimiento poblacional, se ha visto en la necesidad de utilizar o implementar tecnologías e infraestructura que cumplan con las necesidades y demandas de los usuarios como tener un gran ancho de banda, calidad en el servicio. El presente trabajo de investigación detalla cual es el mejor método heurístico a utilizar para desplegar una red PON, analiza como los efectos no lineales causados por el índice de refracción FWM (Mezclado de cuatro ondas) y el efecto no lineal causados por el Estimulado de Scattering SBS (Estimulado de Briuollin) inciden en una red híbrida WDM-TDM/PON y compara entre dos algoritmos de asignación dinámico de ancho de banda DBA e IPACT para determinar cual brinda un mejor desempeño a la red híbrida.

Se escogio dos métodos heurísticos K-means y Voronoi-cluster, utilizando la herramienta Matlab se realizó una comparación entre estos, tomando en cuenta el menor tiempo de ejecución, se tomo como ejemplo para el despliegue un punto del norte de Quito, en donde se ubicaron los componentes opticos: OLT, ONU y los SPLITTERS.

Para analizar el desempeño de la red híbrida WDM-TDM/PON bajo los efectos no lineales y usando algoritmos de asignación dinámico de ancho de banda se utilizó OMNeT++ que es un simulador de redes, permitiendo medir Throughput, Retardo y Jitter.

PALABRAS CLAVE

- DESPLIEGUE DE RED
- EFECTOS NO LINEALES
- ASIGNACION DINAMICA DE ANCHO DE BANDA
- QoS

ABSTRACT

With the appearance of new applications, the continuous use of the Internet and population growth, it has been necessary to use or implement technologies and infrastructure that meet the needs and demands of users, such as having a high bandwidth, quality in the service. The research work details what is the best heuristic method to use to deploy a PON network, analyzes how the non-linear effects caused by the FWM refractive index (Four Wave Mix) and the non-linear effect caused by the SBS Scattering Stimulus affect a hybrid network WDM-TDM / PON and compares between two algorithms of dynamic allocation of bandwidth DBA and IPACT to determine which provides a better performance to the hybrid network.

Two K-means and Voronoi-cluster heuristic methods were chosen, using the MATLAB tool, a comparison between them was made, considering the shortest execution time, an example for the deployment of the network was taken from a point north of Quito, where the optical components were located: OLT, ONU and the SPLITTERS.

To analyze the performance of the hybrid network WDM-TDM / PON under the nonlinear effects and using algorithms of dynamic allocation of bandwidth was used OMNeT ++ which is a network simulator, allowing to measure Throughput, delay and Jitter.

KEYWORDS

- HYBRID NETWORK WDM-TDM / PON
- NETWORK DEPLOYMENT
- NONLINEAR EFFECTS
- DYNAMIC ASSIGNMENT OF BANDWIDTH
- QoS

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

La ciudad inteligente, o *Smart City*, es y será ciertamente uno de los desafíos más importantes de las próximas décadas. Actualmente una ciudad inteligente puede ser vista como tendencia o para muchos otros como una necesidad, (Effigis, 2015).

Uno de los aspectos fundamentales para las ciudades inteligentes es el Internet de las cosas (IoT). Se puede definir al Internet de las cosas como una red que interconecta dispositivos u objetos equipados con tecnologías de recopilación de datos valiéndose del Internet.



Figura 1. IoT (*Internet de las Cosas*)

Fuente (Isaza, 2016)

La tipificación de ciudades permite la estructuración de la información y su consecuente análisis. Un sistema operativo de ciudad inteligente tiene la capacidad de analizar la información desarrollando innovaciones al servicio de los ciudadanos.

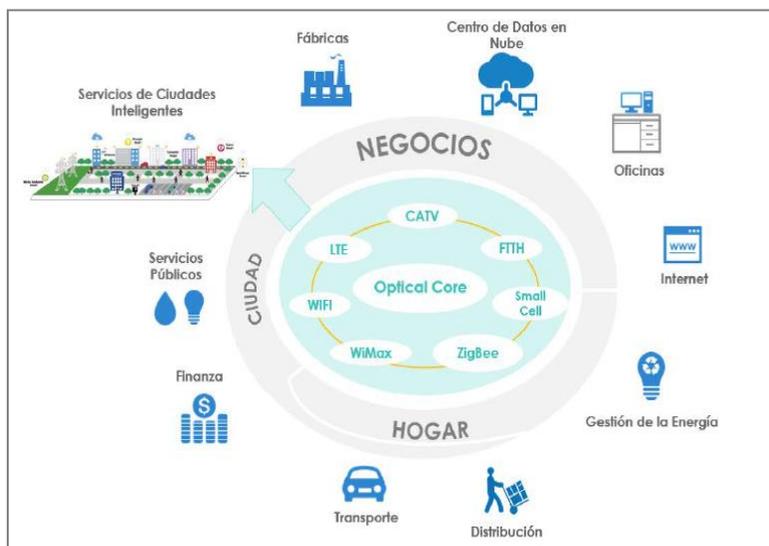


Figura 2. Servicios que se pueden brindar dentro de una Smart City, mediante el IoT.
Fuente: (Medina, Pérez, & Trujillo, 2017)

Sin embargo, la gran cantidad de conexiones que requiere el IoT supondrá con el tiempo crear una infraestructura en equipo de telecomunicaciones mucho más robusta y desarrollar tecnologías en sensores que resulten más económicas con el fin de hacer más viable el proyecto y acercarlo cada vez más a la realidad haciendo que el número de “cosas” conectadas a internet sea también cada vez mayor (Isaza, 2016).

De acuerdo con (Amoroso, 2015), se ha visto en la necesidad de desarrollar nuevos protocolos, métodos y procesos de transmisión de datos, que nos permitan disponer de mejores redes de comunicación capaces de ofrecer un mayor ancho de banda. Entre las aplicaciones que requieren conexiones de banda ancha tenemos juegos en línea, televisión digital, descarga de música y video, VoIP, hasta la necesidad de tener sistemas que permitan dar asistencia remota, realizar trámites bancarios sin salir de casa o de la oficina, videoconferencias, etc.

En cuanto a las distintas tecnologías que permiten gozar de banda ancha se mencionará las principales:

- Acceso cableado

- DSL (Línea de Abonado Digital)
- ADSL (Línea de Abonado Digital Asimétrica)
- HFC (Hibrido de Fibra Coaxial)
- Fibra óptica
- Acceso inalámbrico
- Wi-Fi
- WiMAX
- Satélite
- Acceso móvil
- UMTS (3G)
- LTE (4G)

La necesidad de encontrar una tecnología simple, escalable, económicamente viable y con elevadas prestaciones de ancho de banda, ha impulsado y orientado nuevos esfuerzos y recursos para el desarrollo de una nueva generación de tecnologías de redes de acceso guiado, conocida como redes PON (Redes Ópticas Pasivas).

Una red óptica pasiva conocida como PON es una red punto-multipunto que lleva una conexión de fibra óptica hasta casa del usuario. Las redes ópticas pasivas sustituyen el tramo de cobre por fibra óptica monomodo y los divisores eléctricos por divisores ópticos. De esta manera, se eliminan todos los componentes activos existentes entre el servidor y el cliente.

Como en las redes de cable, existen dos canales:

Por el canal descendente los datos llegan desde cada nodo al divisor donde se dirigen a la unidad óptica terminal del usuario correspondiente. En este procedimiento se utiliza multiplexación en el tiempo (TDMA).

Por el canal ascendente, la unidad óptica terminal del usuario envía la información al nodo sin intervención del divisor salvo para controlar el momento en que se da curso a dicha información.

Para que no se produzcan interferencias entre ambos canales (al utilizarse una única fibra para llegar a cada cliente) se utilizan técnicas WDM (Wavelength Division Multiplexing) que permiten el uso de longitudes de onda diferentes sobre la misma fibra.

Las redes de fibra óptica multiservicio atienden a las necesidades de los municipios y sus dependencias, hospitales/centros de salud, escuelas/bibliotecas, cámaras de vigilancia, departamentos de la administración pública, entre otros que necesiten una alta capacidad de comunicación en línea para el tráfico de datos que sirve los ciudadanos.

Todos los sistemas de monitoreo conectados, tiempos de respuesta rápidos y un mejor servicio al ciudadano deben ser los objetivos de las ciudades que se hacen llamar inteligentes, y para poder cumplir con todos estos requisitos se han realizado estudios y modelamientos de escenarios basados en redes PON, TDM-PON, WDM-PON y redes híbridas WDM-TDM/PON.

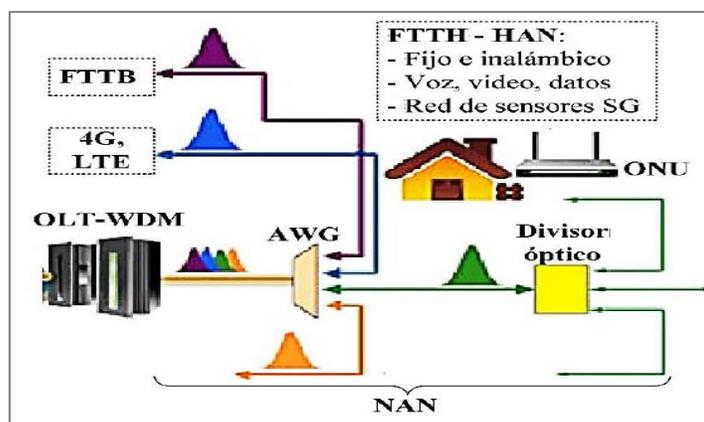


Figura 3. Red híbrida WDM-TDM/PON

1.2 Justificación e importancia

Para poder cubrir todos los requerimientos (audio/videoconferencia, transferencia y almacenamiento de archivos) de una Smart City es primordial dimensionar correctamente la red, utilizando métodos heurísticos como el método de Voronoi, método K-Means que permitirán una ubicación óptima de los equipos, teniendo en cuenta que se debe cumplir con los parámetros de calidad de servicio como son: Throughput, retardo, Jitter y latencia de la red, acorde con el estándar ITU-T G.984.

La demanda cada vez mayor de usuarios móviles y fijos ha hecho replantear a los operadores consolidados sus estrategias. ADSL cuenta con una limitación técnica, ancho de banda, el mismo que disminuye drásticamente a medida que el usuario se aleja del punto de acceso, por esta razón se ha optado por usar la tecnología de fibra óptica que cuenta con robustez, amplio ancho de banda.

La red PON presenta varias ventajas respecto a otras redes como el mayor ancho de banda, mejoría en la calidad de servicio ya que no se ve afectado por ruidos electromagnéticos, minimiza el despliegue de fibra óptica gracias a su topología, simplicidad de la red y cuenta con mayor cobertura (20Km) (Amoroso, 2015), y elimina el uso de equipos activos lo que representa un ahorro significativo.

Lo que se espera al trabajar con protocolos TDM y WDM junto a una red PON es obtener una topología segura y versátil. Por un lado TDM es un protocolo que actualmente se está usando, es una técnica para compartir un canal de transmisión entre diversos usuarios, consiste en asignar a cada usuario, durante unas determinadas "ranuras de tiempo", la totalidad del ancho de banda disponible, lo que representa un inconveniente si se desea aumentar la velocidad de los sistemas y es por esa razón que se usa WDM que permite el uso de longitudes de onda diferentes sobre la misma fibra y tener un ancho de banda independiente. Al incrementar los servicios y la calidad de

estos es necesario el aumento de ancho de banda y la velocidad con la que se transmite la información es por ello por lo que una red híbrida TDM-WDM/PON es la mejor solución.

En este proyecto se determinará si la calidad del enlace (throughput, jitter, delay) en una red híbrida TDM-WDM/PON se ve afectada a causa de los efectos no lineales que son provocados por la variación del índice de refracción y como estos influyen sobre la transmisión de datos, este análisis se realizará usando un software de diseño integral como es OptSim y un simulador modular de eventos discretos OMNeT++.

En cuanto al algoritmo de distribución dinámica de ancho de banda escogeremos entre los antes mencionados el que más ayuda nos proporcione para incrementar la eficiencia de la red y el que se ajuste a las necesidades de la Smart City es decir aplicaciones en tiempo real.

1.3 Alcance del proyecto

El proyecto tiene como fin evaluar el rendimiento de una red híbrida TDM-WDM/PON, basándonos en los parámetros más comunes como son: Throughput, Jitter, Delay.

Se analizará cómo estos parámetros son afectados por efectos no lineales específicamente SBS (Scattering estimulado de Brillouin) Y FWM (Mezcla de Cuarta Onda), debido a la variación del índice de refracción y cómo influye en la transmisión de datos.

En cuanto a los algoritmos de distribución dinámica de ancho de tenemos: Dinamyc Polling Order Arrangement (DPOA), DBA con Múltiples Servicios (DBAM) y DBA Temprana con Predicción basada en Excesiva Reasignación de ancho de banda (PFEBER) seleccionaremos cual es el más indicado basándonos en cual cumple los requerimientos de calidad de servicio (QoS), que de acuerdo a los estándares y normas respectivamente: ISO 37120, IEEE P3333.1 y UNE 178101-4, UNE 178107-1 IN son los que se consideran dentro de la Smart City.

Para efecto de simulación del escenario se utilizará un software especializado en redes ópticas como OptSim, donde se puede mostrar los efectos no lineales.

Sobre la simulación se realizará lo siguiente:

- Simulación de una red TDM-WDM/PON sin efectos de no linealidad.
- Simulación de una red TDM-WDM/PON con efectos no lineales provocados por la variación del índice de refracción SBS (Scattering estimulado de Brillouin) Y FWM (Mezcla de Cuarta Onda).
- Simulación de una red TDM-WDM/PON teniendo en cuenta el mejor algoritmo de distribución dinámica de ancho de banda, trazando un esquema que describa el funcionamiento de cada algoritmo mencionado y analizando cual es el que se ajusta a las necesidades de tiempo real.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

- Evaluación del desempeño y optimización de una Red de Acceso Multiservicio basada en arquitectura WDM-TDM/PON enfocada al desarrollo urbano sostenible (Smart City).

1.4.2 Objetivo Específico

- Analizar el estado del arte de los efectos no lineales causados por el índice de refracción: SBS (Scattering estimulado de Brillouin) Y FWM (Mezcla de Cuarta Onda) en la capa de enlace.
- Realizar el modelamiento óptimo para el despliegue de una red hibrida WDM-TDM/PON enfocada a una Smart City utilizando métodos heurísticos.
- Determinar cuál es el mejor algoritmo de distribución dinámica de ancho de banda que cumpla con los requerimientos de QoS (Throughput, retardo, Jitter y latencia de la red).
- Determinar cuál es la incidencia del algoritmo de distribución dinámica de ancho de banda al realizar una simulación en el escenario diseñado.

- Implementar una simulación de una Red de Acceso Multiservicio basada en arquitectura WDM-TDM/PON con y sin los efectos no lineales: Scattering estimulado de Brillouin (SBS) y Mezcla de Cuarta Onda (FWM).
- Evaluar los dos escenarios, con y sin efectos no lineales, y determinar cómo es afectada la capa de enlace y el rendimiento de la red.

1.5 Contenido de capítulos

En el Capítulo II, se presenta el fundamento teórico sobre la arquitectura y funcionamiento de las redes Pon, se enfatiza sobre los efectos no lineales causados por el índice de refracción y por el estimulado de Scattering, se hace una mención acerca de los algoritmos de asignación de ancho de banda.

En el capítulo III, se detalla los métodos heurísticos utilizados para dimensionar la red híbrida PON, se muestran simulaciones y análisis de los métodos estudiados.

En el capítulo IV, se realiza el diseño de la red WDM-TDM/PON, se analiza cómo influyen los efectos no lineales sobre el desempeño de la red, y se hace una comparación entre dos algoritmos de asignación de ancho de banda.

CAPITULO II

ESTADO DEL ARTE

2.1 Redes PON

2.1.1 Arquitectura, funcionamiento y características

Como su nombre lo indica una red óptica pasiva tiene por objetivo eliminar todos los componentes activos existentes (fuentes de alimentación, repetidores de señal, etc.) entre el proveedor de servicios y el cliente, y para el reemplazo de estos se utilizan componentes ópticos pasivos, componentes que son específicamente colocados en la red de distribución.

La red PON es una red punto multipunto, de estructura simple, está formada por los siguientes elementos:

Tabla 1

Elementos que componen una red PON

Equipo	Características	Funciones
OLT: Optical Line Terminal 	<ul style="list-style-type: none"> • Punto de control de la red PON. • Equipo que se ubica en la oficina central. • Capacidad de dar servicio a miles de usuarios 	<ul style="list-style-type: none"> • Conversión de señal eléctrica a señal óptica. • Multiplexado de los otros extremos de la red PON. • OLT convierte las señales estándar utilizadas por el servicio de fibra óptica (FiOS) a la frecuencia y el marco utilizado por el sistema PON. • Controla el flujo bidireccional de información en todo el ODN.

CONTINÚA



-
- Upstream:
Distribuir diferentes tipos de datos y tráfico de voz de los usuarios
 - Downstream:
Obtiene tráfico de datos, voz y vídeo de la red de metro o de una red de larga distancia y la envía a todos los módulos ONT del ODN

- Encamina el tráfico hacia los clientes.

ONU: Optical Network Terminal

Diferencia



- ONT: Un solo punto de terminación. Término UIT-T
- ONU: Mas de un punto de terminación. Término IEEE.
- Puede trabajar en diferentes temperaturas y condiciones climáticas.
- Equipo que se coloca en las instalaciones del cliente o en su proximidad.
- Soporta una gran variedad de interfaces, dependiendo de las necesidades de los clientes

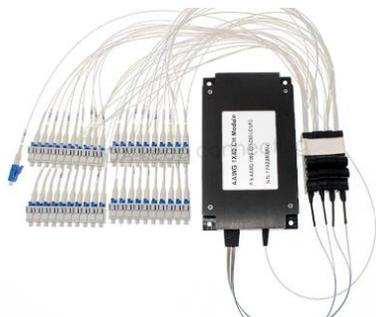
- Conversión de señal óptica a señal eléctrica.
- Demultiplexación de señal.
- Toma energía de la red eléctrica del cliente y la suministra a terminales.

CONTINÚA



SPLITER: Optical Divider

- Dispositivos bidireccionales de distribución óptica con una entrada y múltiples salidas (1:N)
- La señal que entra desde el puerto de entrada (downstream), procede del OLT y se divide entre múltiples puertos de salida.
- Las señales que entran desde las salidas (upstream), provienen de ONT y se combinan en la entrada.
- La señal enviada a ONT/ONU es la misma que reciben.
- Suele realizar la función de divisor en downstream y acoplador upstream
- Pérdidas (en dB)
- Pérdidas de inserción: por inserción del dispositivo en el camino de la señal.
- Pérdidas de retorno: por reflejo de señal.
- Permiten la comunicación entre el OLT y sus respectivos ONT.
- Combinan energía.

AWG-MUX, DEMUX: Arrayed Waveguide Grating

- Es un dispositivo que permite combinar o dividir las señales ópticas de diferentes longitudes de onda.
- Elimina los efectos negativos causados por la vibración mecánica.
- Permite multiplexar o demultiplexar canales de varias longitudes de onda en una sola fibra óptica.

La conexión entre el OLT y ONUs se realiza mediante una sola fibra y el uso de uno o más divisores ópticos.

Downstream es desde el OLT a la ONU (upstream va en la dirección opuesta).

2.1.2 Funcionamiento general de una red PON

Es necesario conocer cómo trabaja una red PON y cómo se comporta cada elemento que la compone.

En cuanto a los elementos pasivos tenemos:

Tabla 2
Elementos pasivos

Elemento	Descripción
Empalmes de fusión	Permiten la unión permanente de dos fibras ópticas FO. Se realiza con una empalmadora y se protege el empalme con un tubo termocontraible
Conectores	Permiten la unión de FO y el desmontaje de la unión, existen varios tipos de conectores
Atenuador	Pueden ser fijos (de 5, 10, 15 o 20 dB) o variables, si son variables el valor de atenuación puede ser ajustado a mano.
Acopladores	Divide la señal óptica de entrada en varias salidas. Puede estar formado por 3 o más puertas, por lo que la división puede ser simétrica (igual potencia por cada puerta) o asimétrica (distinto valor).
Circulador óptico	Su función: permitir la transmisión bidireccional por la misma FO. Este tipo de acción permite el uso de una sola FO, pero la desventaja es una alta atenuación.
Aislador	Utilizado en amplificadores ópticos y láser en aplicaciones analógicas
Switch	Permite la permutación entre FO en forma opto-mecánica, termo-óptica (los polímeros cambian el índice de refracción en función de la temperatura) o mediante un circuito electro-óptico de NiLiO ₃
Filtro óptico	Es necesario para operaciones de separación de longitud de onda en WDM.
Splitter	Elemento divisor óptico, tiene una sola entrada y múltiples salidas

Para evitar colisiones todos estos elementos se encuentran sincronizados además de que los usuarios tienen tiempos definidos para acceder al medio.

Con respecto al modo en el que opera la red PON de acuerdo con (Asensi, 2011) cabe destacar que el funcionamiento genérico de la red se debe a la existencia de dos canales, uno ascendente y otro descendente, que trabajan sobre un mismo cable físico. Para que puedan trabajar sin existir colisión alguna se asignan diferentes longitudes de onda a cada canal de transmisión y, dependiendo del tráfico, coexisten en la misma fibra al menos 3 longitudes de onda diferentes: una

para el flujo de vídeo en el canal ascendente y dos para el flujo de datos del enlace ascendente y descendente respectivamente.

Se tiene un nodo óptico (OLT) unido con la cabecera a través de fibra óptica, por medio de este nodo se llega a los abonados utilizando divisores ópticos (splitter), por último, se ingresa a los domicilios, oficinas, etc., donde se encuentran los dispositivos finales ONT.

2.1.3 Tecnologías

Tabla 3

Tabla comparativa de tecnologías PON

	APON (Asynchronous Transfer Mode-PON)	BPON (Broadband PON)	GPON (Gigabit PON)	GPON- ERG	EPON (Ethernet PON)
Estándar	ITU-T G983	ITU-T G983.x	ITU-T G984	ITU-T G984.6	IEEE802.3ah
Protocolo	ATM	ATM	Ethernet, TDM, TDMA	Ethernet, TDM, TDMA	Ethernet
Tasa de bits (Mbps)	Down:155 Up: 155	Down:155.5 2 / 622.08 Up: 155.52 / 622.08	Down: 1244.16 / 2488.32 Up: 155.52/ 622.08/ 1244.16	Down: 2488.32 Up: 1244.16	Down: 1000 Up: 1000
Relación de división máximo	1:48	1:64	1:64	1:64	1:16
Alcance máximo (km)	20	20	60	60	20

CONTINÚA



Banda de longitud de onda operativa (nm)	Down: 1480-1580 Up: 1260-1360	Down: 1480-1580 Up: 1260-1360 / 1260-1360 (MLM1, SLM) 1280-1350 (MLM2)	Down: -1480-1500 / 1550-1560 (banda de mejora para vídeo) Up: 1260-1360 Posibilidad de utilizar longitudes de onda de banda C más cortas.	Down: 1480-1500 Up: OEO (ONU EXT): 1260-1360; OEO (OLT EXT): 1290-1330; OA: 1300-1320 (OBF)	Down: 1490 Up: 1300
Codificación de línea	No definido	NRZ	NRZ + Scrambling	NRZ + Scrambling	8b/10b

	10G-EPON	10GPON (XPON)
Estándar	IEEE802.3av	ITU-T G987.1
Protocolo	Ethernet	CWDM y TDM
Tasa de bits (Gbps)	Down:10 Up: 1.25	Down:10 Up: 2.5
Asimétrico	Down:10	Down:10
Simétrico	Up: 10	Up: 10
Relación de división máximo	1:32	1:64
Alcance máximo (km)	20	20
Banda de longitud de onda operativa (nm)	Down: 1577-2+3 Up: 1270 ± 10	

2.1.4 Ventajas y desventajas de las redes PON

Tabla 4

Ventajas y desventajas de las redes PON

Ventajas	Desventajas
Aumento de la cobertura hasta los 20 Km (o más dependiendo de la tecnología)	Existencia de dispersión cromática y por modo de polarización en las fibras ya instaladas
Optimización de la ocupación de F.O en la red permitiendo una menor inversión teniendo así una gran relación costo-beneficio	El uso de un divisor provoca una reducción en la eficiencia de la red. Por otro lado, cada divisor introduce atenuación en la línea. Por lo tanto, a mayor número de etapas o saltos de divisor, mayor pérdida se introduce en el canal.
Mayor ancho de banda para el usuario.	Ausencia de métodos efectivos de administración y gestión de redes
Tecnología abierta y flexible	Necesario alto nivel de encriptación
Bajos costos de operación y mantenimiento de la red, debido a que los elementos pasivos no requieren tanta atención como los activos.	Dependencia vital del funcionamiento correcto del OLT
Mejora en la calidad del servicio y simplificación de la red debido a la inmunidad que presentan a los ruidos electromagnéticos	Dificultad y coste al reparar los cables de fibra
Reducción del consumo gracias a la simplificación del equipamiento	
Permite la instalación escalada de equipos activos, en función de la demanda solicitada por los usuarios.	
Eficiencia energética: Bajo consumo de energía en aplicaciones específicas, tales como teléfonos de emergencia/cabinas telefónicas	
Monitoreo: Integración completa con sistemas de cámaras de vigilancia, radares de velocidad, conteo de vehículos, panel de mensaje variables, cabinas de peaje, etc.	

CONTINÚA



Más eficiente debido a su topología tipo árbol,
minimiza el despliegue de fibra

Inmunes a interferencia electromagnética

Mayor calidad y estabilidad en la transmisión de datos

2.2 Red TDM-PON

Este tipo de redes cuentan con una alta aceptación como soluciones de red de acceso óptico para distribuir un ancho de banda razonablemente alto a los clientes a través de una infraestructura de red de fibra óptica.

Opera de la siguiente manera, en el transmisor se separa los canales de información asignando diferentes y determinados intervalos de tiempo, dando a cada OLT una sola longitud de onda que será compartida por diversos usuarios, haciendo que el ancho de banda para cada cliente final ubicado en las ONU sea limitado (Dixit, y otros, 2011), estos canales son multiplexados conformando un solo flujo de datos y transportados por el mismo cable de fibra óptica pero a diferentes slots de tiempo. La información que viaja a través del enlace de fibra llega a un demultiplexor/combinador óptico, este componente permite dividir los datos según su posición cronológica. (Pereda, 2004, pág. 708).

Las ONU, equipos terminales, operan bajo su propia ventana de transmisión (time slot), para evitar que la información colapse.

Una de las principales ventajas de una TDM PON es que todas las ONUs pueden funcionar en la misma longitud de onda, trabaja con arquitectura punto multipunto; se puede manipular los slots asignados a cada ONU para cambiar dinámicamente el ancho de banda dado. (Vasquez, 2009).

De acuerdo con las normas la tasa de transferencia de datos para una red TDM-PON es 2.5 Gb/s.

En el canal descendente la señal es transmitida desde la OLT hacia el usuario, la señal se multiplexa en varios intervalos de tiempo y es enviada a todas las ONU, y mediante etiquetas de dirección que son colocadas en la señal es como se reconoce los datos en cada ONU. (Moncayo, 2016)

Para el canal ascendente se establece un mecanismo de arbitraje, consiste en dar un tiempo determinado a la ONU para que pueda transmitir la información y así evitar colisiones. (Velasquez, 2014)

En un TDM PON el tráfico de bajada hacia el usuario, es enviado desde el OLT por divulgación hacia todos las ONU, mientras que en la dirección de subida desde el cliente se usa un mecanismo de arbitraje que un solo ONU puede transmitir datos en un tiempo establecido, debido a que el canal ascendente es compartido.

En sentido descendente, la señal de la OLT se multiplexa en diferentes intervalos de tiempo y se transmite a varias ONU (seguridad débil), donde cada ONU reconoce los datos a través de las etiquetas de dirección incrustadas en la señal. El tráfico en sentido ascendente es transmitido por cada ONU en modo ráfaga y debe implementarse un mecanismo para evitar colisiones.

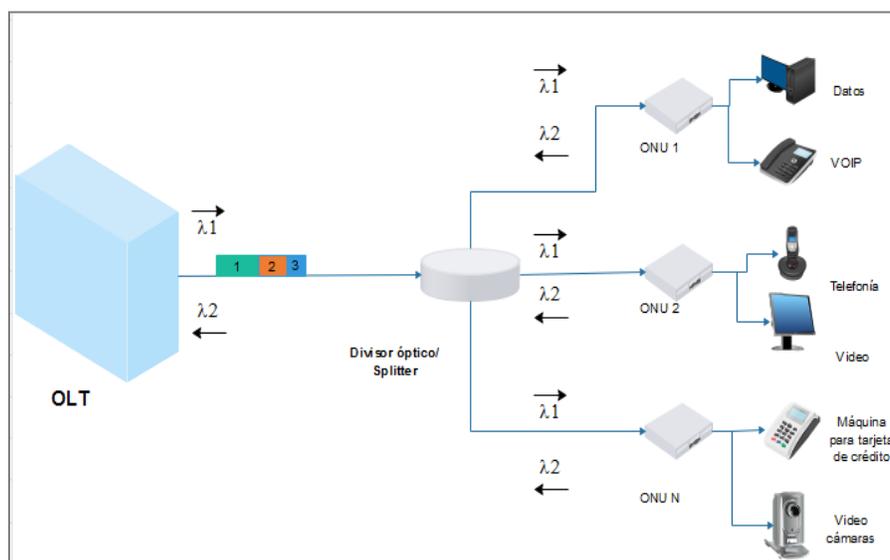


Figura 4. Arquitectura red TDM-PON

Tabla 5

Ventajas y desventajas de la red TDM-PON

Ventajas	Desventajas
Mediante la técnica TDM (Multiplicación por División de Tiempo) permite alcanzar a más abonados	No es segura
Incrementa la velocidad de transmisión binaria intercalando datos de distintos canales, formando una cadena de datos de mayor velocidad.	Ancho de banda limitado
Mejorar la velocidad de transmisión de datos.	Dificultad en la escalabilidad
Maneja la multiplexación estadística para aprovechar al máximo el ancho de banda disponible en la red PON	Dispersión cromática y PMD (Polarization Mode Dispersion)
Bajos costos	Limitaciones: usada para enlaces de corta y mediana distancia

2.3 Red WDM-PON

Su funcionamiento se basa en separar el número de canales, es decir que esta técnica de transmisión proporciona a cada usuario una longitud de onda específica en lugar de compartirla entre 32 o más suscriptores como en TDM-PON.

Como se plantea en (Moreno, 2008), en la arquitectura WDM-PON, todas las unidades de red óptica trabajan con una tasa de bit individual, pueden transmitir datos de forma independiente ya que cada ONU está asignada a su propia longitud de onda dedicada, de este modo cada ONU es independiente de las demás dando aspectos de privacidad y seguridad.

Referente a su topología, la más usada es la de tipo bus o la de árbol, debido a su fácil implementación y flexibilidad.

En cuanto a su forma de trabajar, desde la OLT los datos son multiplexados mediante un AWG, elemento que permite combinar la potencia de diferentes longitudes de onda, para que puedan viajar a través de la fibra óptica hasta llegar a un AWG-demux, en donde las diferentes frecuencias son separadas de manera simétrica y distribuidas a cada usuario (ONT). (Proaño, 2015).

Su arquitectura es similar a la de las redes EPON y GPON, pero con la diferencia en uno de sus elementos como es el Splitter, este elemento es reemplazado por un AWG (Arrayed Wavelength Grating) que es un multiplexor/demultiplexor de longitudes de onda, este componente pasivo se encarga de separar las longitudes de onda para la entrega individual a las ONT de los abonados.

Con respecto a su forma de trabajar en el sentido upstream y downstream utilizan bandas de longitudes de onda distintas, enviando información por una única fibra. (Tello, 2016)

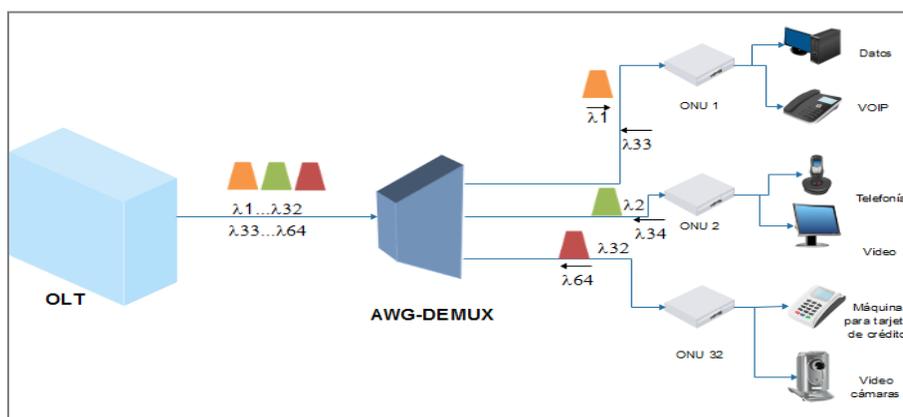


Figura 5. Arquitectura red WDM-PON

Tabla 6

Ventajas y desventajas de la red WDM-PON

Ventajas	Desventajas
Tasa de transferencia de datos: 10 Gb/s por longitud de onda	Alto costo de implementación: láseres sintonizables que tiene cada ONU para captar longitud de onda deseada
Seguridad garantizada	Cada ONU debe tener un láser específico para cada longitud de onda.
Alta escalabilidad	Existe complicaciones si se quiere implementar una topología en cascada.
Distancia de cobertura más amplia	El número de ONUs está limitado debido a la atenuación del divisor óptico.
Flexibilidad máxima: cada enlace se ejecuta a una velocidad diferente y con un protocolo diferente.	La manipulación de un mayor número de longitudes de onda hace que la red tenga un alto grado de exposición a los efectos no lineales y diafonías.
Optimiza el uso del ancho de banda	
Usuario accede a todo el ancho de banda debido a que tiene una longitud de onda dedicada, no comparten el canal.	

2.4 Red híbrida WDM-TDM/PON

Presenta ventajas de las dos técnicas, en lo que se refiere a TDM-PON mejor uso de ancho de banda, capacidad de actualización y en cuanto a WDM-PON manejo de un alto número de longitudes de onda ofrecidas y aumento de las velocidades de datos totales.

A pesar de ser técnicas de multiplexación diferentes pueden coexistir, complementándose perfectamente, dando lugar a una red eficiente.

Este tipo de red puede ser categorizada en esquemas híbridos estáticos y dinámicos.

- Esquema Estático: Las longitudes de onda asignadas para cada ONU no se pueden cambiar durante el funcionamiento, se tiene tantas ONU como longitudes de onda.
- Esquema Dinámico: Las longitudes de onda son cambiadas dinámicamente según la operación y comunicación, ofrece algunas ventajas a PON, incluyendo el equilibrio de carga y función de ahorro de energía, pero al mismo tiempo la ONU debe emplear receptores de modo de ráfaga debido al cambio frecuente en longitudes de onda.

Como se menciona en (Osorio & Gonzalez, 2015), en el sentido descendente, la transmisión de todas las longitudes de onda se las realiza desde la OLT hacia los usuarios, en el bloque receptor específicamente en la parte del usuario es donde se realiza la selección de la longitud de onda. En cuanto al sentido ascendente, se una longitud de onda teniendo en cuenta las limitaciones de carga de la red.

Como una de las características principales de este tipo de redes es el de operar varias longitudes de onda, pero cada longitud de onda es destinada a varios usuarios (ONUs) mediante la técnica TDM, en vez de ser compartida a una ONU exclusiva (WDM).

Esta arquitectura permite que a las ONUS se le asignen dinámicamente las longitudes de onda, así como también ranuras de tiempo. (Hussain, 2014).

Como se vio en el apartado referente a la red WDM-PON, en la red híbrida también se hace uso de láseres ajustables, teniendo tres posibles opciones, pero para poder escogerlo es necesario verificar su funcionamiento y costos.

Para la implementación del algoritmo de asignación de ancho banda se debe tomar en cuenta el tiempo de sintonización del láser.

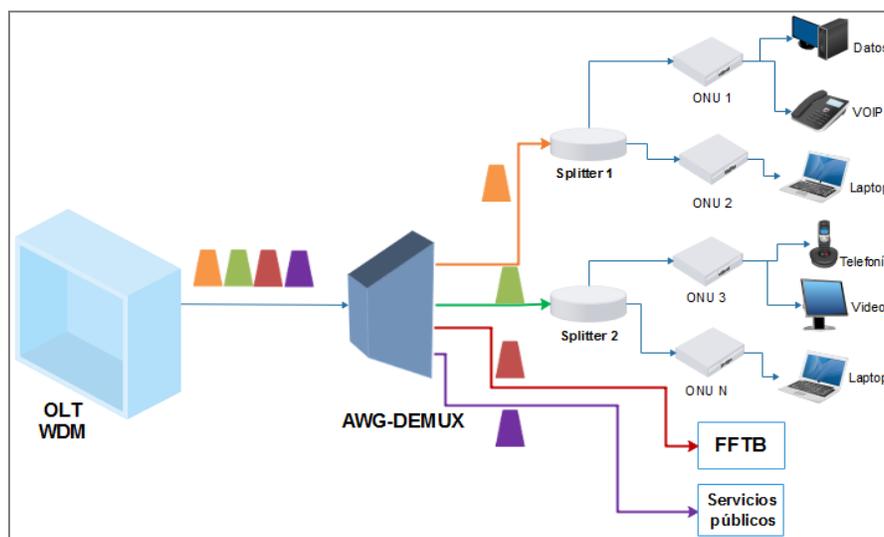


Figura 6. Arquitectura red híbrida WDM-TDM/PON

Tabla 7

Ventajas y desventajas de una red híbrida WDM-TDM/PON

Ventajas	Desventajas
Escalabilidad del ancho de banda.	La implementación de filtros ópticos ajustables puede ser muy costoso.
Facilidad al aumentar láser para crecimiento de la red.	Se puede dar una mayor pérdida de inserción.
Reduce gastos de implementación y mantenimiento	
Flexibilidad de ofrecer cualquier ancho de banda	
El enrutamiento dinámico de longitud de onda puede evitar problemas de congestión de paquetes, contrario al enrutamiento estático.	
Aumento de usuarios.	

2.5 Efectos no lineales

El aumento de usuarios, la aparición de aplicaciones y tecnologías que requieren un mayor ancho de banda, la necesidad de transferir una mayor cantidad de información a mayores distancias

ha dado lugar a implementar redes de mayores capacidades, pero a su vez también aparecen efectos que limitan el desempeño de la fibra óptica. (Castaño & Fernandez, 2012)

En (Guano, Molina, & M., 2014) se menciona que los efectos no lineales no pueden ser atenuados, a diferencia de los efectos lineales (atenuación, dispersión), se originan en todo dieléctrico dando lugar a campos electromagnéticos intensos, estos se producen debido a que el dieléctrico es expuesto a grandes niveles de potencia.

Entre los problemas principales que causan los efectos no lineales tenemos:

- Pérdida de señal
- Daño espectral
- Ruido
- Aumento del BER
- Crosstalk
- Ensanchamiento de pulso
- Degradación de la calidad del sistema

Los efectos no lineales se presentan debido a dos causas:

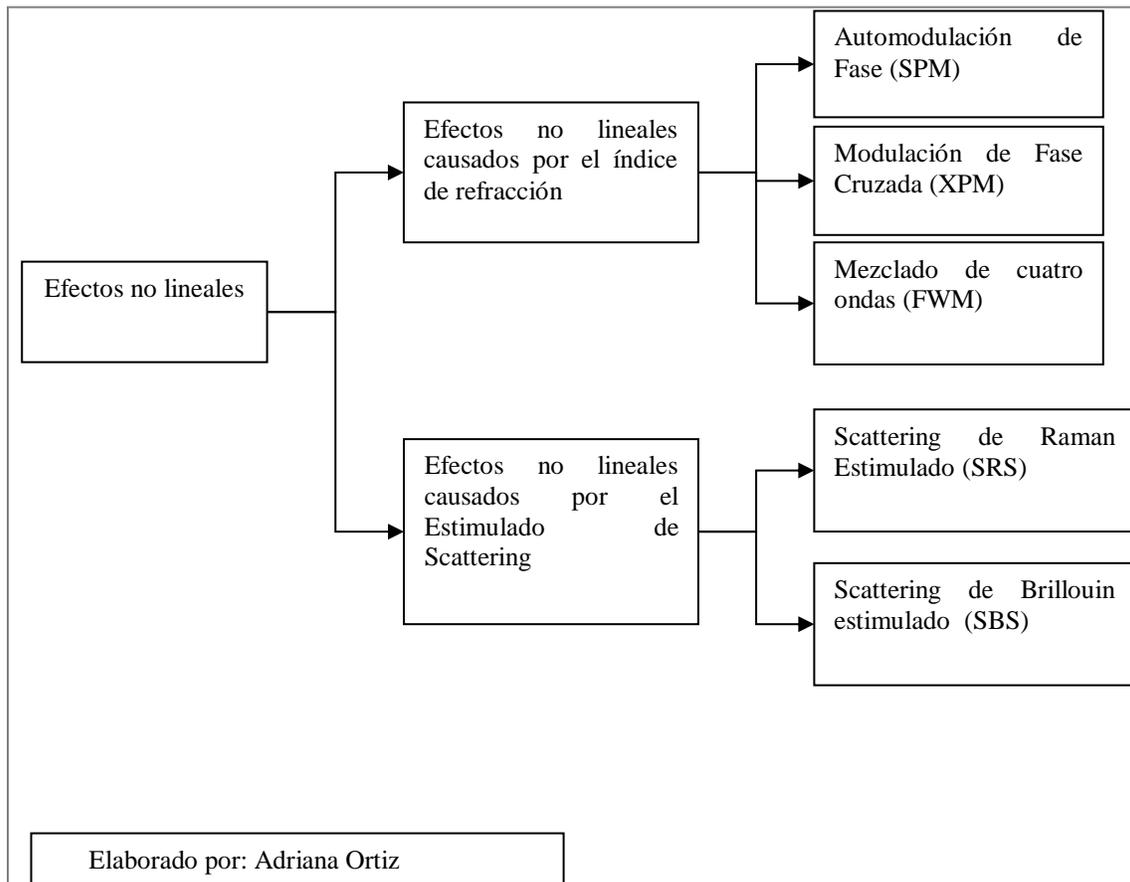


Figura 7. Clasificación de los efectos no lineales

2.5.1 Efectos no lineales causados por el índice de refracción

El índice de refracción podemos definirlo como el cociente entre la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de la luz en el medio (índice a calcular).

Teniendo en cuenta este concepto, se puede acotar que el índice de refracción es útil para calcular la velocidad a la que viaja la luz en la fibra.

La aceptación/rechazo de la onda de luz en la fibra y los ángulos de aceptación que hay dependen del índice de refracción. Los cambios del índice de refracción dentro de la fibra afectan la manera en que la luz viaja a través de la fibra. (FibreMex, 2015).

Las no linealidades que surgen debido a la dependencia energética del índice de refracción con la intensidad del campo aplicado (efecto Kerr) y tomando en cuenta el tipo de señal de entrada son: Automodulación de Fase (SPM), Modulación de Fase Cruzada (XPM) y Mezclado de cuatro ondas (FWM). (Lopez, Toledo, Ordoñez, & Agredo, 2011)

2.5.1.1 Mezclado de cuatro ondas (FWM)

El fenómeno del Mezclado de cuatro ondas se origina por la susceptibilidad no lineal de tercer orden denotada por $X^{(3)}$, haciéndose presente en un sistema con n números de canales a diferentes ondas de frecuencia $\omega_1, \omega_2, \omega_3 \dots \omega_n$. (Gómez, Puerto, & Guevara, 2015)

Como se plantea en (Agrawal, 2002), si tres campos ópticos con frecuencias portadoras $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ se copropagan en un mismo hilo de fibra óptica simultáneamente, $X^{(3)}$ genera un cuarto campo cuya frecuencia ω_4 está relacionada con otras frecuencias por una relación:

$$\omega_4 = \omega_1 + \omega_2 - \omega_3 \quad (1)$$

Este efecto aparece en las redes WDM-PON, ya que manejan varias longitudes de onda en una sola fibra, produciendo daño espectral y aumento del BER. (Guano H. , 2013)

Parte del proceso de FWM se puede ver como un proceso de dispersión en el que dos fotones de energía $\hbar\omega_1$ y $\hbar\omega_2$ se destruyen, y su energía aparece en forma de dos nuevos fotones de energía $\hbar\omega_3$ y $\hbar\omega_4$. (Agrawal, 2002)

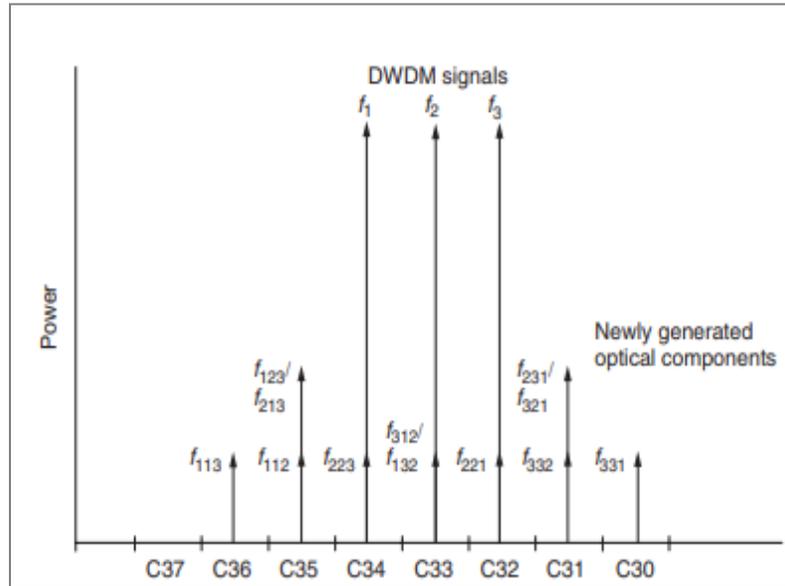


Figura 8. Efecto de FWM en tres señales equidistantes.

Fuente: (Chomycz, 2009)

Su representación matemática es la siguiente:

$$E(r, t) = \sum_{i=1}^n E_i \cos(\omega_i t - \beta_i z) \quad (2)$$

Donde:

β = Constante de propagación no lineal

Y la polarización no lineal está dada por la ecuación 3:

$$P_{NL}(r, t) = \epsilon_0 X^3 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \begin{pmatrix} E_i \cos(\omega_i t - \beta_i z) \\ E_j \cos(\omega_j t - \beta_j z) \\ E_k \cos(\omega_k t - \beta_k z) \end{pmatrix} \quad (3)$$

Donde:

P = polarización

ϵ = susceptibilidad

Al desarrollar la ecuación (2) se generan una gran cantidad de términos que implican el producto de tres campos eléctricos, además se introduce al parámetro d_{ijk} que es el factor de degeneración,

depende de los valores i, j ; toma un valor de 3 si son iguales y 6 si son diferentes. Tomando en cuenta todas estas consideraciones la polarización no lineal para w_{ijk} se expresa de la siguiente manera:

$$P_{ijk}(z, t) = \frac{3\varepsilon_0 X^3}{4} d_{ijk} E_i E_j E_k \cos[(w_i + w_j - w_k)t - (\beta_i + \beta_j - \beta_k)z] \quad (4)$$

Si se tiene un área efectiva A_{eff} , donde las señales se propagan en una onda plana, y que la ecuación (3) se presenta en términos del índice refracción no lineal n_2 , tomando en cuenta efectos de atenuación y dispersión cromática presentes en un sistema real, se tiene (Puerres, Salazar, & Jiménez, 2016) :

$$P_{ijk} = \eta_{ijk} \left(\frac{w_{ijk} n_2 d_{ijk} L_{eff}}{3cA_{eff}} \right)^2 P_i P_j P_k e^{-\alpha L} \quad (5)$$

Donde:

P_i, P_j, P_k = potencias de entrada

L_{eff} = Se coloca este parámetro por efectos de atenuación de la fibra

η_{ijk} = Se coloca este parámetro por efectos de dispersión cromática, representa la eficiencia de

FWM

La ecuación de la eficiencia es la siguiente:

$$\eta_{ijk} = \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + (\Delta\beta)^2} \left[1 + \frac{4e^{-\alpha L} \sin^2(\Delta\beta L/2)}{(1 - e^{-\alpha L})^2} \right] \quad (6)$$

Donde:

$\Delta\beta$ = diferencia entre las constantes de propagación.

Cuando se tiene $\kappa=0$, es decir que hay falta de coincidencia de fase, κ está representada por la ecuación (7):

$$\kappa = \Delta k + \gamma(P_1 + P_2) \quad (7)$$

Al realizar un análisis de la red, los efectos no lineales son tomados en cuenta cuando, la longitud no lineal L_{NL} es igual o menor a la longitud de la fibra óptica.

$$L_{NL} = \frac{\lambda A_{eff}}{2\pi n_2 P_0} \quad (8)$$

Donde:

P_0 = potencia óptica del canal WDM

El efecto FWM puede disminuir la potencia de los canales, mediante la ecuación (9) podemos medir el impacto del efecto FWM en un sistema WDM.

$$M = N(N - 1)^2 \quad (9)$$

Donde:

N = número de canales de entrada

M = número de productos generados FWM

Desventajas

- Interferencia con canales existentes
- Daño espectral
- Aumento del BER
- Degradación de la transmisión (transmisión comprometida)

2.5.2 Efectos no lineales causados por el Estimulado de Scattering

Como se vio en la figura 7 , tenemos dos tipos de dispersión inelástica: dispersión estimulada de Raman (SRS) y dispersión estimulada de Brillouin (SBS).

Entre estos dos efectos no lineales se tiene una gran diferencia, la dispersión de Brillouin genera fonones acústicos coherentes que dan lugar a una onda acústica macroscópica, por otro lado, la

dispersión Raman genera fonones ópticos incoherentes y no produce onda macroscópica. (Singh & Singh, 2007)

2.5.2.1 Dispersión Estimulada de Brillouin (SBS)

En la dispersión de Brillouin tenemos un mecanismo físico llamado electrostricción, que permite la interacción entre la señal óptica y ondas acústicas, es decir que los materiales se comprimen en presencia de un campo eléctrico, también responde a estímulos como cambios de tensión y temperatura en la fibra.

El valor umbral aproximado para SBS es de 2 dBm (1.6 mW), este valor aumenta si se incrementa el ancho de banda de la fuente. (Puerres & Salazar, 2015)

Azadeh (2009) sostiene que se denomina estimulado a este fenómeno porque las ondas de sonido se pueden generar por las ondas de luz, una vez que la energía de la onda de luz aumenta más allá de un nivel crítico.

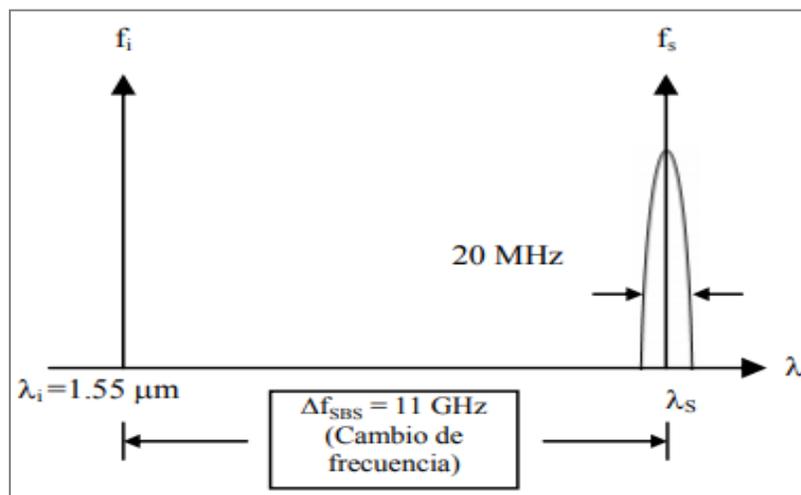


Figura 9. Onda dispersada generada por efecto SBS.

Fuente: (Guo, Kao, & Chiang, 2002)

Se representa matemáticamente el efecto SBS de la siguiente manera

Las 4 ecuaciones de Maxwell describen los fenómenos electromagnéticos. (Boyd, 2008)

$$\bar{E}_p(z, t) = A_p(z, t)e^{i(k_p z - \omega_p t)} + c. c \quad (10)$$

$$\bar{E}_s(z, t) = A_s(z, t)e^{i(k_s z - \omega_s t)} + c. c \quad (11)$$

$$\bar{\rho}(z, t) = \rho_0 + [\rho(z, t)e^{i(q_B z - \Omega_B t)} + c. c] \quad (12)$$

Donde:

z: eje de propagación de la fibra

t=tiempo

$\bar{E}_p(z, t)$ = Campo eléctrico de la onda incidente

$\bar{E}_s(z, t)$ = Campo eléctrico de la onda de Stokes

$\bar{\rho}(z, t)$ = Distribución de densidad de la fibra

$A_p(z, t)$ = Intensidad de la onda incidente

$A_s(z, t)$ = Intensidad de la onda de Stokes

k_p = Vector de onda incidente

k_s = Vector de onda de Stokes

ω_p = Frecuencia angular de la onda incidente

ω_s = Frecuencia angular de la onda de Stokes

ρ_0 = Distribución de densidad inicial

$\rho(z, t)$ = Amplitud de la onda acústica

q_B = Vector de onda acústica

Ω_B = Frecuencia de la onda acústica

c.c= Complejo conjugado (artificio matemático para hacer positiva a una ecuación)

Tomando en cuenta este conjunto de ecuaciones se puede definir al campo eléctrico como:

$$\bar{E}(z, t) = \bar{E}_p(z, t) + \bar{E}_s(z, t) \quad (13)$$

Las ecuaciones resultantes de amplitud acopladas del campo eléctrico óptico se convierten en las ecuaciones (13) y (14), si se considera condiciones del estado de equilibrio:

$$\frac{dA_p}{dz} = \frac{i\varepsilon_0 w \gamma_{st}^2 q^2}{2nc\rho_0} \frac{|A_s|^2 A_p}{\Omega_B^2 - \Omega^2 - i\Omega\Gamma_B} \quad (14)$$

$$\frac{dA_s}{dz} = \frac{-i\varepsilon_0 w \gamma_{st}^2 q^2}{2nc\rho_0} \frac{|A_p|^2 A_s}{\Omega_B^2 - \Omega^2 - i\Omega\Gamma_B} \quad (15)$$

Intensidad de Stokes:

$$I_{s,p} = 2n\varepsilon_0 c A_{s,p} A_{s,p} \quad (16)$$

Factor de ganancia Brillouin:

$$g_B(\Omega) = g_p \frac{(\Gamma_B/2)^2}{(\Omega - \Omega_B)^2 + (\Gamma_B/2)^2} \quad (17)$$

Donde:

$$\Gamma_B = \frac{1}{\tau_B}$$

τ_B = Tiempo de amortiguación de las ondas acústicas

$\tau_B \sim 10$ ns: Tiempo de vida del fonón

g_p = Pico de ganancia máxima

Ω = Valor de frecuencia

Para fibras ópticas monomodo se tiene que la ganancia pico tiene un valor de

$$g_B = 5 \times 10^{-11} \text{ (m/W)}.$$

Ecuaciones de modelamiento del fenómeno de scattering:

$$\frac{dI_s}{dz} = \frac{dI_p}{dz} = -g_B I_s I_p \quad (18)$$

La intensidad de onda de Stokes es máxima cuando se propaga en dirección contra propagante a la onda incidente a través del medio.

$$I_s max = I_s(L)e^{Lp g_B L_{eff} - \alpha L} \quad (19)$$

Donde:

L_{eff} = Longitud efectiva de la fibra óptica que se relaciona con L

L = Longitud real de la fibra óptica

α = Atenuación de la fibra óptica

La potencia crítica está dada por:

$$P_{cr(SBS)} = 21 \frac{A_{eff}}{g_B * L_{eff}} \quad (20)$$

Donde:

A_{eff} = Área efectiva

Esta potencia limita la potencia de entrada, es independiente del número de canales y el valor esta dado en el orden de los mW.

Desventajas

- Atenuación de la señal
- Limitante de potencia
- Pérdida de potencia en la frecuencia incidente.

Un método para combatir a este fenómeno es limitando la máxima potencia de transmisión óptica. Otra forma de prevenirlo es manteniendo la potencia por canal por debajo del umbral. (Ru Lai & Chen, 2015)

2.6 Asignación de ancho de banda en redes ópticas

Para cumplir con las necesidades de los usuarios y tomando en cuenta la calidad de servicio y velocidad de la red es imperativo recurrir a la asignación de ancho de banda que permite adaptar

los requerimientos de ancho de banda de manera más rápida, lo que a su vez vuelve a la red mucho más eficiente.

Los algoritmos de asignación de ancho de banda tienen la siguiente clasificación:

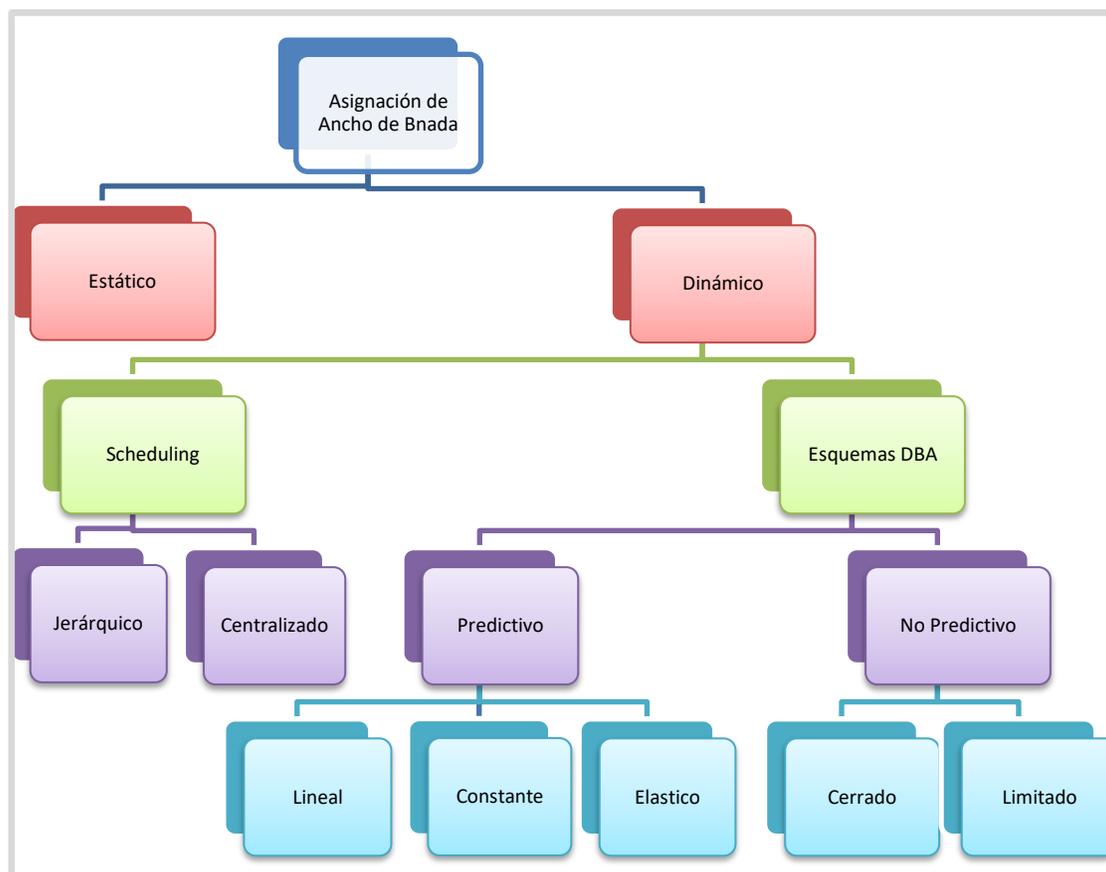


Figura 10. Clasificación de los algoritmos de asignación de ancho de banda.

Fuente: (Hussian & Fernando, 2008)

La distribución estática puede dar lugar a pérdida de tráfico por lo cual no es recomendable utilizarlo, aunque sea simple de implementar y tenga un costo bajo.

Por otro lado, la asignación de ancho de banda dinámico o también conocido por sus siglas como DBA, es un método empleado con el fin de mejorar, distribuir y aprovechar la utilización del ancho de banda, permitiendo el aumento de usuarios, la OLT es el equipo encargado de operar la

asignación, mediante el protocolo MAC para la priorización entre servicios. (Gutierrez, Espinosa, & Hernández, 2011).

Entre las recomendaciones de la ITU-T que se encargan de la asignación de ancho de banda dinámico tenemos la recomendación G.983.4. (Unión Internacional de Telecomunicaciones ITU, 2008).

CAPITULO 3

ANALISIS DE ALGORITMOS HEURISTICOS DE AGRUPAMIENTO PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE LA RED

3.1 Métodos heurísticos

La razón por la cual nos enfocamos en el uso de métodos heurísticos es debido a que los algoritmos de agrupamiento se basan sobre todo en heurísticas.

En cuanto a la comparación de alguno de estos métodos no se cuenta con una medida objetiva, por lo tanto, se tomará en cuenta ciertos parámetros que podamos comparar enfocándonos que el análisis será subjetivo. (STUDYLIB, 2016).

3.2 Análisis de conglomerados (clúster)

En (Pascual & Sánchez, 2007), menciona que el análisis de conglomerados es el estudio formal de algoritmos y métodos para agrupar o clasificar objetos.

Su objetivo principal es el de agrupar en conjuntos elementos o datos adquiridos que cuenten con cierta similitud entre sí (homogeneidad interna, interior del clúster), y que sean disimilares entre grupos.

Para obtener los clústeres se considera la distancia o en otros casos interviene el criterio (depende de lo que se necesite y de lo que consideremos como similar).

Los algoritmos de agrupamiento simplifican el trabajo al momento de detectar clústeres cuando se trata de una enorme cantidad de datos como matrices de patrones o de similitud, e implementan la estrategia de divide y vencerás haciendo que la carga computacional sea menos compleja.

Tomando en cuenta todos estos aspectos vemos que el clustering presenta varias propiedades como velocidad y fiabilidad, haciéndolo un método ventajoso y útil. (Jain & Dubes, 1988).

3.2.1 Etapas de Análisis de Clúster

Para realizar este proceso se necesitan de varios pasos, es fundamental tener en cuenta lo siguiente:

Al momento de crear los grupos se debe tener una idea clara de lo que se requiere, es decir tener un objetivo específico.

La similitud entre los datos adquiridos depende enteramente del criterio del individuo.

Y a continuación se detallan ciertas fases que serán una guía al momento de realizar el proceso de agrupamiento para hallar la solución a nuestro problema:

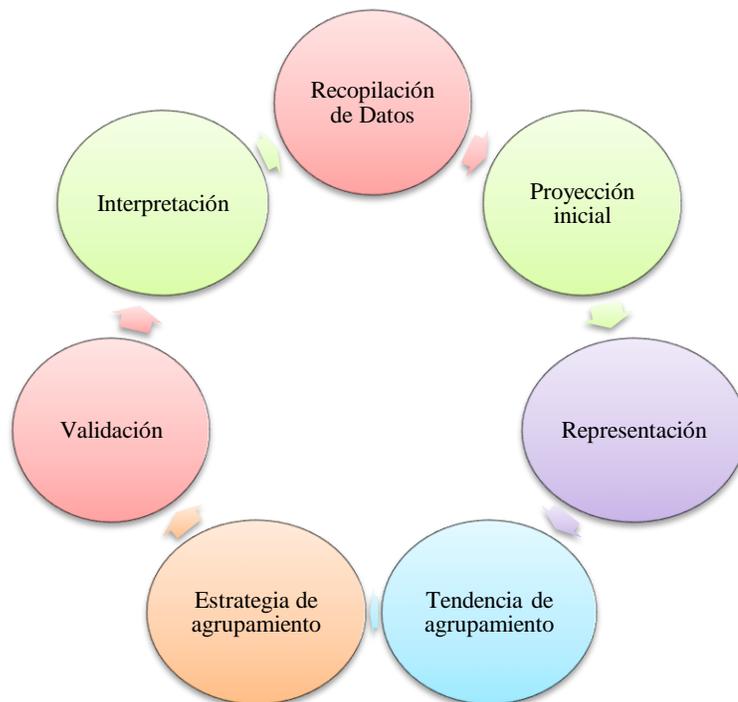


Figura 11. Metodología de agrupamiento.

Fuente (Jain & Dubes, 1988)

Tabla 8*Descripción de las fases de la Metodología de agrupamiento*

Fase	Descripción
Recopilación de datos	En este paso se toman en cuenta los datos que nos van a ser útiles y descartamos aquellos que son irrelevantes. Aquí se realiza la selección de las variables, que permitirán definir una estructura.
Proyección inicial	Al extraer los datos de la fuente los encontramos en su forma bruta. En esta etapa es necesario tratar los datos, para hacer más viable el algoritmo a implementar. La agrupación se puede dar por variables o por individuos.
Representación	<p>Es necesario representar los datos de manera adecuada para hacer más fácil su manipulación al momento de realizar el algoritmo de agrupamiento. Estos datos se convertirán en matrices de patrones o de proximidad, esto dependerá de los requerimientos del problema planteado, de la aptitud de quien desarrolla el algoritmo y de los recursos computacionales. Se observa características de los datos.</p> <p>Por ejemplo, se tiene \mathbf{X} que es una muestra de m individuos, los cuales tienen un conjunto de p variables.</p> $\mathbf{X} = \begin{pmatrix} X_{11} & X_{12} \\ \dots & X_{1p} \\ X_{21} & X_{22} \end{pmatrix}$ <p>X_{11}: Representa a el primer individuo en la primera variable X_{12}: Representa el primer individuo en la segunda variable X_{ij}: Representa el individuo i-ésimo en la variable j-ésima.</p> <p>Aquí se elige la medida de asociación que es un indicador que determina la proximidad o en cuanto se asemejan o difieren un par de elementos ya sea mediante distancia o una similaridad.</p>
Tendencia de agrupamiento	Cuando tenemos una gran cantidad de datos es importante asegurarse si estos pueden o no ser agrupados, depende enteramente del investigador.

CONTINÚA

Estrategia de agrupamiento	<p>Este paso se centra en la elección del algoritmo de agrupación y de los parámetros iniciales, depende de los objetivos planteados en la investigación.</p> <p>Se tiene una amplia variedad de métodos de agrupamiento cada uno con sus distintivas propiedades, en una primera clasificación tenemos los métodos jerárquicos y no jerárquicos.</p>
Validación	<p>Para aceptar los resultados obtenidos tras el proceso que realiza el algoritmo de agrupamiento es imperativo realizar pruebas (uso de técnicas visuales).</p> <p>Aquí podemos encontrar dos tipos de validación: externa e interna</p> <ul style="list-style-type: none"> • Validación externa: Usa información externa es decir información ajena a la técnica de agrupación utilizada. • Validación interna: Toman en cuenta solo la información especificada en los parámetros iniciales.
Representación	<p>El investigador deberá comparar los resultados obtenidos con otros estudios, lo que permitirá obtener conclusiones</p>

3.2.2 Similitud y distancia métrica

Tabla 9

Medidas de Asociación

Distancia	Similaridad
La distancia será pequeña entre los individuos de un clúster	La similaridad será alta entre los individuos de un clúster

- **Distancia métrica**

Una función $d: U \times U \rightarrow \mathcal{R}$ se llama distancia métrica si $\forall x, y, z \in U$ se verifica:

$$d(x, x) \geq 0$$

$$d(x, y) = 0 \Leftrightarrow x = y$$

$$d(x, y) = d(y, x)$$

$$d(x, z) \leq d(x, y) + d(y, z)$$

- **Similaridad**

Una función $s: U \times U \rightarrow \mathcal{R}$ se llama similaridad si $\forall x, y \in U$ se verifica:

$$S_0 = \text{número real infinito arbitrario} \left\{ \begin{array}{l} s(x, y) \leq S_0 \\ s(x, x) = S_0 \\ s(x, y) = s(y, x) \end{array} \right.$$

- **Medidas de asociación para variables**

Tenemos varias medidas de asociación, mencionaremos algunas.

- Coseno del ángulo de dos vectores
- Coeficiente de correlación
- Medidas para datos dicotómicos
- Medida de Ochiai
- Medida Φ
- Medida de Russell y Rao
- Medida de Parejas simples
- Medida de Jaccard
- Medida de Dice
- Medida de Rogers-Tanimoto

- **Medidas de asociación para individuos**

- Distancia Euclídea:

$$d(X_i, X_j) = \sqrt{\sum_{c=1}^P (X_{ic} - X_{jc})^2}$$

- Distancia de Minkowski:

$$d_q(X_i, X_j) = \left(\sum_{c=1}^P |X_{ic} - X_{jc}|^q \right)^{\frac{1}{q}} \quad \text{donde } q \geq 1$$

- Distancia d1 o ciudad (City Block):

$$d(X_i, X_j) = \sum_{c=1}^P |X_{ic} - X_{jc}|$$

- Distancia de Tchebychev o del máximo ($q=\infty$):

$$d_{\infty}(X_i, X_j) = \max(c = 1, \dots, p) |X_{ic} - X_{jc}|$$

- Distancia de Mahalanobis:

$$D_S(X_i, X_j) = \sqrt{(X_i - X_j)' S^{-1} (X_i - X_j)}$$

3.3 Métodos de agrupamiento

Como se vio anteriormente los métodos de agrupamiento son técnicas que permiten hallar el algoritmo adecuado para resolver los requerimientos del problema planteado.

A continuación, se presentará un cuadro donde se observa las diferentes técnicas de clúster.

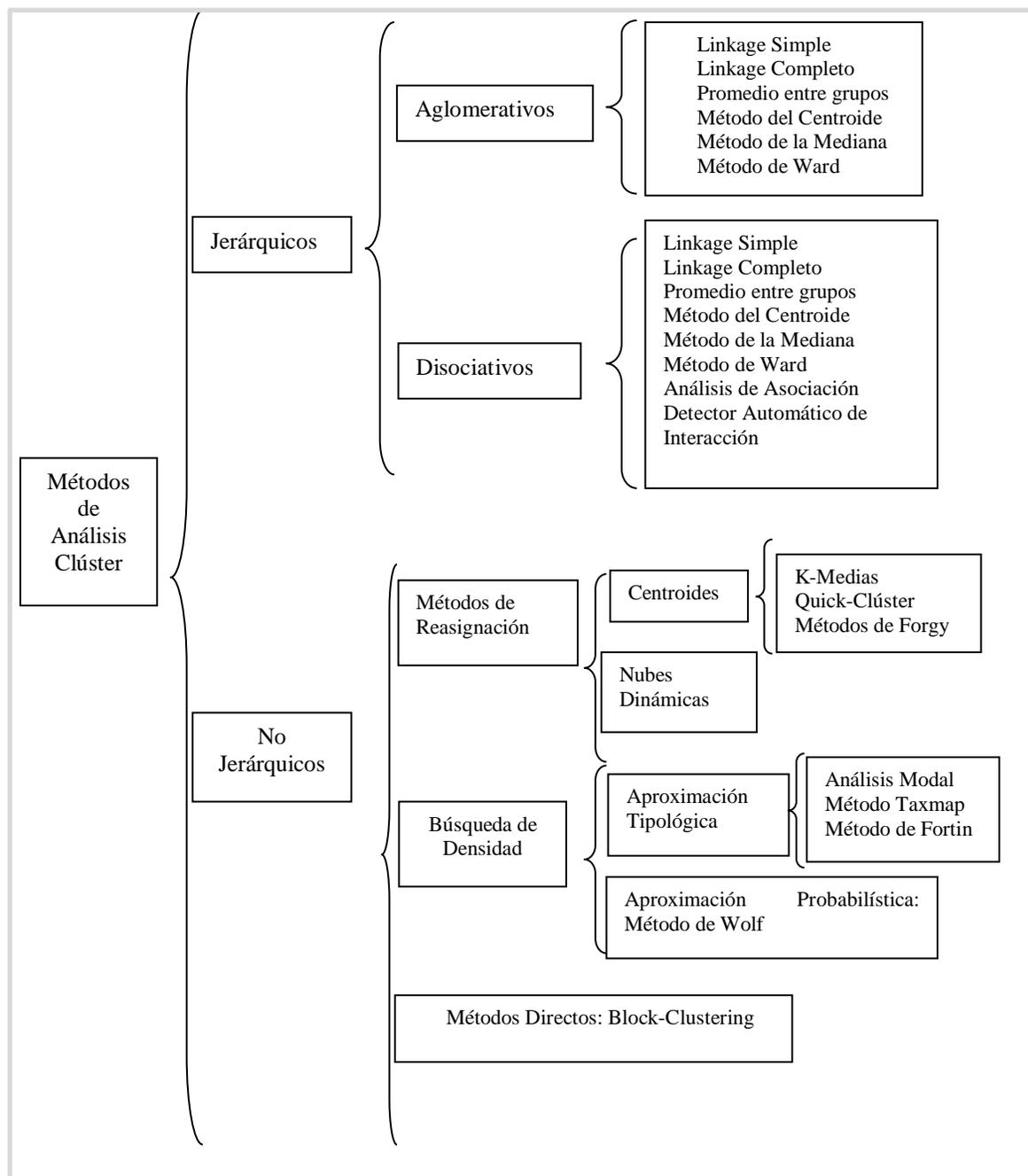


Figura 12. Clasificación de las Técnicas Clúster.

Fuente: (Gallardo, 2012)

Tabla 10
Técnicas de clúster

Jerárquicos	No jerárquicos
<ul style="list-style-type: none"> • Su objetivo es el de agrupar clústeres para formar un nuevo o para separar alguno ya existente y así dar origen a otros dos, en este proceso se puede dar dos casos: se minimiza alguna distancia o bien se maximiza una medida de similitud. • Para formar clústeres se realizan particiones sucesivas. • Los clústeres cercanos se fusionan de manera sucesiva hasta que todos los individuos convergen en un solo grupo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Su objetivo es el dividir en k grupos los datos, estos representan a un clúster. • Desde un inicio es necesario especificar el número de clústeres.

3.4 Métodos Jerárquicos

Este método se subdivide en métodos aglomerativos y en métodos disociativos

- **Método aglomerativo o ascendente:** La premisa a tomar en cuenta aquí es tomar tantos grupos como individuos haya, y se comienza con la clusterización, este proceso finaliza cuando todos los casos se encuentren englobados en un mismo grupo
- **Método disociativo o descendente:** Al contrario que en el método anterior, aquí se tiene un conglomerado formado por todos los individuos, que mediante divisiones sucesivas se van creando grupos cada vez más pequeños. Terminado el proceso se obtiene tantos grupos como individuos se tiene en el estudio.

Son llamados jerárquicos porque se forman clústeres de niveles diferentes, se forman jerarquías.

Luego de realizar el proceso en el que se define qué tipo de medida de asociación tomar, observaremos cual es el proceso que realiza el método ascendente mediante un algoritmo.

Tabla 11*Algoritmo del método jerárquico*

PASO 1	Formar la partición inicial $Q = \{ i_1, \{ i_2 \}, \dots, \{ i_N \}$ $P = \{ i_1, \{ i_2 \}, \dots, \{ i_N \}$ Se considera a cada individuo como un clúster
PASO 2	Determinar los dos clústeres más próximos (menor distancia) i_i, i_j , y agruparlos en uno solo.
PASO 3	Formar la partición $Q = \{ i_1, \{ i_2 \}, \dots, \{ i_i \cup i_j \}, \dots, \{ i_N \}$
PASO 4	Repetir los pasos 2 y 3 hasta obtener la partición final $Q_r = \{ W \}$

3.5 Métodos no Jerárquicos

Este método tiene por objetivo clasificar individuos. Su funcionamiento se basa en elegir alguna partición inicial, es decir especificar los K clústeres, y se intercambian los elementos de los clústeres hasta obtener una óptima partición. Aquí se trabaja con la matriz de datos original, no es necesario utilizar una matriz de distancias o similitudes.

Se subdividen en 4 grupos: Método de Reasignación, Método de Búsqueda de la densidad, Métodos Directos y Métodos de Reducción de Dimensiones.

Nos centraremos en los métodos de Reasignación debido a que en un paso determinado del proceso un individuo es asignado a un clúster y en un paso siguiente puede ser reasignado a otro grupo, este proceso se cumple con el fin de optimizar el criterio de selección. Se da por finalizado este proceso cuando no quedan individuos cuya reasignación permita optimizar el resultado que se ha conseguido. (Gallardo, 2012)

Tenemos varios métodos:

- Método K-Medias
- Quick-Clúster análisis

- Método de Forgy
- Método de las Nubes Dinámicas

3.5.1 Método K-Medias

Es uno de los métodos de agrupación de optimización más conocidos, este algoritmo permite clasificar un conjunto de n datos en k clústeres, y se toma como dato de entrada del algoritmo el número de grupos.

Las variables por usar son de tipo cuantitativo, y se hace uso de la distancia cuadrática Euclídea

A continuación, se describe las etapas que cumple el algoritmo. (Tan, Steinbach, & Kumar, 2006).

Tabla 12

Etapas del algoritmo K-means

Inicialización	<ul style="list-style-type: none"> • Determinar el conjunto de elementos que va a ser particionado. • Definir k que es el número de clústeres deseados. • Definir los centroides de manera aleatoria que es el método más común, aunque existen varios métodos para seleccionar los centroides
Clasificación	Asignar cada punto al centroide más cercano y cada colección de puntos asignados a un centroide es un clúster (Región de Voronoi).
Calculo de centroides	Después de cada asignación se recalculará el nuevo centroide. Se actualizan los centroides de cada clúster, basados en los puntos asignados al clúster.
Criterio de convergencia	<ul style="list-style-type: none"> • Permite detener el proceso del algoritmo, si se trata de iteraciones se determina un número fijo de estas para finalizar el proceso, o cuando ya no hay más un intercambio de objetos entre los clústeres • Repetir el proceso de asignación y actualización hasta que ningún punto cambie de clúster, o lo que es lo mismo, hasta que los centroides permanezcan iguales.

3.5.2 Características

- El número de clústeres (**k**) debe ser necesariamente conocido.
- El centroide es el centro geométrico del clúster, es decir que cada clúster posee un centroide.
- Los centroides se actualizan de acuerdo con la asignación de puntos a clústeres mediante un número definido de iteraciones, hasta que dejen de cambiar los centroides.
- Requiere un mínimo almacenamiento de información.
- Tiempo de complejidad es lineal

3.5.3 Desventajas

- Se necesita de varias iteraciones para obtener un mejor resultado.
- Necesariamente debe ser inicializado en el algoritmo el número de clústeres (**k**), perjudicando la eficacia de este.
- La distribución de los datos se ve afectada debido a que k-means es susceptible a valores extremos.
- Sensible al ruido
- En lo que se refiere a la elección de los centroides iniciales es altamente sensible

3.5.4 Complejidad

En cuanto a su complejidad computacional podemos decir que es alta, a pesar de que este algoritmo es de fácil implementación, debido a esta razón su uso es limitado, K-means muestra una complejidad $O(nkd)$. (Pérez, y otros, 2014)

Donde:

n: número de objetos

k: número de grupos

d : número de dimensiones.

3.5.5 Desarrollo del algoritmo

1. Input

K , se inicializa el número de clústeres, y los centroides se eligen aleatoriamente.

2. Se elige aleatoriamente los centroides de los k clúster $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_K \in \mathfrak{R}$

3. while {

for $i=1$ to m	}	Paso para asignación de clúster
$c^{(i)}$: índice (desde 1 a K)		

4. for $k=1$ a K

$\mu_k :=$ promedio de puntos asignados al clúster $k \rightarrow$ Paso para mover el
centroide

5. } end while

3.6 Métodos de interpolación

Para nuestro estudio se toma en cuenta los métodos de interpolación a partir de puntos, la interpolación espacial permite estimar el valor que puede alcanzar cierto atributo (N) en una región definida, la misma que contiene información del atributo que son las coordenadas (x, y), se inicia este proceso con la ayuda de puntos vecinos situados en la parte interna de la región mencionada, dando valores a N . (Ferreira, 2005)

De acuerdo con Gomariz (2013) este tipo de interpolación se centra en analizar el comportamiento y la influencia de una muestra de datos en otros puntos en el espacio, en la tabla 13 se detalla la división de los métodos de interpolación, así como sus características y subdivisiones.

Tabla 13
Clasificación de los métodos de interpolación

Métodos globales	Métodos locales
Considera todos los puntos de la muestra	Utiliza los puntos más cercanos al punto a interpolar
Estos a su vez se subdividen en: Métodos de Clasificación y Métodos de Regresión	Métodos de polígonos de Thiessen, ponderación lineal y de la inversa de la distancia

Para realizar la comparación entre métodos de clusterización se escogió el método Polígonos de Thiessen o también conocido como Diagrama de Voronoi.

3.7 Diagrama de Voronoi

A lo largo de la historia ha sido denominado de diferentes formas: Polígonos de Thiessen, Teselación de Dirichlet, Celdas de Wigner-Seitz, Zonas de Brillouin, nombres tomados de las personas que los estudiaron, dando a entender que el Diagrama de Voronoi ha sido utilizado y redescubierto varias veces (Martinez, 2015)

Como se menciona en (Marinai & Dengel, 2004), el Diagrama de Voronoi segmenta un plano formado por un grupo de puntos en celdas o subregiones, es decir que el plano se divide en tantas regiones como puntos se tenga, y a su vez estas celdas se forman por los puntos que son más cercanos a un objeto particular que a cualquier otro.

Existen varios trabajos sobre el uso de él Diagrama de Voronoi como método de clusterización, el estudio se enfocará en el algoritmo basado en los círculos de Voronoi llamado Voronoi-Clúster nombrado así por Reddy (2013).

3.7.1 Método Voronoi-Clúster, basado en los círculos de Voronoi

Este método trabaja de la siguiente manera:

Tabla 14*Funcionamiento del algoritmo basado en los círculos de Voronoi*

Inicialización	<ul style="list-style-type: none"> • Determinar el conjunto de elementos que va a ser particionado, es decir que se debe tener un conjunto S de n puntos. • A partir del conjunto S construir el Diagrama de Voronoi. • Se debe especificar el valor de k, que es el número de clústeres. • Cada punto que forma el conjunto S es tomado como un sub-clúster.
Proceso	<ul style="list-style-type: none"> • Se fusionan los sub-clústeres, de acuerdo con el siguiente criterio: $f(P)$ donde $P \in S$ Almacenando en $f(P)$ la suma de los radios de todos los círculos que contienen P en sus circunferencias. • Los n puntos dados son ordenados de manera ascendente con respecto a $f(P)$ y guardados en SL, formando una lista. • El proceso de fusión comienza con p_i (i es uno inicialmente). • Se halla todos los círculos Voronoi que contienen p_i en su circunferencia. Y se toma en cuenta los puntos en el círculo Voronoi más pequeño que tiene p_i en su circunferencia. Si alguno de estos puntos ya está asignado a un subgrupo, se agrega el punto p_i al mismo subgrupo, pero si el punto p_i no está asignado a ningún subgrupo, agregamos p_i a un nuevo subgrupo • Se cuenta el número de subgrupos generados hasta esta etapa, si se forman k agrupamientos, se termina el proceso. Caso contrario i se incrementa en uno y se repite el mismo procedimiento con p_i, es decir, el siguiente punto de la lista SL ordenada. • Cuando todos los puntos de la lista SL se agotan, el proceso se reinicia desde el punto p_i.

3.7.2 Características

- Existe una relación de dualidad entre el diagrama de Voronoi y la Triangulación de Delaunay, es decir que podemos obtener una estructura de la otra, se tiene una dualidad punto-región y arista-arista.
- P_i y P_j forman parte del círculo de Voronoi, dando a entender que no contiene otros sitios en su interior.

3.7.3 Desventajas

- Alto tiempo de ejecución

3.7.4 Complejidad

Acerca de su complejidad, por un lado, se requiere un tiempo de $O(n \log n)$ para graficar el Diagrama de Voronoi. Los valores de la función V_{cell} se calculan para cada uno de los puntos dados en tiempo $O(n \log n)$.

Los puntos del conjunto S toman un tiempo $O(n \log n)$ para ser ordenados.

Por lo tanto, la complejidad de tiempo global del algoritmo propuesto es $O(n \log n)$. (Reddy, 2013).

3.7.5 Desarrollo del algoritmo

Entrada: Se tiene un conjunto S de n puntos, y un valor k , que es el número de clústeres, es un valor requerido.

Se define las variables y funciones a usar.

Tabla 15

Definición de variables y funciones, método basado en los círculos de Voronoi

Sum, i, j, h, m, r, a, b,	Variables temporales
p, q	
Vos(S)	Función que construye el diagrama de Voronoi del conjunto S de n puntos dados
V(p)	Celda de Voronoi del punto p_i
CirS(v)	Círculo de Voronoi del vértice v
R(v)	Función para encontrar el radio del círculo Voronoi $CirS(v)$ del vértice v .
Vcell(p)	Función para encontrar el error de la celda Voronoi del punto p .
Sort(S)	Función para ordenar los puntos de S en orden monótonamente creciente según la función $V_{cell}()$.
SL []	Una matriz para almacenar los puntos ordenados.

- 1) Se llama a $Vor(S)$, Se construye el diagrama de Voronoi del conjunto S .
- 2) Se llama a $Vcell(p_i)$, halla el valor del error en la celda de Voronoi del punto p_i .
- 3) Se llama $Sort(p_i)$, ordena los puntos p_i de S en orden monótonamente creciente de los valores de $Vcell(p_i)$.
- 4) Almacena los puntos ordenados p_i , $i = 1, 2, \dots, n$ en la matriz de la lista ordenada SL .
- 5) Comienza con $SL[j]$, se halla los vértices de Voronoi v_m (para algunos $m = 1, 2, \dots, r$) cuyos círculos $CirS(v_m)$ contienen $SL[j]$ en sus circunferencias.

/ * inicialmente $j \leftarrow 0$ * /

- 6) Se llama a $R(v_m)$ para encontrar el radio de los círculos Voronoi $CirS(v_m)$.
- 7) Hallar los puntos en el círculo de Voronoi de radio mínimo ($CirS(q)$) que contienen $SL[j]$ en su circunferencia.
- 8) If $SL[j]$ ya está asignado a un subgrupo (C_a)

then

{

If los puntos en la circunferencia de $CirS(q)$ se asignan a cualquier subgrupo C_b , then

Fusiona $SL[j]$ y todos los otros puntos del subclúster C_a en el subgrupo C_b .

i.e., $C_b \leftarrow C_b \cup C_a$;

(or)

Fusionar todos los puntos del subgrupo C_b en el subclúster C_a .

i.e., $C_a \leftarrow C_a \cup C_b$;

}

Else If los puntos en la circunferencia de $CirS(q)$ son asignados a cualquier grupo C_h

then

Agregue SL [j] al subgrupo C_h .

i.e., $C_h \leftarrow C_h \cup SL[j]$;

9) If k número de grupos son creados then Exit ();

Else If $(j == \text{length}(SL-1))$ then ir al paso 10;

/* Esto indica que la lista ordenada SL está agotada */

Else

{

$j \leftarrow j + 1$;

Ir al paso 5 para continuar con los otros puntos de la lista ordenada SL;

}

10) $j \leftarrow 0$;

11) Ir al paso 5 para repetir el mismo procedimiento desde el principio de la lista ordenada SL para los siguientes radios menores del círculo de Voronoi.

Función Vcell(p_i)

{

Paso 1: Encontrar los vértices de Voronoi en cuyos círculos (por ejemplo, CirS (v_i)) para algunos $i = 1, 2, \dots, t$) es localizado el punto p_i .

Paso2: Se llama a R (v_i) para encontrar los radios r_1, r_2, \dots, r_t de CirS (v_i).

Paso3: Sum=(r_1, r_2, \dots, r_t);

Paso4: Return (Sum);

}

3.8 Simulación y comparación entre los métodos de K-means y Método del Diagrama de Voronoi basado en sus círculos.

Para realizar las pruebas se tomó en cuenta una zona en específico en la ciudad de Quito, escenario que será utilizado para realizar las simulaciones con los dos métodos.

Se tomaron 28, 121 y 213 puntos como muestra, en donde se observará el comportamiento de ambos métodos, en la siguiente figura se muestra el escenario escogido.



Figura 13. Escenario para realizar las pruebas

Se utilizó Google Maps, en el mapa se podrá seleccionar los puntos, y también captura la longitud y latitud de estos.

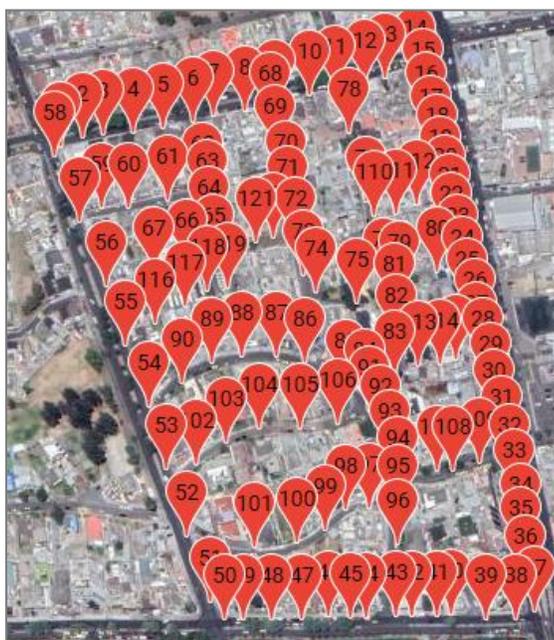


Figura 14. Puntos. Latitud y longitud

Estos puntos son visualizados en Matlab, la figura muestra las coordenadas correspondientes a un sector del norte de la ciudad de Quito.

Se tomo como referencia el mismo escenario, pero con distinta cantidad de puntos.

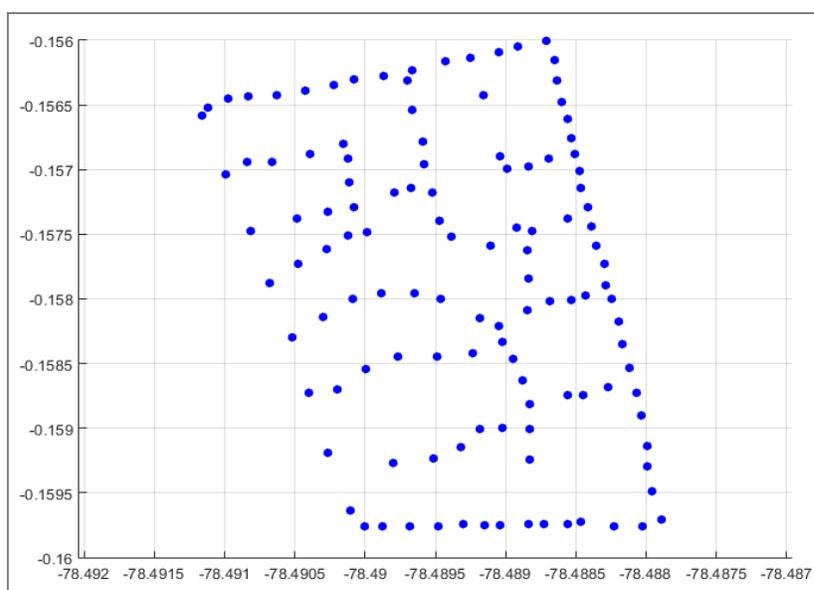


Figura 15. Coordenadas tomadas en el mapa

3.8.1 Pruebas método K-means

Primero se analizará cómo es el comportamiento del método K-means en el escenario escogido, tomando en cuenta las diferentes cantidades de puntos que se tomaron.

3.8.1.1 Escenario con 38 puntos

Para comenzar el análisis se tomará el escenario que está formado por 38 puntos.

Como se observa, se trató de enmarcar varias de las cuadras del escenario.

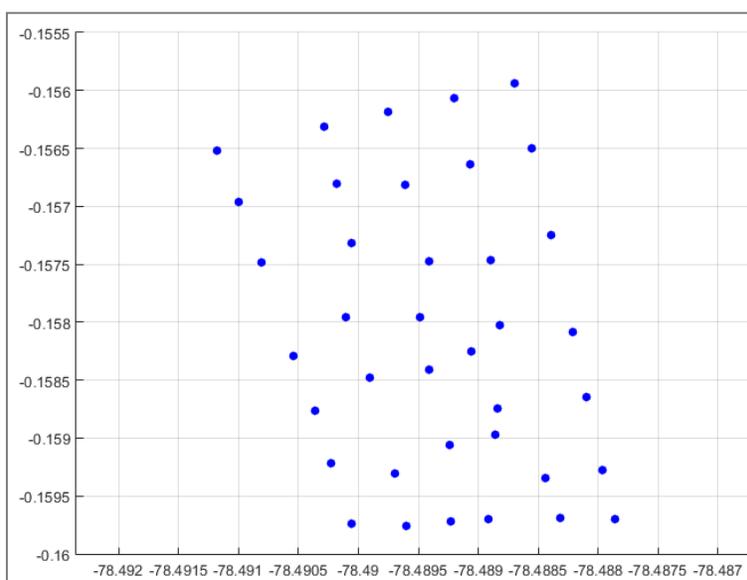


Figura 16. Escenario formado por 38 puntos

Esta simulación nos permitirá observar el tiempo de ejecución del algoritmo, tomando en cuenta el número de iteraciones y el número de clústeres.

Para poder observar la diferencia entre los tiempos es necesario realizar esta prueba con varios números de clústeres, y en base a 10 iteraciones, los clústeres serán formados con los datos obtenidos del mapa (coordenadas x, y).

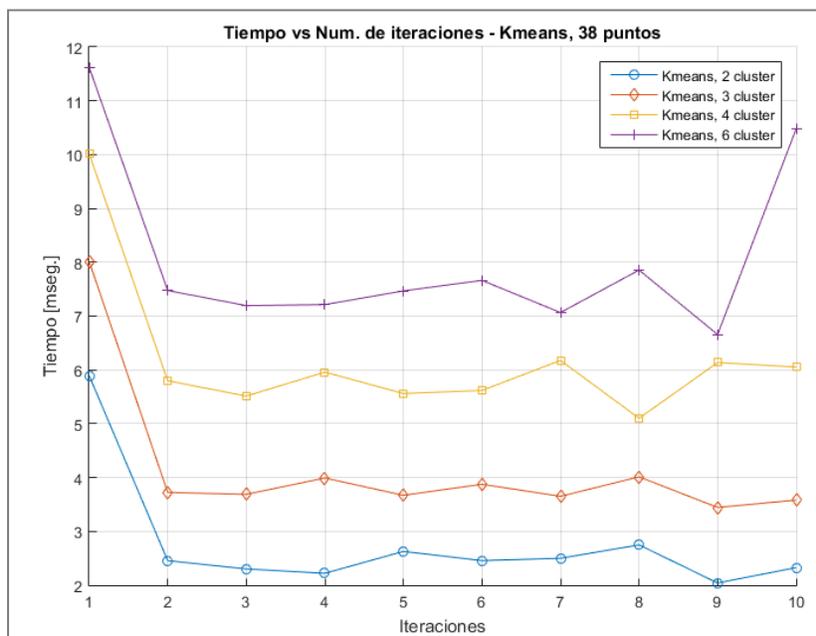


Figura 17. Tiempo vs Número de Iteraciones, K-means, 38 puntos

Se puede observar que a medida que se aumenta los clústeres toma más tiempo agrupar los datos, como se puede apreciar en la figura 17, la línea de color azul toma menor tiempo en agrupar los datos en 2 clústeres tomando en cuenta 10 iteraciones y en cierto momento sigue una tendencia casi lineal, por el contrario la línea morada muestra que para concentrar los datos en un número de seis clústeres el tiempo que se toma en ejecutar el algoritmo es mucho mayor, esto se debe a que luego de que a los centroides se les asignan los datos, en cada iteración se actualizan, por lo tanto a mayor número de clústeres mayor es el tiempo que se toma en procesar los datos.

En la siguiente gráfica, observamos cuantos datos son agrupados en cada clúster.

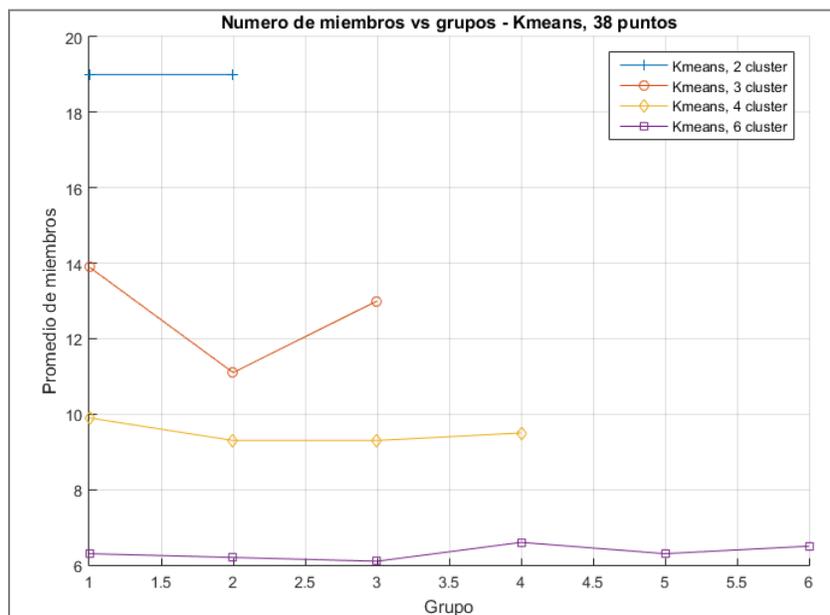
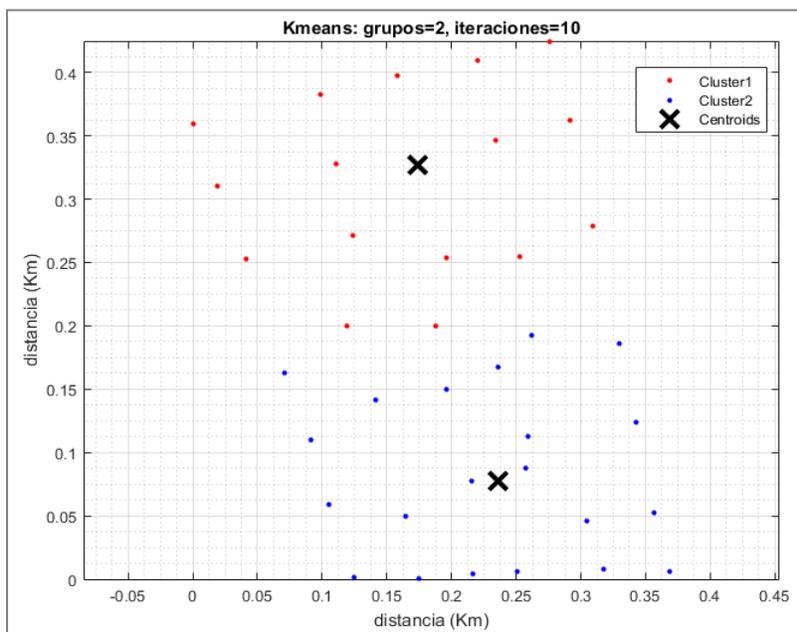


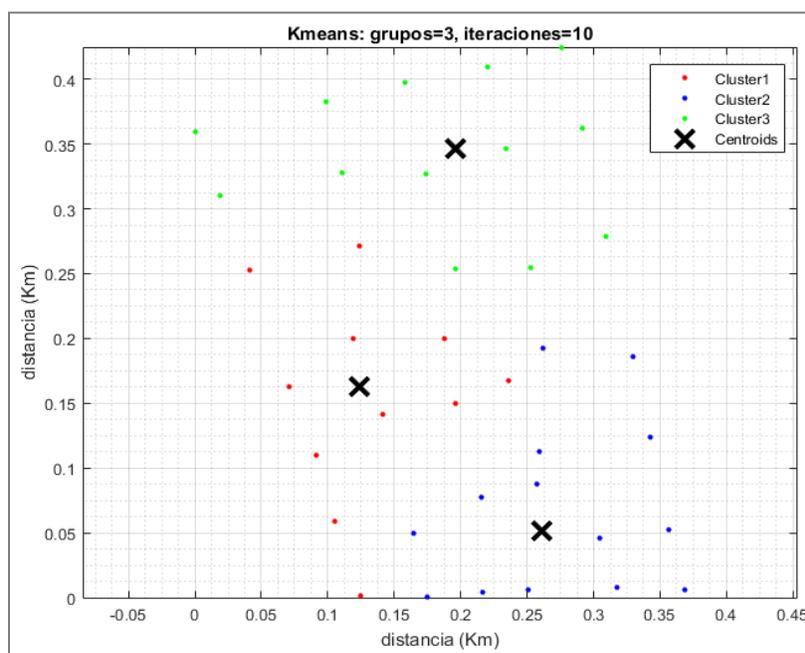
Figura 18. Promedio de miembros en cada clúster, K-means

Como podemos ver en la figura 18, los datos son distribuidos de manera casi uniforme, en el caso del clúster 2 se nota una gran diferencia en la distribución de miembros teniendo un valor mucho más alto, pero a medida que se aumenta el número de clústeres la distribución se va haciendo más equitativa, esto lo podemos visualizar en la línea de color purpura, que es el caso para 6 clústeres.

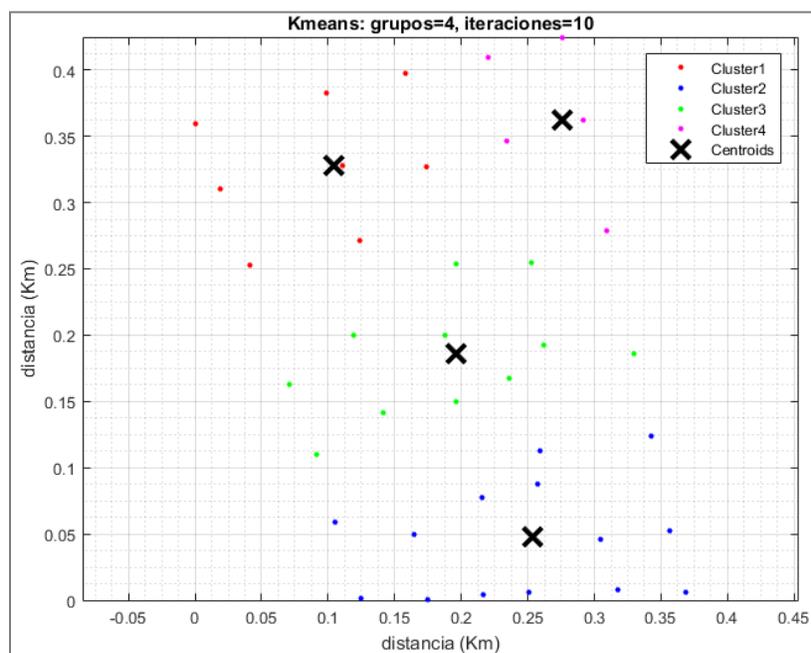
En las gráficas siguientes se muestra como realiza la distribución de las muestras tomadas para diferentes números de clústeres, se evidencia en las gráficas que la distribución es casi igual para el clúster 2, como se mencionó anteriormente la distribución es uniforme.



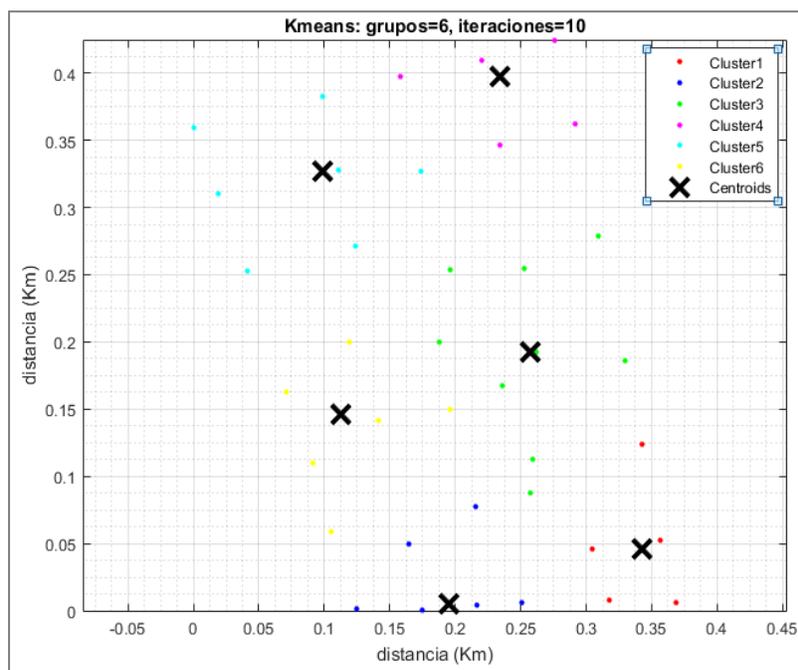
a) Clúster 2



b) Clúster 3



c) Clúster 4



d) Clúster 6

Figura 19. Método K-means empleado en el escenario con 38 puntos

3.8.1.2 Escenario con 121 puntos

Para el siguiente escenario se tomaron 121 puntos, los mismos que dibujan el contorno de las cuadras del lugar escogido.

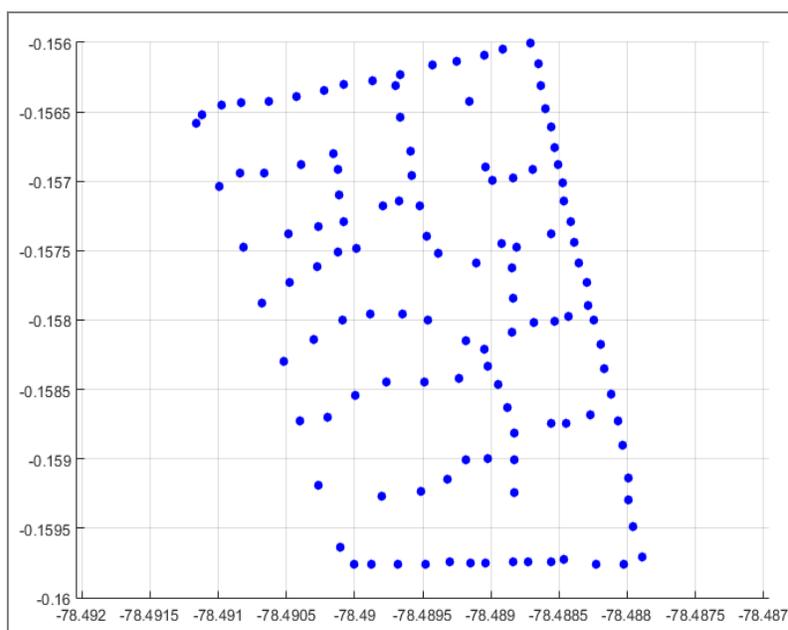


Figura 20. Escenario formado por 121 puntos

Aquí se puede observar que el tiempo que se toma en agrupar los datos es mayor, esto es debido a que se tiene una mayor cantidad de puntos, la distribución es menos estable y no se percibe esa tendencia lineal que se vio en la gráfica 17.

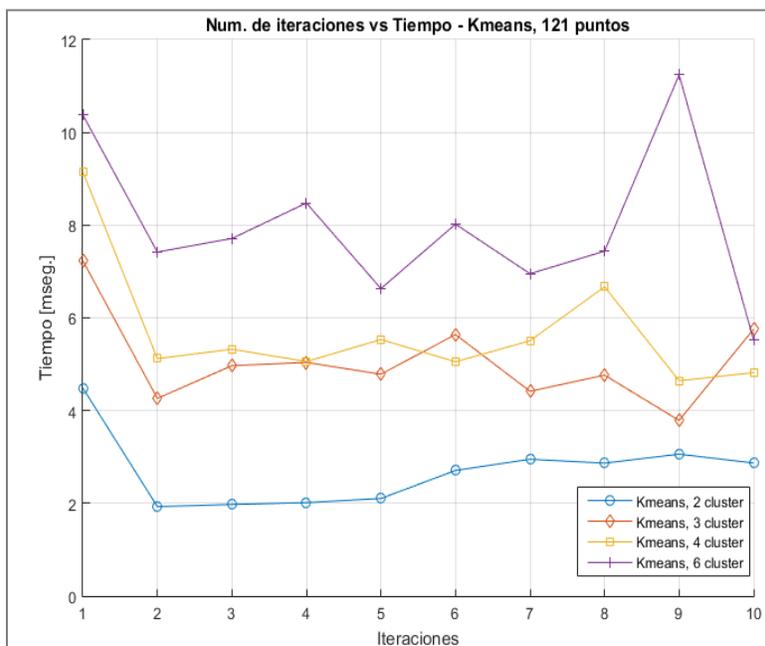


Figura 21. Tiempo vs Número de Iteraciones, K-means, 121 puntos

Aunque el tiempo se ve afectado, la distribución aún sigue siendo equitativa.

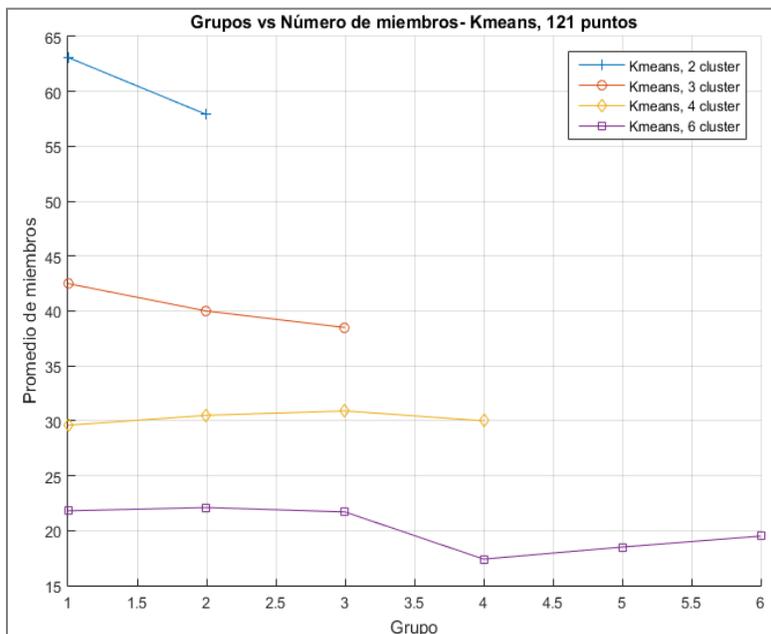
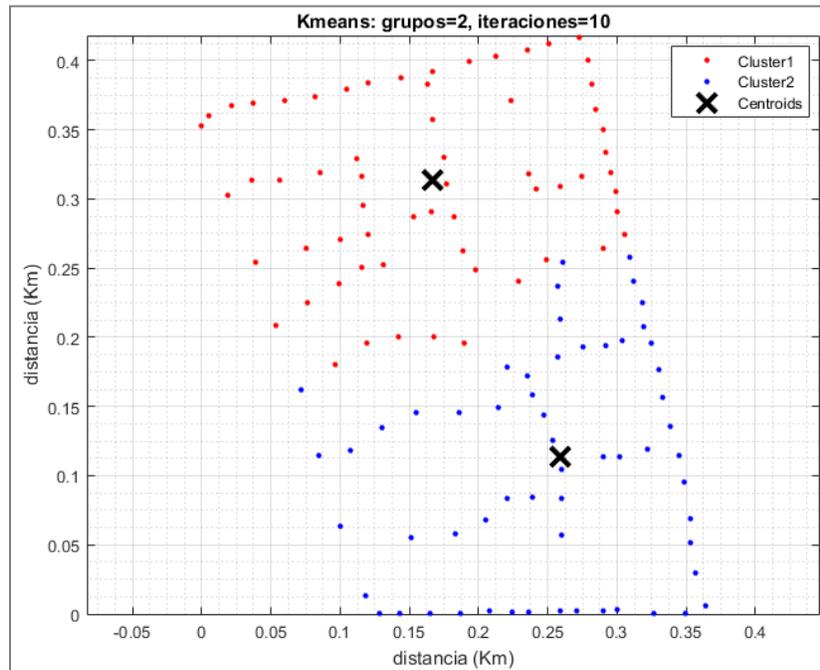
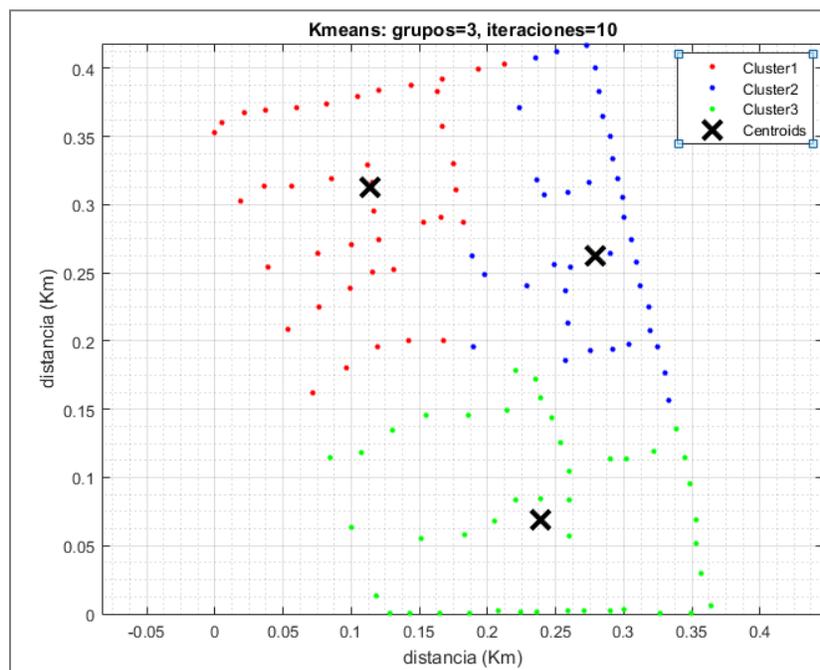


Figura 22. Promedio de miembros en cada clúster, K-means

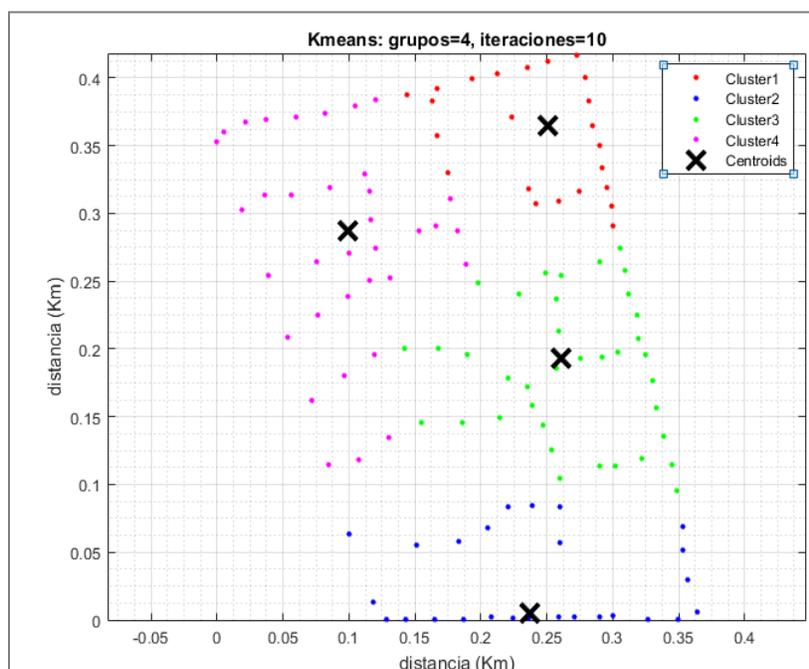
Al aplicar el método K-means se visualiza que los datos son distribuidos de manera igualitaria, observar la gráfica 23 (d).



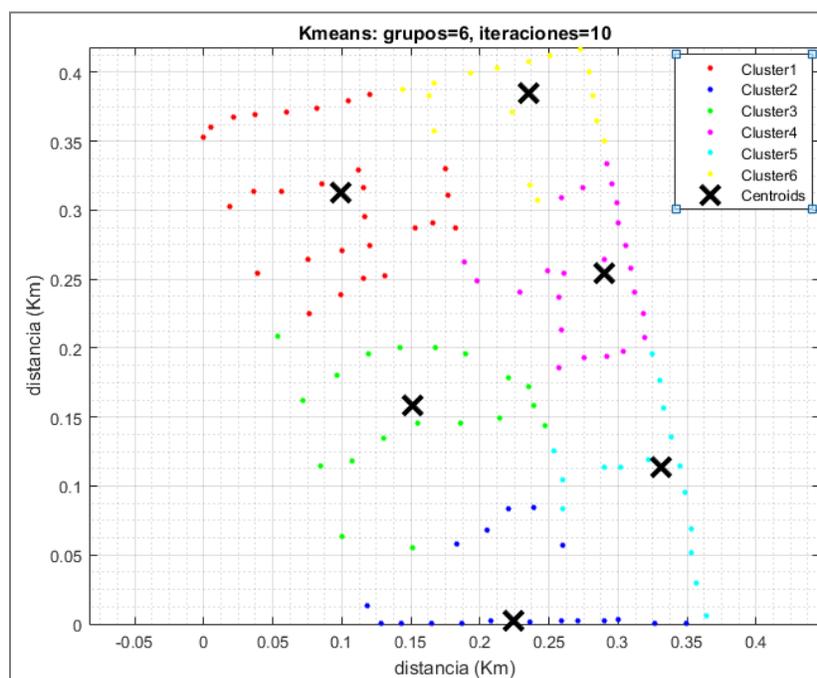
a) Clúster 2



b) Clúster 3



c) Clúster 4



d) Clúster 6

Figura 23: Método K-means empleado en el escenario con 121 puntos

3.8.1.3 Escenario con 213 puntos

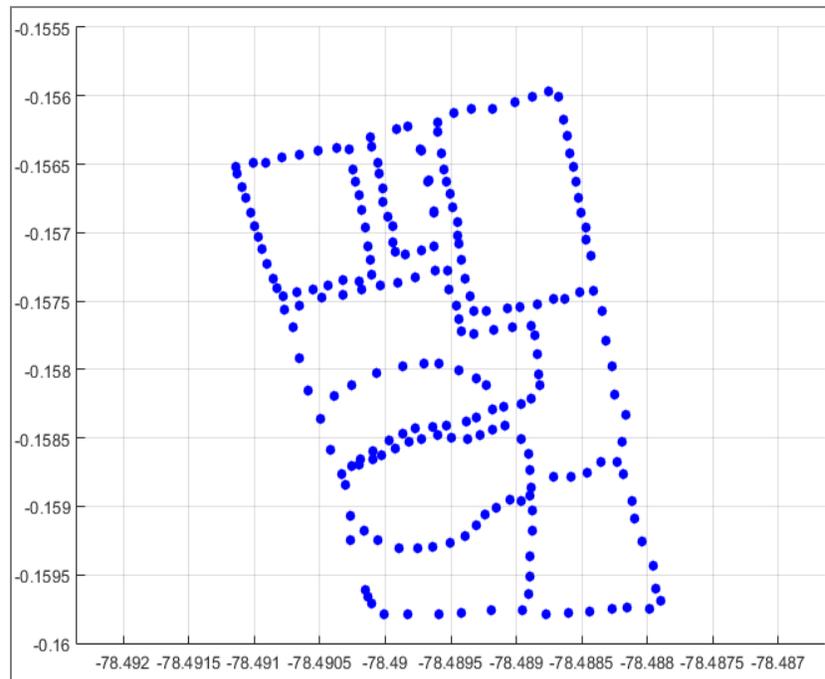


Figura 24. Escenario formado por 213 puntos

Se evidencia que mientras el número de datos crece el método es menos estable, el tiempo es menor cuando se trata de un número menor de clústeres, esto se ve representado en la línea de color azul, pero mientras el número de clúster es mayor como el caso de la línea color púrpura clúster 6, se observa que el tiempo aumenta considerablemente y es bastante inestable.

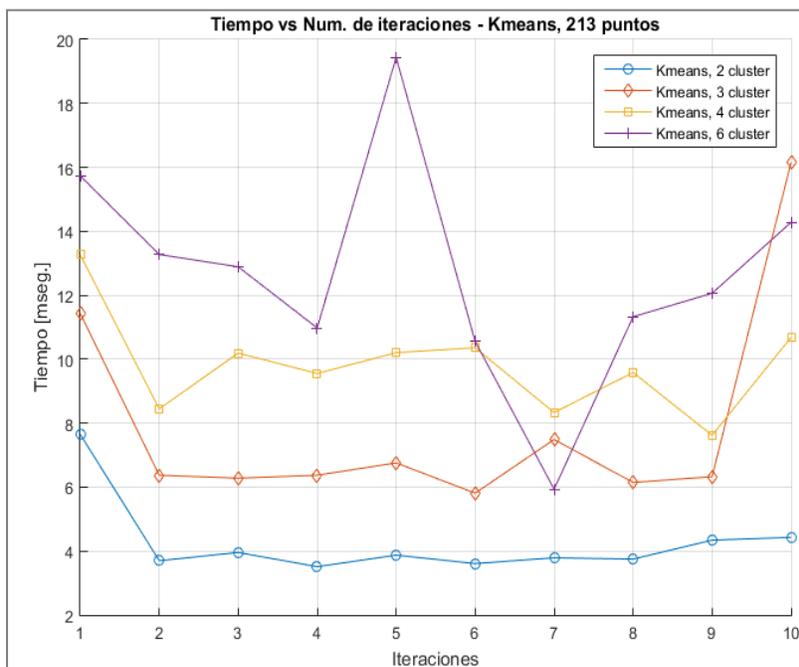


Figura 25. Número de Iteraciones vs Tiempo, K-means, 213 puntos

La distribución sigue siendo equitativa, evidenciando esto para un número de 6 clústeres, donde se percibe una tendencia casi lineal.

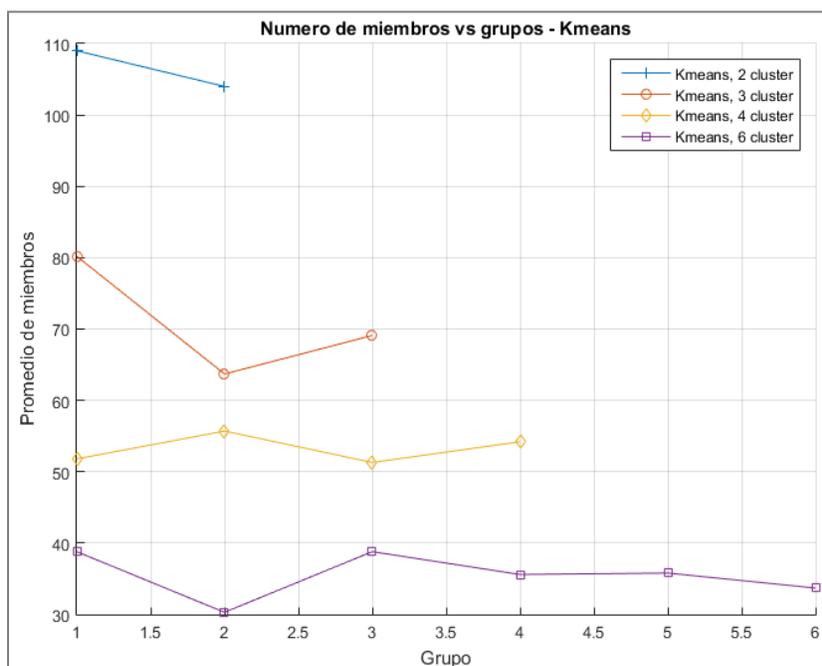
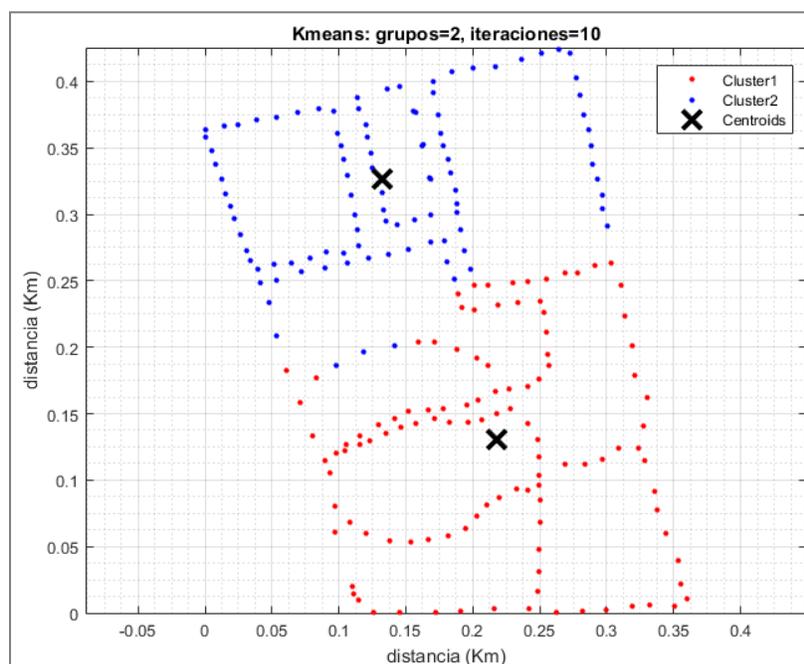
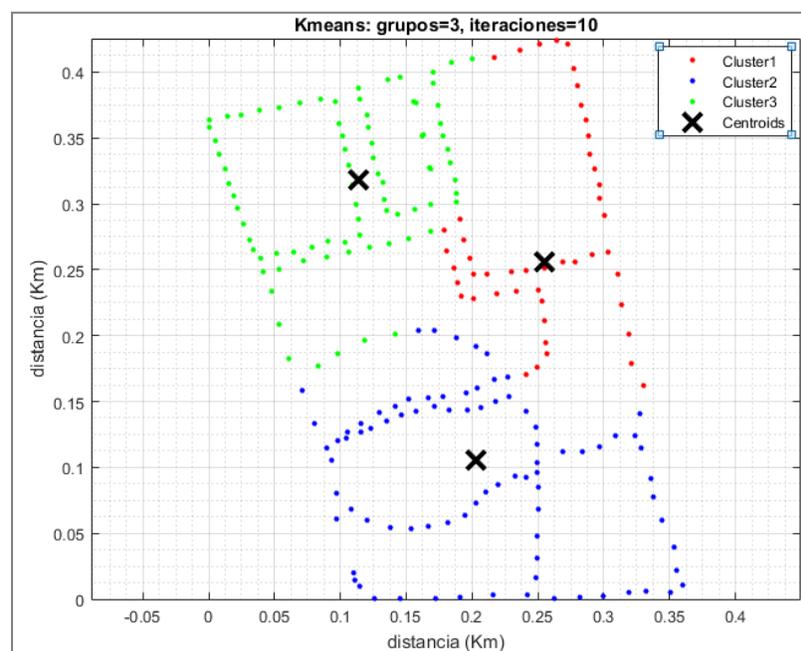


Figura 26. Promedio de miembros en cada clúster, K-means

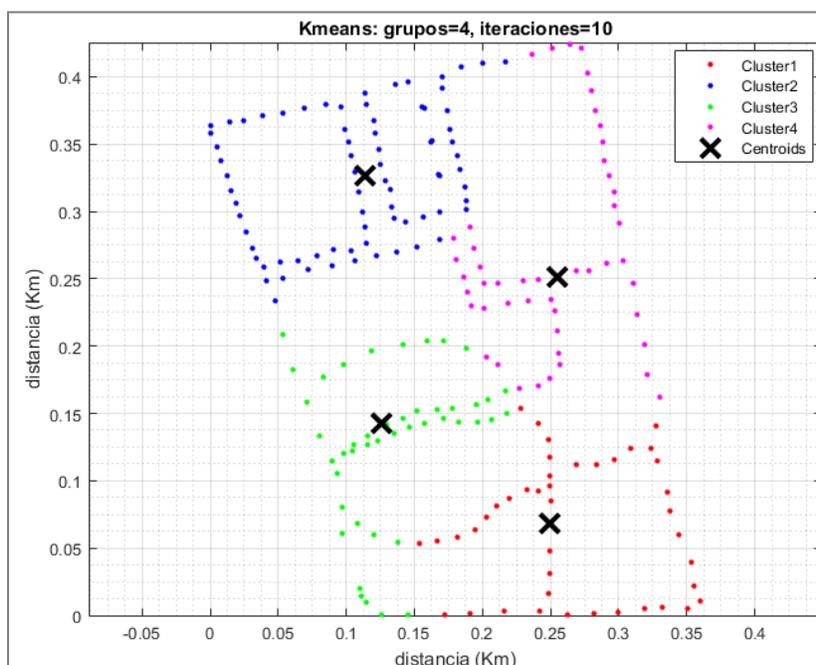
Se muestra en la gráfica 27 la aplicación del método k-means.



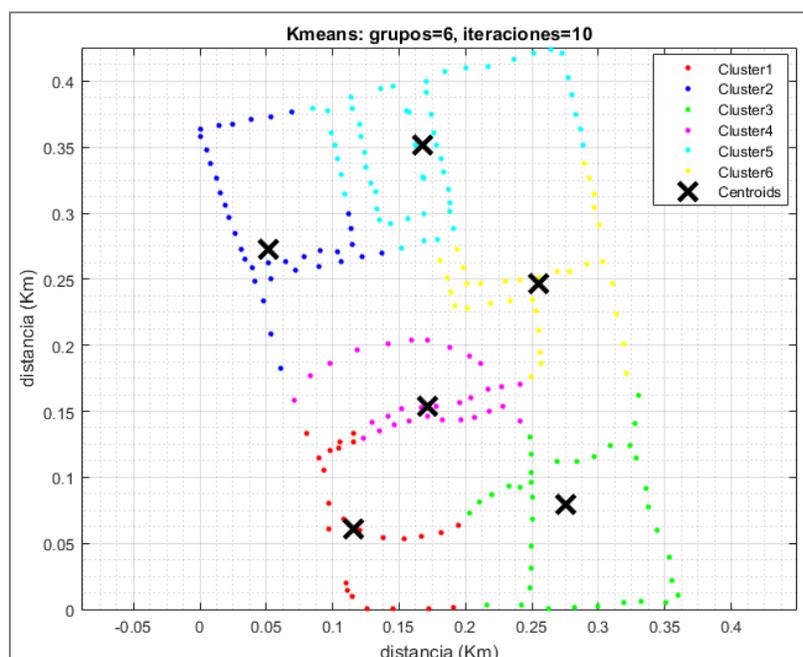
a) Clúster 2



b) Clúster 3



c) Clúster 4



d) Clúster 6

Figura 27. Método K-means empleado en el escenario con 213 puntos.

3.8.2 Pruebas método Voronoi-Clúster

Para realizar estas pruebas se basó en el método de bordes de Voronoi, de igual manera se realizó el análisis para el escenario con las 3 cantidades de puntos.

3.8.2.1 Escenario 38 puntos

Para este método se calculó el tiempo en el que demora en distribuir los datos, para el escenario de 38 puntos se presenta el tiempo en la siguiente tabla:

Tabla 16

Tiempo de distribución del método Voronoi-clúster, 38 puntos

# de Clúster	Tiempo (ms)
Clúster 2	109,0479
Clúster 3	92,9843
Clúster 4	89,1866
Clúster 6	85,9827

En este método no se pudo realizar la gráfica con respecto al número de iteraciones ya que este método en primer lugar no cuenta con un número fijo de clústeres (k) como en el método K-means, por ello solo se tomó el tiempo de ejecución.

En la siguiente figura se aplica el Diagrama de Voronoi que es el primer paso para implementar el método Voronoi-clúster.

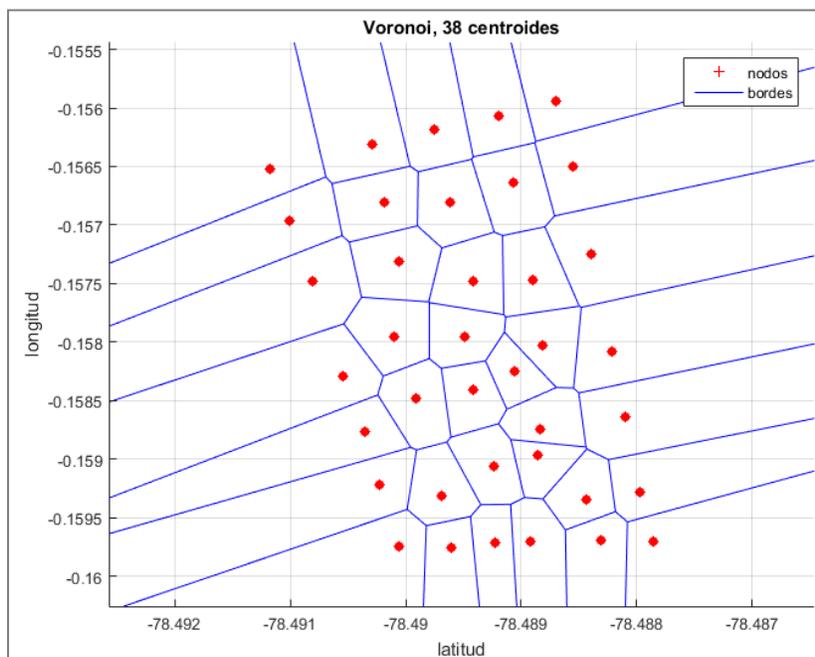
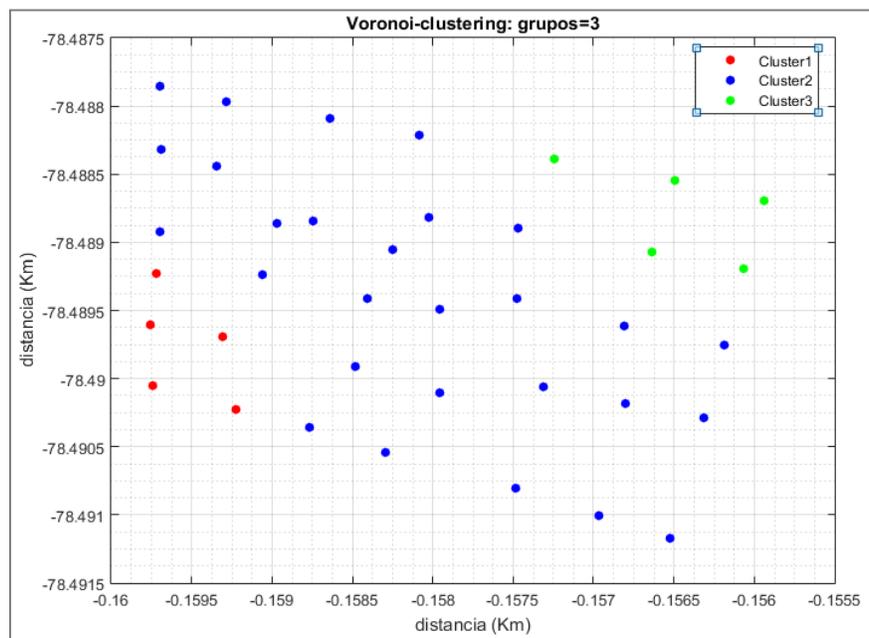


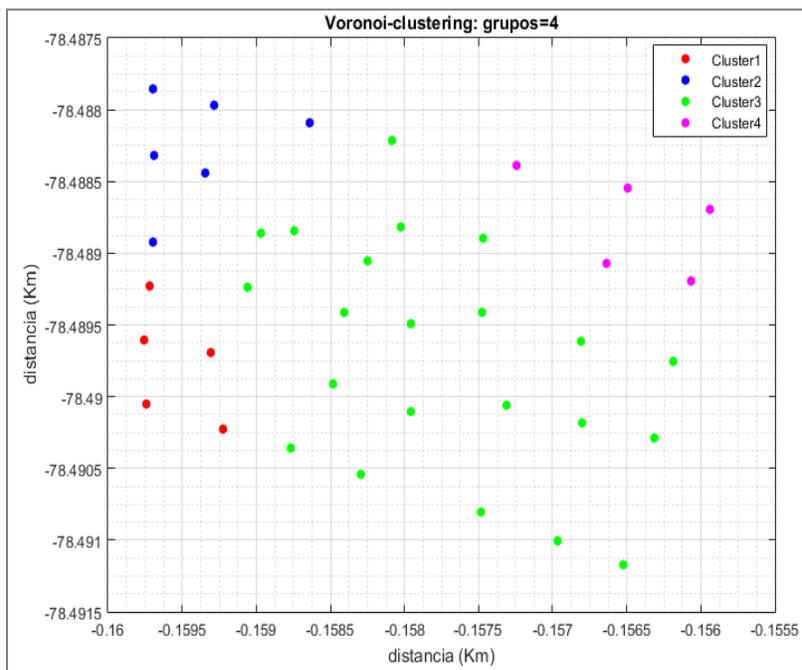
Figura 28. Diagrama de Voronoi, escenario 38 puntos

Para realizar el proceso de la clusterización primero toma a cada punto como si fuera un subclúster, luego se realiza una fusión de subclústeres, donde primero se realiza el cálculo de todos los radios que contienen a P (vértice) en su circunferencia para esto se crea una función $f(P)$, luego todos los puntos son ordenados de manera incremental con respecto a la función y guardados en una matriz que forma una lista ordenada SL . Se comienza el proceso con $SL [j]$, a continuación, se halla los vértices de Voronoi tomando en cuenta si los círculos $CirS (v_m)$ contienen a $SL [j]$ en sus circunferencias. Se halla los puntos que forman parte del círculo de Voronoi de radio mínimo que contengan a $SL [j]$ en su circunferencia.

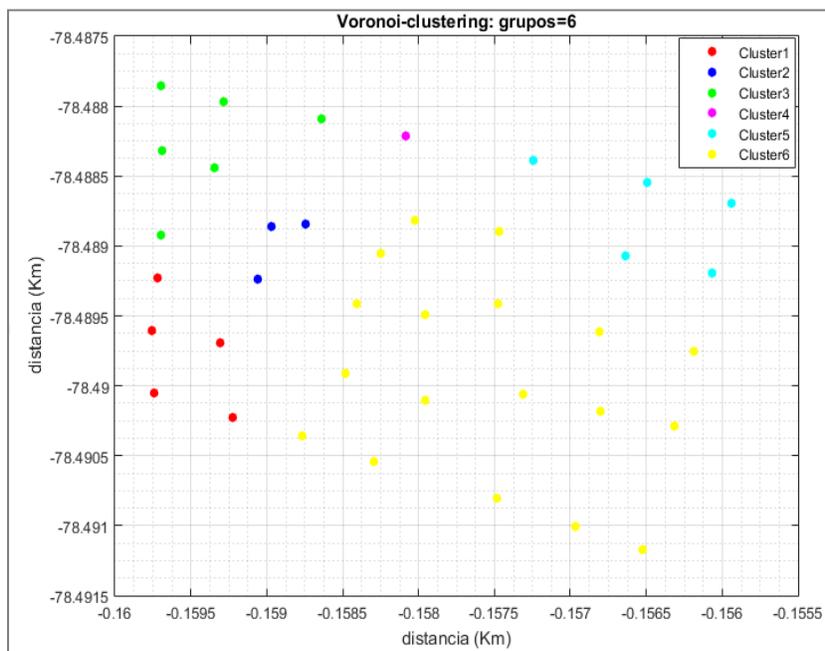
Y aquí es donde se comienza a formar los subclústeres tomando en cuenta lo siguiente, si $SL [j]$ ya está asignado a un subgrupo Ca , los puntos del círculo de Voronoi son asignados a un subclúster Cb , entonces se agregan los puntos de Ca y $SL [j]$ al subclúster Cb o se pueden añadir todos los puntos al subclúster Ca . Si al realizar este proceso ya se crean los clústeres, entonces finaliza el método.



b) Clúster 3



c) Clúster 4



d) Clúster 6

Figura 29. Método Voronoi-clúster, escenario 38 puntos

3.8.2.2 Escenario 121 puntos

Al aumentar el número de muestras se observa que el tiempo también aumentó considerablemente, es decir que a este algoritmo le toma más tiempo en realizar la distribución de los datos.

Tabla 17

Tiempo de distribución del método Voronoi-clúster. 121 puntos

# Clúster	Tiempo (ms)
Clúster 2	2,52e+03
Clúster 3	2,46e+03
Clúster 4	2,45e+03
Clúster 6	2,38e+03

Se crea el diagrama de Voronoi, en el escenario dado por 121 puntos.

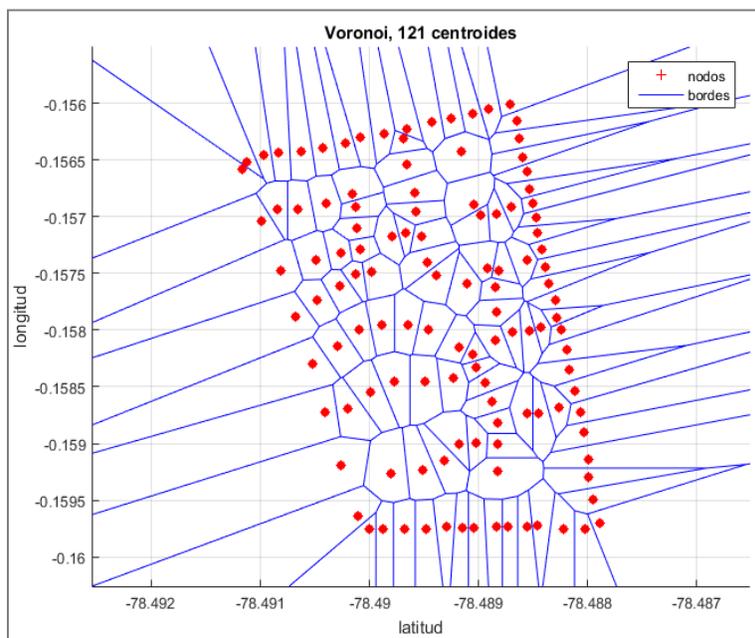
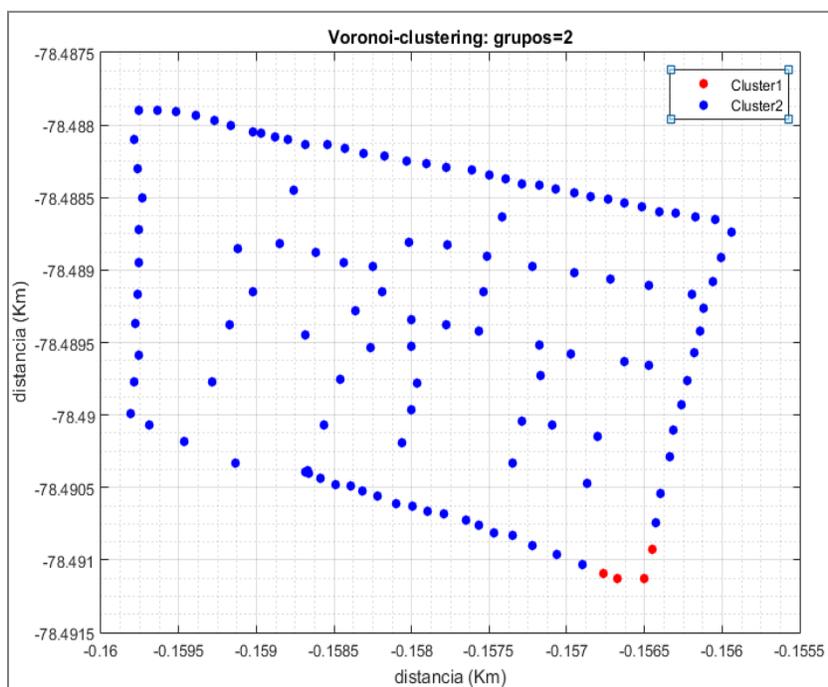
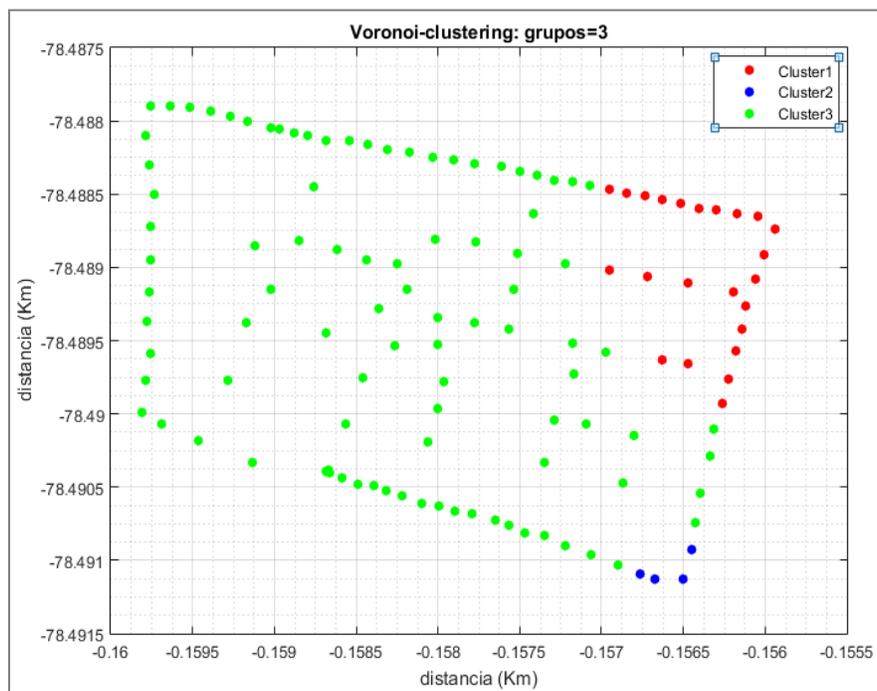


Figura 30. Diagrama de Voronoi

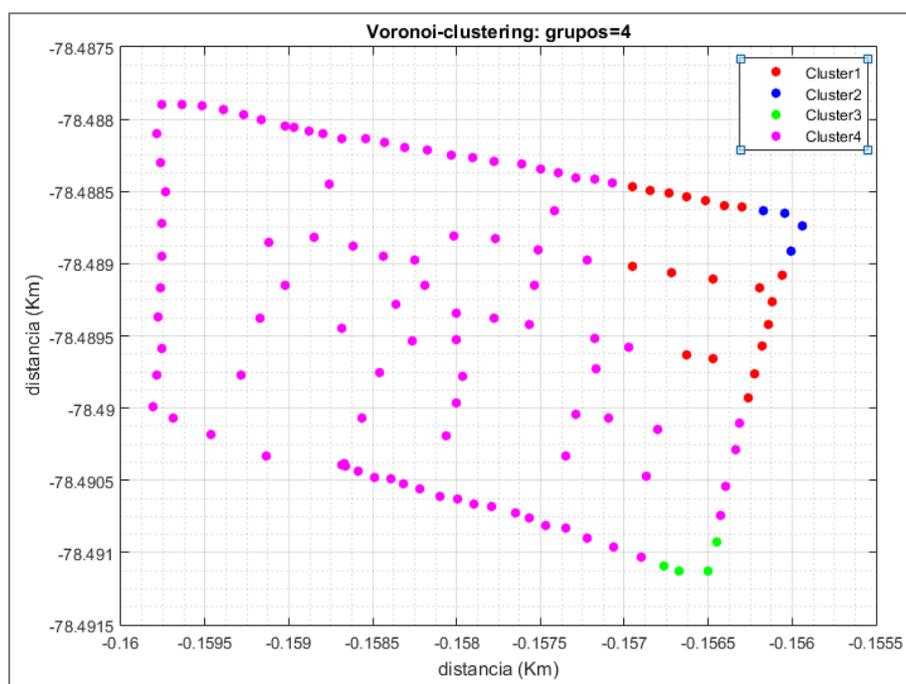
En las siguientes graficas se muestra cómo opera el método Voronoi-clúster.



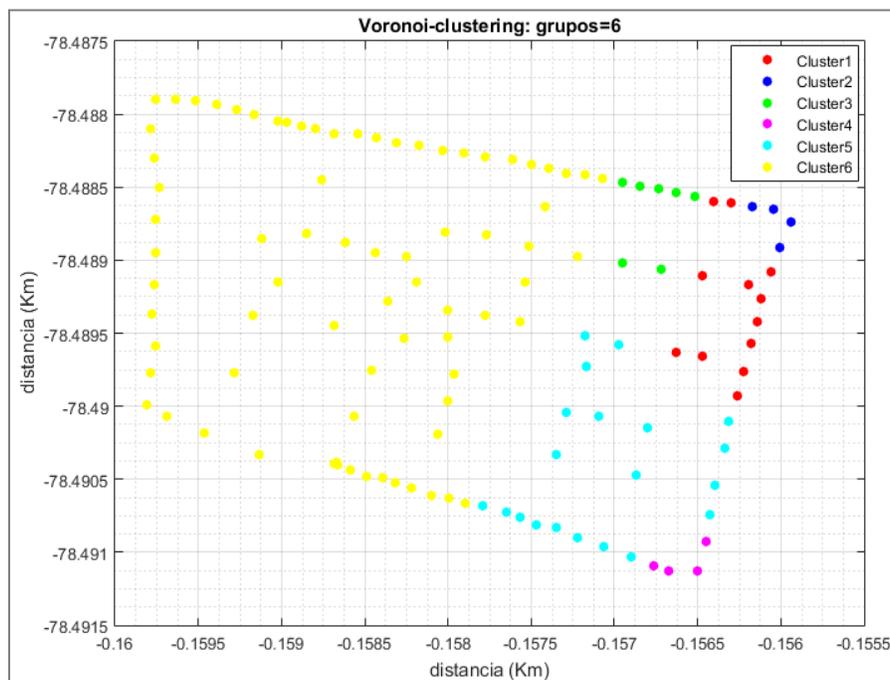
a) Clúster 2



b) Clúster 3



c) Clúster 4



d) Clúster 6

Figura 31: Método Voronoi-clúster, escenario 121

3.8.2.3 Escenario 213 puntos

Tabla 18

Tiempo de distribución del método Voronoi-clúster, 213 puntos

# de Clúster	Tiempo (ms)
Clúster 2	1,44e+04
Clúster 3	1,37e+04
Clúster 4	1,31e+04
Clúster 6	1,28e+04

El tiempo de ejecución es demasiado alto, comparándolo con el método de K-means que presenta una media de 4,26 ms para 2 clústeres y una media de 12,64 ms para 6 clústeres.

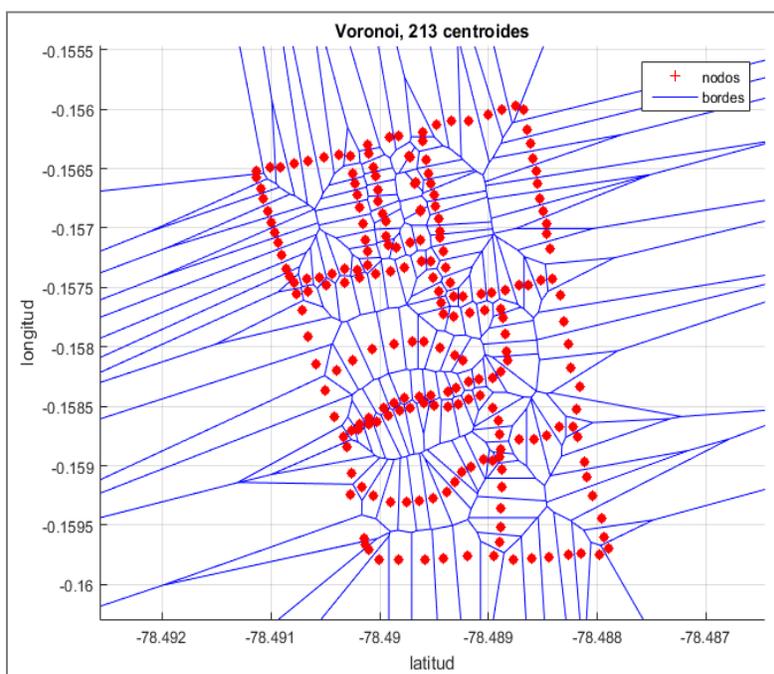
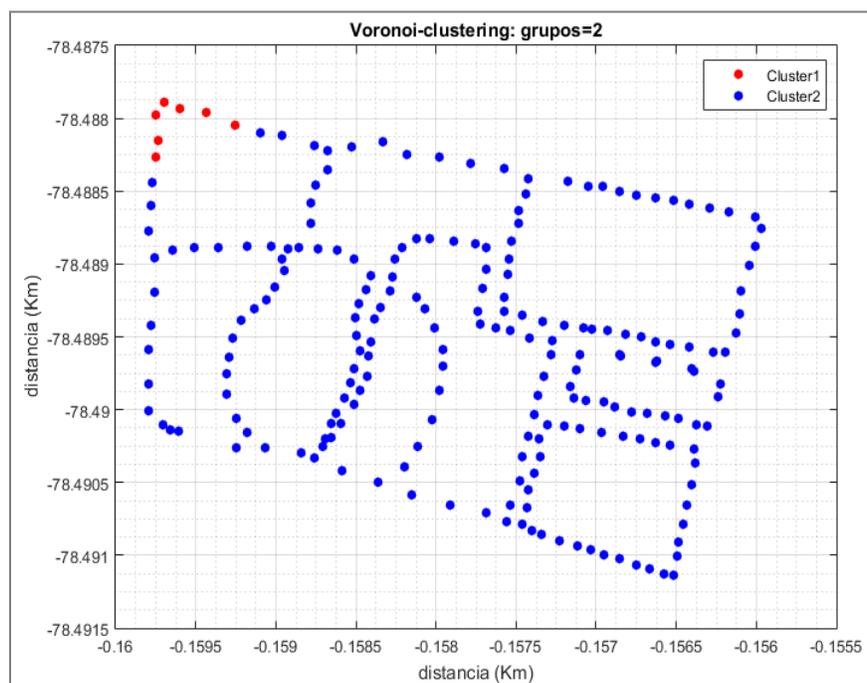
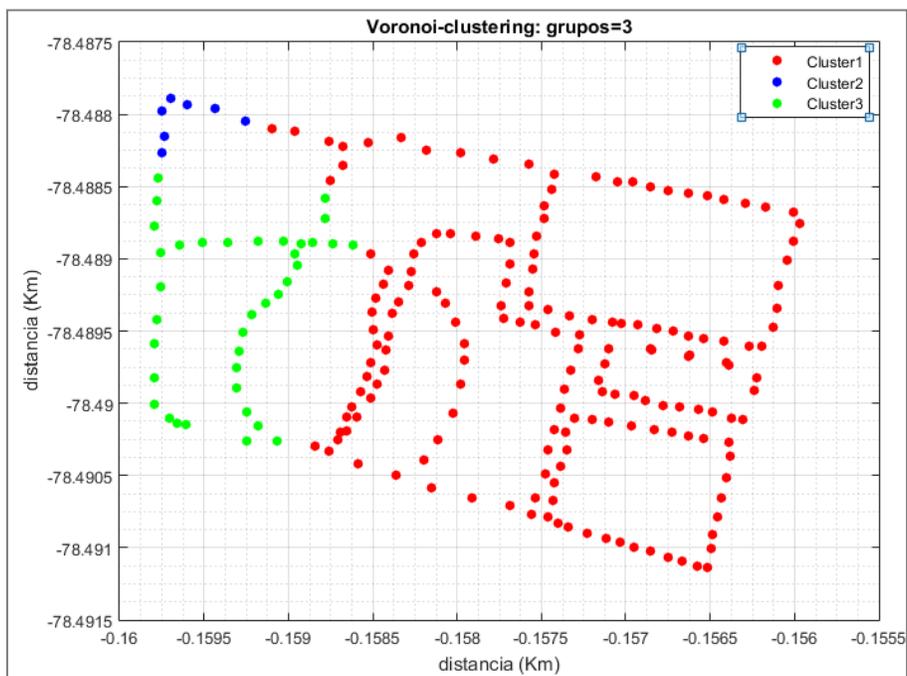


Figura 32. Diagrama de Voronoi

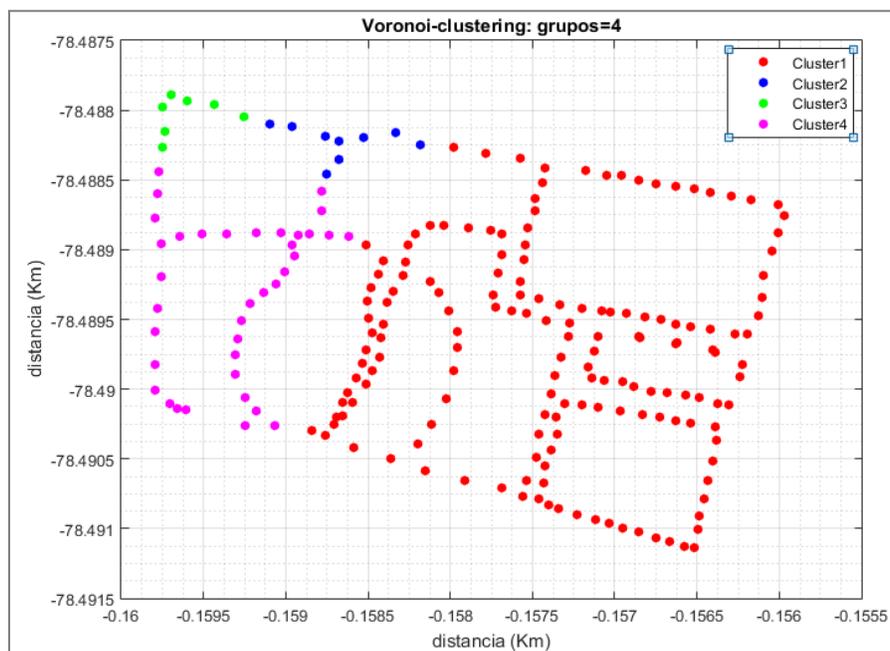
Los puntos no se distribuyen de una manera uniforme, a pesar de que se tiene un mayor número de datos.



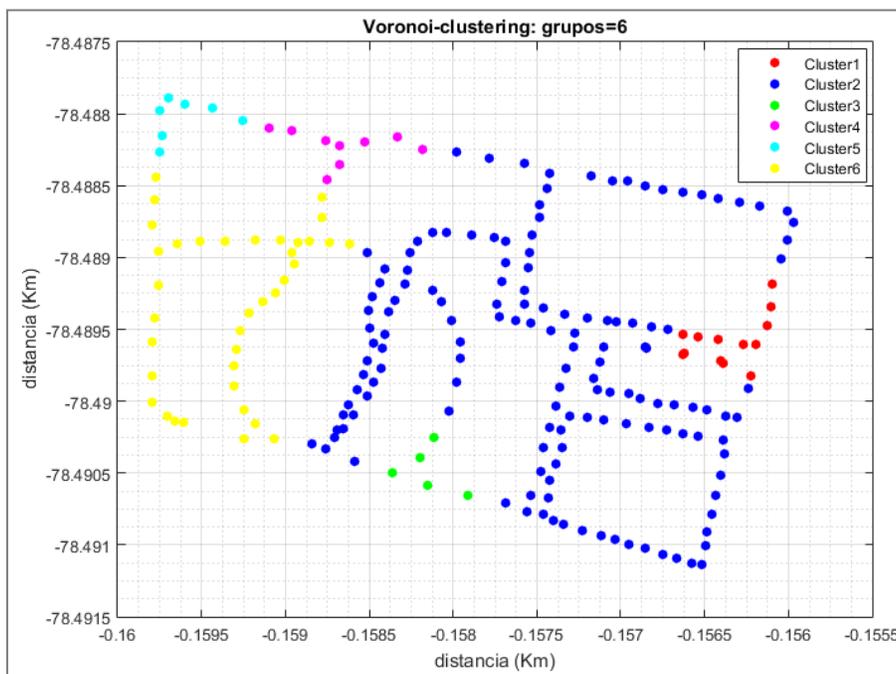
a) Clúster 2



b) Clúster 3



c) Clúster 4



d) Clúster 6

Figura 33. Método K-means empleado en el escenario con 213 puntos

3.9 Comparación de los dos métodos

Para poder realizar esta comparación, se tomó en cuenta el tiempo que tarda cada método en ejecutar la distribución de los datos.

Tabla 19

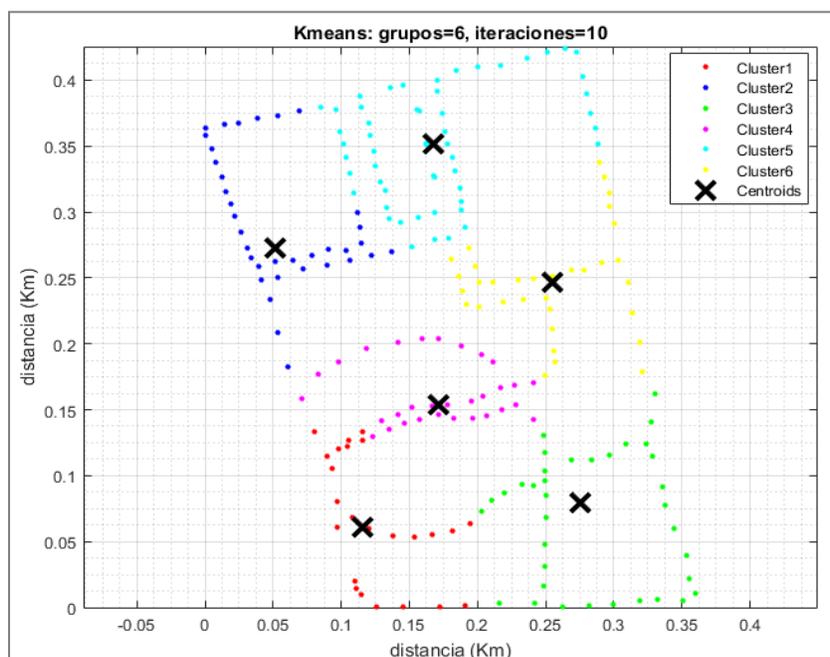
Tabla comparativa del promedio del tiempo de ejecución de K-means y Voronoi-clúster

Escenario	Método K-means				Método Voronoi-clúster			
	Clúster 2	Clúster 3	Clúster 4	Clúster 6	Clúster 2	Clúster 3	Clúster 4	Clúster 6
38 puntos	2,75716	4,16498	6,19381	8,06929	109,0479	92,9843	89,1866	85,9827
121 puntos	2,78297	5,03302	6,19311	8,22143	2,27e+03	2,24e+03	2,14e+03	1,97e+03
213 puntos	4,2611	7,91363	9,82428	12,64773	1,44e+04	1,37e+04	1,31e+04	1,28e+04

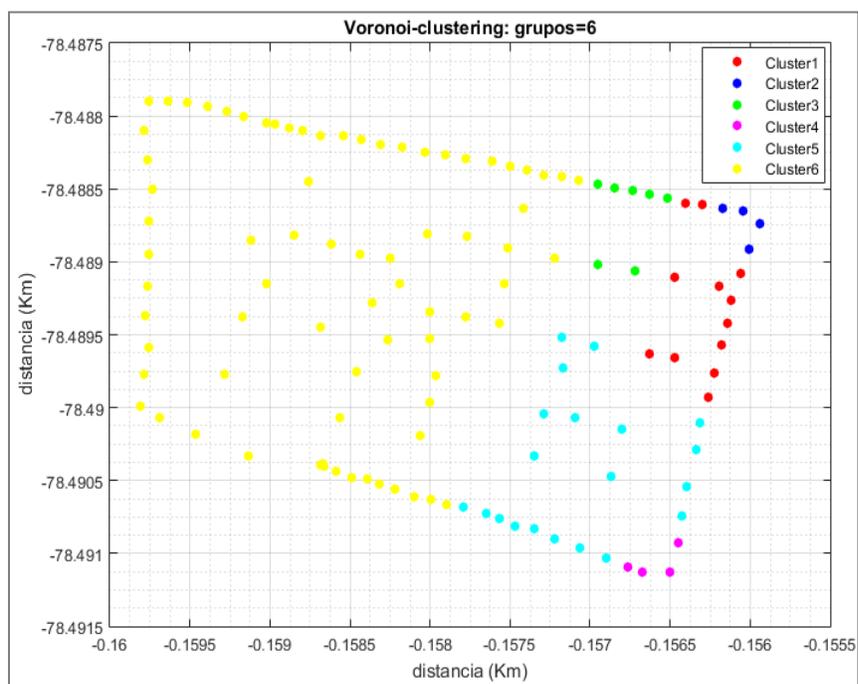
Si se observa la tabla 19, se tiene que el tiempo de ejecución del método Voronoi-clúster es mucho más alto que K-means. A K-means le toma pocos milisegundos realizar la distribución de los datos, volviéndolo un método más efectivo y rápido.

En cuanto a su complejidad, la implementación del método Voronoi-clúster presenta un proceso largo y algo complejo, mientras que el método K-means es más simple de utilizar.

Si observamos la figura 34 (a), para el método de K-mean a medida que el número de clúster crece la distribución de los puntos se vuelve más equitativa, en cambio para el método Voronoi-clúster no se visualiza que los grupos contengan un número igualitario de datos.



a) Método K-menass



b) Método Voronoi-clúster

Figura 34. Escenario 121 puntos

CAPITULO 4

EVALUACION DEL ESCENARIO PROPUESTO, SIMULACIONES

4.1 Dimensionamiento de la red en base al método heurístico escogido

Para realizar el adecuado dimensionamiento de una red sea esta de fibra o coaxial es indispensable conocer las especificaciones técnicas de los elementos que conforman estas redes permitiendo vislumbrar su funcionalidad, modo de operación entre otras características para así obtener un óptimo funcionamiento de la red.

Como se observó en el capítulo anterior, para optimizar una red se utilizó métodos heurísticos, dando lugar a una posible solución al problema planteado, que es hallar la mejor distribución de los equipos para satisfacer las necesidades del usuario.

Para hacer uso de cualquiera de los métodos anteriores, se debe tomar en cuenta ciertos parámetros.

Tabla 20

Parámetros a tomar en cuenta para la distribución de elementos ópticos

Numero de generadores	Distancia entre nodos
Dependiendo de la cantidad de puntos o nodos que se tome del mapa, repercutirá en el tiempo de ejecución y la dificultad de cálculo, es decir que, a mayor número de datos, mayor tiempo de ejecución del algoritmo.	Las coordenadas (x, y) nos ayudan a evitar este problema, los nodos no deben estar demasiado alejados o esto representará un problema al momento de hallar la ubicación adecuada de la OLT.

El escenario escogido para realizar la distribución de los componentes de la red PON será un punto en el norte de Quito, es un sitio bastante transitado y alrededor se encuentran varios locales, oficinas y demás, como se observa en la figura 35, la zona que está delimitada por la línea amarilla es en la que vamos a utilizar para la simulación.



Figura 35. Zona del Norte de Quito, delimitada por las calles Edmundo Carvajal, Av., de la Prensa, Av. Brasil y calle Zamora

Se dibujo una malla sobre la zona escogida, lo que nos permitirá promediar distancias, que nos ayudaran en la colocación de los equipos.

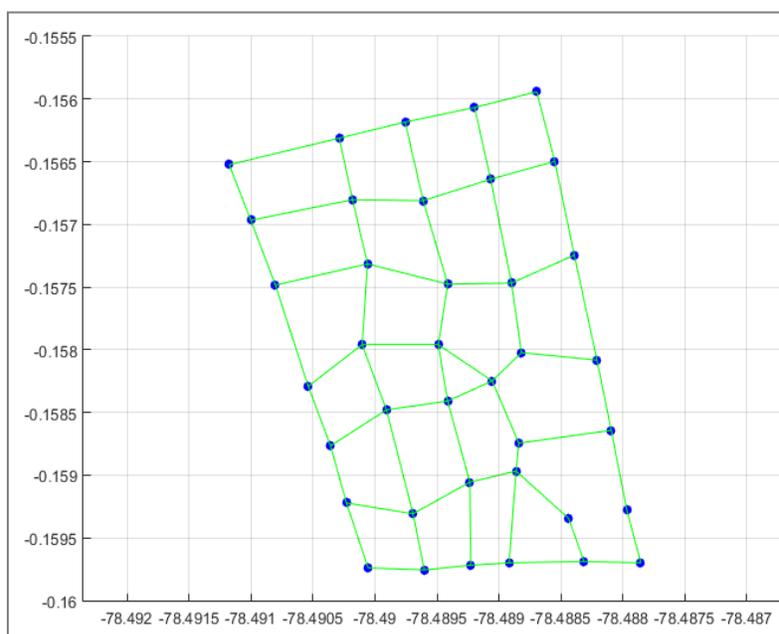


Figura 36. Malla colocada sobre la zona de Quito, formada por 38 puntos

Como se había mencionado anteriormente, los puntos utilizados para formar esta malla se obtuvieron en Google Maps, que mediante una aplicación permite guardar las coordenadas (x,y).

Todos los puntos visualizados en la figura 36 son los posibles usuarios, y para poder escoger la ubicación de los equipos, se hará uso del método del método K-means, que como vimos en el apartado anterior su tiempo de ejecución es bajo y trabaja bien con un menor número de clústeres, realizando una distribución más equitativa.

Para poder colocar los AWG se utiliza el método de K-means, se coloca como valor k (número de clústeres) la cantidad de AWG que se va a utilizar en la red, realiza los cálculos respectivos y coloca los AWG en el mapa, el mismo proceso se cumple para colocar los Splitters, en donde ahora el valor de k será para especificar el número de Splitters utilizados en la red.

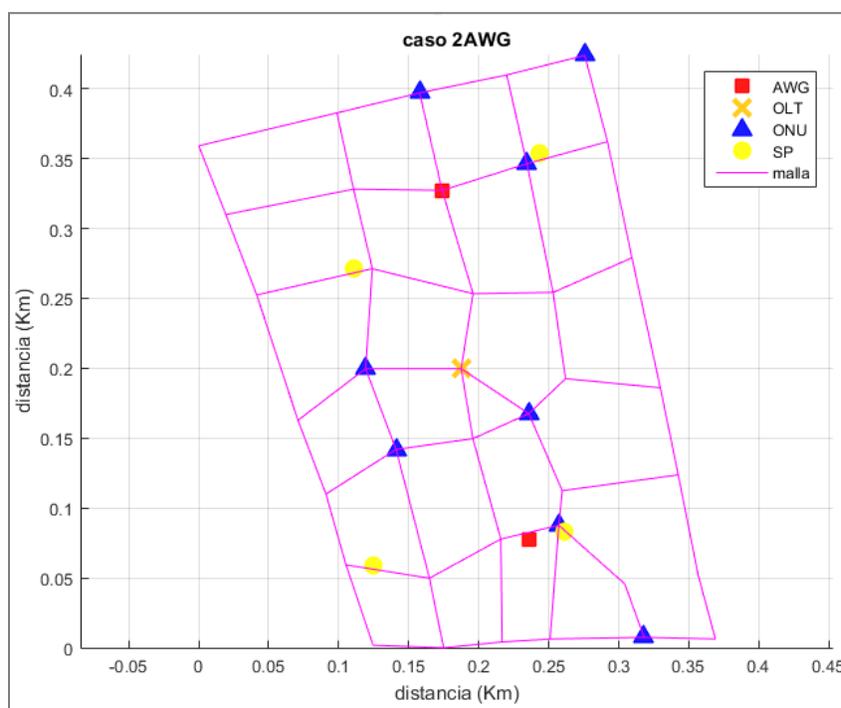


Figura 37. Aplicación del método K-means para la distribución de componentes, 2AWG

Para realizar un correcto despliegue de la red, es necesario tomar en cuenta ciertos aspectos importantes:

- Pérdidas de inserción
- Distancia del enlace
- Potencia de transmisión
- Velocidad de transmisión
- Cantidad de equipos usuario final
- Especificaciones técnicas de todos los elementos que conforman la red

A continuación, se muestra el caso en el que se utiliza 3AWG en la red.

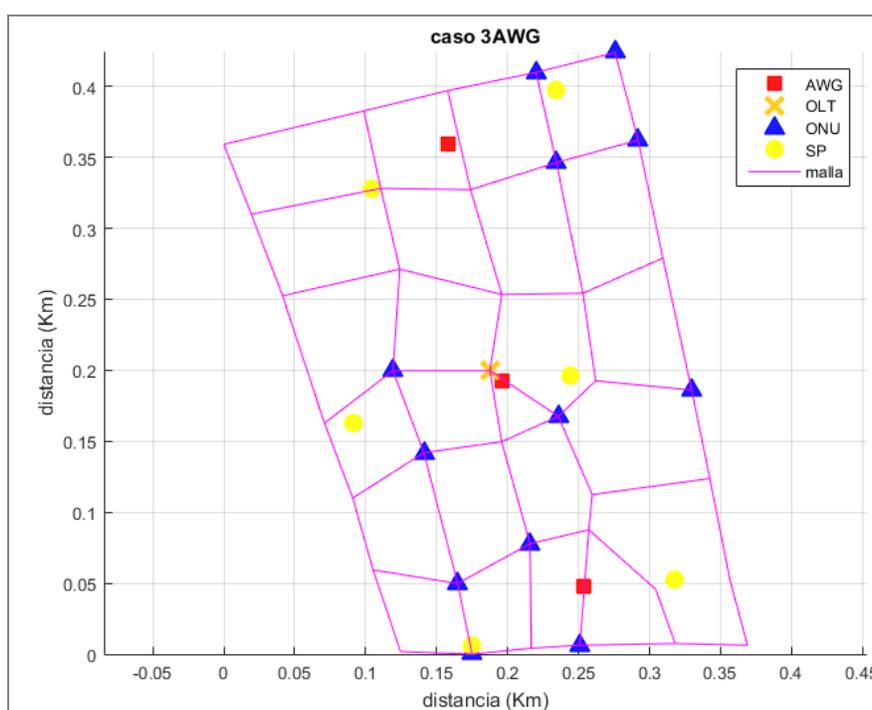


Figura 38. Aplicación del método K-means para la distribución de componentes, 3AWG

Se puede apreciar que la distribución es bastante uniforme, y abarca todos los puntos del mapa, permitiendo la interconectividad de todos los usuarios.

4.2 Simulación de la red WDM-TDM/PON en OptSim

Se hará uso de un software de simulación, que permitirá observar el comportamiento de la red óptica teniendo en cuenta distintos parámetros y configuraciones.

4.2.1 Configuración de la red híbrida WDM-TDM/PON

Entre las varias herramientas destinadas a la simulación de redes ópticas, se escogió a Optsim, que es un entorno de simulación y modelado que permitirá observar, analizar y estudiar el funcionamiento de la red, posee una interfaz gráfica amigable con el usuario, fácil de manejar.

OptSim creado por RSoft Design Group, cuenta con una gran biblioteca provista de múltiples componentes y herramientas para visualizar resultados, permitiendo que la experiencia sea interactiva. Se puede observar en la figura 39 la interfaz gráfica del software OptSim.

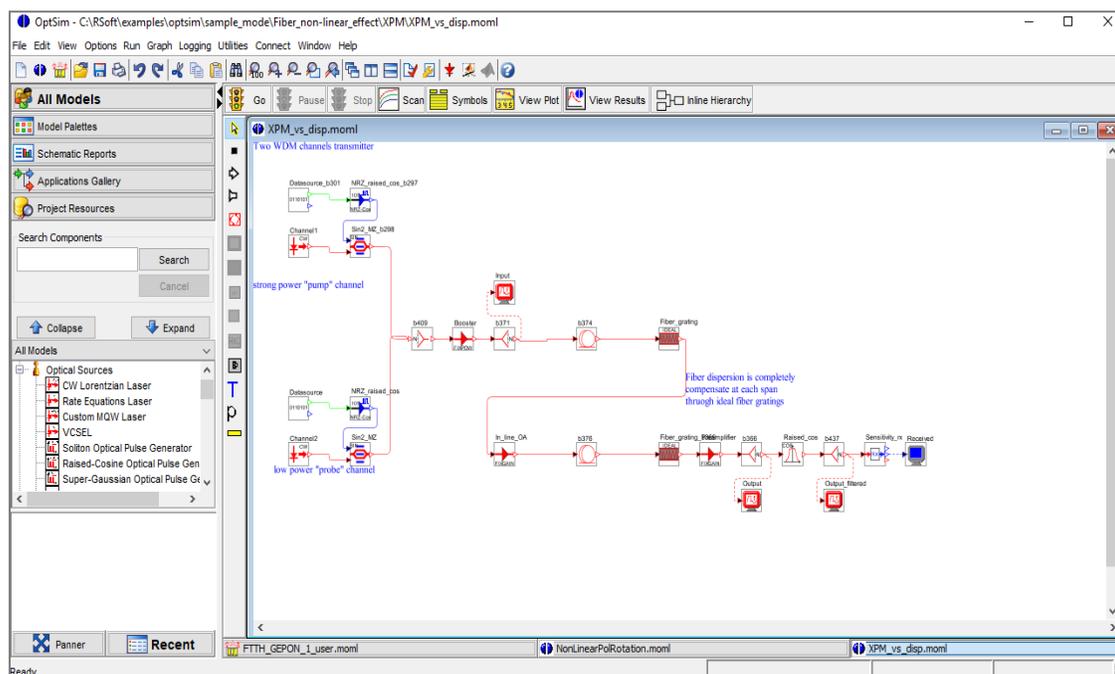


Figura 39. Entorno Grafico software de simulación OptSim

A continuación, se detalla cómo está formado internamente cada elemento de la red híbrida, y como se verá la arquitectura completa.

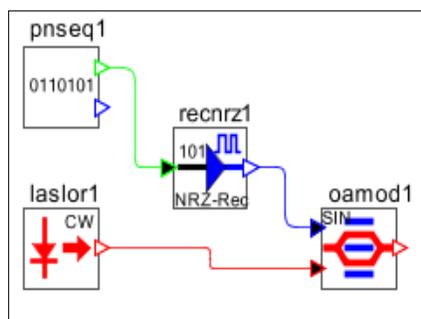


Figura 41. Vista interna de un transmisor

Tabla 21

Descripción de los elementos internos que forman el bloque transmisor

Representación grafica	Nombre	Descripción
	Fuente de datos	Simula a un generador de señales logicas pseudoaleatorias, pudiendo dar la velocidad de transmisión.
	Codificador NRZ	La señal de salida esta en nivel bajo cuando se introduce un 1, y en nivel alto cuando se introduce un 0
	Laser Lorentzian CW	Simula un laser de onda continua, brindando opciones de configuración en cuanto al ancho de banda: ideal o realista
	Modulador de amplitud Mach-Zehnder	A la entrada de este elemento ingresa una señal electrica, donde el voltaje se covierte en campor electrico, modulando asi la señal, y convirtiendola en una señal optica a la salida del modulador

- **Configuracion de parametros del transmisor 1**

Al observar internamente el primer bloque transmisor , este esta formado a su vez por 8 transmisores, en este bloque se establecen parametros como: potencia de la señal, longitud de onda, velocidad de transmision, frecuencia.

Los datos de cada emisor se conectan a un splitter óptico, por lo tanto cada entrada de datos es enviada por un solo canal.

En cuanto a la configuración de este primer bloque tenemos:

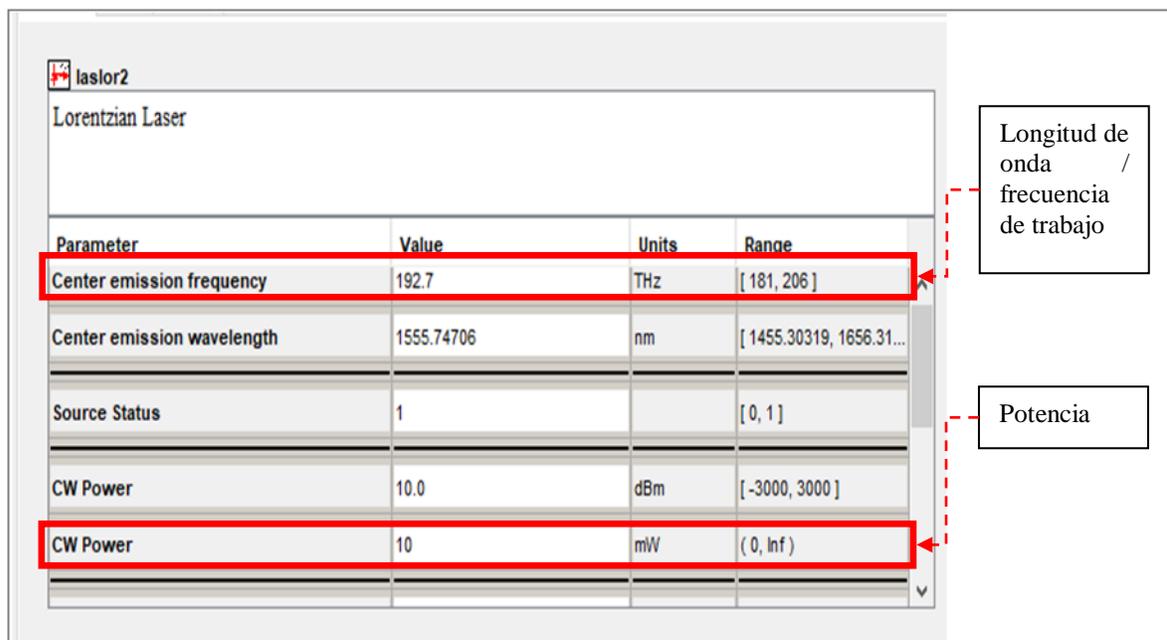
Tabla 22
Configuración del bloque transmisor

Componente	Unidad	Valor
Laser Lorentzian CW	THz (Frecuencia)	192.7
	mW (Potencia)	5
Fuente de datos	Gbps (Velocidad de transmisión)	10

The screenshot shows a software interface for configuring a transmission block. The main window is titled 'pnseq2'. Below the title, there is a text area that says 'Samples per bit - No description is available. Please try the "Help" button.' Below this is a table with the following columns: 'Parameter', 'Value', 'Units', and 'Range'. The 'Bit rate' row is highlighted with a red box, and a red arrow points to it from a callout box on the right that says 'Velocidad de transmisión'. The 'Bit rate' row has a value of 10, units of Gbit/s, and a range of (0, Inf). Other rows in the table include 'Corresponding Simulated Bit-Rate' (2.5 Gbit/s), 'Baud rate' (2.5 GBaud/s), 'Samples per bit' (10000), 'Sequence' (Random), 'Custom Sequence Filename' (empty), and 'Pseudo Random Sequence Mode' (Automatic).

Parameter	Value	Units	Range
Bit rate	10	Gbit/s	(0, Inf)
Corresponding Simulated Bit-Rate	= 2.5	Gbit/s	
Baud rate	= 2.5	GBaud/s	
Samples per bit	= 10000		
Sequence	"Random" ▾		
Custom Sequence Filename	""		
Pseudo Random Sequence Mode	"Automatic" ▾		

a) Configuración de la velocidad de transmisión



b.) Configuración de la frecuencia y potencia

Figura 42. Configuración en el bloque transmisor

Cabe mencionar que cada bloque transmisor difunde los datos a diferentes frecuencias, como se observa en la tabla 23.

Tabla 23

Tabla de las diferentes frecuencias que manejan los 8 bloques transmisores

N° Transmisor- Bloque TDM	Frecuencia (THz)
1	192.7
2	192.8
3	192.9
4	193.0
5	193.1
6	193.2
7	193.3
8	193.4

El objetivo del uso de 8 transmisores es el de simular a 8 usuarios, ya que cada transmisor envía un dato diferente. Todos los datos del primer bloque se conectan a un combinador óptico, permitiendo combinar todas las señales de datos en una salida, como se aprecia en la figura 43, y luego este enviara la señal al AWG_MUX , figura 44.

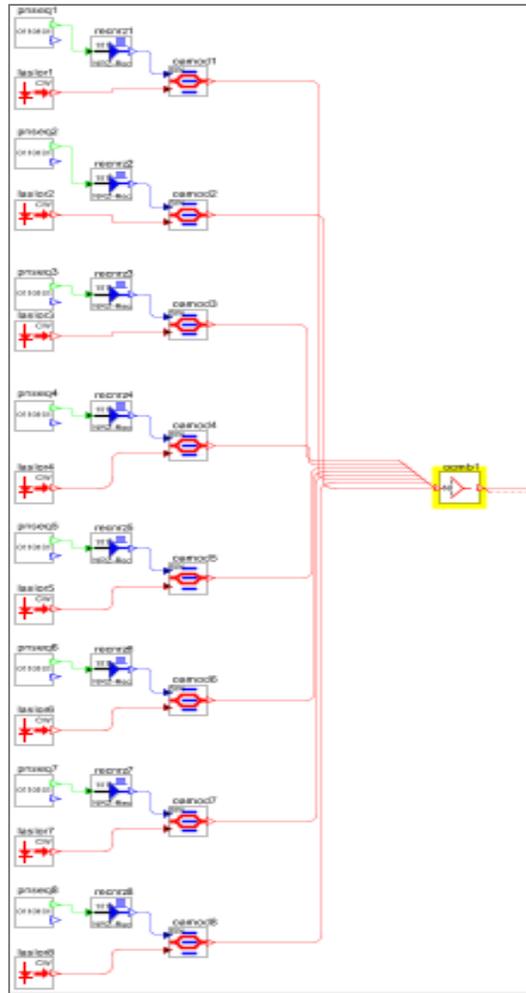


Figura 43. Vista interna del primer bloque transmisor

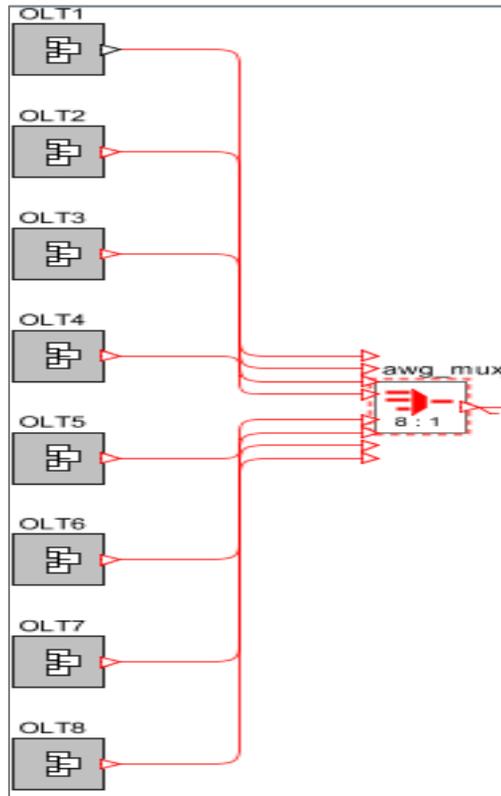


Figura 44. Estructura del transmisor de la red PON híbrida WDM/TDM-PON

Se puede observar como esta formada la parte del transmisor de la red, cada grupo de transmisor se conecta a un AWG-MUX, mismo que enviara los datos por el enlace de la fibra.

Se escogio trabajar con la tercera ventana de transmision de fibra optica, 1550 nm, debido a que posee baja atenuacion y funciona en largas distancias.

b) Enlace de fibra óptica

Los datos son enviados por un solo canal hacia la fibra, estos datos son obtenidos a través del AWG-MUX. El módulo de la fibra posee varios parámetros que se pueden configurar como la distancia, perdidas por atenuación, dispersión, efectos de no linealidad, etc.

Se adiciono un amplificador óptico y una fibra compensadora de dispersión, todos estos elementos se los puede observar en la figura 45.

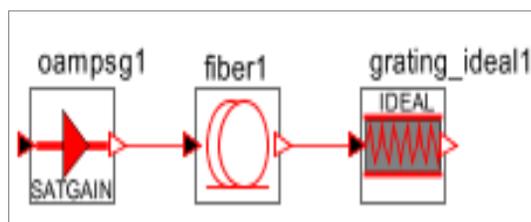


Figura 45. Enlace de fibra óptica

Tabla 24

Descripción de los elementos que forman parte del enlace de fibra óptica

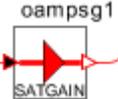
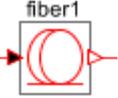
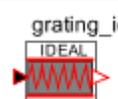
Representación gráfica	Nombre	Descripción
	Amplificador óptico de ganancia saturable	Trabaja en las bandas de 1530 a 1625 nm, posee un bajo factor de ruido y mayor estabilidad.
	Enlace de fibra óptica	El enlace de fibra óptica simula la propagación de la señal óptica a través de un tramo de fibra. El modelo de fibra implementado tiene en cuenta los fenómenos lineales y no lineales que influyen en la propagación, así como los efectos relacionados con la polarización.
	Fibra compensadora de dispersión	Su función es la de compensar la dispersión cromática en el enlace óptico, posee un valor de coeficiente de dispersión cromático de signo contrario al de la fibra. Presenta una mayor atenuación.

Tabla 25

Configuración enlace fibra óptica

Componente	Unidad	Valor
Amplificador óptico de ganancia saturable	dB	10-40
Enlace de fibra óptica	Km(Distancia)	20-80
	db/km (Pérdidas por atenuación)	0.2
	ps ² /km (Dispersión)	-20

A continuación, se mostrará las ventanas de configuración para el tramo de la fibra.

oampsg1
Optical Amplifier Saturable Gain

Parameter	Value	Units	Range
Output Saturation Power	3.0	dBm	[-3000, 3000]
Output Saturation Power	1.99526	mW	(0, Inf)
Gain Shape	"Flat"		
Small Signal Gain	10.0	dB	[0, Inf)
Gain Shape File Name	\$(OSLIB)/EDFA_gain.DAT		
Noise	"Yes"		

Ganancia en dB

Figura 46. Configuración de la ganancia en el amplificador óptico

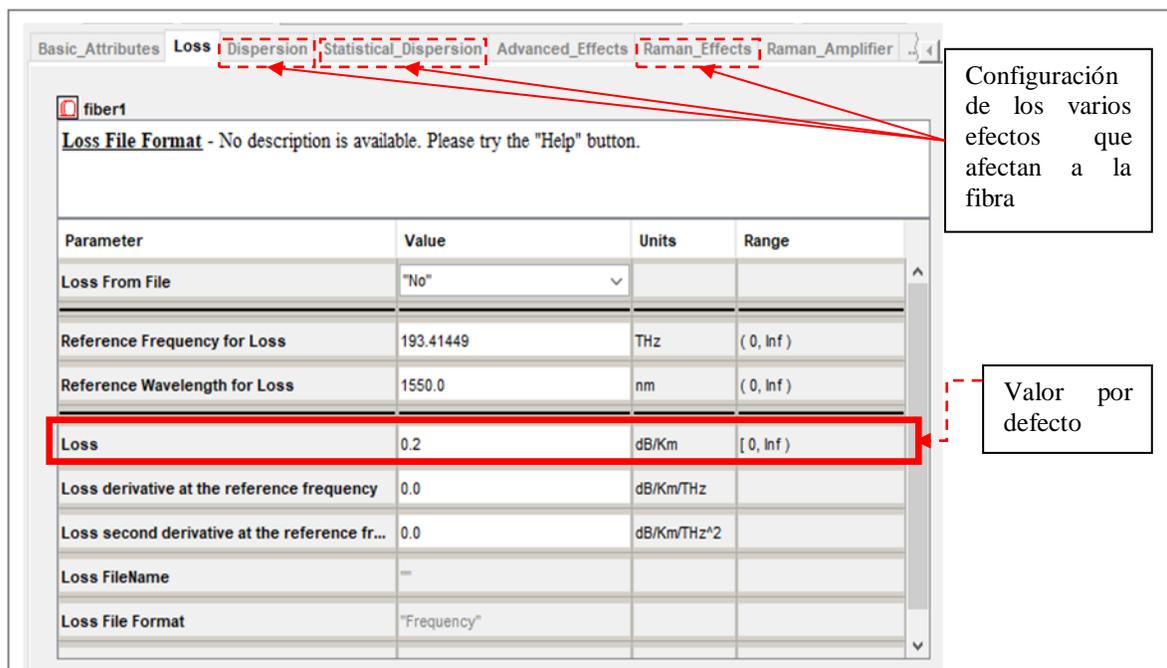
basic_Attributes | Loss | Dispersion | Statistical_Dispersion | Advanced_Effects | Raman_Effects | Raman_Amplifier

fibert
Length - No description is available. Please try the "Help" button.

Parameter	Value	Units	Range
Length	50.0	Km	[0, Inf)
Length Statistical Variation %	0.0		[0, 100]

Distancia en Km

a. Configuración de la distancia



b. Pestañas de configuración de la fibra.

Figura 47. Parámetros de configuración de la fibra óptica.

c) Bloque receptor

Las señales que salen de la fibra compensadora son dirigidas hacia un AWG_DEMUX, este permitirá que la señal sea dividida para que llegue a cada receptor, cada una de estas señales ingresa a un filtro óptico (pasa banda), en donde es filtrada la señal para ingresar a cada módulo receptor, para el primer bloque se filtra la frecuencia de 192.7 THz.

A continuación, se muestra el bloque receptor de todo nuestro sistema.

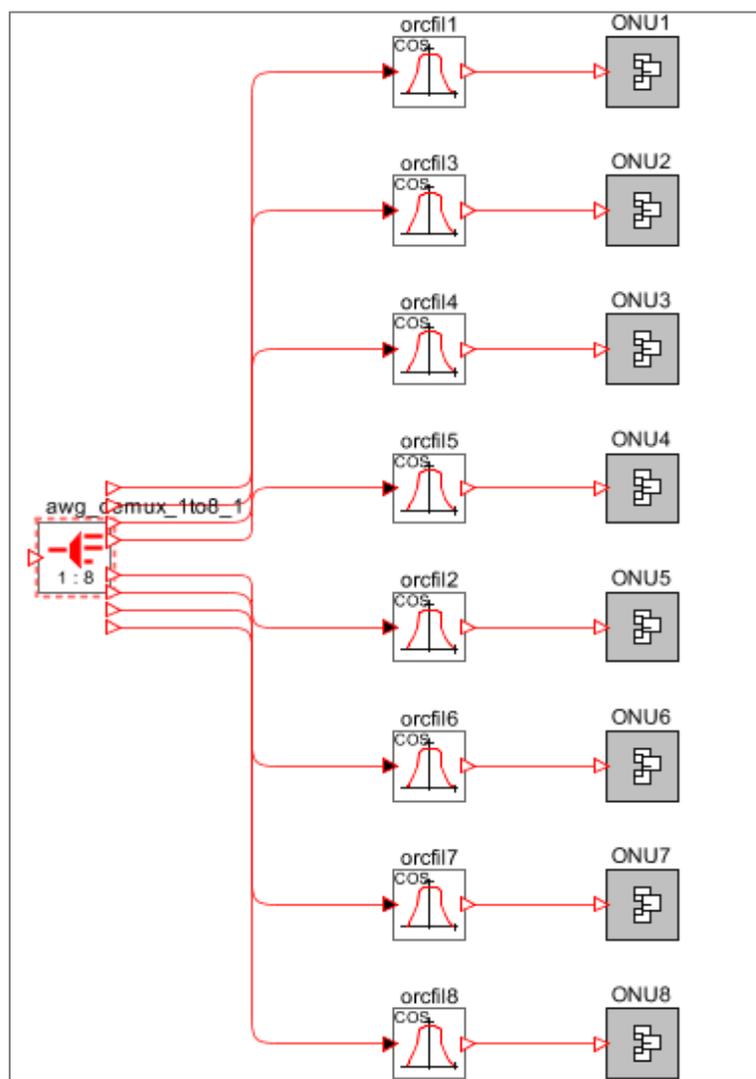


Figura 48. Bloque receptor de la red híbrida

Internamente el receptor 1 o la ONU1 que es la terminal del abonado, se compone de la siguiente forma:

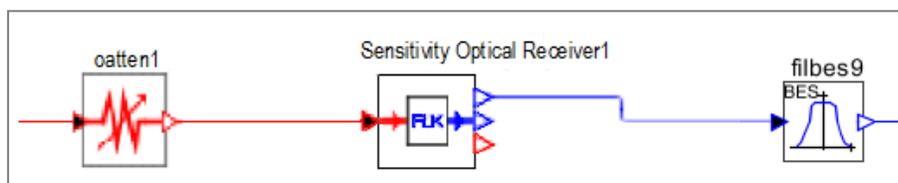


Figura 49. Vista interna del bloque receptor

Tabla 26

Descripción de los elementos internos que forman el bloque receptor

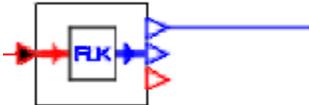
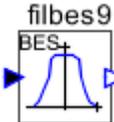
Representación grafica	Nombre	Descripción
	Atenuador óptico	El atenuador introduce la pérdida solicitada al espectro óptico de entrada.
	Receptor óptico	Simula un receptor óptico completo (incluido el fotodetector, el amplificador y el filtro de detección posterior) y se basa en la especificación de sensibilidad del receptor. También puede realizar una evaluación semi-analítica de BER.
	Filtro eléctrico Bessel	Simula un filtro eléctrico. Tenemos varios modelos de filtros: paso bajo de polo simple o doble, Butterworth, Bessel, Chebychev, coseno elevado.

Tabla 27

Configuración del bloque receptor

Componente	Unidad	Valor
Atenuador óptico	dB	3-30
Receptor óptico	dB (Sensibilidad del equipo)	-27
	Orden del filtro de Bessel	5
	Frecuencia -3dB normalizada	0.8
Filtro eléctrico Bessel	Nº de polos	5
	Ancho de banda -3dB	8

Parameter	Value	Units	Range
Bit rate	10	Gbit/s	(0, Inf)
Corresponding Simulated Bit-Rate	= 10.0	Gbit/s	
Baud rate	= 10.0	GBaud/s	
Samples per bit	= 2500		
Sensitivity under test condition	-27	dB	
Custom Sequence Filename	""		
Pseudo Random Sequence Mode	"Automatic"		

Se configura a qué velocidad se transmite

Sensibilidad del equipo

a.) Configuración receptor óptico

Center Frequency - No description is available. Please try the "Help" button.

Parameter	Value	Units	Range
Type	"Lowpass"		
Center Frequency	= 30.0	GHz	(0, 5000)
Number of Poles	1		[1, 10]
3dB Bandwidth	5	GHz	(0, 5000)
Amplitude plot	"No"		

Filtro pasa bajos
Nº de polos y
Ancho de banda -3dB

b.) Configuración filtro eléctrico Bessel

Figura 50. Parámetros de configuración del bloque receptor.

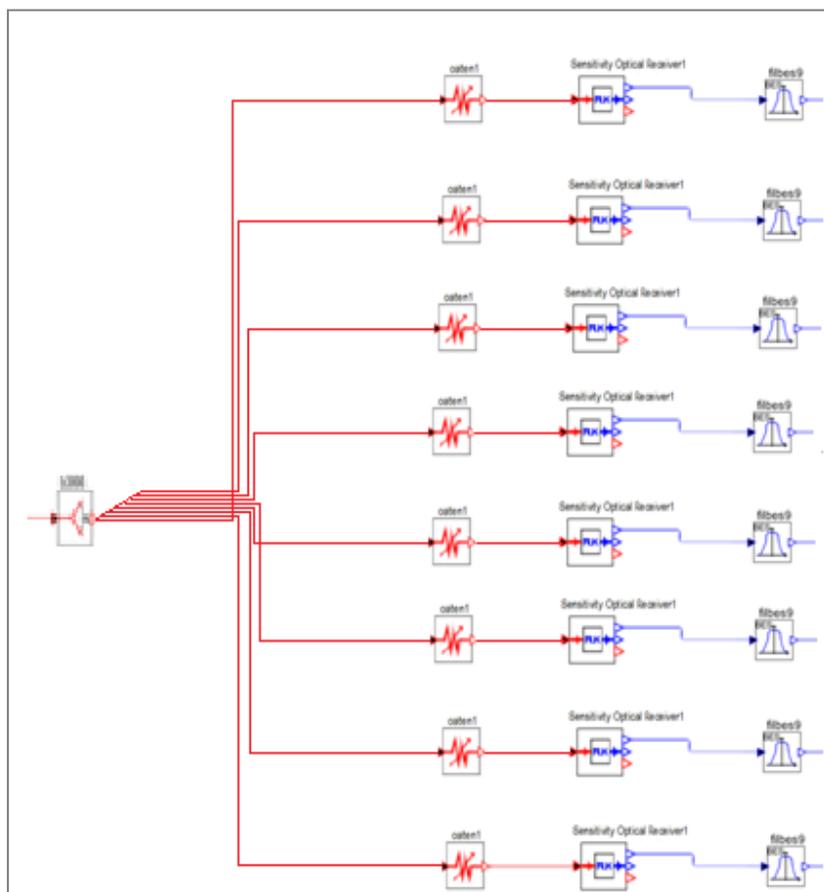


Figura 51. Vista interna del receptor de la red híbrida

Luego de realizar todas las configuraciones respectivas, se procederá a realizar las simulaciones y análisis de los datos obtenidos

El primer análisis que se va a realizar en este apartado es en la red híbrida WDM/TDM-PON sin ningún tipo de efecto de no linealidad, más adelante se observará como el efecto SBS y el efecto FWM afectan a la red.

4.2.2 Simulación de la Red híbrida WDM/TDM-PON sin efectos no lineales

Con el fin de conocer el comportamiento de los datos mientras viajan por la red, se realizará un análisis en cada uno de los bloques que conforma la red.

1) Análisis bloque transmisor

Sabemos que internamente en cada bloque transmisor se forman ocho datos, que son generados por la fuente de datos de cada emisor.

En la figura 52 se presenta una frecuencia de $\lambda_1 = 192.7$ THz, es el espectro de la señal del bloque transmisor 1, específicamente del tramo donde se trabaja con TDM-PON, con una potencia de 17.8 dB.

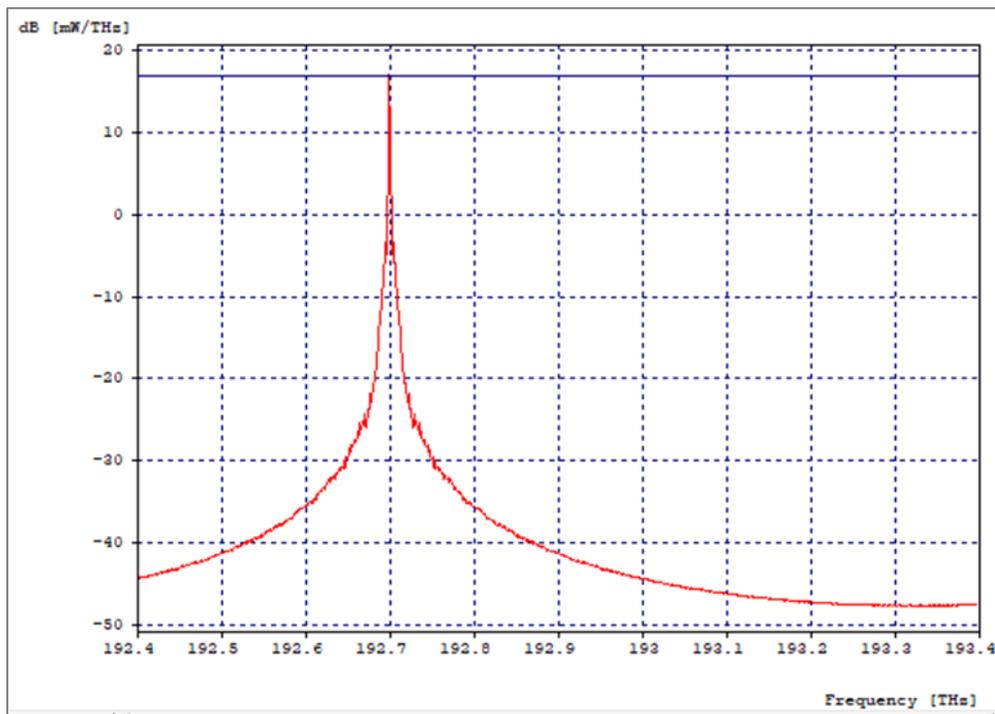


Figura 52. Espectro de frecuencia del bloque transmisor 1

A continuación, se observa los datos transmitidos en el bloque transmisor 1, alcanzando una potencia de 0.2 mW.

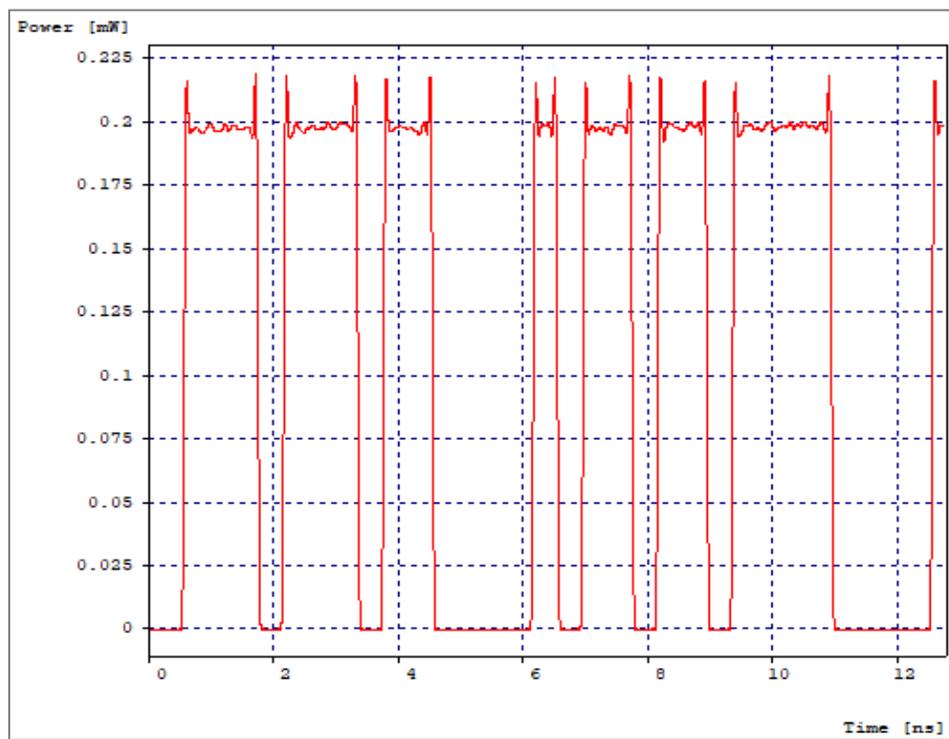


Figura 53. Datos transmitidos por el bloque transmisor 1

Esta red está diseñada para 64 usuarios, por lo tanto, las 8 frecuencias con las que trabaja la red WDM-TDM/PON se presentan en la figura 54, esta gráfica fue tomada a la salida del AWG-MUX, como se aprecia la señal presenta una leve atenuación debido al uso del AWG_MUX, tenemos una potencia de 16.89 dB.

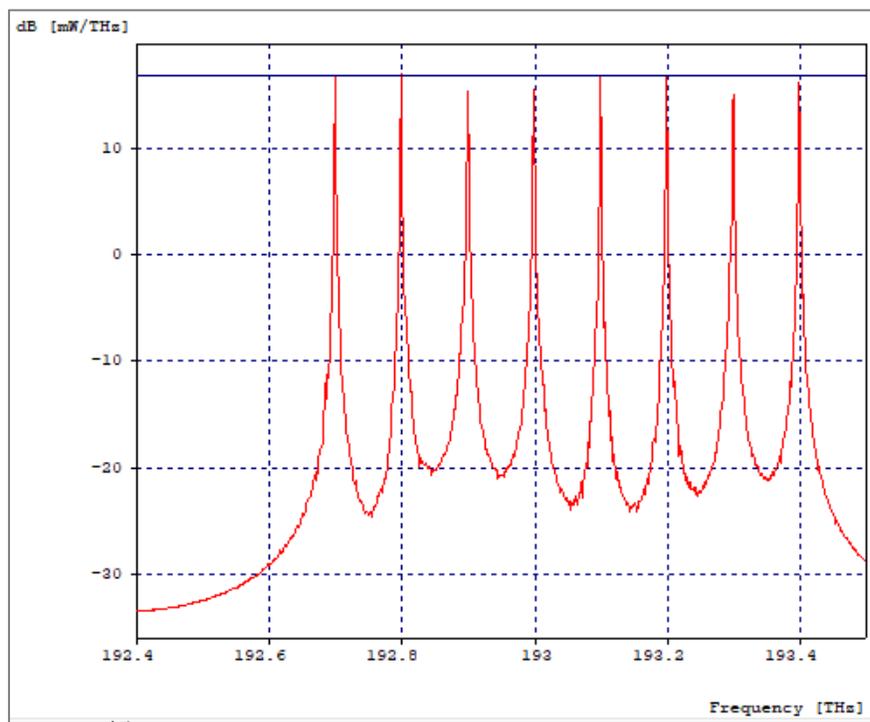


Figura 54. Grupo de 8 frecuencias de la red WDM/TDM-PON

Luego de que los datos viajan a través de la fibra óptica y pasan por el amplificador óptico, se observa claramente que el grupo de 8 frecuencias presenta ruido, y también aumentó su potencia a los 20 dB.

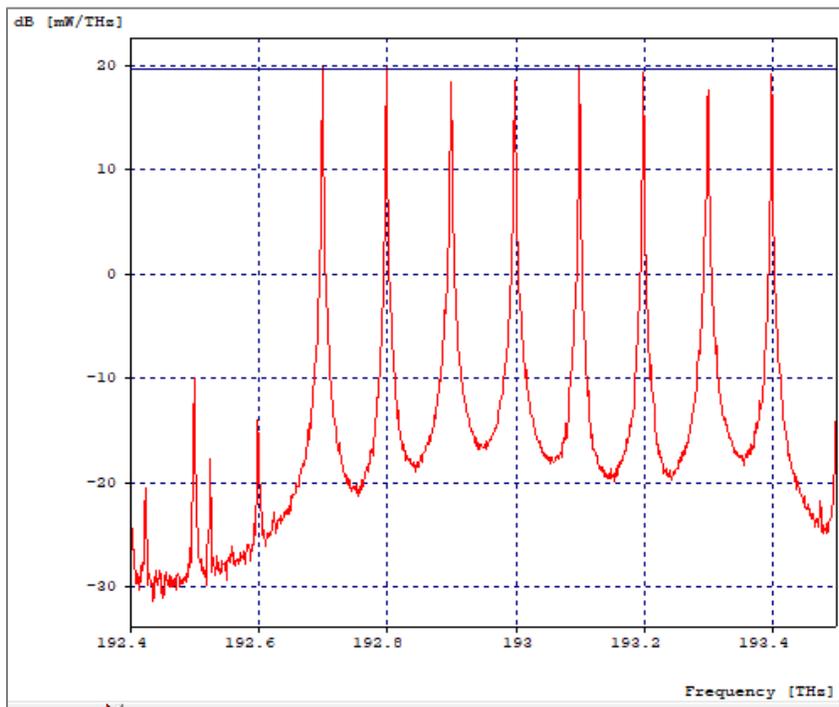


Figura 55. Grupo de 8 Frecuencias a la salida del amplificador óptico

2) Análisis del bloque receptor

Los datos pasan por la fibra compensadora de dispersión y son conducidos al filtro óptico que es parte del primer bloque receptor, se muestra en la figura 56 el espectro de frecuencia a la salida del filtro, en donde se observa que limpia la señal, la frecuencia mostrada es $\lambda_1 = 192.7$ THz.

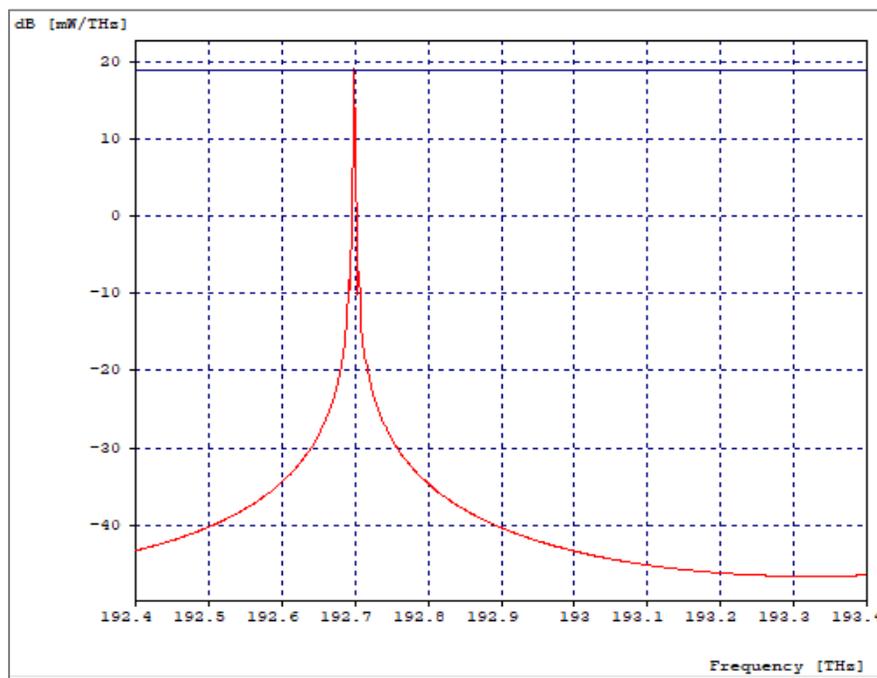


Figura 56. Espectro de frecuencia a la salida del filtro óptico

Los datos recibidos se muestran en la figura 57, tomados a la salida del filtro óptico, se observa que tienen una potencia de 0.2 mW.

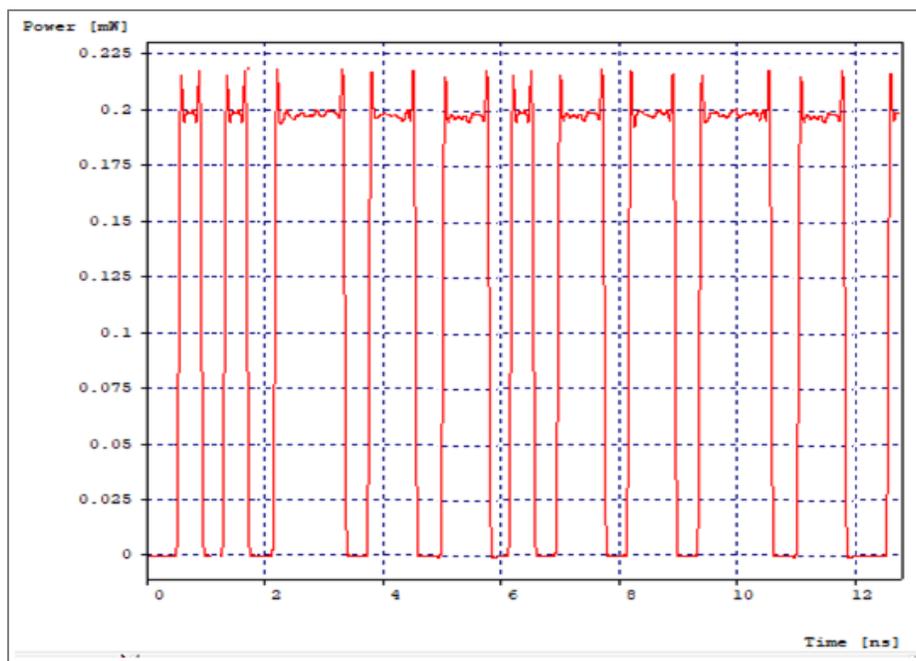


Figura 57. Datos ópticos a la salida del filtro óptico

La señal que pasa por el filtro óptico es conducida hacia el receptor, aquí la señal ingresa a un splitter, el cual distribuye la señal para los 8 usuarios.

Ya en el bloque receptor la señal pasa por un atenuador óptico, este proporciona estabilidad y una señal más clara, los datos siguen su trayecto hasta llegar al receptor óptico que es el encargado de transformar la señal óptica en señal eléctrica, a la salida del receptor podemos observar el diagrama de ojo donde nos muestra datos como el BER, jitter y factor Q.

De acuerdo a la figura 58 el BER o conocido como tasa de bit errado es de $2.67 e^{-10}$, factor de calidad 15.86 [dB] y con un Jitter de 0.026 [ns], el diagrama de ojo presenta interferencia de símbolos que puede deberse a factores como la distancia del enlace, la potencia de transmisión (5mW), aunque la señal apenas es buena de acuerdo al BER presentando, aun así la señal logra proveer a los 64 usuarios de la red, tomando en cuenta que el servicio otorgado a los usuarios podría presentar retardos, pérdidas de conexión, etc.

Para realizar un análisis más detallado sobre el comportamiento de la señal se irá modificando el valor de la potencia de transmisión, esta simulación también nos permitirá observar como las pérdidas de inserción de todos los elementos utilizados para construir la red repercuten en la señal transmitida.

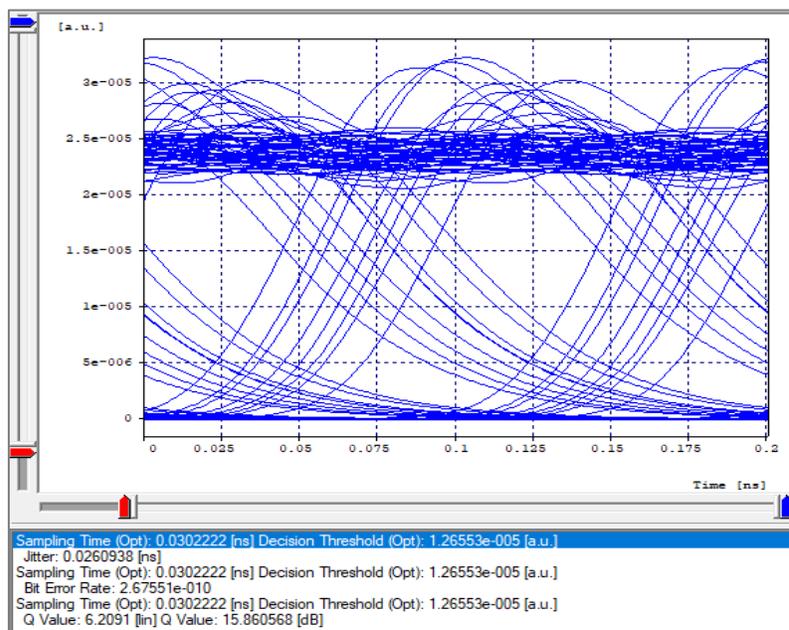


Figura 58. Diagrama de ojo en el receptor.

También podemos observar los datos que llegan a los usuarios.

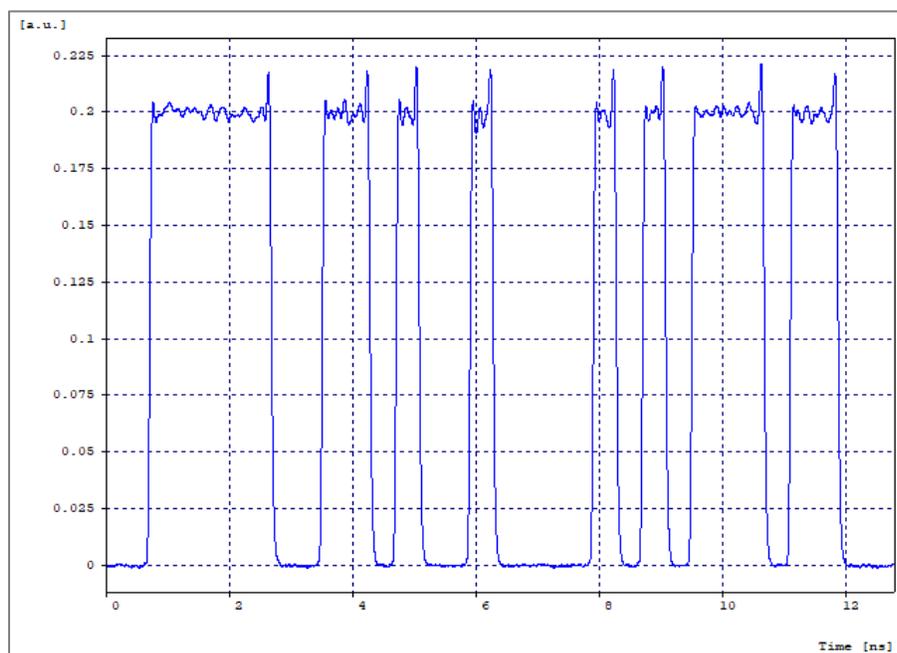


Figura 59. Datos recibidos a la salida del receptor

Pero podemos observar que en la figura 60 se presenta el diagrama de ojo de un solo usuario en el bloque receptor, y se ve claramente que la señal recibida es óptima. Tiene un BER de $1 e^{-10}$, si

se mide individualmente el BER para cada usuario se puede apreciar que la señal transmitida llega sin ningún problema al receptor, su jitter es de 0.075 ns y su factor Q es de 40 dB.

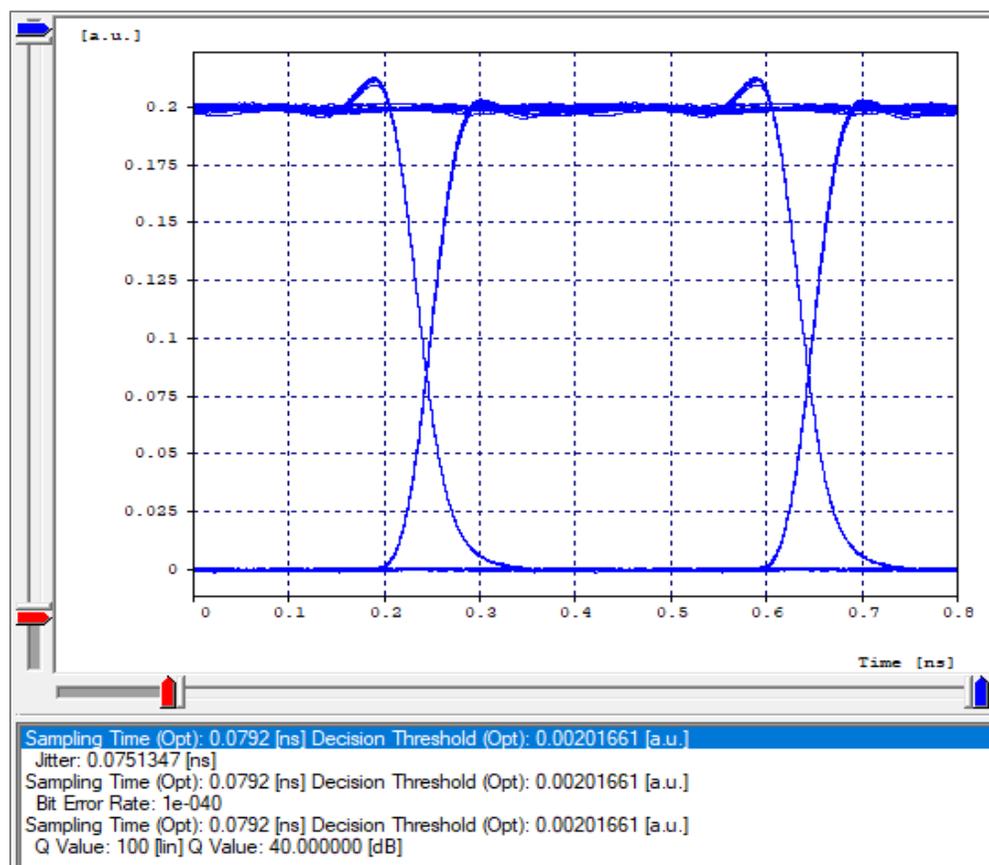


Figura 60. Diagrama de ojo medido a la salida del receptor de un único usuario

4.2.2.1 Análisis

Se realizaron varias pruebas, en donde se fue modificando la distancia, potencia de entrada, tasa de transmisión y el ancho de banda.

A continuación, se presenta la gráfica que contiene la relación entre la distancia y el BER, estos datos fueron tomados a la salida del bloque receptor, como se observa al aumentar la distancia el BER va aumentando, provocando que la señal se degrade, también se puede ver que con respecto a la gráfica 36 el BER mejoró ya que se aumentó la potencia de transmisión a 10mW, y se configuró una tasa de transmisión de 10 Gbps.

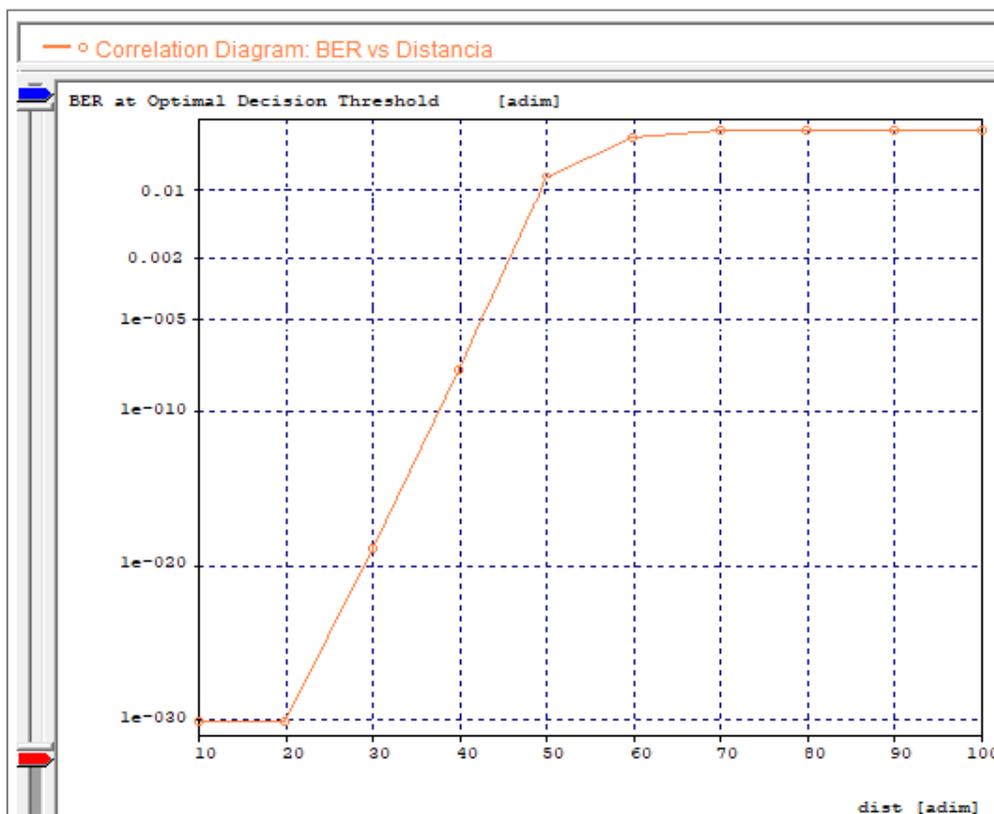


Figura 61. Distancia vs BER, potencia de 10mW, tasa de transmisión de 10Gbps

A continuación, en la figura 62, se visualiza que el BER aumenta considerablemente cuando la tasa de transmisión es de 20 Gbps mientras aumenta la distancia, aunque es una simulación se trató de modelar una arquitectura real y es posible que el aumento de BER se deba a que uno de los equipos utilizados no pueda gestionar adecuadamente el volumen de tráfico que recibe.

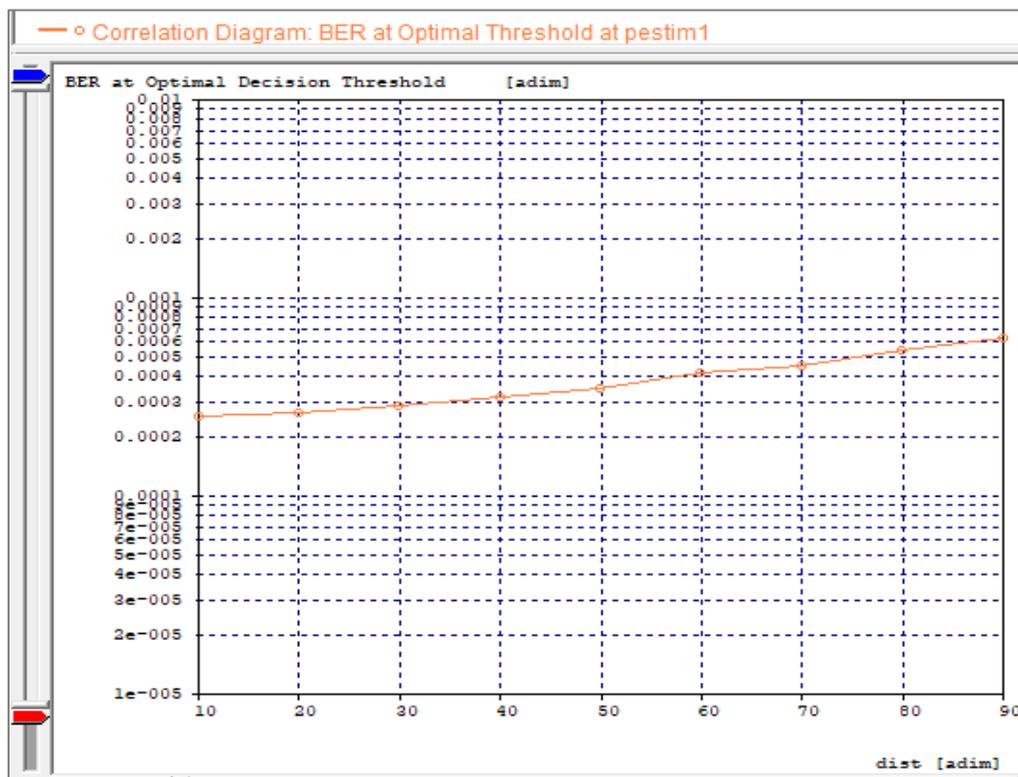


Figura 62. Distancia vs BER, potencia de 10mW, tasa de transmisión de 20Gbps

A continuación, se muestra la relación Distancia vs BER, tomando en cuenta una potencia de 10mW y 20 mW, con el aumento de potencia el BER se redujo, permitiendo una mejora en la señal y asegurando una entrega confiable de la información.

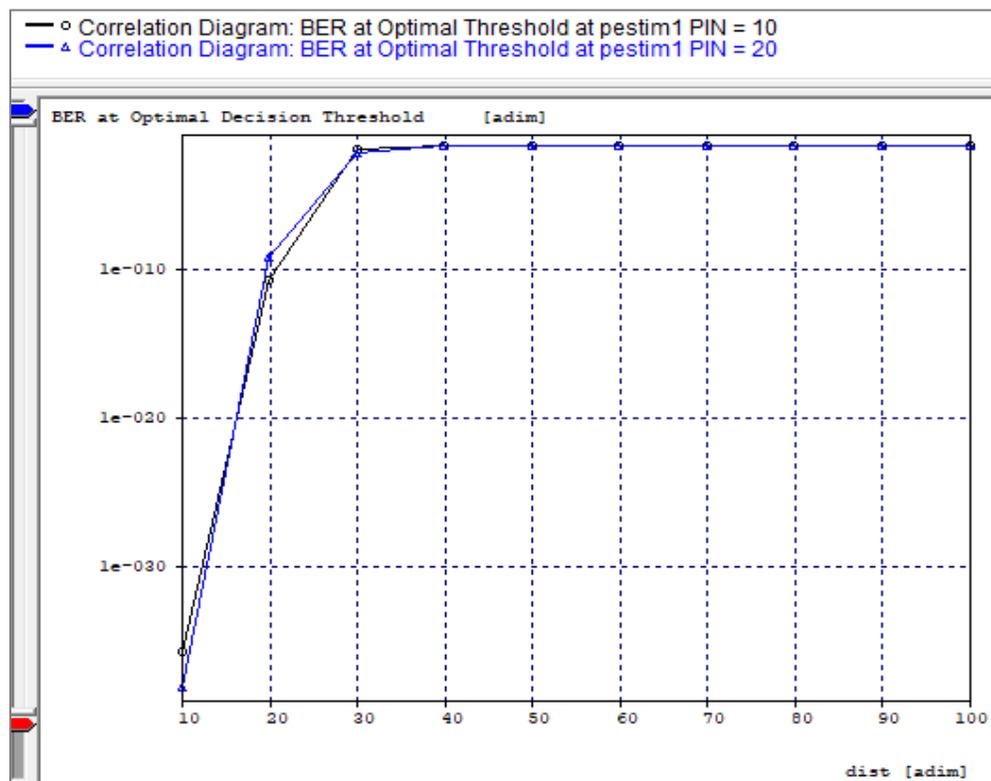


Figura 63. Distancia vs BER, potencia de 10mW y 20 mW, tasa de transmisión de 10Gbps

La siguiente grafica muestra la relación velocidad de transmisión vs BER, para una longitud de fibra de 20 Km, donde se aprecia que mientras aumenta la velocidad de transmisión aumenta el BER, dándonos a entender que los datos no están llegando al bloque receptor.

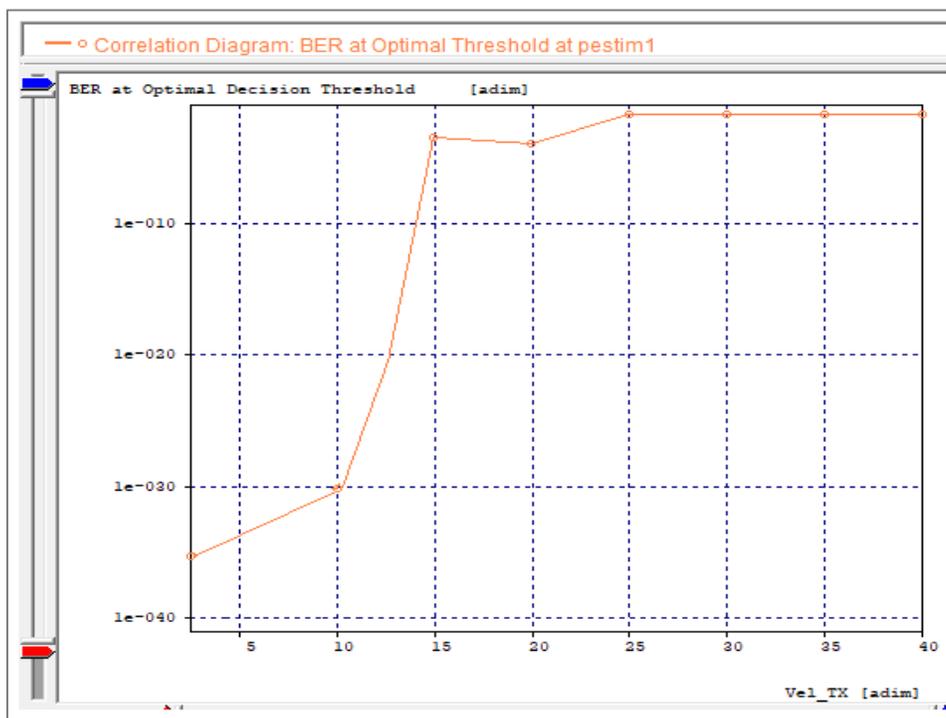


Figura 64. Velocidad de transmisión vs BER, longitud de fibra óptica 20 Km, P_{TX} 10 mW.

El siguiente resultado que vamos a mostrar es la relación distancia vs potencia recibida, aquí se observa como a medida que aumenta la distancia la potencia en el receptor se va perdiendo, claro que esto también se debe a las pérdidas de los splitters, AWG-MUX Y DEMUX, la atenuación en la fibra.

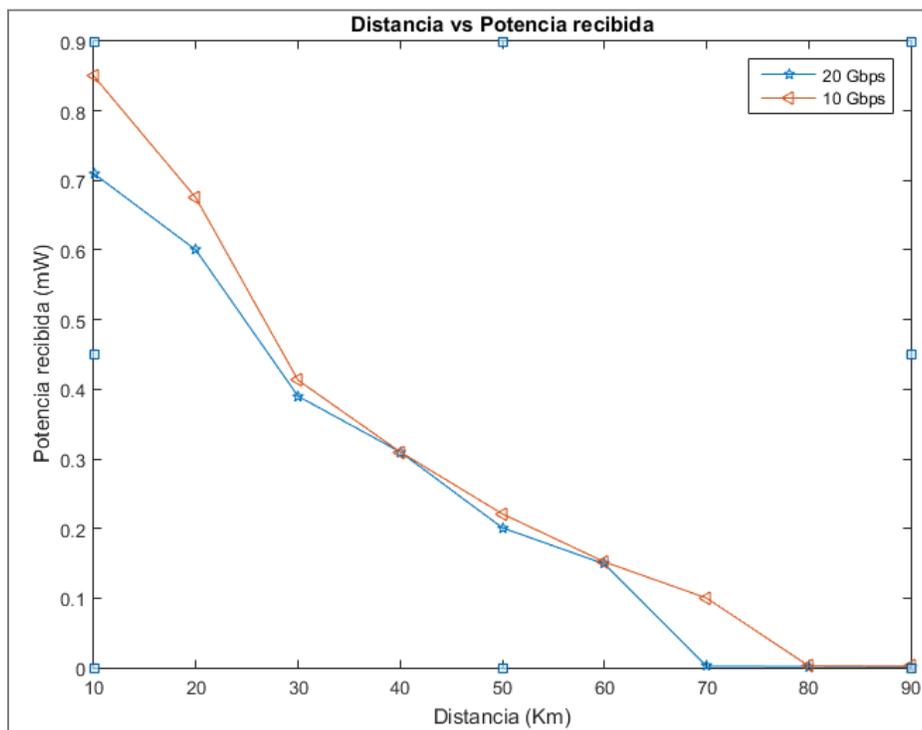


Figura 65. Distancia vs Potencia recibida, con una potencia de 10mW

4.2.3 Simulación de la Red híbrida WDM/TDM-PON bajo el efecto no lineal causado por el índice de refracción FWM (Mezclado de cuatro ondas).

Para poder realizar esta simulación fue necesario realizar algunas modificaciones a la red construida.

Supé (2011), describe dos esquemas para poder simular el efecto FWM, vamos a basarnos en el esquema que utiliza un modulador externo el cual trabaja con la señal que sale del Codificador NRZ rectangular. Se utiliza un modulador de amplitud, que de acuerdo con sus características a su salida presenta dos ondas ópticas con el doble de separación de frecuencia de modulación, estas señales tienen la misma polarización.

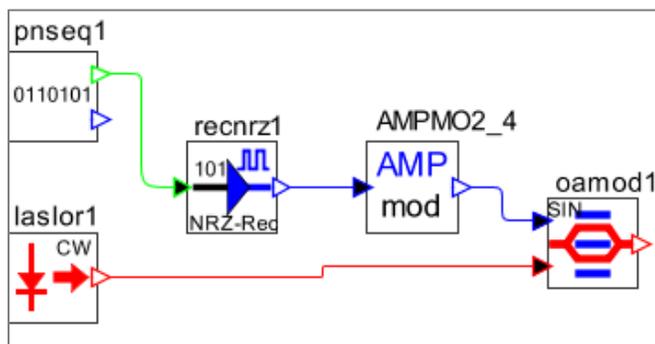


Figura 66. Modulador de amplitud utilizado para simular el efecto FWM

Para probar este fenómeno se necesita observar si hay algún cambio en las 8 frecuencias que maneja el bloque receptor, la frecuencia portadora del modulador es el parámetro que se va a ir modificando hasta notar algún cambio.

AMPMO2_4			
Fixed_Mean - No description is available. Please try the "Help" button.			
Parameter	Value	Units	Range
Carrier_Frequency	0.03	THz	[-1e+032, 1e+032]
Carrier_Amplitude	1.0		[-1e+032, 1e+032]
Carrier_Phase	0.0		[-1e+032, 1e+032]
Modulator_Sensibility	1.0		[-1e+032, 1e+032]
Fixed_Mean	0.0		[-1e+032, 1e+032]

Figura 67. Ventana de configuración del modulador de amplitud

Se realizaron pruebas con varios valores en la frecuencia portadora, llegando a observar que el valor con el que las 8 frecuencias transmitidas empiezan a degradarse fue de 0.3THz.

En el apartado de análisis se mostrará todas las pruebas realizadas con diferentes valores de la frecuencia portadora.

4.2.3.1 Análisis

Aquí se podrá observar como este efecto incide en el BER, y en todo el sistema.

Se puede visualizar en la figura 68 que debido al efecto FWM se originan canales parásitos, la potencia de los 8 canales ha sido atenuada y existe una gran interferencia entre canales.

Si se aumenta el número de canales en la red, los canales parásitos generados por FWM aumentaran exponencialmente.

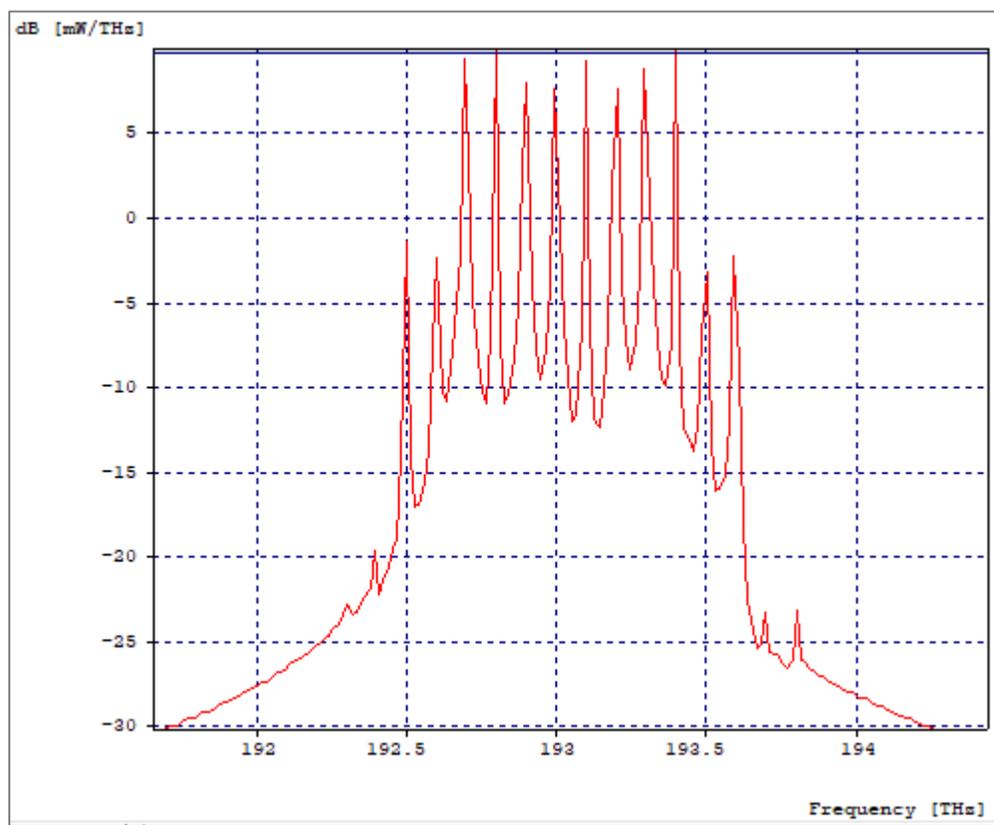


Figura 68. Efecto no lineal FWM visto en las 8 frecuencias de la red híbrida WDM-TDM/PON

La grafica que se muestra a continuación, se observa como el BER aumenta con relación a la distancia, mostrándonos que la señal ha sufrido un gran deterioro, con una potencia de transmisión de 10mW, tasa de transmisión de 10Gbps.

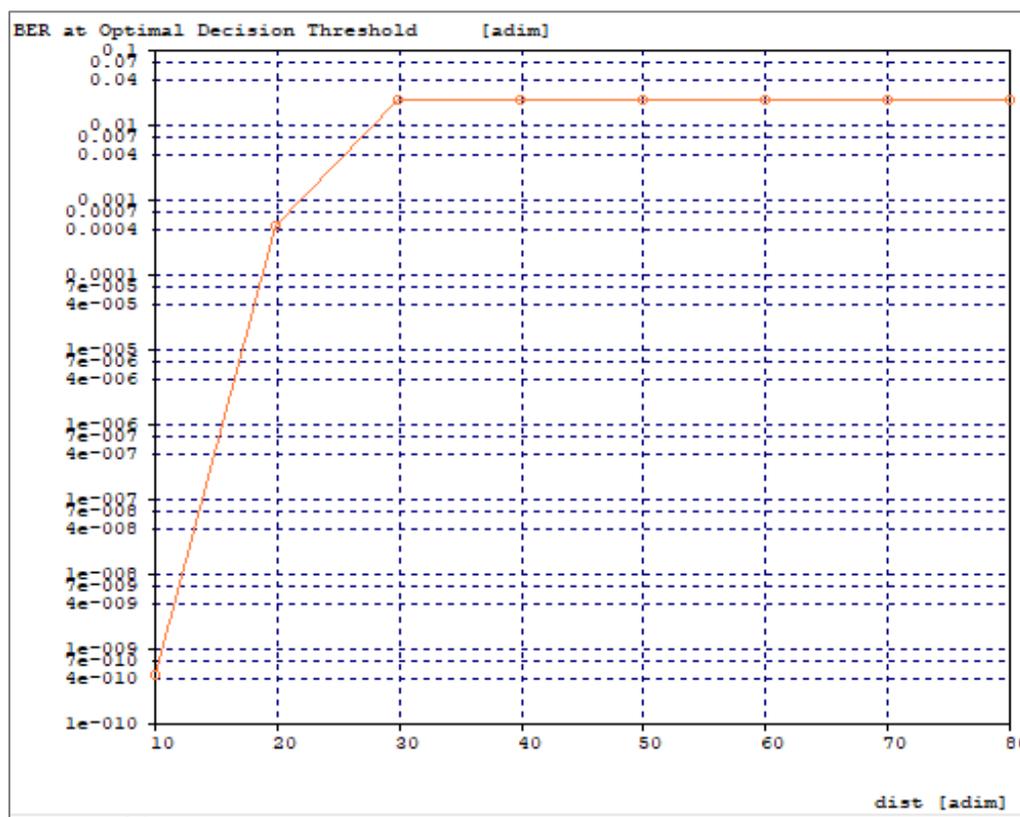


Figura 69. Distancia vs BER, efecto no lineal FWM, $P_{tx}=10\text{mW}$, 10 Gbps, con frecuencia portadora 0.1THz

Realizamos una comparación de las señales cuando se transmite a una velocidad de 10 y 20 Gbps, con la frecuencia portadora de 0.3THz que es con la que se percibió la aparición de canales parásitos y degradación de la señal. El BER aumenta mientras la distancia sigue aumentando, y más para la velocidad de transmisión de 20 Gbps, como se observa en la figura 70.

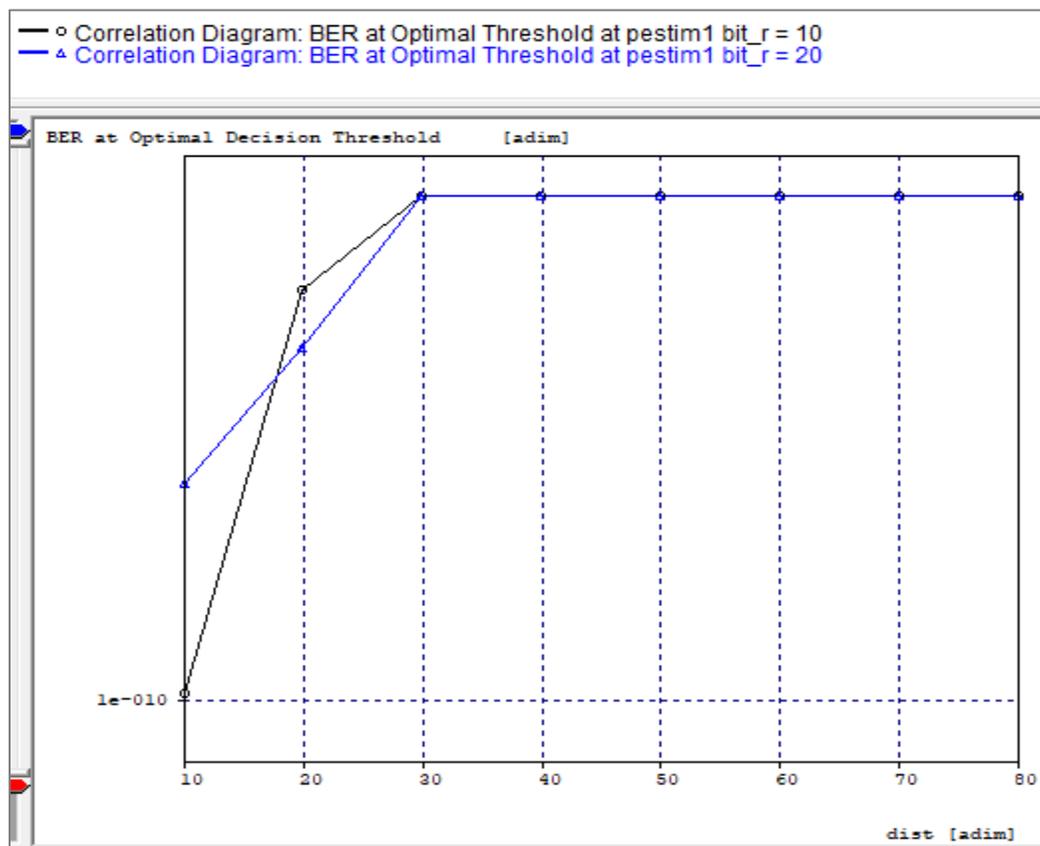


Figura 70. Distancia vs BER, efecto no lineal FWM, $P_{tx}=10\text{mW}$, frecuencia portadora 0.3THz

El BER ha aumentado debido a que se aumentó la potencia de transmisión a 20 mW, es decir que si se aumenta la potencia aumenta el efecto FWM, dando lugar a una señal aún más deteriorada. Se puede observar que la velocidad de transmisión también se ve afectada, mientras se aumenta la distancia, la señal no es capaz de llegar al receptor, por ello es por lo que se ve un BER muy alto lo que nos indica que la red no está funcionando adecuadamente.

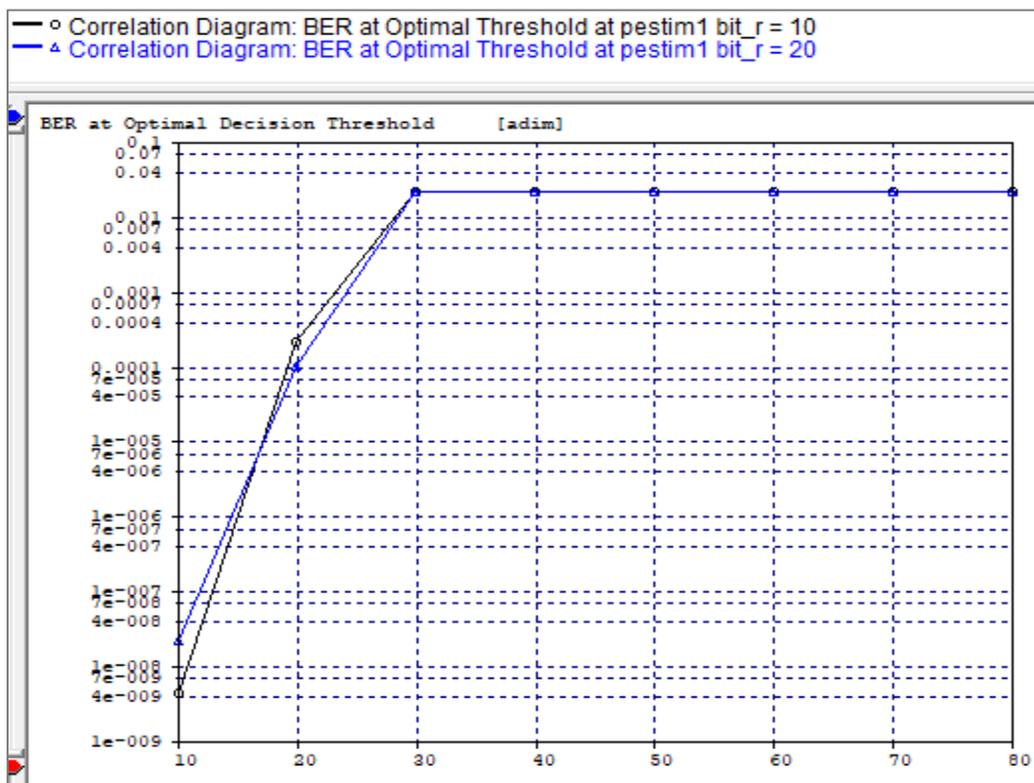


Figura 71. Distancia vs BER, efecto no lineal FWM, $P_{tx}=20mW$, frecuencia portadora 0.3THz

Si observamos la figura 72, la potencia recibida va disminuyendo a medida que aumenta la distancia, con una potencia de 10mW. La tasa de transmisión también se ve afectada a medida que la distancias crece.

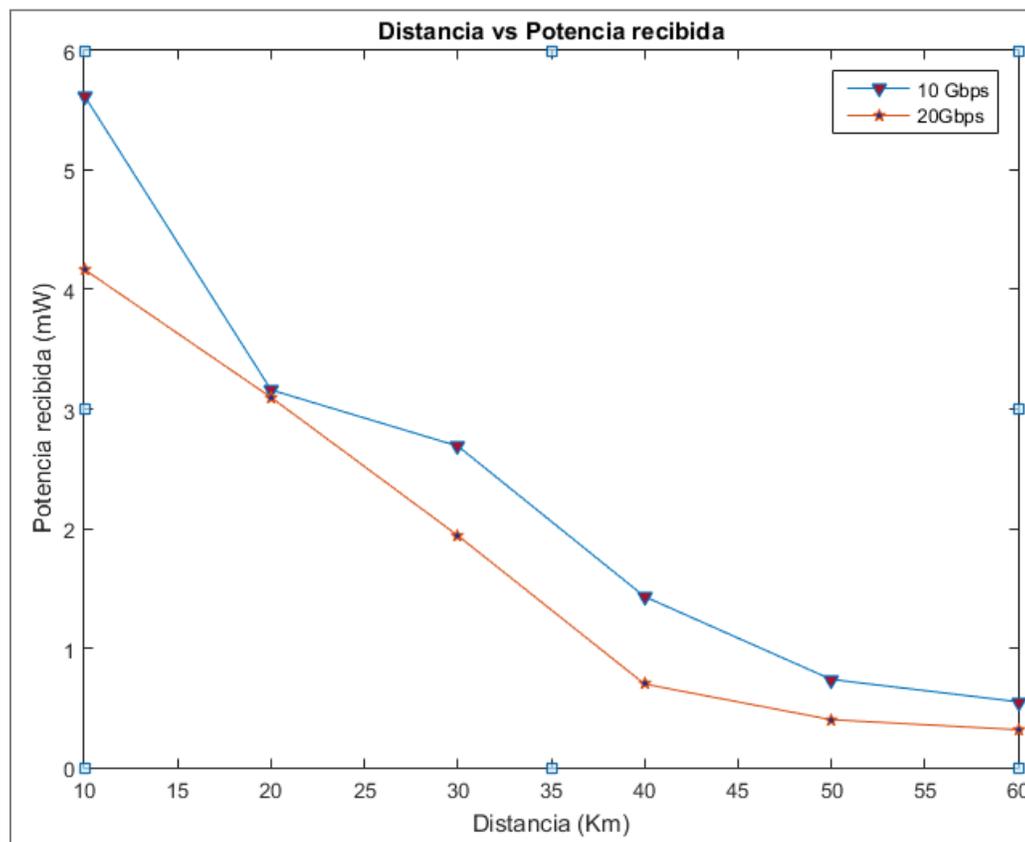


Figura 72. Distancia vs Potencia recibida, potencia 10mW, frecuencia portadora 0.3THz

4.2.4 Simulación de la Red híbrida WDM/TDM-PON bajo el efecto no lineal causado por SBS (Dispersión Estimulada de Brillouin).

En este caso para poder realizar la simulación con este tipo de efecto no lineal, se modificaron parámetros propios de la fibra óptica, como se muestra en la figura 73 tenemos una pestaña en el cuadro de propiedades de la fibra óptica, el mismo que señalaremos y procedemos a activar, en este cuadro observamos varios parámetros que tienen que ver con el efecto no lineal SBS como se explicó en el apartado 2.5.2.1.

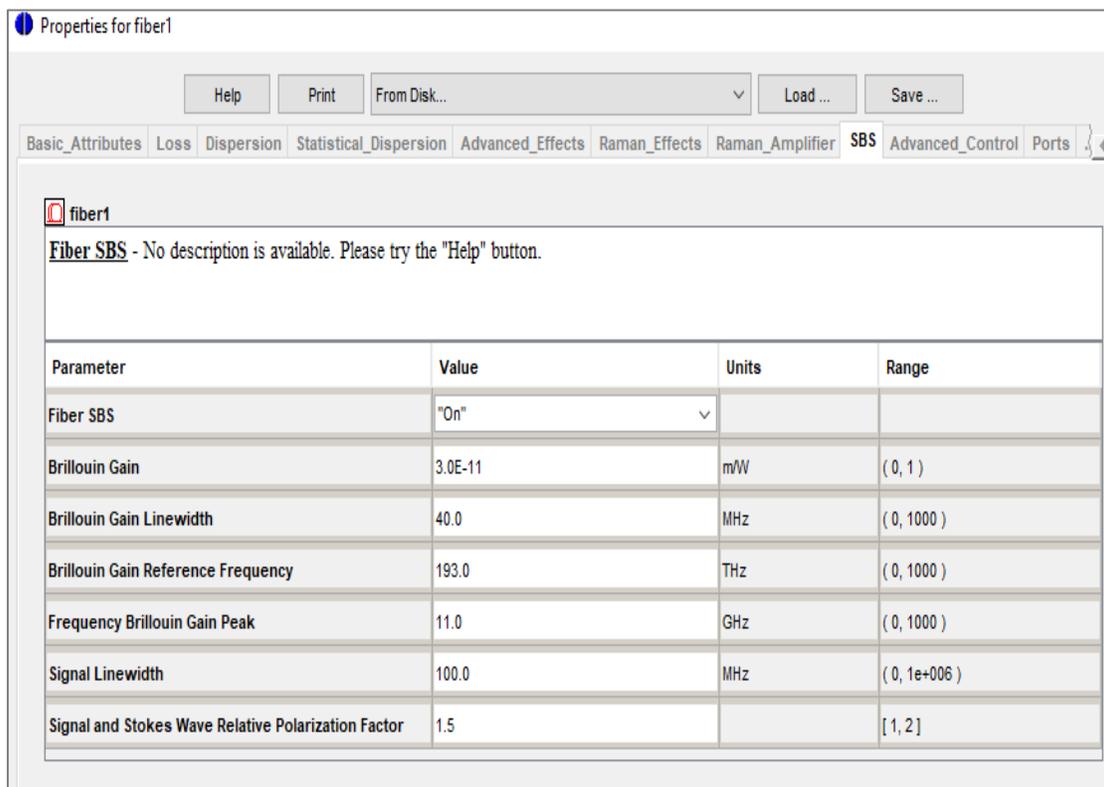
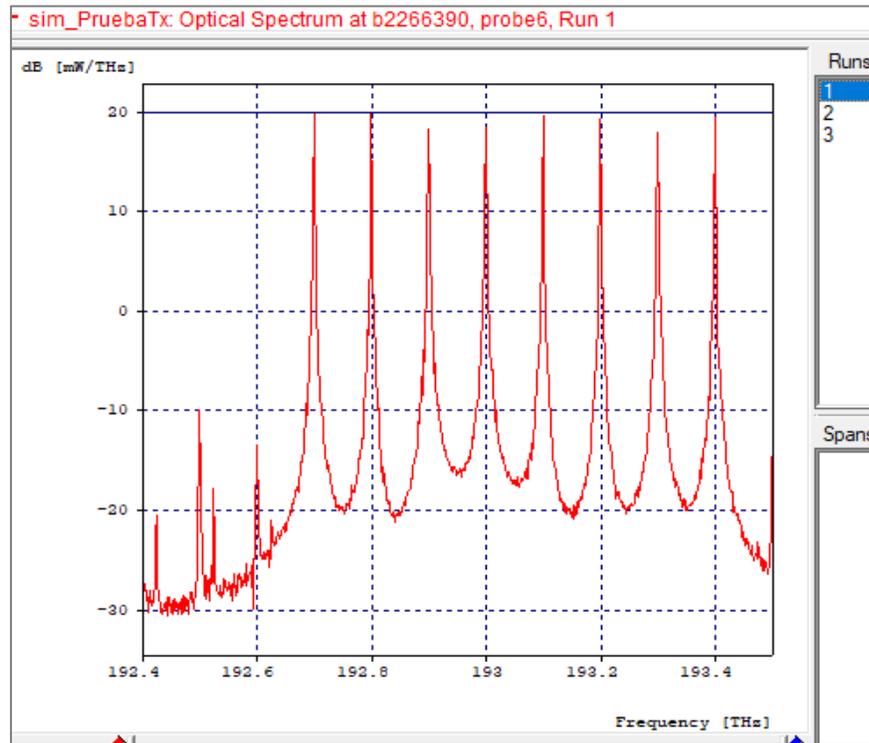


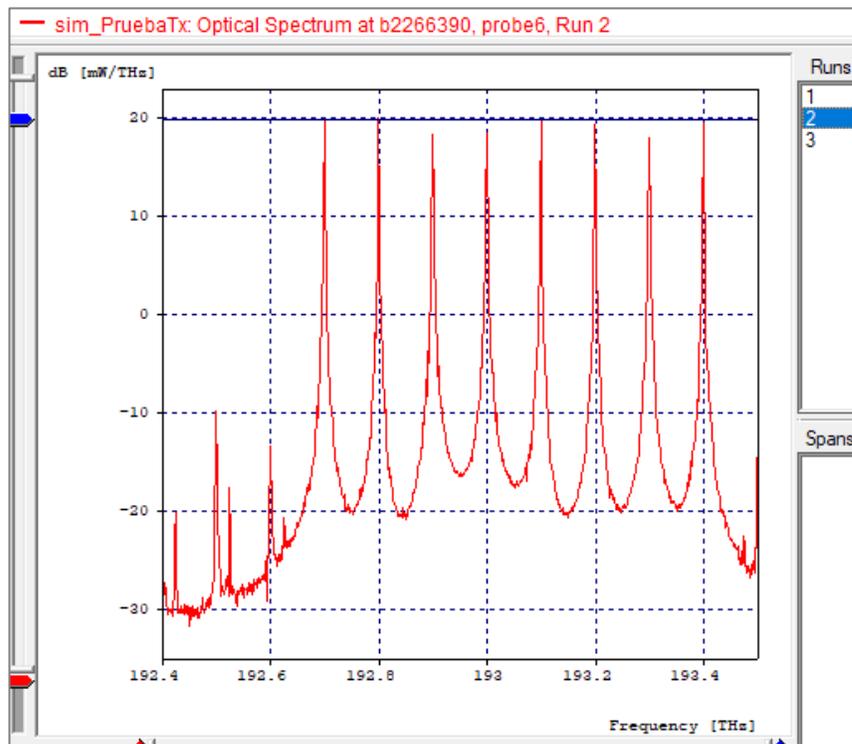
Figura 73. Cuadro de propiedades de la fibra óptica, efecto SBS

4.2.4.1 Análisis

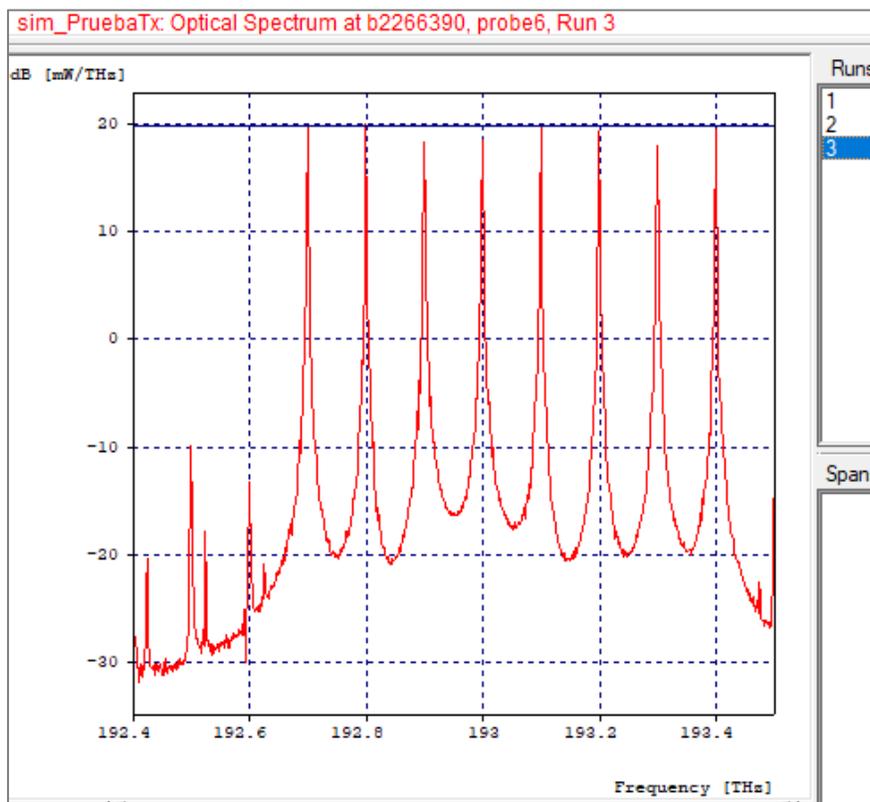
Para comenzar con el análisis, se muestra en la figura 74 que la potencia crítica con la cual se limita la potencia de entrada es de 7.72 mW, se realizaron varias pruebas al ir cambiando la potencia de entrada, y se observó que a partir de 10mW la potencia se mantenía en el mismo nivel y no sufría modificación alguna.



a) Potencia de entrada de 10mW



b) Potencia de entrada de 20mW



c) Potencia de entrada de 30 mW

Figura 74. Grupo de frecuencias mostrando potencia crítica de SBS

La figura 75 muestra que mientras la distancia es más grande el BER va aumentando exponencialmente, configurado con una potencia de 30mW y velocidad de transmisión de 10Gbps, el BER no se ha visto afectado como con otros efectos no lineales.

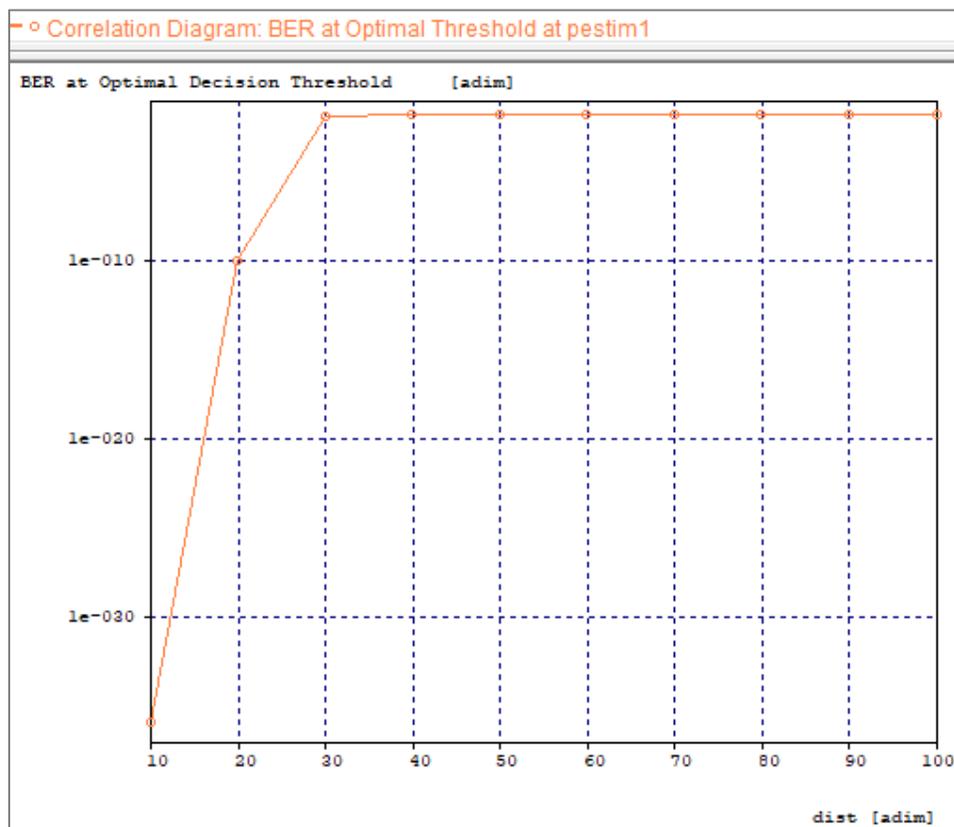


Figura 75. Distancia vs BER, potencia de transmisión 30mW, 10Gbps

Observando la figura 76, se puede apreciar que mientras se aumenta la velocidad de transmisión el BER aumenta, velocidad de transmisión de 20 Gbps con potencia de 20mW.

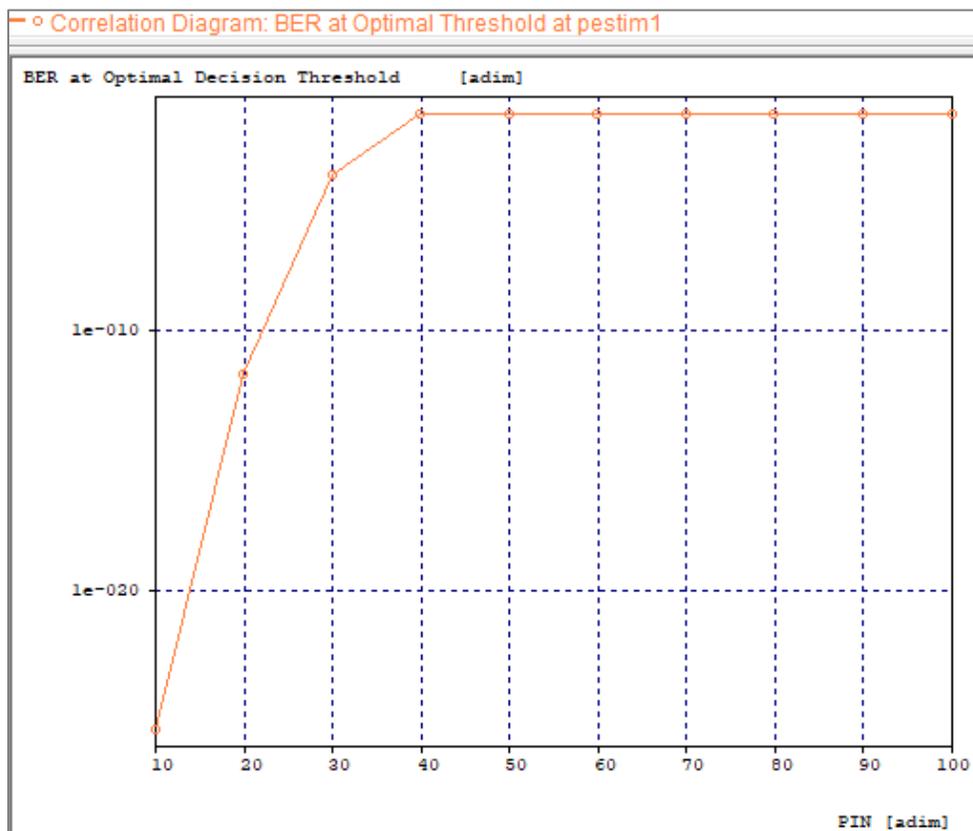


Figura 76. Distancia vs BER, potencia de transmisión 20mW, 20Gbps

En el siguiente grafico se presenta la relación distancia vs potencia recibida, al aumentar la distancia la potencia recibida disminuye, aunque se aumente la potencia de entrada esta no tendrá ningún efecto en la potencia de salida, ya que tenemos que la potencia critica SBS es de 10mW, se configuró con una potencia de 20mW a 10 y 20 Gbps.

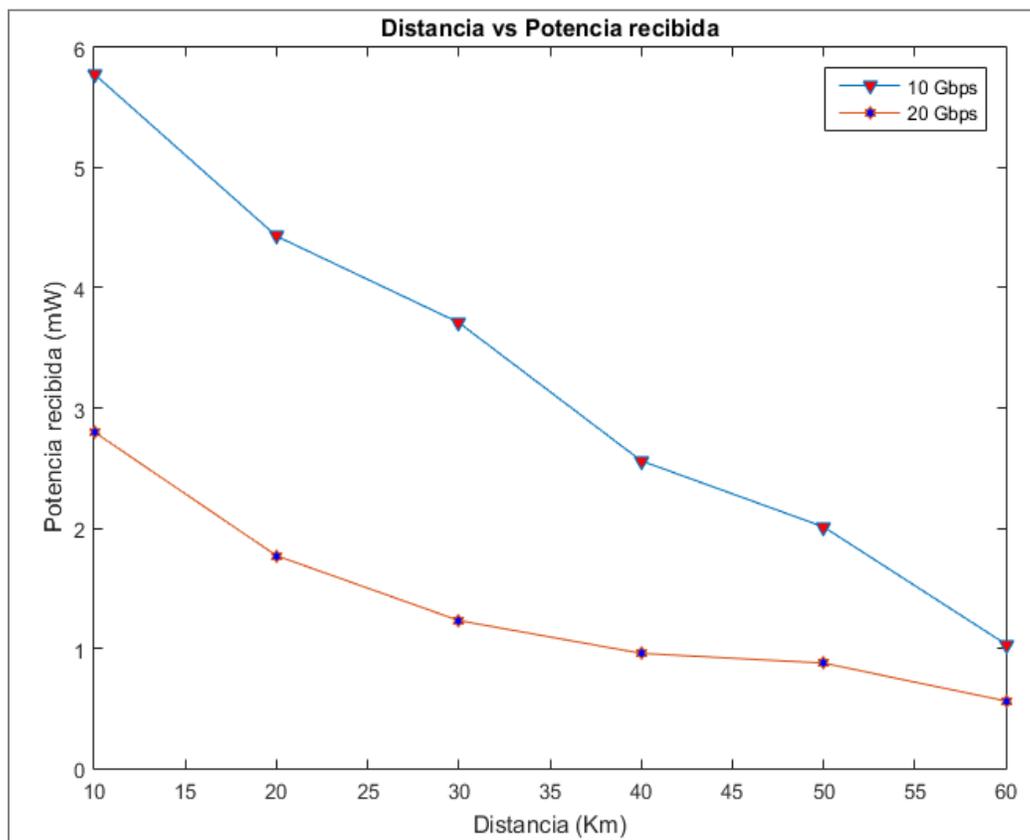


Figura 77. Distancia vs Potencia recibida, con una potencia de 20mW

4.3 Introducción a OMNeT++, configuración de bloques de la red híbrida WDM-TDM/PON

OMNeT++ es un simulador de redes que permite describir el comportamiento de modelos de transición, trabaja con lenguaje de programación C++, su funcionamiento es a base de módulos orientados a objetos, su arquitectura es flexible y es de libre distribución.

Sus módulos son reutilizables, las conexiones siguen un nivel de jerarquía: un sub módulo puede conectarse con otro igual o con aquel que contenga en si un módulo compuesto. (OpenSim Ltd., 2001)

Entre los aspectos a tomar en cuenta para comenzar a realizar la simulación de la red se comenzará por los protocolos de control de acceso debido a que es una red híbrida, en la OLT se implementará WDM y en la ONU utilizará TDM, en cada ONU se filtrará una longitud de onda que servirá para dar servicio a los usuarios.

Aquí se presenta el esquema general de la red PON, diseñada en OMNET++, es un fichero con extensión. ned que define los módulos simples y compuestos, sus parámetros y puertos de entrada y salida.

Cada componente que se observa en la figura 78 está formado en su interior por módulos simples y compuestos

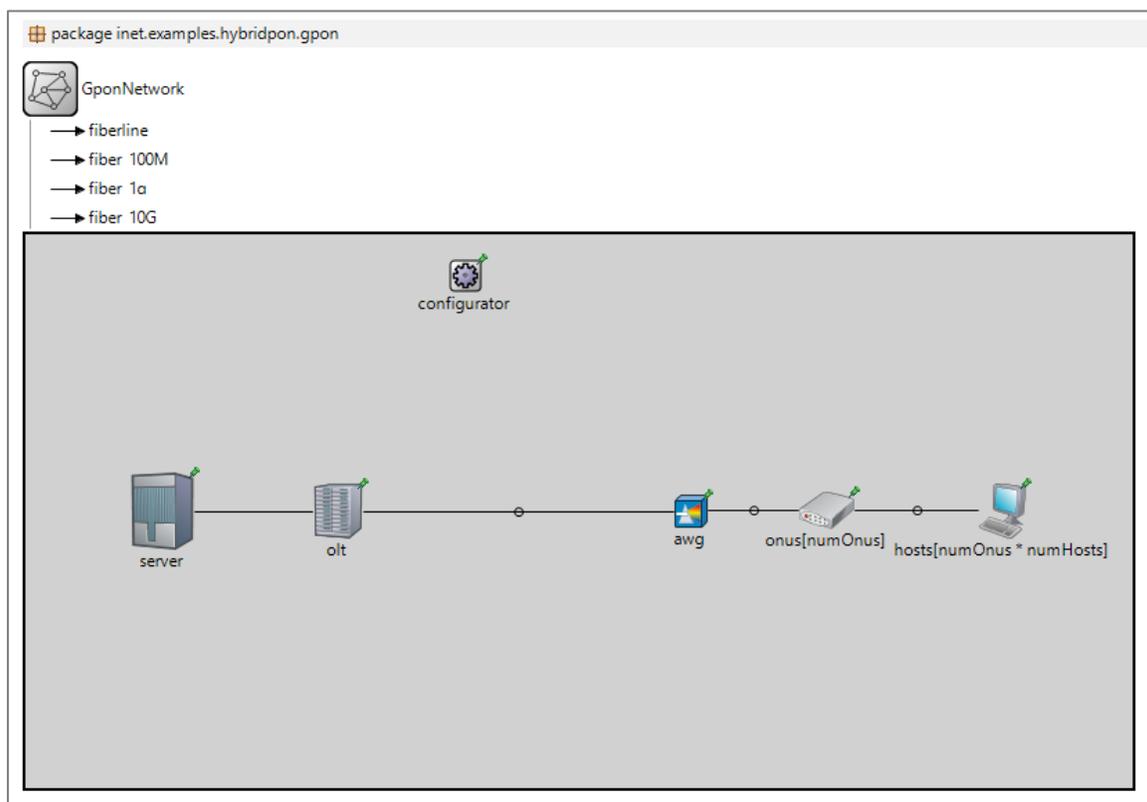


Figura 78. Red híbrida WDM-TDM/PON, diseñada con el simulador OMNeT++

4.3.1 Módulo Server

Este módulo maneja todo lo referente a IP, TCP y UDP lo que son capas y aplicaciones, se encarga de proveer servicios dentro de una red.

Formado por varios módulos simples y compuestos.

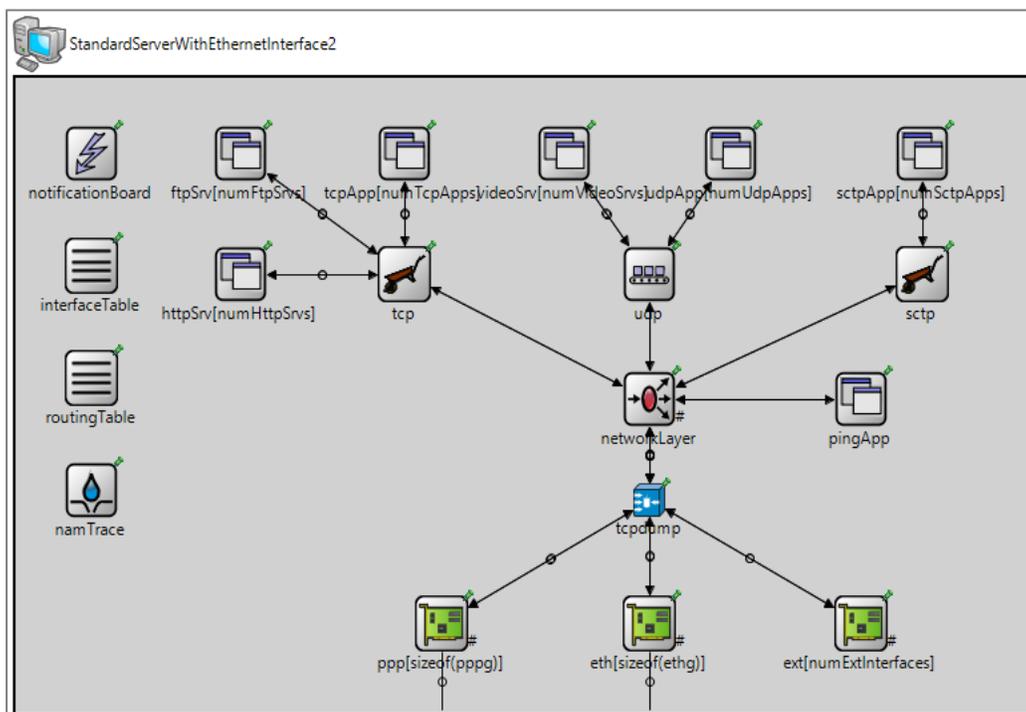


Figura 79. Módulo Server, vista interior (módulos simples y compuestos)

Tabla 28

Descripción de los módulos simples y compuestos del módulo Server

Módulo	Descripción
Notification board	Permite que los módulos pueden notificarse entre sí sobre "eventos" como cambios en la tabla de enrutamiento, cambios en el estado de la interfaz (arriba / abajo), cambios en la configuración de la interfaz, transferencias inalámbricas, cambios en el estado del canal inalámbrico, cambios en la posición del nodo móvil, etc.
Módulo de interface: ftpSrv, tcpApp, httpSrv	Plantilla para aplicaciones TCP. Muestra las puertas que necesita una aplicación TCP, para poder usarse en StandardHost, etc.
tcp	Interfaz para implementaciones de protocolo TCP. Todas las implementaciones de TCP deben implementar esto (TCP, ITCP)

CONTINÚA



UDP	<p>Implementación del protocolo UDP, para IPv4 e IPv6.</p> <p>Si va a ser utilizado como una aplicación en una comunicación con clientes, el módulo puede conectarse a varias aplicaciones.</p> <p>Para recibir paquetes UDP, las aplicaciones conectadas primero deben "vincularse" al puerto UDP dado. Esto se puede hacer enviando un mensaje arbitrario con el tipo de mensaje UDP_C_BIND y un UDPCtrlInfo adjunto con srcPort</p>
Módulo de interface: videoSrv, udpApp	Plantilla para aplicaciones UDP. Muestra qué puertos necesita una aplicación UDP, para poder usarse en StandardHost, etc.
sctp	
sctpApp	No es un tipo de módulo real. Solo muestra qué puertos debe tener una aplicación SCTP para poder usarse en StandardHost, etc.
interface Table	Además de las interfaces registradas, también se creará una interfaz de bucle invertido. Esta tabla solo contiene propiedades de interfaces independientes del protocolo.
routing table	<p>Almacena la tabla de enrutamiento.</p> <p>El parámetro del módulo routerId debe estar vacío, para los hosts.</p>
nam Trace	<p>Cuando se coloca dentro de un host o enrutador, se escribe una traza NAM, basada en las notificaciones que recibe a través del NotificationBoard. Se espera encontrar un módulo NAMTrace llamado "nam" a nivel de red, si falta el módulo "nam", este módulo no hace nada y no tiene una sobrecarga de tiempo de ejecución.</p> <p>Este módulo no tiene puertos y no procesa mensajes.</p>
NetworLayer está formado por 5 módulos simples: ip, icmp, igmp, arp, errorHanding	<p>En este módulo se implementa el protocolo IP. El encabezado del protocolo está representado por la clase de mensaje IPDatagram.</p> <p>Se maneja ICMP que es un protocolo de control de mensajes, también se utiliza IGMP.</p> <p>Además, se implementa el protocolo de resolución de direcciones para direcciones MAC de 6 bytes IPv4 e IEEE 802.</p> <p>Y el último módulo maneja las notificaciones de error que llegan de otros módulos de protocolo.</p> <p>Los errores llegan en los mensajes; esta implementación solo imprime un informe y descarta el mensaje.</p>

CONTINÚA



tcpdump	Ayuda a analizar el tráfico en la red, permitiendo grabar y mostrar en tiempo real los paquetes.
pppinterface	Este módulo complementa el módulo PPP con una cola de salida.
compuesto por 2 módulos simples:	Modulo <u>PPP</u> encapsula/ desencapsula los datagramas de red en tramas PPP, recopila estadísticas sobre los paquetes transmitidos y eliminados.
queue, ppp	El módulo <u>queue</u> permite poner en cola los paquetes. Los elementos de la cola almacenan paquetes hasta que se pueden transmitir. Tienen una entrada y una puerta de salida.
eth compuesto por tres módulos simples:	El módulo eth es un módulo de interface que admite solo la operación dúplex, además complementa al módulo EtherMac y EtherEncap con una cola de salida para el soporte de QoS.
ext	Representa una interfaz del mundo real, simula bucles.
pingApp	Genera solicitudes de ping y calcula la pérdida de paquetes y los parámetros de ida y vuelta de las respuestas.

4.3.2 Modulo OLT o Nodo Terminal de Línea Óptico

Este módulo se creó como tipo red, está compuesto por varios módulos simples, cumple funciones importantes dentro de la red como el envío y recepción de mensajes control, la administración de usuarios, ya que nuestra red PON es híbrida la OLT puede manejar varios tipos de longitudes de onda.

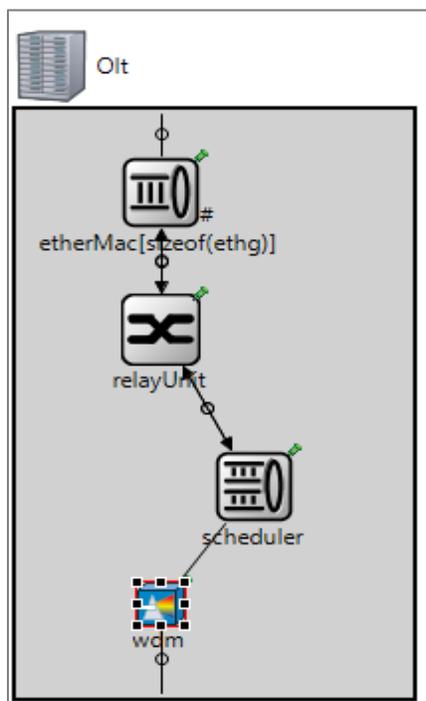


Figura 80. Módulo OLT, vista módulos simples

Tabla 29

Módulos simples que forman el módulo OLT

EtherMac	Se encarga de operaciones lógicas, como del entramado, del control de acceso al medio (MAC), aquí se realiza la asignación dinámica de ancho de banda, detecta las colisiones, maneja mensajes de atasco, permite retransmitir tramas.
Relay Unit	Permite enviar / recibir tramas Ethernet, contiene una tabla para la dirección de destino se asignan puertos de salida. La tabla se actualiza con la dirección de origen cada vez que recibe una trama de datos y se asignan puertos de entrada. La información que provee la tabla es: dirección MAC hexadecimal y número de puerto decimal.
Scheduler	Este módulo nos da la elección de escoger que paquete se transmite primero, si la interfaz esta lista para transmitir se decide que cola puede enviar un paquete. Se puede asignar el ciclo de sondeo entre la OLT y la ONU.
Wdm	Su función es la de actuar como un divisor óptico, aquí se implementa la parte de WDM de nuestra red híbrida, permitiendo separar los canales.

4.3.3 Módulo AWG

Este módulo lo que hace es dividir o separar la información que llega desde la OLT hacia las ONUs. En el sentido descendente se demultiplexan los canales que poseen varias longitudes de onda y son distribuidas para todas las ONUs. En el sentido ascendente en cambio realiza el proceso contrario, une y combina todos los paquetes, manteniendo el orden de llegada para ser enviados a la OLT. Entre los parámetros configurados tenemos las puertas que son tanto de entrada como de salida.



Figura 81. Módulo AwgDemux

4.3.4 Módulo ONU o Unidad de Red Óptica

Son el equipo final que se comunica con el usuario, soporta una gran variedad de interfaces, dependiendo de las necesidades de los clientes.

En el sentido ascendente la ONU maneja los datos que vienen del usuario para enviarlos a la OLT. En cambio, en el sentido descendente recibe los datos o requerimientos antes pedidos por el cliente.

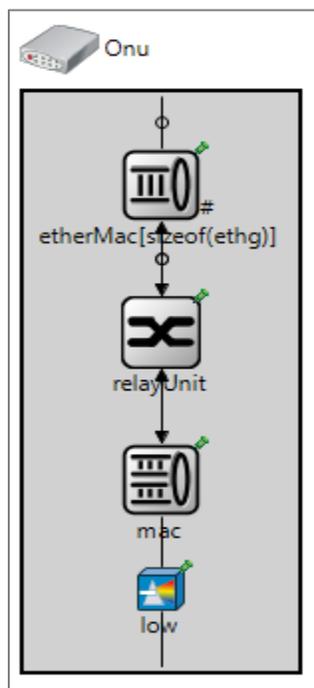


Figura 82: Módulo ONU, vista módulos simples

Tabla 30

Módulos simples que forman la ONU

Ether mac	Implementación de EtherMAC2 con manejo de pérdida de trama en txQueue
Relay Unit	Permite enviar / recibir tramas Ethernet, contiene una tabla para la dirección de destino se asignan puertos de salida. La tabla se actualiza con la dirección de origen cada vez que recibe una trama de datos y se asignan puertos de entrada. La información que provee la tabla es: dirección MAC hexadecimal y número de puerto decimal.
mac	En la variable queueSize se puede almacenar paquetes, se puede acceder a FIFO, los paquetes recibidos se ponen en cola, y se van almacenando hasta cuando estos llegan a una tasa más alta que la interfaz puede manejar.
low	Módulo simple que sirve como interface con el medio físico y con la capa PON

4.3.5 Modulo Host

Cuenta con los mismos módulos del Servidor, excepto que se ha eliminado el módulo pingApp.

Este módulo utiliza host IP con TCP, UDP en capas y aplicaciones.

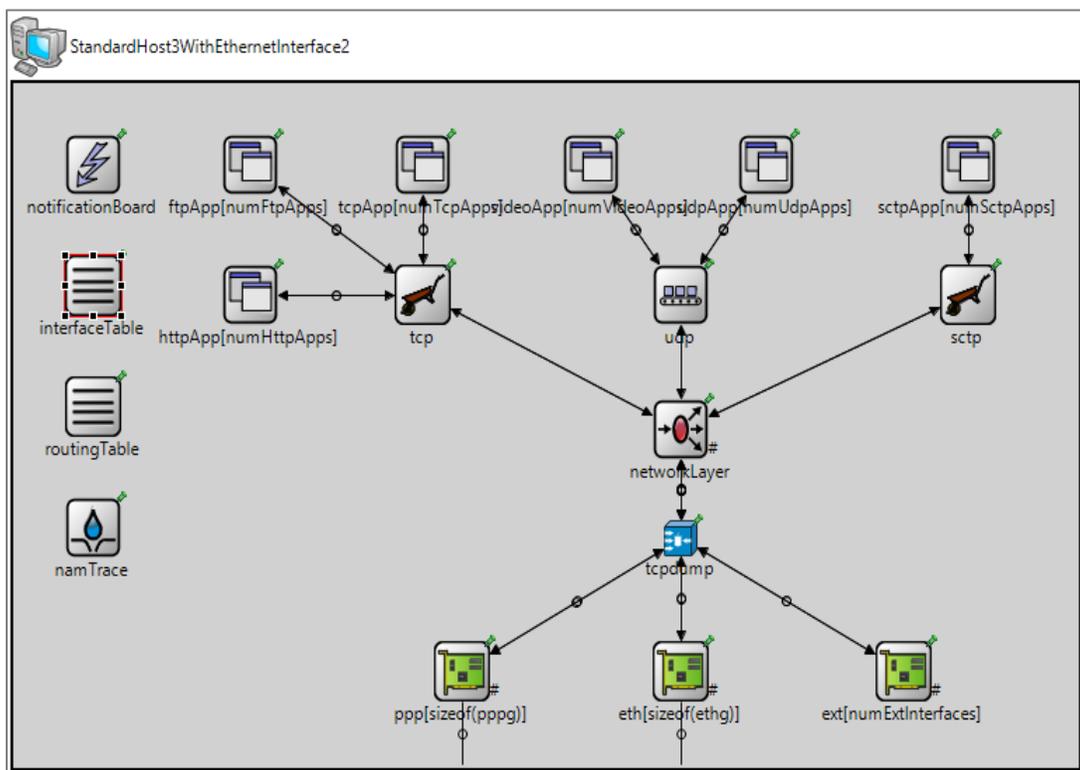


Figura 83. Módulo Host, vista de módulos simples y compuestos

4.3.6 Configuración del fichero omnetpp.ini

Antes de comenzar la simulación es necesario crear el archivo omnetpp.ini, en este archivo se configuran valores de parámetros que fueron creados, pero no se les asignó un valor específico.

Tabla 31

Configuración de parámetros de toda la red híbrida en el fichero omnetpp

numOnus, numHost	Se especifica el número de ONUs y de hosts que va a formar la red
Distance	Distancia del enlace de fibra óptica en Km
numUdpApps	Se puede configurar cualquier tipo de servicio sea voz, datos o video 1--Video 2—VoIP Se configura tanto para el cliente como para el servidor.

CONTINÚA



eth[*].mac.txrate	Aquí se configura la velocidad de transmisión de la capa MAC, en este caso se utilizó una velocidad de 10Gbps.
Config Stage 2-1	Esta configuración permite simular la red con el efecto no lineal SBS, como se vio en las simulaciones con OptSim la potencia umbral que limita la potencia de entrada es de 8mW.
Config Stage 2-2	Aquí se simula el efecto no lineal FWM, sabemos que con una frecuencia portadora de 0.4THz la señal se degrada.
Config Stage 3-DBA	Se implementa el algoritmo de asignación dinámico de ancho de banda DBA
Config Stage 4-IPACT	Se implementa el algoritmo de asignación dinámico de ancho de banda IPACT

4.3.7 Creación de ficheros .cc, .h y .msg

Tabla 32

Descripción ficheros .cc, .h., .msg

Fichero	Descripción
.cc	Utilizados para indicar el comportamiento y funcionalidad de la red, se describe el paso de un mensaje de un módulo a otro.
.h	Contiene las cabeceras de los métodos, aquí se especifican las variables estáticas como el tamaño del paquete, el tamaño del encabezado, etc.
.msg	Define la estructura del mensaje, se puede tener varios tipos de mensaje y añadirles campos de datos.

4.4 Simulación de la Red híbrida WDM/TDM-PON sin efectos de no linealidad, análisis de la calidad de servicio con OMNeT++

Tenemos nuestro escenario configurado, ahora se procede a realizar las simulaciones respectivas, en donde se analizará parámetros como: throughput, jitter y delay, parámetros importantes ya que indican calidad de servicio.

Tabla 33

Parámetros configurados en el archivo omnetpp.ini

Número de usuarios	16
Velocidad de transmisión del canal	100Mbps
Distancia	20 km
Potencia de Tx	1mW
Tipo de servicio	Video

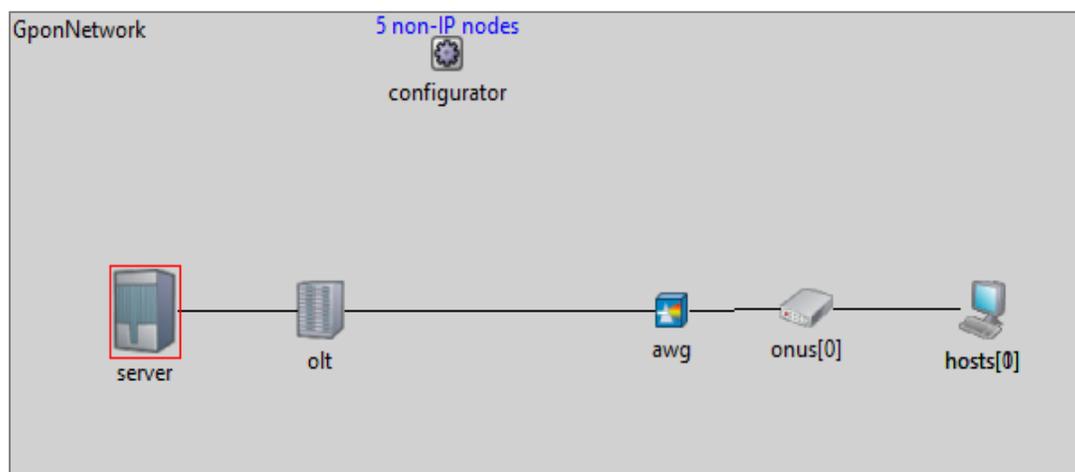


Figura 84. Escenario presentado al realizar la simulación en OMNeT++

a) Throughput

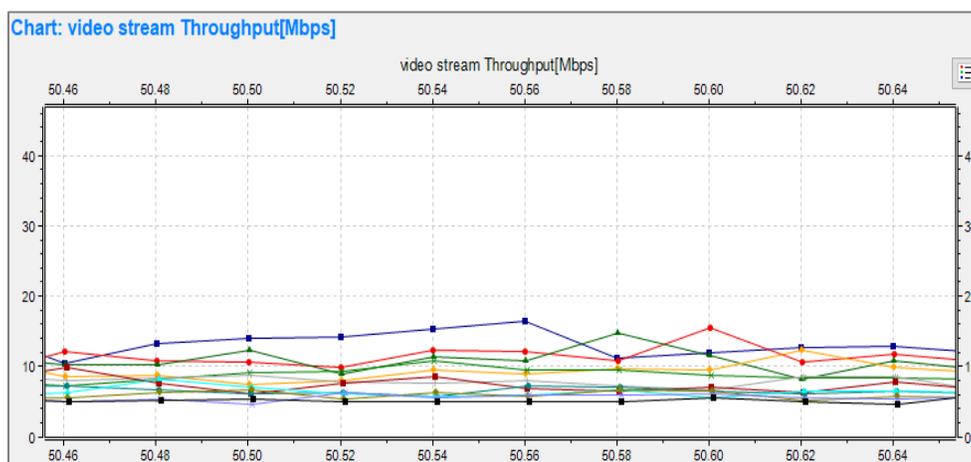


Figura 85. Throughput visto en cada usuario

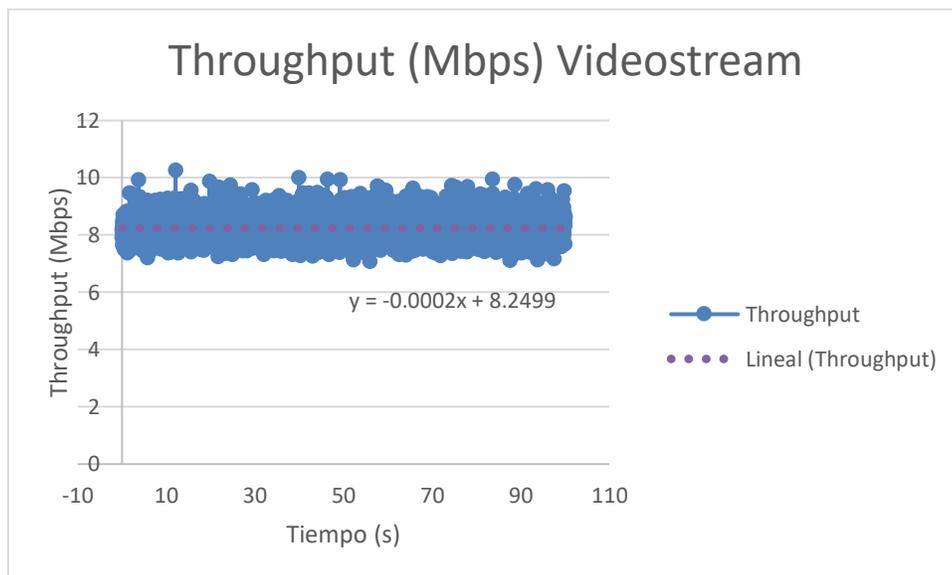


Figura 86. Throughput de toda la red

Como podemos observar en la figura 86 se tiene un throughput estable, con un valor promedio en toda la red para los 16 usuarios de 8,2Mbps. Hay que tomar en cuenta que no se puede llegar al máximo de la velocidad transmitida debido a varios factores como: pérdidas de inserción, pérdidas en el canal, atenuación óptica y otros efectos que se hacen presentes en la fibra óptica.

Pero este ancho de banda se mantiene constante para cada usuario, lo que nos lleva a concluir que la red híbrida diseñada cumple con el objetivo planteado que es brindar calidad de servicio, estabilidad y confiabilidad, debiéndose esto a que para cada usuario está destinada una longitud de onda, y no se tiene problemas de que en ciertas horas pico el ancho decae.

b) Jitter

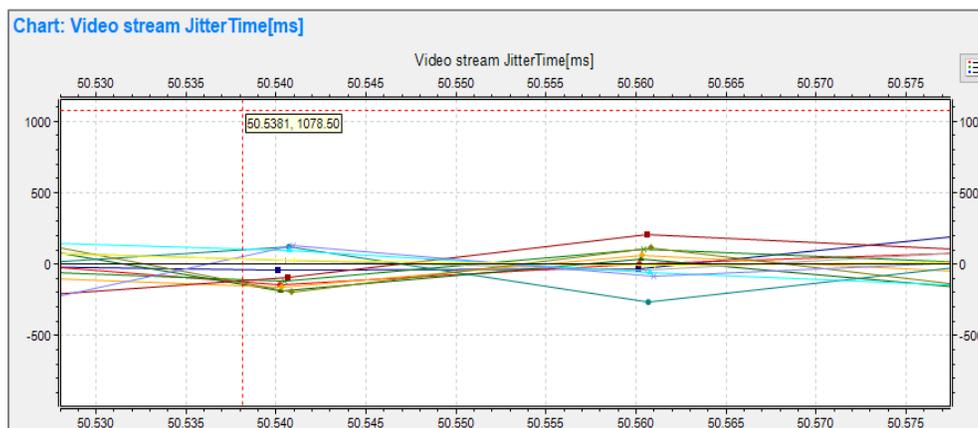


Figura 87. Jitter visto en cada usuario

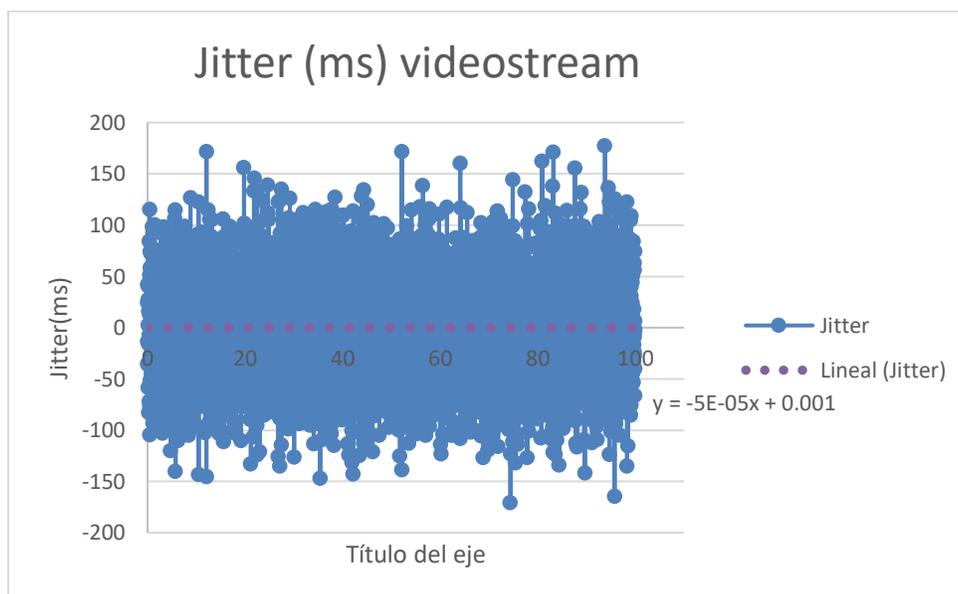


Figura 88. Jitter de toda la red

Se tiene un valor promedio de 0.001 ms, lo que da a entender que la calidad de video que se transmite es muy buena, no tiene retrasos, ni se entrecorta proporcionando al usuario un excelente servicio en lo que se refiere a videoconferencias, videos en vivo, transmisión de video en vivo, etc.

c) Delay

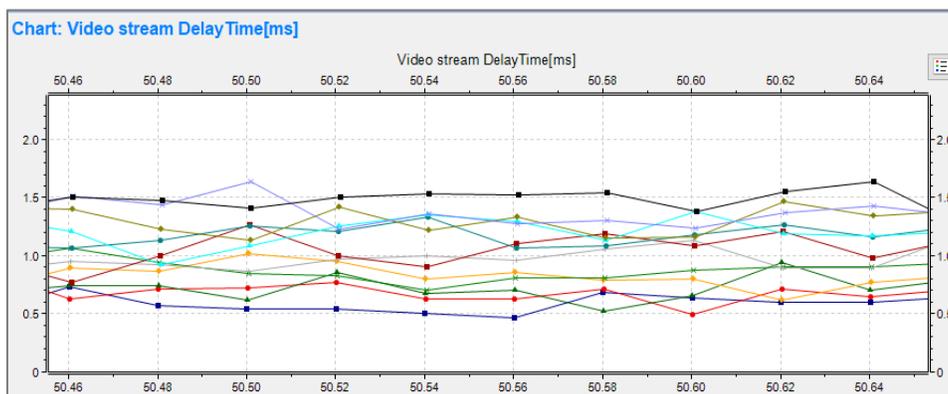


Figura 89. Delay visto en cada usuario

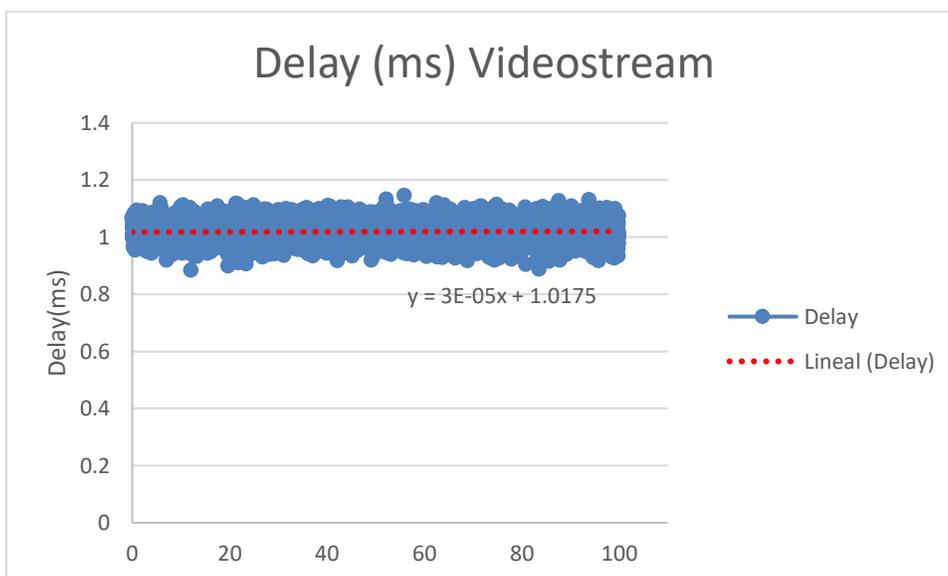


Figura 90. Delay de toda la red

Se tiene un retardo promedio de 1.01 ms, este retardo es bastante bajo, no afecta a la red.

De acuerdo con los datos observados si bien es cierto la red no alcanza el ancho de banda de 10Mbps establecidos teóricamente, brinda un throughput promedio de 8.2Mbps a toda la red, en cuanto al delay y jitter tenemos valores bastante bajos, por lo que se puede decir que cumple con la prioridad principal de una red que es ofrecer QoS al cliente, manteniendo un servicio ininterrumpido y cumpliendo con todas las demandas.

4.5 Simulación de la Red híbrida WDM/TDM-PON bajo el efecto no lineal causado por el Estimulado de Scattering SBS (Dispersión Estimulada de Brillouin).

a) Throughput

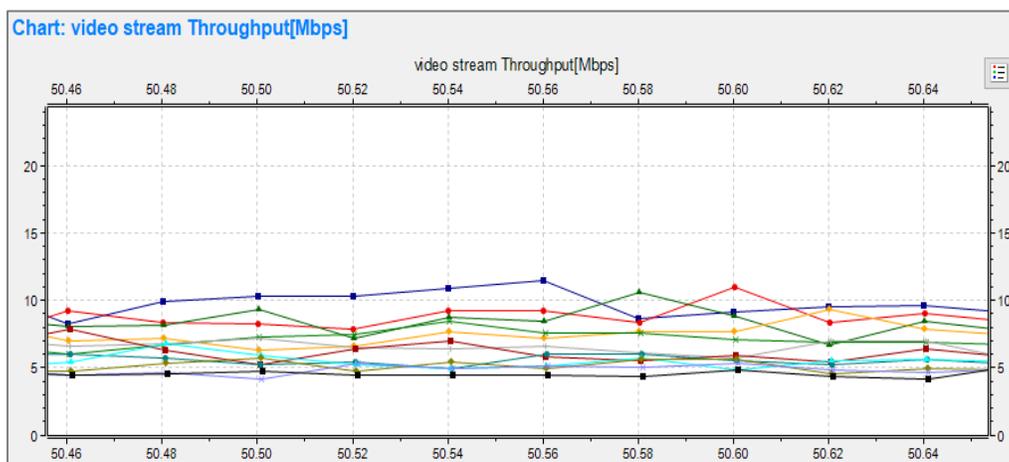


Figura 91. Throughput visto en cada usuario

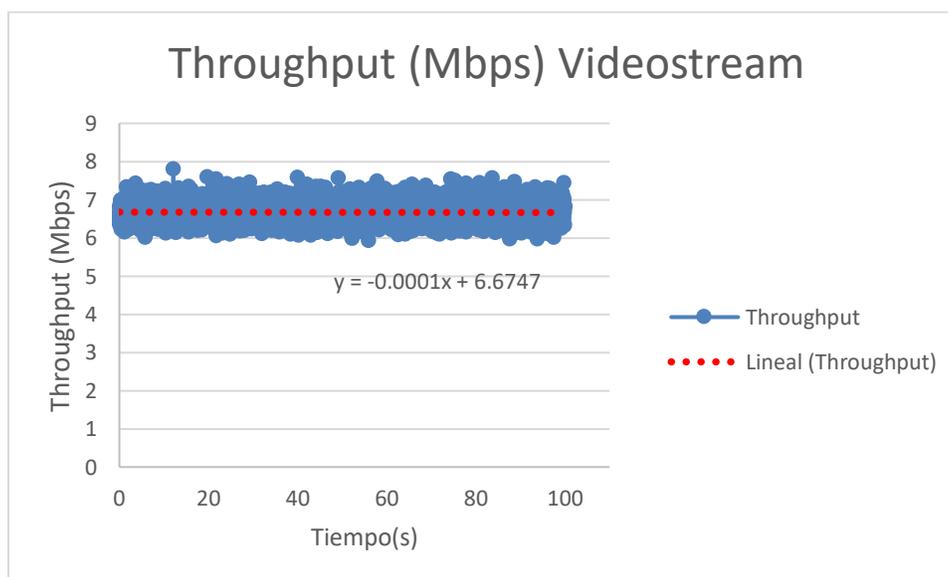


Figura 92. Throughput de toda la red

El throughput sigue manteniéndose estable, pero a diferencia del anterior escenario, decayó en 2 Mbps, observamos que el efecto no lineal SBS si repercute en el throughput, dando una pérdida considerable del ancho de banda, pero aun si la red es funcional.

b) Jitter

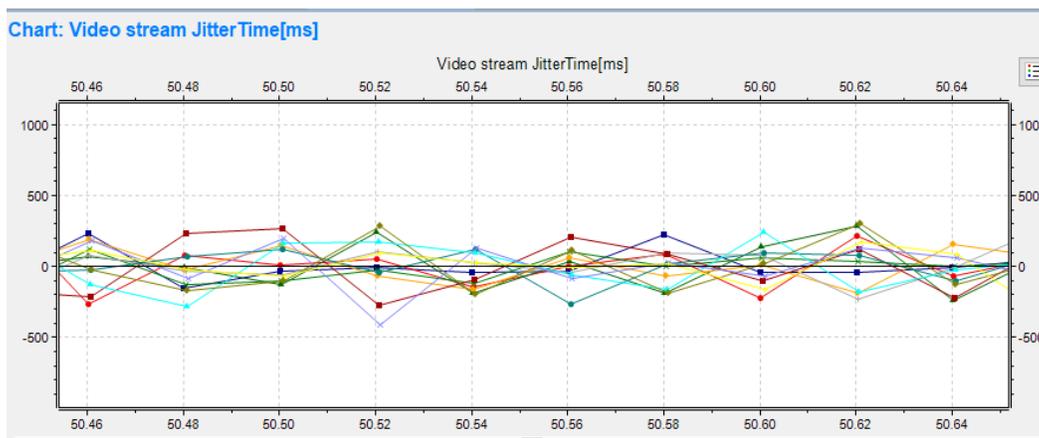


Figura 93. Jitter visto en cada usuario

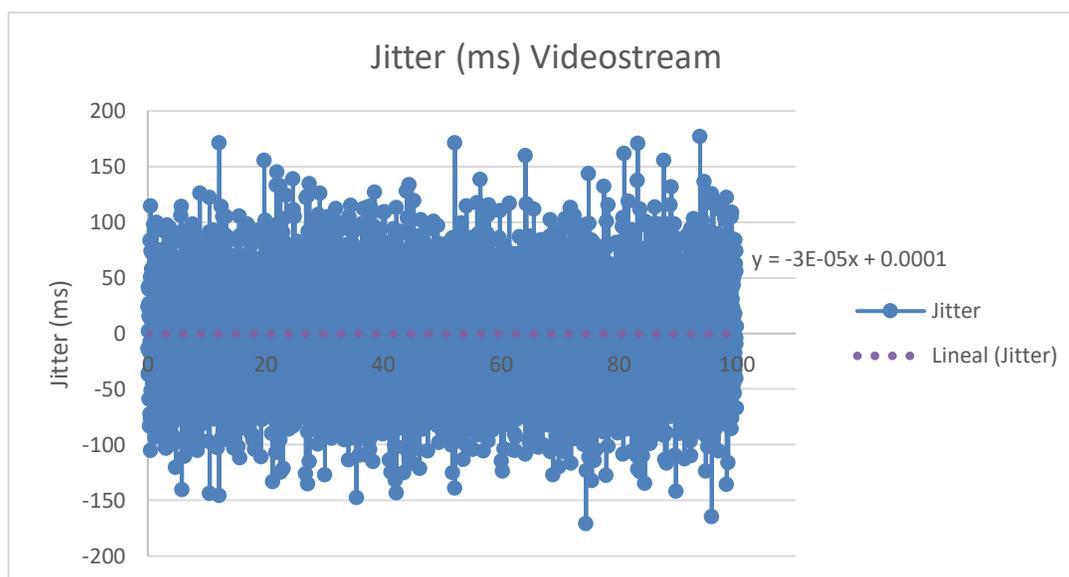


Figura 94. Jitter de toda la red

El jitter se encuentra en un valor de 0, este parámetro no afecta a las aplicaciones que utilizan video streaming, ya que en las ONUs los paquetes son ordenados antes de su uso.

c) Delay

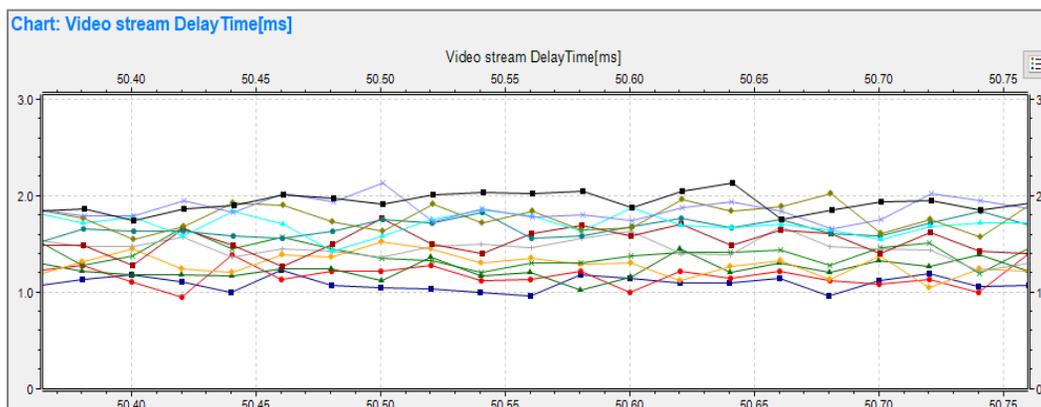


Figura 95. Delay visto en cada usuario

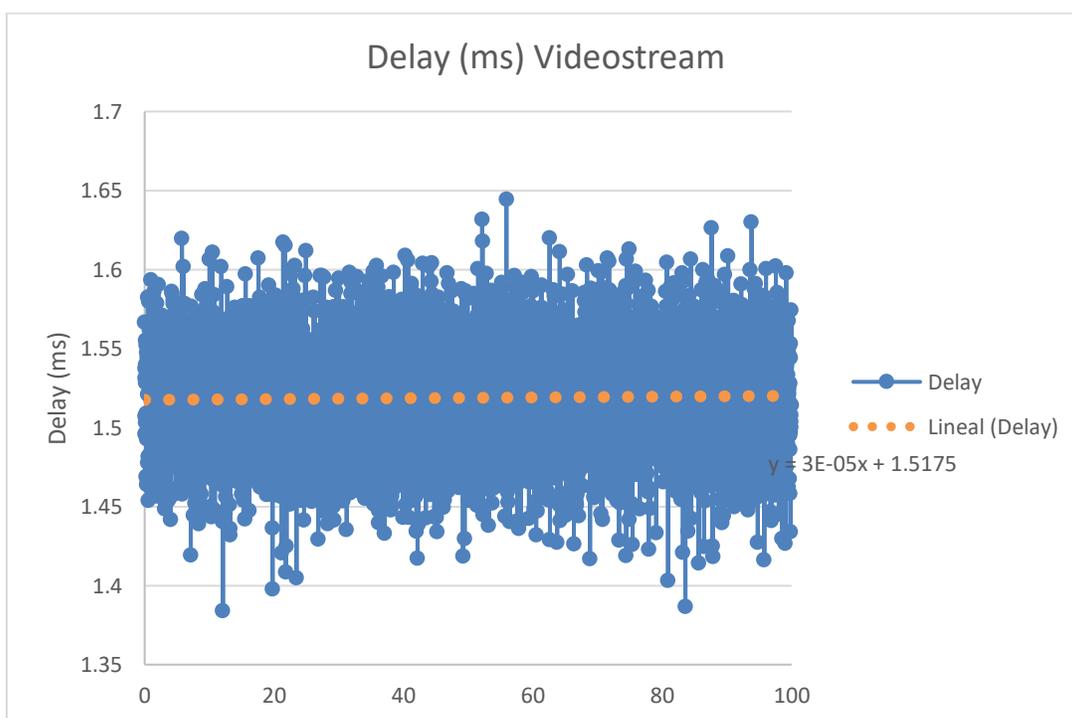


Figura 96. Delay de toda la red

En cuanto al delay tenemos un valor promedio de 1.51 ms, valor que se encuentra en el rango aceptable para transmitir una buena calidad de video.

Cuando interfiere el efecto no lineal SBS se observa que provoca una caída del ancho de banda, se tiene un throughput promedio de 6.67 Mbps en comparación con el escenario general donde se tiene un throughput promedio de 8.2 Mbps, también se observa un leve aumento en el delay. De

acuerdo con los valores obtenidos en OptSim se sabe que este efecto tiene una potencia crítica que afecta a la señal, esta potencia tiene un valor de 10mW.

4.6 Simulación de la Red híbrida WDM/TDM-PON bajo el efecto no lineal causado por el índice de refracción FWM (Mezclado de cuatro ondas)

a) Throughput

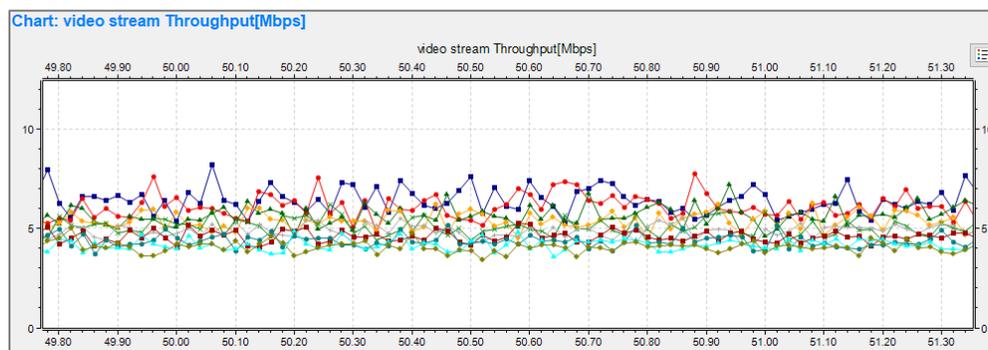


Figura 97. Throughput visto en cada usuario

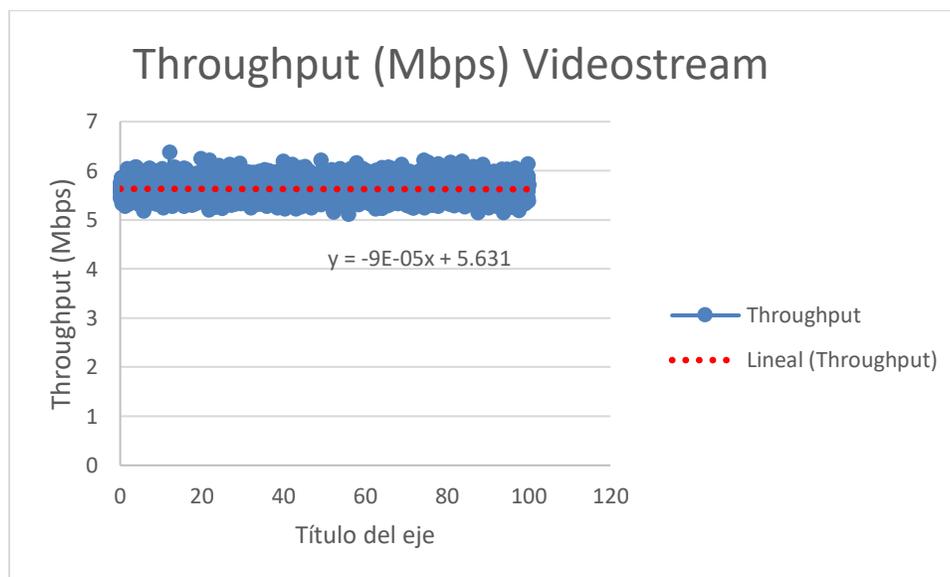


Figura 98: Throughput de toda la red

Comparado con el escenario original, aquí el ancho de banda ha decaído en 3Mbps, teniendo una media de 5.63Mbps.

b) Jitter

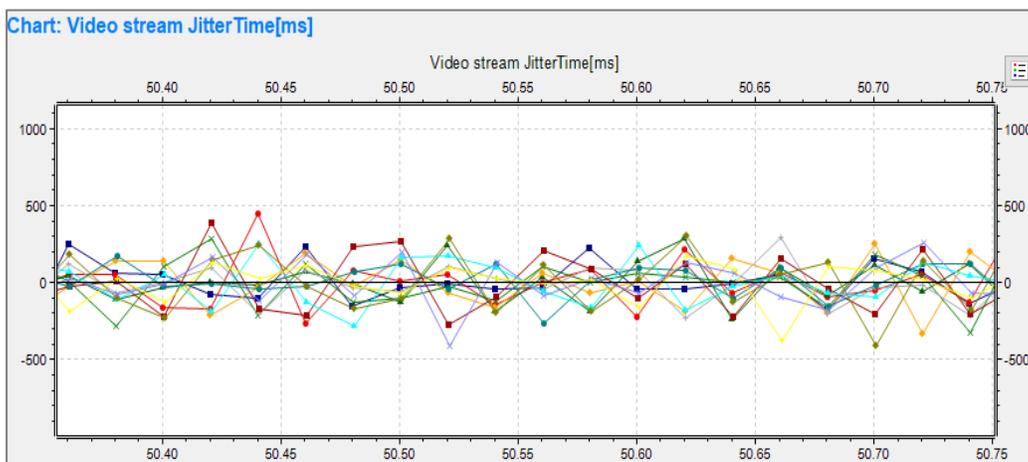


Figura 99. Jitter visto en cada usuario

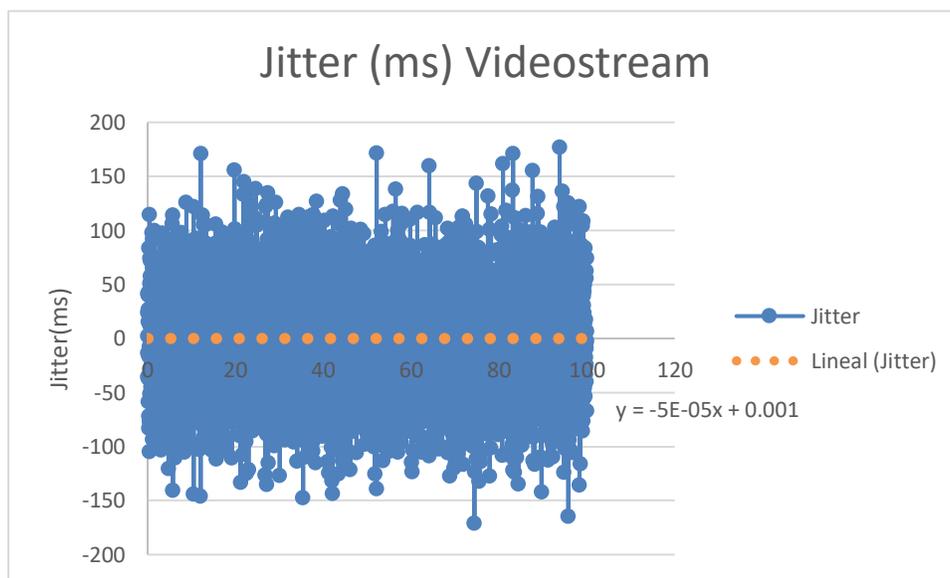


Figura 100. Jitter de toda la red

El jitter presentado es de 0,001 ms, prácticamente no existe, se observa que este parámetro no es afectado por el efecto no lineal FWM.

c) Delay

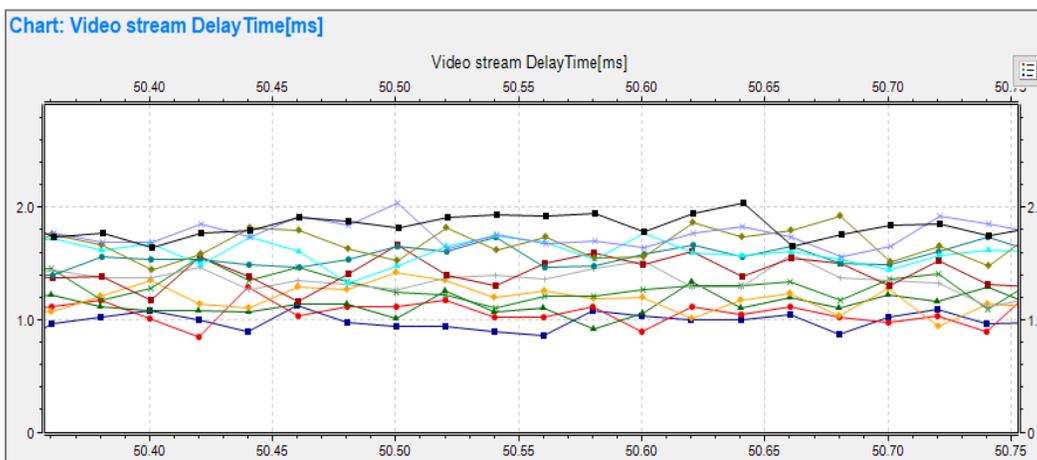


Figura 101. Delay visto en cada usuario

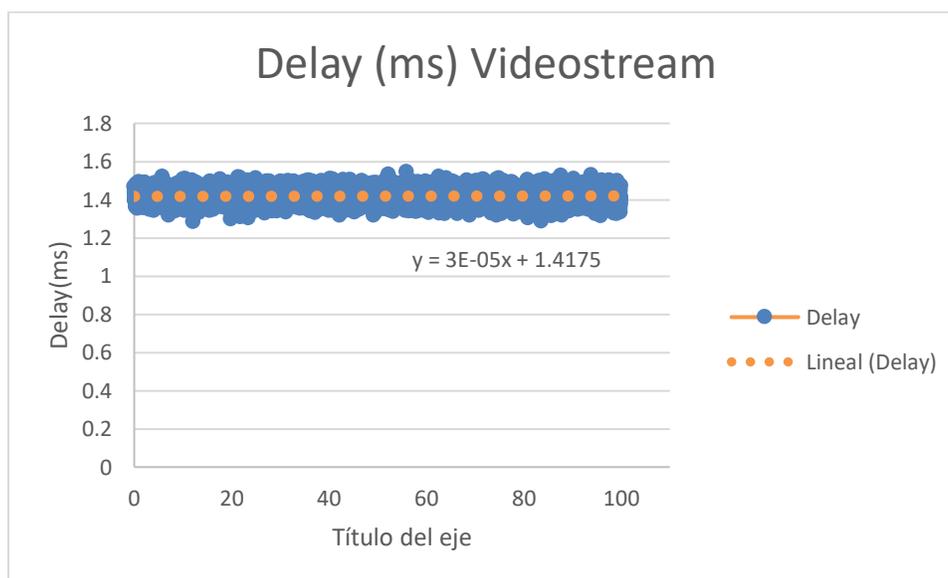


Figura 102. Delay de toda la red

Presenta un delay no tan alto, promedio de 1,41ms, que es aceptable cuando se tiene aplicaciones que utilizan video streaming.

El efecto no lineal FWM incide en el ancho de banda, en este caso se vio disminuido en 3Mbps, tomando en cuenta las simulaciones realizadas con OptSim, el efecto no lineal FWM posee una frecuencia portadora que al alcanzar cierto valor provoca una degradación de la señal transmitida,

el valor de esta frecuencia fue de 0.3THz, comprobando que este efecto perjudica directamente al throughput de la red.

4.7 Simulación de la Red hibrida WDM/TDM-PON usando algoritmo de asignación dinámico de ancho de banda DBA

a) Throughput

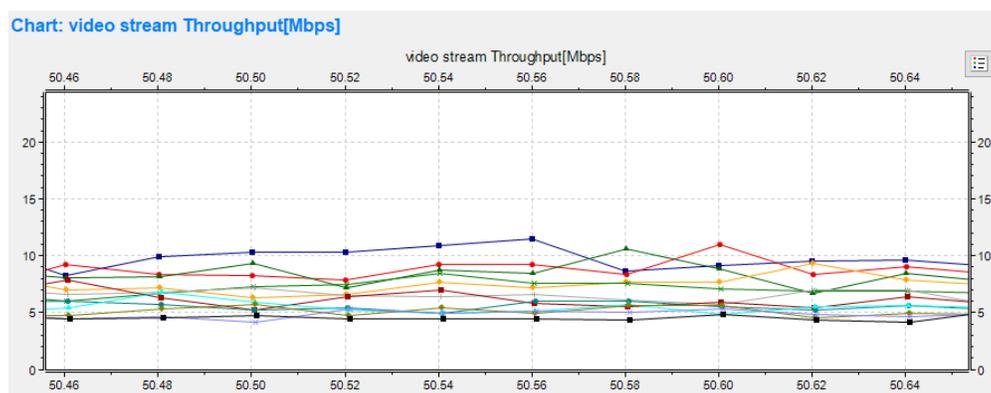


Figura 103. Throughput visto en cada usuario

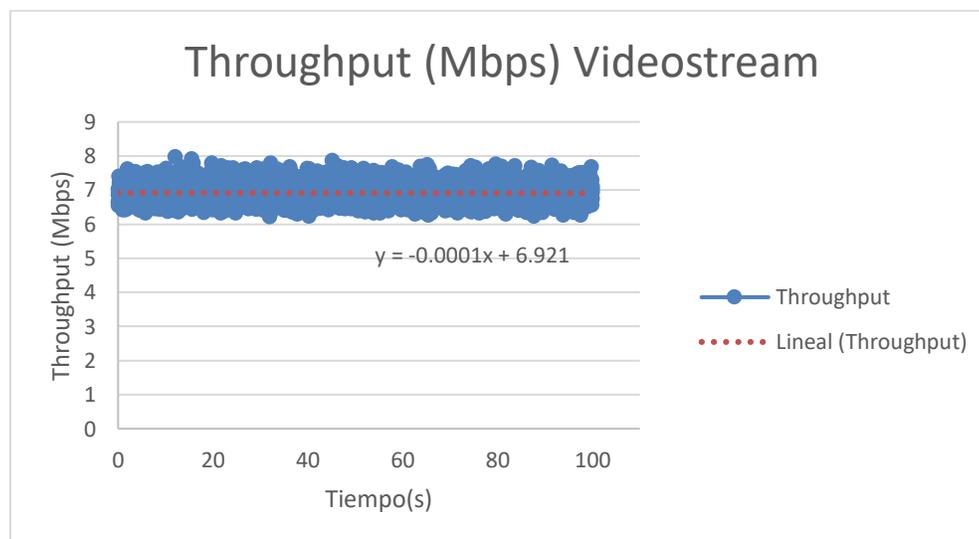


Figura 104. Throughput de toda la red

Los algoritmos de distribución dinámica permiten optimizar el ancho de banda y así brindar QoS, aquí se observa que el ancho de banda es distribuido dependiendo del requerimiento del usuario, es decir si el usuario 1 pide más ancho de banda, se le concederá, y así sucesivamente con

los demás usuarios, esto se puede observar en la figura 105, donde cada usuario tiene asignado un ancho de banda diferente.

General : #0	
GponNetwork.hosts[0].udpApp[0]	
video stream Throughput[Mbps] (vector)	9.87234833464973 (4999)
GponNetwork.hosts[1].udpApp[0]	
video stream Throughput[Mbps] (vector)	8.932384586207242 (4999)
GponNetwork.hosts[2].udpApp[0]	
video stream Throughput[Mbps] (vector)	8.17301965589058 (4999)
GponNetwork.hosts[3].udpApp[0]	
video stream Throughput[Mbps] (vector)	7.525645156143229 (4999)
GponNetwork.hosts[4].udpApp[0]	
video stream Throughput[Mbps] (vector)	6.988778384962592 (4999)
GponNetwork.hosts[5].udpApp[0]	
video stream Throughput[Mbps] (vector)	6.530187570713343 (4999)
GponNetwork.hosts[6].udpApp[0]	
video stream Throughput[Mbps] (vector)	6.1120841316087215 (4999)
GponNetwork.hosts[7].udpApp[0]	
video stream Throughput[Mbps] (vector)	5.756808681572714 (4999)

Figura 105. Asignación dinámica de ancho de banda, red sin efectos no lineales

b) Jitter

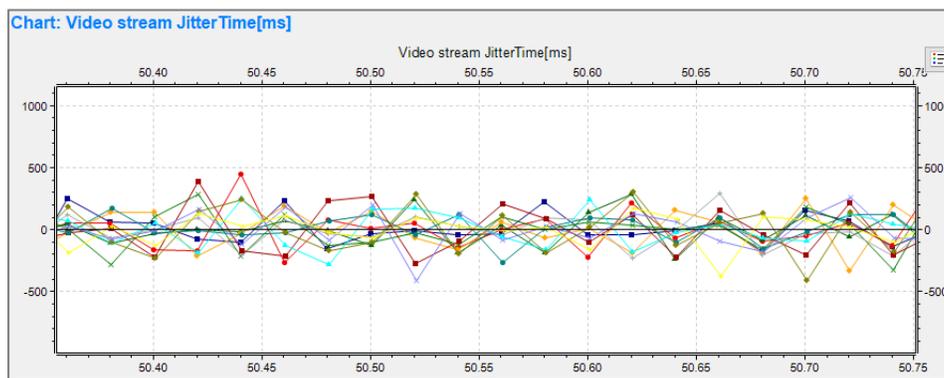


Figura 106. Jitter visto en cada usuario

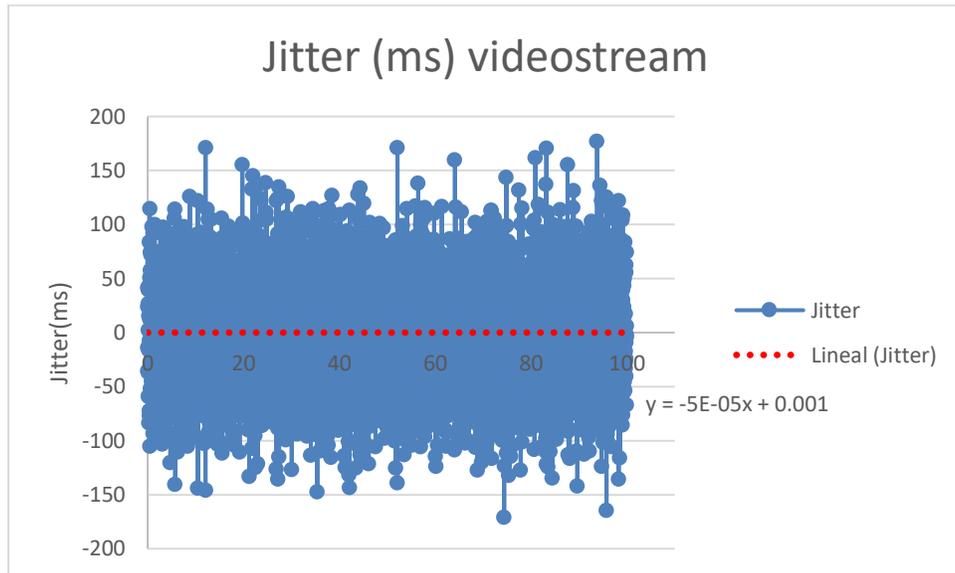


Figura 107. Jitter de toda la red

No se tiene jitter, como se puede ver el valor promedio es de 0.001ms.

c) Delay

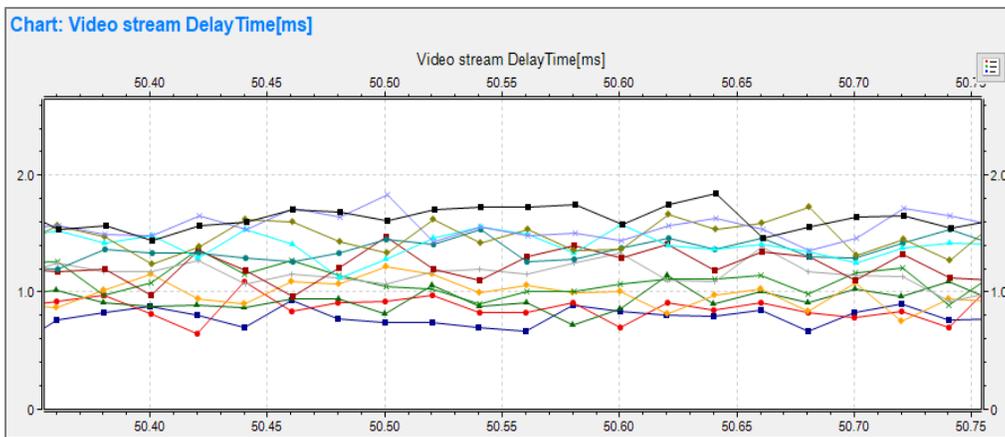


Figura 108. Delay visto en cada usuario

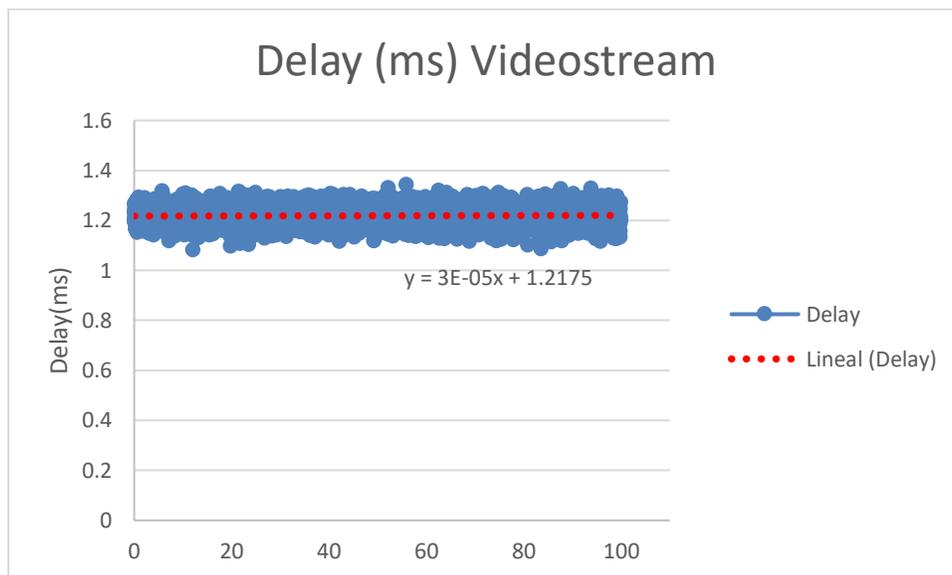


Figura 109. Delay de toda la red

Se tiene un delay promedio de 1.21 ms, lo cual es aceptable, no afecta a la red y por lo tanto no afecta a la calidad de servicio.

4.8 Simulación de la Red híbrida WDM/TDM-PON usando esquema de asignación dinámico de ancho de banda IPACT

a) Throughput

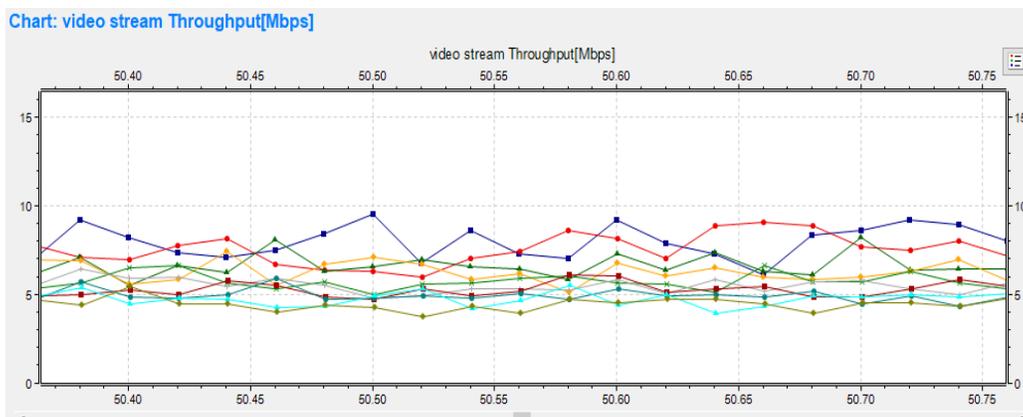


Figura 110. Throughput visto en cada usuario

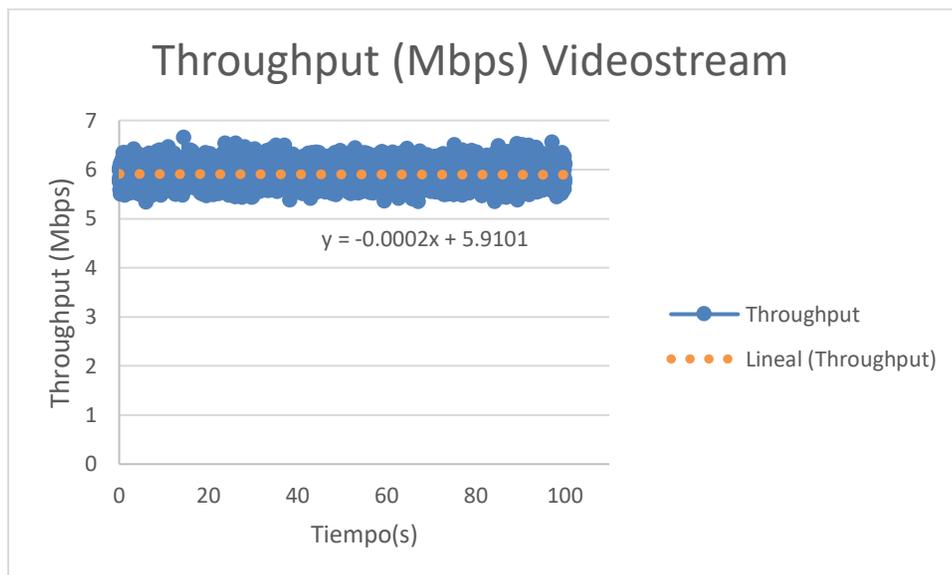


Figura 111. Throughput de toda la red

Se observa que el throughput asignado es igual para todos los usuarios ya que el servicio que está solicitando la ONU es videostream.

b) Jitter

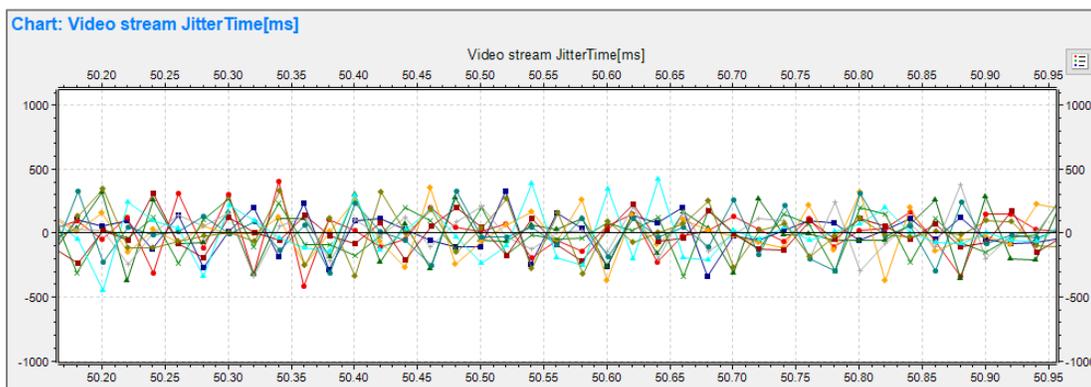


Figura 112. Jitter visto en cada usuario

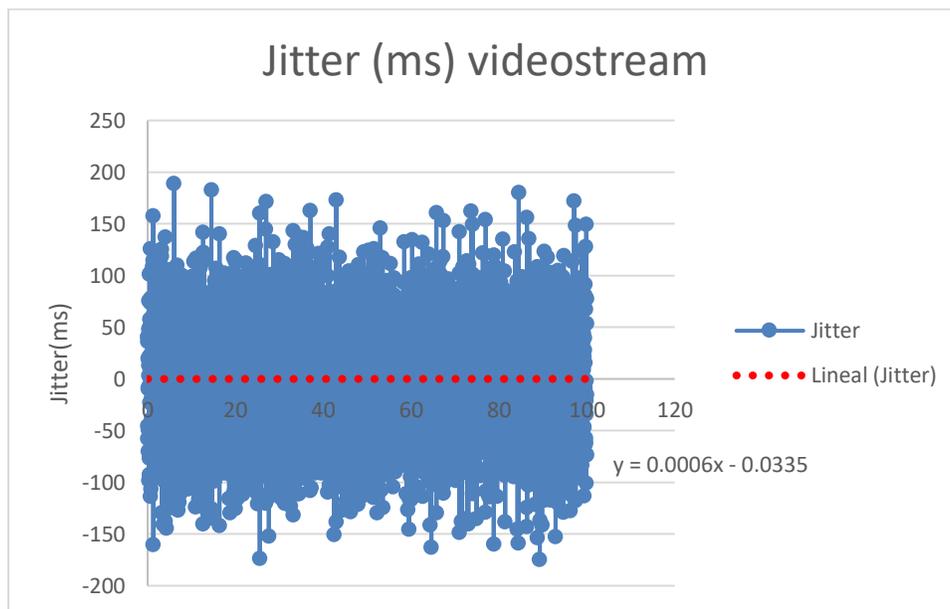


Figura 113. Jitter de toda la red

No existe jitter en la red lo que nos da a entender que la red brindara el soporte necesario a cada usuario.

c) Delay

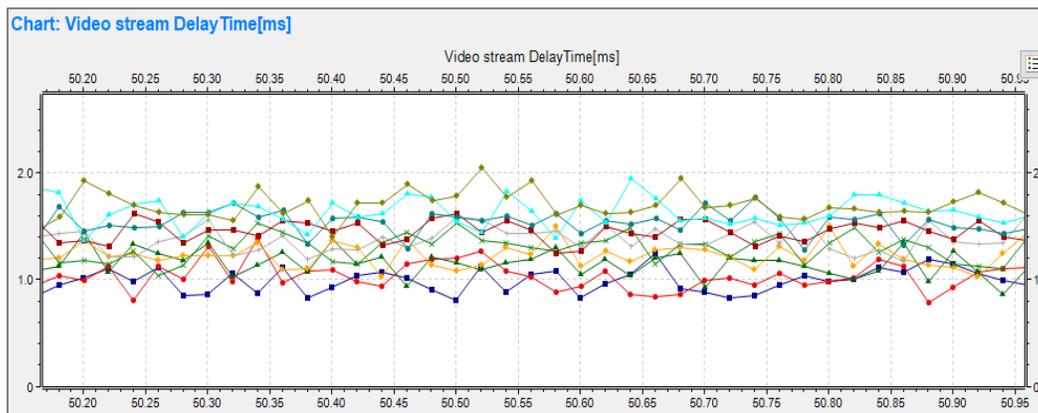


Figura 114. Delay visto en cada usuario

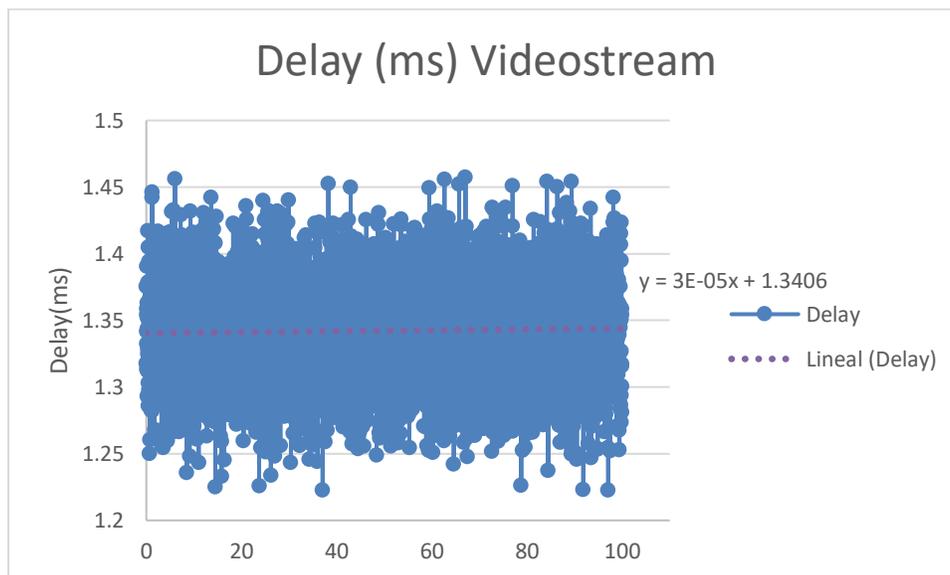


Figura 115. Delay de toda la red

Con todos los datos obtenidos se realizará la comparación entre los dos esquemas de distribución de ancho de banda.

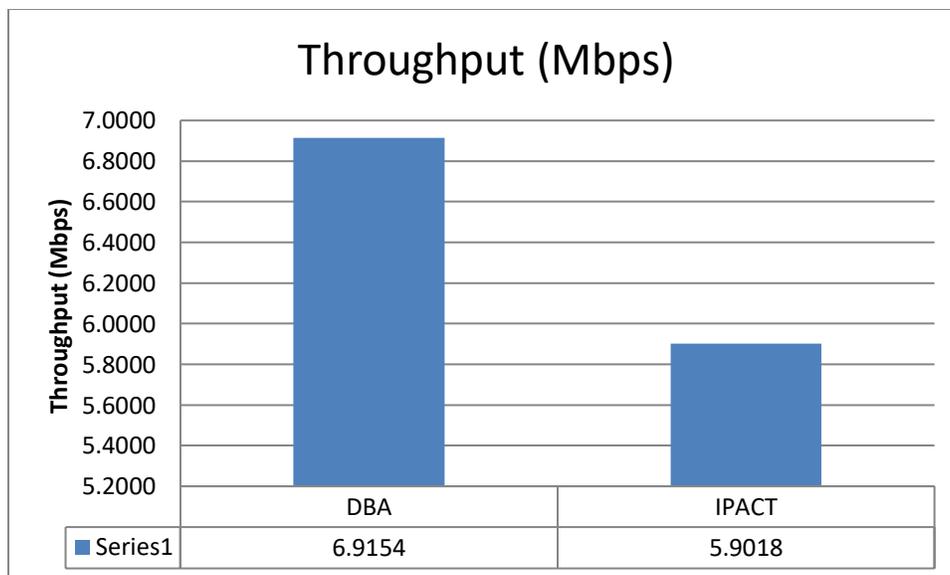


Figura 116: Comparación de Throughput algoritmo DBA e IPACT

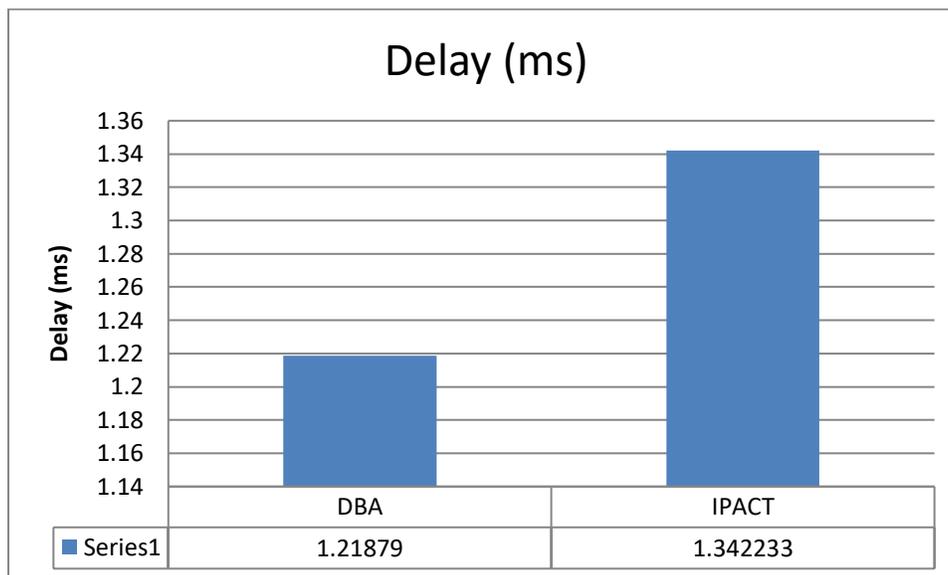


Figura 117. Comparación del Delay algoritmo DBA e IPACT

El mejor throughput obtenido es con el esquema DBA, este también disminuye del retardo, brindando calidad de servicio a la red QoS y cumpliendo con los requerimientos del usuario.

El esquema DBA presenta un mayor rendimiento y hace distinción de los requerimientos del usuario, por otro lado IPACT no toma en cuenta la clase de servicio, lo que significa que no proporciona calidad de servicio.

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

El uso diario de redes sociales, servicios de streaming, juegos en línea, servicios en línea, la necesidad de tener una alta capacidad de transferencia de datos, etc., permitió llegar a la conclusión de que el uso de redes híbridas es necesario para cumplir con el requerimiento de QoS por parte de los usuarios, la red híbrida WDM-TDM/PON toma lo mejor de las redes WDM-PON y de las redes TDM-PON, como su escalabilidad, el aumento de usuarios, bajos costos.

Como usuarios exigimos que los servicios que prestan los municipios o el gobierno sean cada vez más rápidos y fiables, como el transporte, área de salud, servicios de pago y demás, para atender todas estas necesidades se crean las Ciudades Inteligentes, su objetivo es recolectar datos en tiempo real para mejorar estos servicios, de ahí parte la importancia de realizar un correcto despliegue de la red híbrida WDM-TDM/PON, que mediante el análisis y desarrollo de un método heurístico enfocado a la clusterización nos dará una posible solución para la mejor distribución de sus componentes ópticos tratando de brindar conectividad a todos los usuarios y dando una pauta para el desarrollo de Smart City.

Realizando una comparación entre los tiempos y mejor distribución de los datos se pudo apreciar que el método K-means es mucho mejor que Voronoi-Clúster, en cuanto a implementación el algoritmo K-means es más simple y eficaz.

En cuanto al análisis del comportamiento de la red híbrida WDM-TDM/PON cabe destacar que el uso de OptSim fue necesario, se pudo observar cuales son las limitaciones en la capa física, siendo estos datos de gran ayuda al momento de implementar los módulos y funciones en OMNeT++, este simulador de redes facilito analizar el desempeño de la red híbrida, arrojando

datos en función de los parámetros de calidad de servicio: Throughput, retardo y Jitter. El efecto no lineal FWM causo un mayor impacto en el throughput de la red comparado con el efecto no lineal SBS, por este motivo se debe tomar muy en cuenta los efectos que inciden en la fibra óptica.

Para cumplir con los requerimientos de calidad de servicio QoS es necesario tomar en cuenta que hay varios factores que afectan a estos parámetros e influyen en el desempeño de la red, uno de estos factores es el algoritmo empleado para la creación de varios módulos en OMNeT++, que fueron utilizados para crear la red híbrida, otro factor que puede influir es el tiempo de transmisión, el tiempo de respuesta a los mensajes Request, el tiempo de espera en las colas, el tiempo de encapsulado, la distancia entre la OLT y la ONU, la potencia de transmisión, etc.

Los esquemas de distribución dinámico de ancho de banda toman en cuenta el tipo de servicio que los usuarios solicitan, brindando un mayor ancho de banda a quien lo requiera, permitiendo optimizar el uso del ancho de banda.

Entre los limitantes que se puede encontrar al utilizar redes híbridas se podría comenzar indicando que tienen un costo elevado, los componentes pasivos son costosos, pero por otro lado deberíamos pensar en el beneficio que presentaría, se optimizaría la movilidad, seguridad y demás servicios que mejorarían en gran escala la calidad de vida de las personas.

5.2 Recomendaciones

El método de Voronoi-clúster no mostro resultados óptimos, pero es imprescindible el estudio de otros métodos que se basan en el diagrama de Voronoi, como Voronoi en base a sus bordes o en base a sus vértices.

Analizar que incidencia tienen los demás efectos no lineales causados por el índice de refracción y los efectos no lineales causados por el Estimulado de Scattering sobre la calidad de servicio de una red.

Implementar esquemas de distribución dinámico de ancho de banda que tomen en cuenta QoS de la red.

Estudiar otras topologías de redes híbridas que podrían utilizarse para ser implementadas en una ciudad inteligente, tomando en cuenta costos, facilidad de implementación, desempeño de la red.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agrawal, G. (2002). *Fiber Optic Communication Systems*. New York: Wiley-Interscience.
- Amoroso, M. (2015). Aplicación de las técnicas de agrupamiento para la distribución cuasi-óptima de una red híbrida WDM-TDM/PON en cascada multinivel que da soporte a una Smart Grid o Smart City. Cuenca.
- Asensi, J. (2011). Design of passive optical network. Valencia, España.
- Azadeh, M. (2009). *Fiber optics engineering*. Springer.
- Boyd, R. (2008). *Nonlinear Optics*. USA: Academic Press.
- Castaño, D., & Fernandez, F. (2012). Tecnología de comunicaciones ópticas a 40 y 100 Gbps. *Revista en telecomunicaciones e informática*, 2-4.
- Chomycz, B. (2009). *Planning fiber optic networks*. New York: McGraw-Hill.
- Dixit, A., Lannoo, B., Das, G., Colle, D., Pickavet, M., & Demeester, P. (2011). Evaluation of flexibility in hybrid WDM/TDM-PON. Gent, Belgica.
- Effigis*. (2015). Recuperado el Enero de 2017, de <http://effigis.com/es/la-ciudad-inteligente-y-la-importancia-del-donde/>
- Ferreira, A. (2005). Técnicas de interpolación espacial utilizadas en la evaluación de reservas geológicas.
- FibreMex. (2015). *FibreMex*. Recuperado el 11 de Enero de 2018, de <https://fibremex.com/fibraoptica/index.php>
- Gallardo. (2012). *Universidad de Granada*. Recuperado el 10 de Marzo de 2017, de Programa de teoría: 3º Diplomatura de Estadística: <https://www.ugr.es/~gallardo/pdf/cluster-1.pdf>
- Gomariz, F. (2013). Distribución espacial: interpolación espacial.

- Gómez, F., Puerto, K., & Guevara, D. (2015). The optical fiber and the nonlinear phenomenon fourth wave mixing. *Mundo FESC*, 43-59.
- Guano, H. (2013). Estudio y simulación de los efectos no lineales Scattering Estimulado de Brillouin (SBS) y Scattring Estimulado de Raman (SRS). Quito.
- Guano, H., Molina, P., & M., J. (2014). Estudio y simulación de los efectos no lineales Scattering Estimulado de Brillouin (SBS) y Scattering Estimulado de Raman (SRS) en una Fibra Óptica Monomodo. *Revista EPN*, 1-3.
- Guo, Y., Kao, C., & Chiang, K. (2002). *Nonlinear photonics: Nonlinearities in optics, optoelectronics and Fiber Communications*. Berlin: Springer-Verlag Berlin and Heidelberg GmbH & Co. KG.
- Gutierrez, V., Espinosa, D., & Hernández, C. (2011). Impacto y masificación del uso de las redes GPON en Colombia frente a otras tecnologías. Colombia.
- Hussain, N. (2014). A survey/ Development of passive optical access network technologies. Baghdad, Iraq.
- Hussian, S., & Fernando, X. (2008). EPON: an extensive review for up-to-date dynamic bandwidth allocation schemes. Canada.
- Isaza, J. (8 de Marzo de 2016). *bienpensado*. Recuperado el febrero de 2017, de <http://bienpensado.com/que-es-el-internet-de-las-cosas/>
- Jain, A., & Dubes, R. (1988). *Algorithms for clustering data*. New Jersey: Prentice Hall.
- Jana, P. (2013). Developing algorithms for clustering biological data. India.
- Lopez, J., Toledo, A., Ordoñez, H., & Agredo, J. (Octubre de 2011). Efectos no lineales y su relación con los parámetros de transmisión de una red WDM.
- Marinai, S., & Dengel, A. (2004). *Document analysis systems VI*. Florencia: Springer.

- Martinez, U. (2015). Aplicación de la geometría computacional en la reconstrucción 3D basada en diagramas de Voronoi. Puebla, México.
- Medina, C., Pérez, M., & Trujillo, L. (2017). IoT paradigm into the Smart City vision: a survey. Bogotá, Colombia.
- Moncayo, J. (2016). Análisis y diseño para la unificación activa y pasiva de redes de acceso para servicio de telecomunicaciones de múltiples operadores. Guayaquil, Ecuador.
- Moreno, M. (2008). Estudio técnico económico de factibilidad para el diseño de redes PON y GPON. Quito, Ecuador.
- OpenSim Ltd. (2001). *OMNet++ Discrete Event Simulator*. Recuperado el 2 de Agosto de 2017, de <https://omnetpp.org/intro/>
- Osorio, J., & Gonzalez, J. (2015). Configuración dinámica de canales ascendentes y descendentes en una red de acceso WDM-PON. Bogota, Colombia.
- Pascual, D. P., & Sánchez, S. (2007). Algoritmos de agrupamiento. Cuba.
- Pereda, J. M. (2004). *Sistemas de redes ópticas de comunicaciones*. Madrid: Prentice Hall.
- Pérez, J., Hidalgo, M., Almanza, N., Castro, N., López, V., Estrada, H., & Mexicano, A. (2014). Mejora del algoritmo K-means mediante una meta-heurística orientada a la reducción de su complejidad computacional. México.
- Proaño, V. (Mayo de 2015). Analizar y simular los efectos no lineales causados por el fenómeno de índice de refracción en la capa física en una red PON de nueva generación. Quito, Ecuador.
- Puerres, A., & Salazar, D. (2015). Estudio y simulación de los efectos no lineales Modulación Cruzada de Fase(XPM) y Mezcla de Cuatro Longitudes de Onda (FWM). Quito.

- Puerres, A., Salazar, D., & Jiménez, M. (2016). Estudio y simulación de los efectos no Lineales Modulación Cruzada de Fase (XPM) y Mezcla de Cuatro Ondas (FWM) en una Fibra Óptica Monomodo. Quito.
- Reddy, D. (Abril de 2013). *Developing algorithms for clustering biological data*.
- Ru Lai, J., & Chen, W. (2015). High utilization dynamic bandwidth allocation algorithm based on sorting report messages with additive-polling thresholds in EPONs. Taiwan.
- Singh, S., & Singh, N. (2007). Nonlinear effects in optical fibers: origin, management and applications. India.
- STUDYLIB. (2016). *Trabajos y Tareas*. Recuperado el 12 de Junio de 2017, de 8.Agrupamiento (clustering): <https://studylib.es/doc/5596870/8.-agrupamiento--clustering->
- Supe, A. (2011). Comparison of different FWM realization methods in optical fiber. Riga.
- Tan, P., Steinbach, M., & Kumar, V. (2006). *Introduction to data mining*. New York: Pearson Addison Wesley.
- Tello, D. (2016). Análisis de técnicas de monitorización en redes ópticas pasivas (PON) y desarrollos en la monitorización con radiofrecuencia en redes WDM-PON. España.
- Unión Internacional de Telecomunicaciones ITU. (2008). *Unión Internacional de Telecomunicaciones ITU*. Recuperado el 15 de 04 de 2017, de <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.983.4/es>
- Vasquez, J. L. (Noviembre de 2009). Estudio de las redes ópticas pasivas de banda ancha (BPON) y sus posibles aplicaciones en el país. Quito, Ecuador.
- Velasquez, J. (2014). Analysis of performances and tolerances of the second generation passive optical networks (NG-PON2) for FTTH systems. España.

Zhang, J., & Ansar, N. (2011). Scheduling hybrid WDM/TDM passive optical networks with convex laser tuning time. China.