

**INCIDENCIA A NIVEL FÍSICO DE LA TÉCNICA DE MODULACIÓN M-QAM SOBRE UN
MODULO RoF EN UNA RED FTTH-GPON**

ANEXOS



**JULIAN ANDRÉS DUYSOVIC GARCÍA
ERNESTO CAMILO UNIGARRO SANTACRUZ**

Trabajo de Grado para optar al título de:

INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

Director:

PhD. José Giovanni López Perafán

**Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Popayán, Cauca
2021**

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A. DEMOSTRACIÓN MATEMÁTICA DE LA PROBABILIDAD DE ERROR DE SÍMBOLO ASOCIADA A UN SISTEMA M-QAM MODELADO CON UN CANAL AWGN....	1
ANEXO B. CONSIDERACIONES BÁSICAS DE LOS SISTEMAS MÓVILES 5G RELEVANTES EN LA INVESTIGACIÓN	7
ANEXO C. RELACIÓN ENTRE LA MAGNITUD DEL VECTOR DE ERROR (EVM) Y LA BER PARA SISTEMAS M-QAM	12
ANEXO D. RESULTADOS OBTENIDOS EN TÉRMINOS DE EVM, BER Y POTENCIA EN LA RED RoF CONFIGURADA MEDIANTE UNA TOPOLOGÍA PUNTO A MULTIPUNTO	14
ANEXO E. RESULTADOS OBTENIDOS EN TÉRMINOS DE OPM EN LA RED FTTH-GPON QUAD PLAY PARA VARIAS ONTS.....	22
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	34

ANEXO A. DEMOSTRACIÓN MATEMÁTICA DE LA PROBABILIDAD DE ERROR DE SÍMBOLO ASOCIADA A UN SISTEMA M-QAM MODELADO CON UN CANAL AWGN

En este anexo se presenta la descripción matemática de los procedimientos llevados a cabo para encontrar la expresión de probabilidad de error de símbolo de un sistema M-QAM modelado a partir de un canal AWGN, en términos de parámetros de medición comunes en los sistemas de telecomunicaciones, en este caso particular, la relación señal a ruido SNR.

Como se estudió en la sección 1.3.2 de la monografía [1], un error ocurre cuando uno de los símbolos recibidos se ubica fuera de su respectiva región de decisión, confundiendo con un símbolo adyacente. De esta forma, considerando el símbolo complejo \hat{a}_k recibido, representado en la ecuación (1), el símbolo transmitido representado en la ecuación (2), y el símbolo de referencia de la ecuación (3), se define el evento "error de símbolo en el sistema" $\{\varepsilon_s\}$.

$$\hat{a}_k = \hat{i}_k + j\hat{q}_k = (i_k + n_{0k}) + j(q_k + n_{0k}) \quad (1)$$

$$a_k = i_k + jq_k \quad (2)$$

$$\min \{|\hat{a}_k - d_k|\} = d_{min} \quad (3)$$

$\{\varepsilon_s\}$: " \hat{a}_k no se encuentra en la región de decisión del símbolo a_k ".

Donde,

a_k , símbolo k-ésimo transmitido, compuesto por los símbolos k-ésimos i_k y q_k , los cuales representan la fase y cuadratura.

\hat{a}_k , símbolo k-ésimo recibido, compuestos por los símbolos k-ésimos \hat{i}_k y \hat{q}_k , los cuales representan la fase y cuadratura.

d_k , símbolo k-ésimo de referencia.

La ocurrencia de un error en el sistema está supeditada a la posible ocurrencia de un error en cualquiera de los símbolos del alfabeto, cuya longitud está definida por el nivel de la modulación M-QAM. Por lo tanto, la probabilidad del evento error $\{\varepsilon_s\}$ se calcula por medio del teorema de probabilidad total de un evento:

$$P\{\varepsilon_s\} = \sum_{k=1}^M P\{a_k\}P\{\varepsilon_s/a_k\} \quad (4)$$

El primer término de la sumatoria corresponde a la probabilidad de ocurrencia de un símbolo transmitido, y el segundo término equivale a la probabilidad condicional de error dado que se transmitió un símbolo a_k , es decir, la probabilidad de que el valor del símbolo de referencia d_k sea diferente al valor de a_k . Además, considerando que el diagrama de constelación es de tipo rectangular, cada símbolo puede tener 2 ó 3 ó 4 símbolos adyacentes, y su probabilidad de error se compone de la suma de probabilidades de error que tenga con cada símbolo adyacente. Con base en lo anterior, la ecuación (4) se puede definir así:

$$P\{\varepsilon_s\} = \frac{1}{M} \left[\sum_{k=1}^{L_2} 2P\{d_k \neq a_k\} + \sum_{k=1}^{L_3} 3P\{d_k \neq a_k\} + \sum_{k=1}^{L_4} 4P\{d_k \neq a_k\} \right] \quad (5)$$

Donde,

L_2 , cantidad de símbolos que tienen exactamente dos símbolos adyacentes.

L_3 , cantidad de símbolos que tienen exactamente tres símbolos adyacentes.

L_4 , cantidad de símbolos que tienen exactamente cuatro símbolos adyacentes.

En la anterior formulación matemática, debe satisfacerse la siguiente condición:

$$M = L_2 + L_3 + L_4 \quad (6)$$

A partir de la ecuación (5), se define un evento error $\{e\}$ que cumple la siguiente característica:

$$\{e\} : \{d_k \neq a_k\} \quad (7)$$

Ahora bien, considerando la naturaleza compleja de los símbolos, éstos se pueden descomponer en una componente en fase y cuadratura, como se indica en la ecuación (1) y (2); los posibles valores que puede tomar tanto en fase como en cuadratura se encuentran separados una distancia arbitraria d entre ellos.

Por lo tanto, teniendo en cuenta las regiones de decisión que tiene cada símbolo, para que se satisfaga la condición expuesta en (7) se debe cumplir que el valor del símbolo \widehat{a}_k se encuentre por fuera de la región de decisión del símbolo a_k , es decir, que la componente en fase o en cuadratura del símbolo recibido \widehat{a}_k se encuentren alejadas una distancia mayor a $\frac{d}{2}$ de las componentes en fase o en cuadratura del símbolo transmitido a_k , respectivamente. De esta forma, el evento $\{e\}$ se puede considerar como la una unión entre dos eventos $\{e_I\}$ y $\{e_Q\}$, donde $\{e_I\}$ corresponde al error en fase y $\{e_Q\}$ al error en cuadratura. A continuación se definen las expresiones que rigen a los eventos anteriormente definidos:

$$\{e_I\} : \left\{ \widehat{i}_k > i_k + \frac{d}{2} \vee \widehat{i}_k < i_k - \frac{d}{2} \right\} \quad (8)$$

$$\{e_Q\} : \left\{ \widehat{q}_k > q_k + \frac{d}{2} \vee \widehat{q}_k < q_k - \frac{d}{2} \right\} \quad (9)$$

En concordancia con lo definido en expresión (1), las ecuaciones (8) y (9) se pueden simplificar de la siguiente manera:

$$\{e_I\} : \{e_Q\} : \left\{ n_{0k} > \frac{d}{2} \right\} \quad (10)$$

A partir de (10) se evidencia que los eventos $\{e_I\}$ y $\{e_Q\}$ son semejantes, y como la unión de ambos eventos da como resultado el evento $\{e\}$, los tres eventos son semejantes entre sí. El procedimiento para calcular la probabilidad de ocurrencia del evento $\{e\}$ se describe a continuación:

$$P\{e\} = P\left\{ n_{0k} > \frac{d}{2} \right\} \quad (11)$$

Como $n_{0k} \sim N(0, \sigma^2)$, de acuerdo a las propiedades de la distribución normal, se puede plantear una transformación $z_{0k} \sim N(0,1)$ que cumpla la siguiente condición:

$$z_{0k} = \frac{n_{0k}}{\sigma} \quad (12)$$

Al reemplazar la ecuación (12) en (11), se obtiene que:

$$P\{e\} = P\left\{z_{0k} > \frac{d}{2\sigma}\right\} \quad (13)$$

Además, considerando la función de densidad de probabilidad de la distribución normal, se resuelve la ecuación (13) dando como resultado la siguiente expresión:

$$P\{e\} = P\{d_k \neq a_k\} = Q\left(\frac{d}{2\sigma}\right) \quad (14)$$

Como ya se calculó la probabilidad de ocurrencia del evento $\{e\}$, se procede a calcular la probabilidad de error de símbolo en el sistema, la cual se define en la ecuación (5). Lo anterior se logra reemplazando la ecuación (14) en (5), dando como resultado:

$$P\{\varepsilon_s\} = \frac{1}{M} Q\left(\frac{d}{2\sigma}\right) [2L_2 + 3L_3 + 4L_4] \quad (15)$$

De forma general, la probabilidad de error de símbolo en un sistema M-QAM se puede expresar así:

$$P\{\varepsilon_s\} = K(M)Q\left(\frac{d}{2\sigma}\right) \quad (16)$$

Donde,

$$K(M) = \frac{1}{M} [2L_2 + 3L_3 + 4L_4] \quad (17)$$

El valor de $K(M)$ solo depende del nivel de la modulación empleada, de modo que, si el esquema obedece a una constelación de símbolos rectangular, es decir, que el valor M tenga raíz cuadrada exacta, es posible definir una función $K(M)$ en términos únicamente del valor M . Para definir esta función es necesario analizar las características de los diagramas de constelación rectangulares, en general, cada símbolo dentro de su plano de constelación puede tener dos o tres o cuatro símbolos adyacentes, y es posible determinar cuántos tienen dos, cuántos tienen tres y cuántos tienen cuatro, es decir los valores de L_2 , L_3 y L_4 , conociendo previamente el valor M a partir del siguiente análisis: Un determinado diagrama de constelación rectangular corresponde geoméricamente a una serie de cuadrados (punteados) circunscritos, y está compuesto por M símbolos ubicados en el plano complejo, donde en el cuadrado exterior se ubican $4(\sqrt{M} - 1)$ símbolos; de esta manera, todos los símbolos internos, es decir, que no se encuentren ubicados en el cuadrado exterior del diagrama, siempre tendrán cuatro símbolos adyacentes, así mismo, los que únicamente tienen dos símbolos adyacentes son los que están ubicados en los vértices del cuadrado exterior, es decir, siempre serán solo cuatro símbolos sin importar el valor de M , de igual forma, todos los símbolos que se encuentran ubicados sobre el cuadrado exterior, exceptuando los símbolos que están en los vértices, siempre tendrán a su alrededor tres símbolos adyacentes. Por lo tanto, los valores de L_2 , L_3 y L_4 quedan definidos por las siguientes expresiones:

$$L_2 = 4 \quad (18)$$

$$L_3 = 4(\sqrt{M} - 2) \quad (19)$$

$$L_4 = M - L_3 - L_2 \quad (20)$$

De esta forma, reemplazando los términos (18), (19) y (20) en la ecuación (15), se obtiene la expresión para la probabilidad de error de símbolo del sistema M-QAM rectangular, tal como se indica a continuación:

$$P\{\varepsilon_s\} = 4 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}}\right) Q\left(\frac{d}{2\sigma}\right) \quad (21)$$

Por otro lado, si se trata de un esquema de modulación cuyo diagrama de constelaciones es de forma no rectangular, la expresión para la probabilidad de error del sistema corresponde a la definida en la ecuación (16) en donde se debe hallar el valor de K de forma experimental, es decir, se debe realizar un procedimiento manual para definir el número promedio de símbolos adyacentes.

Ahora bien, en la ecuación (21) el término de la función complementaria de error gaussiano se encuentra en función del valor $\frac{d}{2\sigma}$, donde d corresponde a una distancia arbitraria que representa la separación entre símbolos adyacentes, por lo cual es necesario definir la expresión en términos de parámetros característicos en un sistema de comunicaciones. Se propone adecuar la expresión en términos de la relación señal a ruido SNR , por lo que primero se define la expresión matemática que caracteriza el parámetro mencionado.

$$SNR = \frac{E_s}{N_0} \quad (22)$$

Donde,

E_s , Energía de símbolo.

N_0 , es la densidad espectral de potencia de ruido unitaria.

La ecuación (22) indica que el parámetro SNR equivale a la relación de energía de símbolo a ruido unitario, lo cual hace necesario encontrar una expresión de la energía de símbolo en términos de la distancia entre símbolos adyacentes. Es importante resaltar que el procedimiento que se va a llevar a cabo para expresar la energía de símbolo en términos de distancia corresponde exclusivamente para modulaciones cuyo diagrama de constelación sea completamente rectangular, y se lista a continuación:

$$E_s = E[|a_k|^2] \quad (23)$$

$$E_s = \sum_{k=1}^M P\{a_k\} |a_k|^2 \quad (24)$$

En la expresión (24) los símbolos se consideran equiprobables, por lo que resolver la ecuación se centra en determinar la sumatoria de las magnitudes elevadas al cuadrado de todos los símbolos complejos; al considerar la simetría respecto al origen del diagrama de constelación rectangular, la sumatoria en un determinado cuadrante del plano complejo, es igual a la sumatoria en cualquier otro cuadrante, por lo que el resultado total sería cuatro

veces el resultado en cualquier cuadrante; por lo tanto, la energía de símbolo se puede plantear de la siguiente manera:

$$E_s = \frac{4}{M} \sum_{k=1}^A |a_{k1}|^2 \quad (25)$$

Donde,

A , cantidad de símbolos del alfabeto del primer cuadrante del plano complejo.

a_{k1} , símbolo k -ésimo ubicado en el primer cuadrante del plano complejo.

Además, teniendo en cuenta que el símbolo complejo se conforma de una componente en fase y otra en cuadratura, el alfabeto del primer cuadrante del plano complejo se puede definir mediante la conformación de dos alfabetos I y Q , de tamaño $\frac{\sqrt{M}}{2}$, compuestos por los símbolos que pueden tomar los componentes en fase y cuadratura respectivamente, en dicho cuadrante; tal como se indica a continuación:

$$I = \left\{ \frac{d}{2}, \frac{3d}{2}, \frac{5d}{2}, \dots, \left(\frac{\sqrt{M}-1}{2} \right) d \right\} \quad (26)$$

$$Q = \left\{ \frac{d}{2}, \frac{3d}{2}, \frac{5d}{2}, \dots, \left(\frac{\sqrt{M}-1}{2} \right) d \right\} \quad (27)$$

En las expresiones (26) y (27), se evidencia que los valores de los alfabetos se pueden expresar mediante las siguientes sucesiones:

$$I_{a1} = \frac{d}{2}(2a + 1) \quad a = 0, 1, \dots, \frac{\sqrt{M}}{2} - 1 \quad (28)$$

$$Q_{b1} = \frac{d}{2}(2b + 1) \quad b = 0, 1, \dots, \frac{\sqrt{M}}{2} - 1 \quad (29)$$

Considerando lo anterior, en donde se descompuso el alfabeto de símbolos complejos del primer cuadrante en dos alfabetos de símbolos reales, la ecuación (25) puede solucionarse si se considera que el símbolo a_{k1} también se puede descomponer en dos símbolos reales i_{k1} y q_{k1} que representan la fase y cuadratura, lo que resume a calcular una sumatoria de todos los posibles valores reales que puedan tomar los símbolos i_{k1} y q_{k1} , que en últimas están representados por los alfabetos I y Q , o bien, las sucesiones I_{a1} y Q_{b1} llegando a la siguiente expresión:

$$E_s = \frac{4}{M} \sum_{a=0}^N \sum_{b=0}^N I_{a1}^2 + Q_{b1}^2 \quad (30)$$

Donde,

$N = \frac{\sqrt{M}}{2} - 1$, y el término $\frac{\sqrt{M}}{2}$ representa el tamaño de los alfabetos I y Q .

Por último, reemplazando las ecuaciones (28) y (29) en la ecuación (30) y posteriormente resolviendo la ecuación, se obtiene la expresión final para la energía de símbolo en términos de la distancia entre símbolos adyacentes que se plantea a continuación:

$$E_s = \frac{d^2}{6}(M - 1) \quad (31)$$

Finalmente, se procede a definir la expresión final para la probabilidad de error de símbolo del sistema en función de la relación señal a ruido SNR . Para esto se debe considerar que la variación estándar de la componente de ruido AWGN sigue la siguiente condición:

$$\sigma^2 = \frac{N_0}{2} \quad (32)$$

De esta forma, reemplazando las ecuaciones (31) y (32) en la expresión (22), y posteriormente reemplazando en la ecuación (21), se obtiene la fórmula final para la probabilidad de error de símbolo en un sistema M-QAM rectangular, en función del parámetro SNR , la cual se encuentra definida por:

$$P\{\varepsilon_s\} = 4 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}}\right) Q \left(\sqrt{\frac{3 SNR [lineal]}{(M - 1)}} \right) \quad (33)$$

ANEXO B. CONSIDERACIONES BÁSICAS DE LOS SISTEMAS MÓVILES 5G RELEVANTES EN LA INVESTIGACIÓN

En este anexo se realiza una recopilación de la información más relevante, para la presente investigación, en torno a lo estipulado en el *Release 15* de la 3GPP, donde se presenta la primera fase desarrollada de los sistemas de quinta generación móvil y su tecnología Nueva Interfaz Radio (*NR, New Radio Interface*), y se describe los aspectos del sistema y las especificaciones técnicas de los diferentes grupos de servicios que soportan la nueva generación móvil; en particular, se presenta el enfoque de los sistemas 5G, su arquitectura, y aspectos de nivel físico como las bandas de operación, forma de onda y características técnicas relacionadas a los diferentes canales físicos [2], [3].

El *release* define diferentes tipos de requerimientos claves para los sistemas móviles en términos de nuevos servicios y mercados, soportados bajo la arquitectura *Stand Alone* (Véase *Figura B.1*), los cuales se describen a continuación:

- **Enhanced Mobile Broadband (eMBB):** El requerimiento de banda ancha móvil mejorada, el cual se pretende que sea mucho mayor al de 4G, es definido en términos de velocidades de datos, densidad de tráfico, movilidad de usuario, entre otros, y se consideran diferentes áreas de servicio como: ambientes *indoor*, áreas rurales, redes de oficina, *home networks*, etc.
- **Comunicaciones críticas (CC, Critical Communications) y Comunicaciones de Ultra Baja y Confiable Latencia (URLLC, Ultra Reliable Low Latency Communications):** Este requerimiento surge a partir de los diversos escenarios y ambientes que requieren niveles de latencia muy bajos y una muy alta disponibilidad del servicio de comunicación. La latencia del servicio en general depende del retardo de la interfaz 5G por lo que está relacionada con las capacidades a nivel físico que ofrecen los sistemas 5G.
- **Massive Internet of Things (mIoT):** Existe una gran cantidad de escenarios que requieren la implementación de sistemas 5G para soportar grandes volúmenes de tráfico en diferentes dispositivos. En sí, esta característica se encuentra relacionada con aspectos operacionales que abarcan el amplio rango de dispositivos y servicios IoT (*IoT, Internet of Things*).
- **Operaciones Flexibles de Red:** Cubre diferentes aspectos como: Interrupciones en la red, exposición a la capacidad de la red, escalabilidad, movilidad diversa, seguridad, entrega eficiente de contenidos, migración e interoperabilidad.

En general, existen dos tipos de arquitecturas para los sistemas 5G, la arquitectura *Stand Alone* bajo la cual se pretenden desarrollar totalmente los requerimientos anteriormente descritos, que se ilustra en la *Figura B.1*, y la arquitectura *Non Stand Alone* la cual se rige a partir de la coexistencia con los sistemas LTE, que se ilustra en la *Figura B.2*.

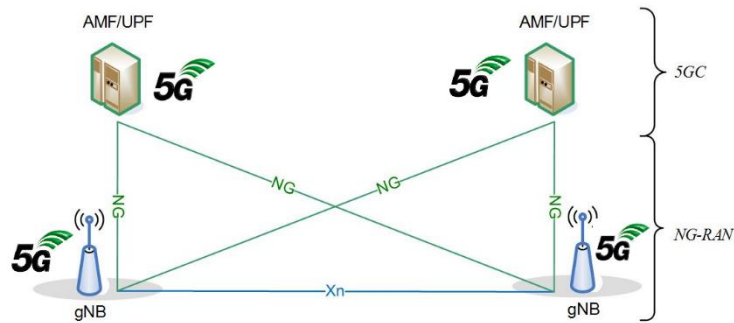


Figura B.1. Arquitectura *Stand Alone* 5G. Tomada de [2].

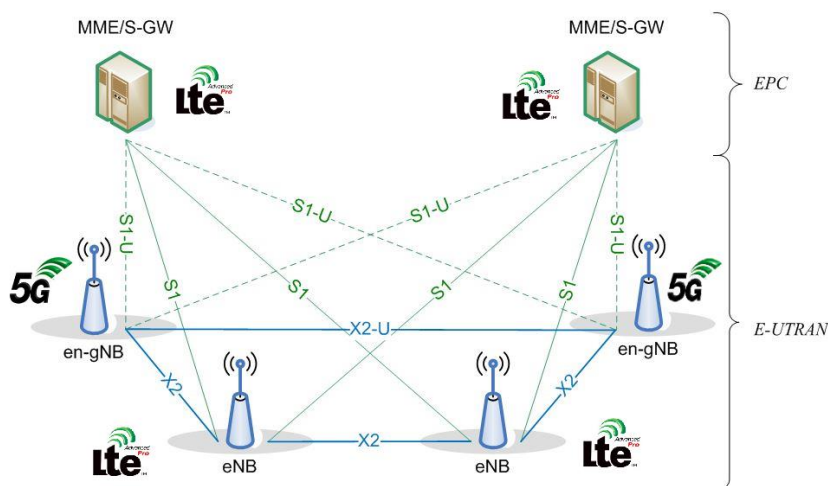


Figura B.2. Arquitectura *Non Stand Alone* 5G. Tomada de [2].

Una de las diferencias más importantes entre los modelos anteriormente planteados, es el aprovechamiento de la infraestructura 4G por parte de la arquitectura *NSA*, en la que si bien, la comunicación se rige a partir de protocolos y celdas 5G, se conserva, por parte de la arquitectura LTE, los elementos que constituyen la red de acceso E-UTRAN (*E-UTRAN*, *Evolved-UMTS Terrestrial Radio Access Network*), el núcleo de la red EPC (*EPC*, *Evolved Packet Core*) conformado por el plano de usuario S-GW (*S-GW*, *System Architecture Evolution Gateway*) y el plano de control MME (*MME*, *Mobility Management Entity*), como también, algunas interfaces radio. Caso contrario a la arquitectura *SA*, en la cual se despliega una red 5G independiente, con un nuevo núcleo de red, una nueva red de acceso, y nuevas interfaces radio; en cuanto al núcleo de la red, éste se denomina 5GC (*5GC*, *5th Generation Core*) y se encuentra compuesto por el plano de usuario UPF (*UPF*, *User Plane Function*) y el plano de control AMF (*AMF*, *Access and Mobility Management Function*), además, se comunica con la red de acceso a través de la interfaz radio *NG*; en cuanto a la red de acceso, ésta se denomina *NG-RAN* (*NG-RAN*, *New Generation - Random Access Network*) y se conforma de un conjunto de estaciones base denominadas *gNB* (*gNB*, *next generation Node B*), las cuales se comunican entre sí por medio de la interfaz X_n .

Ahora bien, dejando un poco de lado la arquitectura de los sistemas 5G, es preciso describir algunas características físicas relacionadas con la tecnología NR, que son relevantes en el

contexto de la investigación. Dentro de estas características se encuentran las bandas de operación, la forma de onda de la señal NR, aspectos técnicos de los canales físicos, entre otras.

En primer lugar, el *Release 15* estipula que los sistemas 5G hacen uso de dos rangos de frecuencias para la propagación, denominados FR1 y FR2; el primero, corresponde al rango de frecuencias habitual de los sistemas LTE, mientras que el segundo corresponde a una nueva banda de operación para la propagación de ondas milimétricas, cuyo rango va de los 24 GHz a los 52 GHz y en el cual se espera proveer anchos de banda entre 50 y 400 MHz, tal como se aprecia en la Tabla B.1.

Tabla B.1. Ancho de banda soportado por la tecnología NR [2].

Banda	Rango	Ancho de banda soportado [MHz]
FR1	410 MHz - 7125 MHz	5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 70,90, 100
FR2	24250 MHz – 52600 MHz	50, 100, 200, 400

En resumen, el *Release* establece 7 nuevas bandas de operación para la tecnología NR, tres subbandas dentro del rango FR1, y cuatro subbandas que conforman el nuevo rango FR2, como se indica en la Figura B.3.

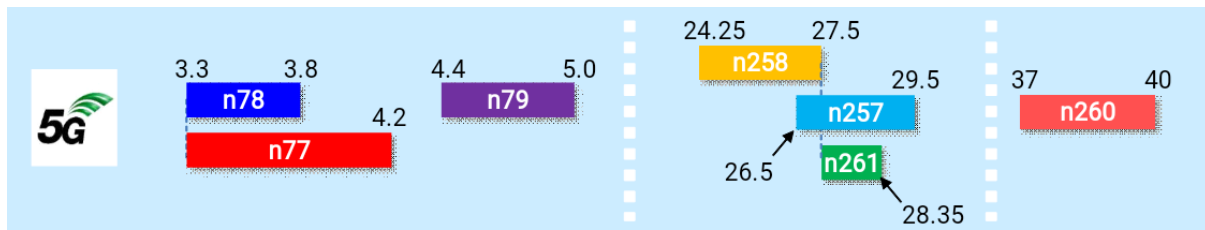


Figura B.3. Nuevas bandas de operación de los sistemas 5G. Tomada de [2].

A continuación, se presenta una tabla con las características físicas más importantes, de las cuatro bandas que conforman el rango de frecuencias FR2.

Tabla B.2. Bandas de operación en FR2 [2].

Banda NR	Rango	Modo de Duplexación
n.257	26500 MHz - 29500 MHz	TDD
n.258	24250 MHz - 27500 MHz	TDD
n.260	37000 MHz - 40000 MHz	TDD
n.261	27500 MHz - 28350 MHz	TDD

Otro aspecto físico importante a considerar es la forma de onda de la señal NR, la cual es de tipo CP-OFDM, donde el número de subportadoras y el valor de prefijo cíclico varía según el ancho de banda del sistema y según un tipo de numerología, la cual representa una serie de opciones de transmisión para el sistema OFDM en relación al espaciamiento entre subportadoras y al tipo de prefijo cíclico; dicha numerología presenta seis opciones de espaciamiento entre subportadoras que van desde 15 KHz hasta 480 KHz, tal como se indica en la Figura B.4.

	μ	$\Delta f = 2^{\mu} \cdot 15 \text{ kHz}$	Cyclic Prefix	
Sync < 6 GHz	0	15 kHz	Normal	Data < 6 GHz
	1	30 kHz	Normal	
	2	60 kHz	Normal, Extended	
Sync > 6 GHz	3	120 kHz	Normal	Data > 6 GHz
	4	240 kHz	Normal	
	5	480 kHz	Normal	

Figura B.4. Parámetros definidos por la numerología. Tomado de [4].

En la ilustración, se evidencia los diferentes valores de espaciamiento entre subportadoras OFDM a partir de las diferentes numerologías que expresa el parámetro μ , como también, los diferentes tipos de prefijo cíclico asociados. Así mismo, se observa que para frecuencias mayores a 6 GHz, las señales de datos deben ser transmitidas usando las numerologías 2 y 3, mientras que las señales de sincronización deben configurarse mediante las numerologías 3 y 4; en cambio, para frecuencias menores a 6 GHz, la señal de datos puede transmitirse haciendo uso de las numerologías 0, 1 y 2, mientras que para la señal de sincronización se trabaja con las numerologías 0 y 1. De igual forma, se aprecia que la numerología 5 no está soportada en el *Release 15*, pero si se encuentra especificada para la futura implementación de la fase II de los sistemas 5G.

Ahora bien, tal y como se mencionó previamente, la cantidad de subportadoras OFDM depende tanto del valor de numerología como del ancho de banda del sistema, en particular, el estándar brinda información acerca de la cantidad máxima de bloques de recursos físicos (*PRB, Physical Resource Block*) que se necesitan para brindar diferentes anchos de banda, según los diferentes valores de numerología, tal como se indica en la Tabla B.3. Es importante recordar que un PRB se compone de 12 subportadoras OFDM consecutivas.

Tabla B.3. Anchos de Banda para los sistemas 5G [2].

SCS (KHz)	10 MHz	20 MHz	30 MHz	40 MHz	50 MHz	60 MHz	70 MHz	80 MHz	90 MHz	100 MHz	200 MHz	400 MHz
	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}
15	52	106	160	216	270	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
30	24	51	78	106	133	162	189	217	245	273	N.A	N.A
60	11	24	38	51	65	79	93	107	121	132	264	N.A
120	N.A	N.A	N.A	N.A	32	N.A	N.A	N.A	N.A	66	132	264

Además de lo expuesto anteriormente, es preciso señalar que los sistemas móviles de quinta generación se conforman de varios canales físicos para la transmisión de información. Existen canales físicos particulares para el *downlink* y el *uplink*, y cada canal transmite y recibe una determinada información. En general, existen los canales compartidos de información, los canales de control, los canales broadcast, entre otros. Para el *downlink* los canales se denominan: Canal Físico de Multidifusión (PBCH, Physical Broadcast Channel), Canal Físico Descendente Compartido (PDSCH, Physical Downlink Shared Channel) y Canal Físico Descendente de Control (PDCCH, Physical Downlink Control Channel); mientras que para el *uplink* se denominan: Canal Físico de Acceso Aleatorio (PRACH, Physical Broadcast Channel), Canal Físico Ascendente Compartido (PUSCH, Physical Uplink Shared Channel) y Canal Físico Ascendente de Control (PUCCH, Physical Uplink Control Channel). En la Tabla B.4 se describen sus características más importantes.

Tabla B.4. Características de los canales físicos de bajada 5G [2].

ENLACE	CANAL FÍSICO	NOMBRE	MODULACIÓN	COD. CANAL
DL	PDSCH	Physical Downlink Shared Channel	QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM.	Cod. LDPC.
DL	PBCH	Physical Broadcast Channel	QPSK	Cod. Polar
DL	PDCCH	Physical Downlink Control Channel	QPSK	Cod. Polar

En el cuadro se evidencia que los canales físicos casi siempre emplean la técnica de modulación QPSK y una codificación de canal de tipo polar, con excepción del PDSCH y el PUSCH, los cuales emplean una codificación de canal de tipo LDPC, y se modulan a partir de esquemas QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 256 QAM y $\frac{\pi}{2}$ BPSK, siendo éste último exclusivo del enlace *uplink*. Por otro lado, para evaluar el desempeño de un sistema 5G, el *Release 15* propone el parámetro EVM para la medición de la capacidad del sistema en términos de recuperación de información, en particular, establece unos valores umbrales mínimos de EVM por cada esquema de modulación M-QAM asociado, según los diferentes tipos de estación base que existen en los sistemas 5G; estas estaciones bases se clasifican en aquellas que operan en el rango FR1 y aquellas que operan en la banda de ondas milimétricas (FR2), teniendo como particularidad que para sistemas que operen en FR2 no se contempla el uso de la técnica de modulación 256-QAM, la cual sirve únicamente para sistemas que operen en FR1. A continuación se indica los valores mínimos de EVM para el canal PDSCH, que garantizan una correcta recuperación de la información.

Tabla B.5. Requerimientos mínimos de EVM en relación a la técnica M-QAM, para el PDSCH [3].

ESQUEMA M-QAM	EVM [%] requerido
QPSK	17.5%
16-QAM	12.5 %
64-QAM	8 %
256-QAM	3.5 %

ANEXO C. RELACIÓN ENTRE LA MAGNITUD DEL VECTOR DE ERROR (EVM) Y LA BER PARA SISTEMAS M-QAM

En este anexo se realiza una relación entre el parámetro Magnitud del Vector de Error y la Probabilidad de Error de Símbolo de un sistema M-QAM modelado bajo un canal AWGN. Lo anterior es posible, no mediante un procedimiento matemático demostrado, sino basado en una aproximación que se hace comúnmente en numerosos estudios [5, 6], y la cual se ilustra en la siguiente ecuación:

$$EVM \approx \sqrt{\frac{E_{Simb.error}}{E_{Simb.ref}}} \quad (34)$$

Donde, $E_{Simb.error}$ es la energía del símbolo error y $E_{Simb.ref}$ es la energía del símbolo de referencia. El símbolo error corresponde a la diferencia entre el símbolo recibido y el símbolo transmitido o símbolo de referencia, y se puede expresar de la siguiente manera:

$$S_e = \widehat{a}_k - d_k \quad (35)$$

Reemplazando las expresiones (1), (2) y (3), descritas en el Anexo A, en la expresión (35) se obtiene:

$$S_e = n_{0k} \quad (36)$$

Donde $n_{0k} \sim N(0, \sigma^2)$ es una variable aleatoria gaussiana, por lo que la energía del símbolo S_e corresponde a la densidad espectral de ruido unitaria N_0 , tal como se indica a continuación:

$$E_{Simb.error} = N_0 \quad (37)$$

Así mismo, los símbolos de referencia en el receptor corresponden a los mismos símbolos transmitidos, por lo cual, la ecuación (34) se puede expresar como:

$$EVM \approx \frac{1}{\sqrt{SNR [lineal]}} \quad (38)$$

Ahora bien, considerando lo expuesto en la sección 1.3 de la monografía, la probabilidad de error de símbolo asociada a un sistema M-QAM modelado con un canal AWGN es:

$$P_{error\ de\ Símbolo} = 4 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}}\right) Q \left(\sqrt{\frac{3\ SNR [lineal]}{(M-1)}} \right) \quad (39)$$

Al reemplazar (38) en (39) se obtiene lo siguiente:

$$P_{error\ de\ Símbolo} \approx 4 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}}\right) Q \left(\sqrt{\frac{3}{(M-1)EVM^2}} \right) \quad (40)$$

Y considerando que se desea conocer el valor de la probabilidad de error de bit, el cual puede ser aproximado con el valor de la tasa de error de bit, se divide la anterior ecuación por el término $\log_2 M$.

$$P_b \approx \frac{4}{\log_2 M} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}}\right) Q \left(\sqrt{\frac{3}{(M-1)EVM^2}} \right) \quad (41)$$

En la Tabla 6. se listan las expresiones de la BER asociada a cada esquema M-QAM en relación a la medida del EVM, que en algunas ocasiones se encuentra definida en valores porcentuales, por lo que primero se debe convertir a unidades lineales, como se indica en la ecuación (42).

$$EVM = 0.01 EVM[\%] \quad (42)$$

Tabla C.1. EVM vs BER, para M-QAM.

M-QAM	Probabilidad de Error de Símbolo	BER vs EVM
4-QAM (QPSK)	$P\{\varepsilon_s\} = 2Q(\sqrt{SNR[lineal]})$	$BER \approx Q\left(\frac{1}{EVM[lineal]}\right)$
16-QAM	$P\{\varepsilon_s\} = 3Q\left(\sqrt{\frac{SNR[lineal]}{5}}\right)$	$BER \approx \frac{3}{4}Q\left(\frac{1}{\sqrt{5} EVM[lineal]}\right)$
64-QAM	$P\{\varepsilon_s\} = 3.5Q\left(\sqrt{\frac{SNR[lineal]}{21}}\right)$	$BER \approx \frac{7}{12}Q\left(\frac{1}{\sqrt{21} EVM[lineal]}\right)$
256-QAM	$P\{\varepsilon_s\} = 3.75 Q\left(\sqrt{\frac{SNR[lineal]}{85}}\right)$	$BER \approx \frac{15}{32} Q\left(\frac{1}{\sqrt{85} EVM[lineal]}\right)$

ANEXO D. RESULTADOS OBTENIDOS EN TÉRMINOS DE EVM, BER Y POTENCIA EN LA RED RoF CONFIGURADA MEDIANTE UNA TOPOLOGÍA PUNTO A MULTIPUNTO

En este anexo, se presentan las tablas con todos los resultados obtenidos, en términos de EVM, BER y potencia recibida, para cada arreglo evaluado, cuando se configuró una topología punto a multipunto.

En particular, para el arreglo de 2 usuarios los resultados se listan en la Tabla D.1 y Tabla D.2, para el arreglo de 4 usuarios los resultados se indican en la Tabla D.3, Tabla D.4, Tabla D.5 y Tabla D.6, y por último, para el arreglo de 8 usuarios los resultados se indican en la Tabla D.7, Tabla D.8, Tabla D.9, Tabla D.10, Tabla D.11, Tabla D.12, Tabla D.13 y Tabla D.14.

Tabla D.1 Resultados obtenidos para el receptor RoF 1, en un arreglo 1-2.

d [Km]	QPSK		16-QAM		64-QAM		256-QAM		P_{RX} [dBm]
	EVM	BER	EVM	BER	EVM	BER	EVM	BER	
1	-----	-----	-----	-----	-----	-----	4,88	0,098	-6,22
2	-----	-----	-----	-----	-----	-----	5,03	0,116	-6,39
3	-----	-----	-----	-----	-----	-----	5,25	0,145	-6,50
4	-----	-----	-----	-----	-----	-----	6,01	0,266	-6,70
5	16,38	$3,1 \times 10^{-7}$	9,1	$3,3 \times 10^{-7}$	5,35	$1,3 \times 10^{-5}$	6,67	0,389	-6,88
6	16,15	$2,14 \times 10^{-7}$	8,45	$4,5 \times 10^{-8}$	4,99	$3,6 \times 10^{-6}$	-----	-----	-7,22
7	15,88	$1,4 \times 10^{-7}$	7,86	$4,7 \times 10^{-9}$	5,23	$8,8 \times 10^{-6}$	-----	-----	-7,39
8	15,83	$1,25 \times 10^{-7}$	8,08	$1,16 \times 10^{-8}$	5,75	$4,3 \times 10^{-5}$	-----	-----	-7,64
9	16,84	$6,2 \times 10^{-7}$	8,94	$2,1 \times 10^{-7}$	7,03	<u>$5,5 \times 10^{-4}$</u>	-----	-----	-7,72
10	18,31	$4,1 \times 10^{-6}$	10,36	$5,9 \times 10^{-6}$	8,58	$3,20 \times 10^{-3}$	-----	-----	-8,09
11	19,34	$1,2 \times 10^{-5}$	11,63	$4,5 \times 10^{-5}$	12,34	$2,2 \times 10^{-2}$	-----	-----	-8,17
12	22,24	<u>$1,2 \times 10^{-4}$</u>	14,33	<u>$6,8 \times 10^{-4}$</u>	-----	-----	-----	-----	-8,37
13	29,90	$3,15 \times 10^{-3}$	18,19	$5,3 \times 10^{-3}$	-----	-----	-----	-----	-8,68
14	46,03	$3,8 \times 10^{-2}$	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-8,91

Tabla D.2 Resultados obtenidos para el receptor RoF 2, en un arreglo 1-2.

d [Km]	QPSK		16-QAM		64-QAM		256-QAM		P_{RX} [dBm]
	EVM	BER	EVM	BER	EVM	BER	EVM	BER	
1	-----	-----	-----	-----	-----	-----	4,21	0,037	-6,22
2	-----	-----	-----	-----	-----	-----	4,89	0,099	-6,39

3	----	----	----	----	----	----	5,11	0,126	-6,50
4	----	----	----	----	----	----	5,66	0,207	-6,70
5	16,79	$5,7 \times 10^{-7}$	8,91	$1,9 \times 10^{-7}$	5,72	$3,9 \times 10^{-5}$	6,10	0,282	-6,88
6	16,27	$2,64 \times 10^{-7}$	8,40	$3,8 \times 10^{-8}$	5,31	$1,1 \times 10^{-5}$	----	----	-7,22
7	16,12	$2,0 \times 10^{-7}$	8,11	$1,13 \times 10^{-8}$	5,67	$3,4 \times 10^{-5}$	----	----	-7,39
8	15,77	$1,12 \times 10^{-7}$	8,29	$2,5 \times 10^{-8}$	5,83	$5,3 \times 10^{-5}$	----	----	-7,64
9	16,35	$2,9 \times 10^{-7}$	8,95	$2,2 \times 10^{-7}$	6,97	<u>$5,1 \times 10^{-4}$</u>	----	----	-7,72
10	18,54	$5,3 \times 10^{-6}$	10,46	$7,15 \times 10^{-6}$	8,64	$3,4 \times 10^{-3}$	----	----	-8,09
11	19,32	$1,2 \times 10^{-5}$	11,55	$4,0 \times 10^{-5}$	11,90	$1,9 \times 10^{-2}$	----	----	-8,17
12	21,97	<u>$1,0 \times 10^{-4}$</u>	14,12	<u>$5,7 \times 10^{-4}$</u>	----	----	----	----	-8,37
13	30,20	$3,42 \times 10^{-3}$	18,78	$6,46 \times 10^{-3}$	----	----	----	----	-8,68
14	45,88	$3,75 \times 10^{-2}$	----	----	----	----	----	----	-8,91

Tabla D.3 Resultados obtenidos para el receptor RoF 1, en un arreglo 1-4.

<i>d</i> [Km]	QPSK		16-QAM		64-QAM		256-QAM		P_{RX} [dBm]
	<i>EVM</i>	<i>BER</i>	<i>EVM</i>	<i>BER</i>	<i>EVM</i>	<i>BER</i>	<i>EVM</i>	<i>BER</i>	
1	----	----	----	----	----	----	4,80	0,089	-6,32
2	----	----	----	----	----	----	5,11	0,126	-6,43
3	----	----	----	----	----	----	5,35	0,159	-6,56
4	----	----	----	----	----	----	6,10	0,28	-6,73
5	16,17	$2,2 \times 10^{-7}$	9,05	$2,9 \times 10^{-7}$	5,68	$3,6 \times 10^{-5}$	6,99	0,45	-6,85
6	15,99	$1,64 \times 10^{-7}$	8,89	$1,8 \times 10^{-7}$	5,14	$6,4 \times 10^{-6}$	----	----	-7,21
7	16,05	$1,8 \times 10^{-7}$	8,34	$3,1 \times 10^{-8}$	5,97	$7,5 \times 10^{-5}$	----	----	-7,33
8	16,21	$2,36 \times 10^{-7}$	8,75	$1,2 \times 10^{-7}$	6,55	$2,5 \times 10^{-4}$	----	----	-7,63
9	16,56	$4,1 \times 10^{-7}$	9,65	$1,3 \times 10^{-6}$	7,01	<u>$5,4 \times 10^{-4}$</u>	----	----	-7,71
10	18,12	$3,3 \times 10^{-6}$	10,22	$4,5 \times 10^{-6}$	8,72	$3,6 \times 10^{-3}$	----	----	-7,99
11	19,81	$1,8 \times 10^{-5}$	11,57	$4,1 \times 10^{-5}$	12,35	$2,2 \times 10^{-2}$	----	----	-8,23
12	22,31	<u>$1,2 \times 10^{-4}$</u>	14,28	<u>$6,5 \times 10^{-4}$</u>	----	----	----	----	-8,35
13	35,42	$1,0 \times 10^{-2}$	21,10	$1,1 \times 10^{-2}$	----	----	----	----	-8,69

Tabla D.4 Resultados obtenidos para el receptor RoF 2, en un arreglo 1-4.

d [Km]	QPSK		16-QAM		64-QAM		256-QAM		P_{RX} [dBm]
	EVM	BER	EVM	BER	EVM	BER	EVM	BER	
1	-----	-----	-----	-----	-----	-----	4,70	0,078	-6,32
2	-----	-----	-----	-----	-----	-----	5,15	0,131	-6,43
3	-----	-----	-----	-----	-----	-----	5,53	0,186	-6,56
4	-----	-----	-----	-----	-----	-----	6,29	0,317	-6,73
5	16,22	$2,4 \times 10^{-7}$	8,99	$2,4 \times 10^{-7}$	5,71	$3,8 \times 10^{-5}$	7,09	0,472	-6,85
6	16,01	$1,69 \times 10^{-7}$	8,72	$1,1 \times 10^{-7}$	5,01	$3,8 \times 10^{-6}$	-----	-----	-7,21
7	16,39	$3,2 \times 10^{-7}$	8,45	$4,5 \times 10^{-8}$	5,22	$8,4 \times 10^{-6}$	-----	-----	-7,33
8	16,60	$4,3 \times 10^{-7}$	8,15	$1,5 \times 10^{-8}$	5,98	$7,5 \times 10^{-5}$	-----	-----	-7,63
9	16,84	$6,2 \times 10^{-7}$	9,17	$4,0 \times 10^{-7}$	6,89	<u>$4,4 \times 10^{-4}$</u>	-----	-----	-7,71
10	18,48	$4,9 \times 10^{-6}$	10,36	$5,9 \times 10^{-6}$	8,64	$3,3 \times 10^{-3}$	-----	-----	-7,99
11	19,15	$1,0 \times 10^{-5}$	11,55	$4,0 \times 10^{-5}$	12,12	$2,09 \times 10^{-2}$	-----	-----	-8,23
12	22,29	<u>$1,2 \times 10^{-4}$</u>	14,34	<u>$6,8 \times 10^{-4}$</u>	-----	-----	-----	-----	-8,35
13	37,31	$1,4 \times 10^{-2}$	20,88	$1,2 \times 10^{-2}$	-----	-----	-----	-----	-8,69

Tabla D.5 Resultados obtenidos para el receptor RoF 3, en un arreglo 1-4.

d [Km]	QPSK		16-QAM		64-QAM		256-QAM		P_{RX} [dBm]
	EVM	BER	EVM	BER	EVM	BER	EVM	BER	
1	-----	-----	-----	-----	-----	-----	4,15	0,035	-6,32
2	-----	-----	-----	-----	-----	-----	4,75	0,840	-6,43
3	-----	-----	-----	-----	-----	-----	5,11	0,126	-6,56
4	-----	-----	-----	-----	-----	-----	5,89	0,245	-6,73
5	16,84	$6,2 \times 10^{-7}$	8,66	$9,0 \times 10^{-8}$	5,88	$6,0 \times 10^{-5}$	6,79	0,413	-6,85
6	16,28	$2,64 \times 10^{-7}$	8,29	$2,5 \times 10^{-8}$	5,21	$8,1 \times 10^{-6}$	-----	-----	-7,21
7	16,10	$1,9 \times 10^{-7}$	7,96	$7,2 \times 10^{-9}$	5,10	$5,4 \times 10^{-6}$	-----	-----	-7,33
8	16,32	$2,82 \times 10^{-7}$	8,54	$6,1 \times 10^{-8}$	5,78	$4,6 \times 10^{-5}$	-----	-----	-7,63
9	16,77	$5,6 \times 10^{-7}$	9,25	$5,0 \times 10^{-7}$	6,89	<u>$4,5 \times 10^{-4}$</u>	-----	-----	-7,71
10	18,00	$2,9 \times 10^{-6}$	10,22	$4,5 \times 10^{-6}$	8,6	$3,25 \times 10^{-3}$	-----	-----	-7,99
11	19,16	$2,9 \times 10^{-6}$	11,54	$3,9 \times 10^{-5}$	11,31	$1,5 \times 10^{-2}$	-----	-----	-8,23

12	22,73	<u>$1,6 \times 10^{-5}$</u>	14,26	<u>$6,4 \times 10^{-4}$</u>	----	----	----	----	-8,35
13	41,15	$2,3 \times 10^{-2}$	21,33	$1,35 \times 10^{-2}$	----	----	----	----	-8,69

Tabla D.6 Resultados obtenidos para el receptor RoF 4, en un arreglo 1-4.

<i>d</i> [Km]	QPSK		16-QAM		64-QAM		256-QAM		P_{RX} [dBm]
	<i>EVM</i>	<i>BER</i>	<i>EVM</i>	<i>BER</i>	<i>EVM</i>	<i>BER</i>	<i>EVM</i>	<i>BER</i>	
1	----	----	----	----	----	----	4,35	0,047	-6,32
2	----	----	----	----	----	----	5,05	0,119	-6,43
3	----	----	----	----	----	----	5,51	0,184	-6,56
4	----	----	----	----	----	----	6,09	0,280	-6,73
5	16,21	$2,3 \times 10^{-7}$	8,91	$1,9 \times 10^{-7}$	5,99	$7,8 \times 10^{-5}$	6,98	0,450	-6,85
6	16,09	$1,9 \times 10^{-7}$	8,52	$5,7 \times 10^{-8}$	5,22	$8,5 \times 10^{-6}$	----	----	-7,21
7	15,91	$1,4 \times 10^{-7}$	8,03	$9,6 \times 10^{-9}$	5,87	$5,9 \times 10^{-5}$	----	----	-7,33
8	16,33	$2,9 \times 10^{-7}$	8,54	$6,1 \times 10^{-8}$	6,11	$1,03 \times 10^{-5}$	----	----	-7,63
9	16,81	$6,0 \times 10^{-7}$	9,88	$2,2 \times 10^{-7}$	7,00	<u>$5,3 \times 10^{-4}$</u>	----	----	-7,71
10	18,28	$3,9 \times 10^{-6}$	10,54	$8,3 \times 10^{-6}$	8,47	$2,9 \times 10^{-3}$	----	----	-7,99
11	19,35	$2,9 \times 10^{-6}$	11,61	$4,4 \times 10^{-5}$	12,96	$2,6 \times 10^{-2}$	----	----	-8,23
12	22,50	<u>$1,2 \times 10^{-5}$</u>	14,25	<u>$6,4 \times 10^{-4}$</u>	----	----	----	----	-8,35
13	39,91	$1,4 \times 10^{-2}$	22,00	$1,57 \times 10^{-2}$	----	----	----	----	-8,69

Tabla D.7 Resultados obtenidos para el receptor RoF 1, en un arreglo 1-8.

<i>d</i> [Km]	QPSK		16-QAM		64-QAM		256-QAM		P_{RX} [dBm]
	<i>EVM</i>	<i>BER</i>	<i>EVM</i>	<i>BER</i>	<i>EVM</i>	<i>BER</i>	<i>EVM</i>	<i>BER</i>	
1	----	----	----	----	----	----	5,00	0,112	-6,41
2	----	----	----	----	----	----	5,24	0,144	-6,62
3	----	----	----	----	----	----	6,12	0,286	-6,70
4	----	----	----	----	----	----	6,66	0,387	-6,81
5	16,33	$2,86 \times 10^{-7}$	10,05	$3,2 \times 10^{-6}$	6,12	$1,0 \times 10^{-4}$	7,31	0,517	-6,89
6	16,13	$2,1 \times 10^{-7}$	9,66	$1,3 \times 10^{-6}$	5,55	$2,4 \times 10^{-5}$	----	----	-7,16
7	16,48	$3,6 \times 10^{-7}$	9,34	$6,3 \times 10^{-7}$	6,21	$1,3 \times 10^{-4}$	----	----	-7,29
8	16,72	$5,2 \times 10^{-7}$	9,16	$3,9 \times 10^{-7}$	6,87	$4,03 \times 10^{-4}$	----	----	-7,69
9	17,10	$9,0 \times 10^{-7}$	10,09	$3,5 \times 10^{-7}$	7,50	<u>$1,0 \times 10^{-3}$</u>	----	----	-7,81

10	19,61	$1,56 \times 10^{-5}$	11,45	$3,52 \times 10^{-6}$	9,01	$4,5 \times 10^{-3}$	----	----	-8,09
11	24,12	<u>$3,5 \times 10^{-4}$</u>	12,31	$1,0 \times 10^{-4}$	----	----	----	----	-8,27
12	33,24	$7,0 \times 10^{-3}$	14,85	<u>$9,7 \times 10^{-4}$</u>	----	----	----	----	-8,31
13	----	----	21,76	$1,49 \times 10^{-2}$	----	----	----	----	-8,66

Tabla D.8 Resultados obtenidos para el receptor RoF 2, en un arreglo 1-8.

<i>d</i> [Km]	QPSK		16-QAM		64-QAM		256-QAM		P_{RX} [dBm]
	<i>EVM</i>	<i>BER</i>	<i>EVM</i>	<i>BER</i>	<i>EVM</i>	<i>BER</i>	<i>EVM</i>	<i>BER</i>	
1	----	----	----	----	----	----	5,00	0,113	-6,41
2	----	----	----	----	----	----	5,24	0,144	-6,62
3	----	----	----	----	----	----	6,12	0,286	-6,70
4	----	----	----	----	----	----	6,66	0,387	-6,81
5	16,19	$2,3 \times 10^{-7}$	9,45	$8,3 \times 10^{-7}$	5,62	$3,0 \times 10^{-5}$	7,31	0,517	-6,89
6	15,98	$1,6 \times 10^{-7}$	9,23	$4,7 \times 10^{-7}$	5,15	$6,5 \times 10^{-6}$	----	----	-7,16
7	16,09	$1,9 \times 10^{-7}$	9,09	$3,2 \times 10^{-7}$	5,73	$4,1 \times 10^{-5}$	----	----	-7,29
8	16,35	$2,9 \times 10^{-7}$	8,86	$1,6 \times 10^{-7}$	6,35	$1,7 \times 10^{-4}$	----	----	-7,69
9	16,77	$5,6 \times 10^{-7}$	10,32	$5,5 \times 10^{-6}$	7,50	<u>$1,0 \times 10^{-3}$</u>	----	----	-7,81
10	19,12	$9,7 \times 10^{-5}$	11,45	$3,5 \times 10^{-6}$	8,89	$4,5 \times 10^{-3}$	----	----	-8,09
11	23,98	<u>$3,3 \times 10^{-4}$</u>	12,12	$8,4 \times 10^{-5}$	----	----	----	----	-8,27
12	34,54	$9,0 \times 10^{-3}$	14,66	<u>$8,4 \times 10^{-4}$</u>	----	----	----	----	-8,31
13	----	----	22,23	$1,65 \times 10^{-2}$	----	----	----	----	-8,66

Tabla D.9 Resultados obtenidos para el receptor RoF 3, en un arreglo 1-8.

<i>d</i> [Km]	QPSK		16-QAM		64-QAM		256-QAM		P_{RX} [dBm]
	<i>EVM</i>	<i>BER</i>	<i>EVM</i>	<i>BER</i>	<i>EVM</i>	<i>BER</i>	<i>EVM</i>	<i>BER</i>	
1	----	----	----	----	----	----	4,77	0,086	-6,41
2	----	----	----	----	----	----	5,11	0,126	-6,62
3	----	----	----	----	----	----	5,88	0,244	-6,70
4	----	----	----	----	----	----	6,25	0,310	-6,81
5	16,90	$6,8 \times 10^{-7}$	8,73	$1,1 \times 10^{-7}$	5,96	$7,3 \times 10^{-5}$	6,88	0,431	-6,89
6	16,33	$2,8 \times 10^{-7}$	8,12	$1,3 \times 10^{-8}$	5,15	$6,5 \times 10^{-6}$	----	----	-7,16
7	16,25	$2,5 \times 10^{-7}$	7,49	$8,8 \times 10^{-9}$	6,01	$8,2 \times 10^{-5}$	----	----	-7,29

8	16,74	$5,4 \times 10^{-7}$	8,32	$2,8 \times 10^{-8}$	6,77	$3,7 \times 10^{-4}$	-----	-----	-7,69
9	17,19	$1,0 \times 10^{-6}$	10,25	$4,8 \times 10^{-6}$	7,46	<u>$1,0 \times 10^{-3}$</u>	-----	-----	-7,81
10	21,21	$5,9 \times 10^{-5}$	11,33	$2,9 \times 10^{-5}$	9	$4,48 \times 10^{-3}$	-----	-----	-8,09
11	25,06	<u>$5,6 \times 10^{-4}$</u>	12,24	$9,6 \times 10^{-5}$	-----	-----	-----	-----	-8,27
12	39,11	$1,8 \times 10^{-2}$	14,55	<u>$7,9 \times 10^{-4}$</u>	-----	-----	-----	-----	-8,31
13	-----	-----	21,83	$1,5 \times 10^{-2}$	-----	-----	-----	-----	-8,66

Tabla D.10 Resultados obtenidos para el receptor RoF 4, en un arreglo 1-8.

<i>d</i> [Km]	QPSK		16-QAM		64-QAM		256-QAM		P_{RX} [dBm]
	<i>EVM</i>	<i>BER</i>	<i>EVM</i>	<i>BER</i>	<i>EVM</i>	<i>BER</i>	<i>EVM</i>	<i>BER</i>	
1	-----	-----	-----	-----	-----	-----	4,57	0,066	-6,41
2	-----	-----	-----	-----	-----	-----	4,88	0,098	-6,62
3	-----	-----	-----	-----	-----	-----	5,43	0,171	-6,70
4	-----	-----	-----	-----	-----	-----	6,10	0,283	-6,81
5	16,81	$5,9 \times 10^{-7}$	9,44	$8,1 \times 10^{-7}$	5,89	$7,3 \times 10^{-5}$	6,98	0,451	-6,89
6	16,34	$2,9 \times 10^{-7}$	9,12	$3,5 \times 10^{-7}$	5,75	$6,5 \times 10^{-6}$	-----	-----	-7,16
7	16,09	$1,9 \times 10^{-7}$	8,81	$1,4 \times 10^{-7}$	6,18	$8,2 \times 10^{-5}$	-----	-----	-7,29
8	16,42	$3,3 \times 10^{-7}$	8,33	$2,9 \times 10^{-8}$	6,99	$3,7 \times 10^{-4}$	-----	-----	-7,69
9	17,03	$8,1 \times 10^{-6}$	10,06	$3,3 \times 10^{-6}$	7,13	<u>$6,4 \times 10^{-4}$</u>	-----	-----	-7,81
10	19,75	$1,8 \times 10^{-5}$	11,23	$2,5 \times 10^{-5}$	10,01	$4,48 \times 10^{-3}$	-----	-----	-8,09
11	23,28	<u>$2,2 \times 10^{-4}$</u>	12,30	$1,0 \times 10^{-4}$	-----	-----	-----	-----	-8,27
12	29,95	$3,2 \times 10^{-3}$	14,80	<u>$9,4 \times 10^{-4}$</u>	-----	-----	-----	-----	-8,31
13	-----	-----	22,15	$1,6 \times 10^{-2}$	-----	-----	-----	-----	-8,66

Tabla D.11 Resultados obtenidos para el receptor RoF 5, en un arreglo 1-8.

<i>d</i> [Km]	QPSK		16-QAM		64-QAM		256-QAM		P_{RX} [dBm]
	<i>EVM</i>	<i>BER</i>	<i>EVM</i>	<i>BER</i>	<i>EVM</i>	<i>BER</i>	<i>EVM</i>	<i>BER</i>	
1	-----	-----	-----	-----	-----	-----	5,12	0,128	-6,41
2	-----	-----	-----	-----	-----	-----	5,66	0,207	-6,62
3	-----	-----	-----	-----	-----	-----	6,03	0,270	-6,70
4	-----	-----	-----	-----	-----	-----	6,80	0,415	-6,81
5	16,56	$4,1 \times 10^{-7}$	9,13	$3,6 \times 10^{-7}$	5,77	$4,5 \times 10^{-5}$	7,16	0,487	-6,89

6	16,25	$2,5 \times 10^{-7}$	8,89	$1,8 \times 10^{-7}$	5,05	$5,3 \times 10^{-6}$	----	----	-7,16
7	16,11	$2,0 \times 10^{-7}$	8,79	$1,35 \times 10^{-7}$	5,37	$1,4 \times 10^{-4}$	----	----	-7,29
8	16,38	$3,1 \times 10^{-7}$	8,55	$6,3 \times 10^{-8}$	6,30	$1,5 \times 10^{-4}$	----	----	-7,69
9	16,93	$7,1 \times 10^{-6}$	9,18	$4,1 \times 10^{-6}$	7,41	<u>$9,4 \times 10^{-4}$</u>	----	----	-7,81
10	19,67	$1,6 \times 10^{-5}$	10,93	$1,6 \times 10^{-5}$	9,88	$7,9 \times 10^{-3}$	----	----	-8,09
11	23,34	<u>$2,3 \times 10^{-4}$</u>	12,24	$9,7 \times 10^{-5}$	----	----	----	----	-8,27
12	35,03	$9,9 \times 10^{-3}$	14,64	<u>$8,4 \times 10^{-4}$</u>	----	----	----	----	-8,31
13	----	----	21,76	$1,5 \times 10^{-2}$	----	----	----	----	-8,66

Tabla D.12 Resultados obtenidos para el receptor RoF 6, en un arreglo 1-8.

<i>d</i> [Km]	QPSK		16-QAM		64-QAM		256-QAM		P_{RX} [dBm]
	<i>EVM</i>	<i>BER</i>	<i>EVM</i>	<i>BER</i>	<i>EVM</i>	<i>BER</i>	<i>EVM</i>	<i>BER</i>	
1	----	----	----	----	----	----	4,64	0,072	-6,41
2	----	----	----	----	----	----	4,99	0,111	-6,62
3	----	----	----	----	----	----	5,39	0,165	-6,70
4	----	----	----	----	----	----	6,22	0,304	-6,81
5	16,89	$6,6 \times 10^{-7}$	9,15	$3,2 \times 10^{-7}$	5,69	$3,6 \times 10^{-5}$	7,00	0,455	-6,89
6	16,46	$3,5 \times 10^{-7}$	8,91	$1,9 \times 10^{-7}$	5,14	$6,3 \times 10^{-6}$	----	----	-7,16
7	16,11	$2,0 \times 10^{-7}$	8,55	$6,3 \times 10^{-7}$	5,77	$4,5 \times 10^{-5}$	----	----	-7,29
8	16,51	$3,7 \times 10^{-7}$	8,13	$1,5 \times 10^{-8}$	6,89	$4,5 \times 10^{-4}$	----	----	-7,69
9	16,95	$7,3 \times 10^{-6}$	8,95	$2,2 \times 10^{-7}$	7,33	<u>$8,4 \times 10^{-4}$</u>	----	----	-7,81
10	20,00	$2,2 \times 10^{-5}$	10,46	$7,15 \times 10^{-5}$	9,94	$8,2 \times 10^{-3}$	----	----	-8,09
11	24,52	<u>$4,3 \times 10^{-4}$</u>	12,22	$9,5 \times 10^{-5}$	----	----	----	----	-8,27
12	35,97	$1,1 \times 10^{-2}$	14,86	<u>$9,8 \times 10^{-4}$</u>	----	----	----	----	-8,31
13	----	----	23,13	$1,9 \times 10^{-2}$	----	----	----	----	-8,66

Tabla D.13 Resultados obtenidos para el receptor RoF 7, en un arreglo 1-8.

<i>d</i> [Km]	QPSK		16-QAM		64-QAM		256-QAM		P_{RX} [dBm]
	<i>EVM</i>	<i>BER</i>	<i>EVM</i>	<i>BER</i>	<i>EVM</i>	<i>BER</i>	<i>EVM</i>	<i>BER</i>	
1	----	----	----	----	----	----	5,22	0,141	-6,41
2	----	----	----	----	----	----	5,50	0,182	-6,62
3	----	----	----	----	----	----	5,95	0,256	-6,70

4	----	----	----	----	----	----	6,71	0,397	-6,81
5	16,36	$3,0 \times 10^{-7}$	9,21	$4,5 \times 10^{-7}$	5,53	$2,3 \times 10^{-5}$	7,26	0,507	-6,89
6	16,12	$2,0 \times 10^{-7}$	8,91	$1,9 \times 10^{-7}$	5,08	$5,1 \times 10^{-6}$	----	----	-7,16
7	16,38	$3,1 \times 10^{-7}$	8,68	$9,6 \times 10^{-8}$	5,64	$3,2 \times 10^{-5}$	----	----	-7,29
8	16,79	$5,8 \times 10^{-7}$	8,45	$4,5 \times 10^{-8}$	6,80	$3,8 \times 10^{-4}$	----	----	-7,69
9	17,05	$8,3 \times 10^{-7}$	9,24	$4,8 \times 10^{-7}$	7,39	<u>$9,1 \times 10^{-4}$</u>	----	----	-7,81
10	19,97	$2,17 \times 10^{-5}$	11,01	$1,8 \times 10^{-5}$	9,35	$5,7 \times 10^{-3}$	----	----	-8,09
11	24,50	<u>$4,3 \times 10^{-4}$</u>	12,29	$1,0 \times 10^{-4}$	----	----	----	----	-8,27
12	33,58	$7,5 \times 10^{-3}$	14,76	<u>$9,2 \times 10^{-4}$</u>	----	----	----	----	-8,31
13	----	----	21,08	$1,2 \times 10^{-2}$	----	----	----	----	-8,66

Tabla D.14 Resultados obtenidos para el receptor RoF 8, en un arreglo 1-8.

<i>d</i> [Km]	QPSK		16-QAM		64-QAM		256-QAM		P_{RX} [dBm]
	<i>EVM</i>	<i>BER</i>	<i>EVM</i>	<i>BER</i>	<i>EVM</i>	<i>BER</i>	<i>EVM</i>	<i>BER</i>	
1	----	----	----	----	----	----	4,01	0,025	-6,41
2	----	----	----	----	----	----	4,54	0,063	-6,62
3	----	----	----	----	----	----	4,99	0,111	-6,70
4	----	----	----	----	----	----	5,12	0,128	-6,81
5	16,67	$4,8 \times 10^{-7}$	9,09	$3,2 \times 10^{-7}$	5,70	$3,7 \times 10^{-5}$	5,78	0,227	-6,89
6	16,13	$2,1 \times 10^{-7}$	8,69	$9,9 \times 10^{-8}$	5,10	$5,4 \times 10^{-6}$	----	----	-7,16
7	16,51	$3,8 \times 10^{-7}$	8,53	$5,9 \times 10^{-8}$	6,22	$1,3 \times 10^{-4}$	----	----	-7,29
8	16,88	$6,8 \times 10^{-7}$	8,15	$1,5 \times 10^{-8}$	6,91	$4,6 \times 10^{-4}$	----	----	-7,69
9	17,11	$9,1 \times 10^{-7}$	8,56	$6,5 \times 10^{-8}$	7,45	<u>$9,9 \times 10^{-4}$</u>	----	----	-7,81
10	20,28	$2,8 \times 10^{-5}$	10,93	$1,6 \times 10^{-5}$	9,57	$6,5 \times 10^{-3}$	----	----	-8,09
11	25,47	<u>$6,7 \times 10^{-4}$</u>	12,19	$9,1 \times 10^{-5}$	----	----	----	----	-8,27
12	36,14	$1,1 \times 10^{-2}$	14,54	<u>$7,8 \times 10^{-4}$</u>	----	----	----	----	-8,31
13	----	----	21,77	$1,5 \times 10^{-3}$	----	----	----	----	-8,66

ANEXO E. RESULTADOS OBTENIDOS EN TÉRMINOS DE OPM EN LA RED FTTH-GPON QUAD PLAY PARA VARIAS ONTS

En este anexo, se presentan las tablas con todos los resultados obtenidos, en términos de los parámetros OPM, para cada arreglo evaluado, cuando se simuló con varias ONTs

En particular, para el arreglo de 2 ONTs los resultados se listan en la Tabla E.1 y Tabla E.2, para el arreglo de 4 ONTs los resultados se indican en la Tabla E.3, Tabla E.4, Tabla E.5 y Tabla E.6, y por último, para el arreglo de 8 ONTs los resultados se indican en la Tabla E.7, Tabla E.8, Tabla E.9, Tabla E.10, Tabla E.11, Tabla E.12, Tabla E.13 y Tabla E.14.

Tabla E.1. Resultados obtenidos para la ONT1, en un arreglo de 2 usuarios.

d [Km]	Internet Móvil								VoIP/datos		
	QPSK		16-QAM		64-QAM		256-QAM		BER	Jitter	Q
	EVM	BER	EVM	BER	EVM	BER	EVM	BER			
1	----	----	----	----	----	----	3,19	0,002	10 ⁻⁴⁰	0,023	31,93
2	----	----	----	----	----	----	3,67	0,011	10 ⁻⁴⁰	0,0241	31,75
3	----	----	----	----	----	----	4,22	0,038	10 ⁻⁴⁰	0,025	31,64
4	----	----	----	----	----	----	6,56	0,368	10 ⁻⁴⁰	0,0267	31,68
5	16,56	4,1 x 10 ⁻⁷	9,19	4,2 x 10 ⁻⁷	5,22	8,5 x 10 ⁻⁶	7,12	0,478	10 ⁻⁴⁰	0,0171	31,55
6	16,14	2,1 x 10 ⁻⁷	8,85	1,6 x 10 ⁻⁷	5,79	4,7 x 10 ⁻⁵	----	----	10 ⁻⁴⁰	0,0168	31,43
7	16,49	3,7 x 10 ⁻⁷	9,46	8,5 x 10 ⁻⁷	6,26	1,4 x 10 ⁻⁴	----	----	10 ⁻⁴⁰	0,0154	31,18
8	17,27	1,1 x 10 ⁻⁶	11,24	2,6 x 10 ⁻⁵	6,67	3,1 x 10 ⁻⁴	----	----	10 ⁻⁴⁰	0,016	31,22
9	20,33	2,9 x 10 ⁻⁵	12,04	7,6 x 10 ⁻⁵	7,34	<u>8,6 x 10⁻⁴</u>	----	----	10 ⁻⁴⁰	0,0203	31,15
10	21,27	6,2 x 10 ⁻⁵	13,05	2,3 x 10 ⁻⁴	9,34	5,6 x 10 ⁻³	----	----	10 ⁻⁴⁰	0,0215	31,93
11	22,40	1,3 x 10 ⁻⁴	13,92	<u>4,9 x 10⁻⁴</u>	10,02	8,5 x 10 ⁻³	----	----	10 ⁻⁴⁰	0,0172	31,99
12	24,68	<u>4,7 x 10⁻⁴</u>	15,27	1,3 x 10 ⁻³	12,15	2,1 x 10 ⁻²	----	----	10 ⁻⁴⁰	0,0211	31,85
13	35,87	1,1 x 10 ⁻²	22,32	1,7 x 10 ⁻²	----	----	----	----	10 ⁻⁴⁰	0,023	31,01
14	45,13	3,5 x 10 ⁻²	----	----	----	----	----	----	10 ⁻⁴⁰	0,025	31,94

Tabla E.2. Resultados obtenidos para la ONT2, en un arreglo de 2 usuarios.

d [Km]	<i>Internet Móvil</i>								<i>VoIP/datos</i>		
	QPSK		16-QAM		64-QAM		256-QAM		BER	Jitter	Q
	EVM	BER	EVM	BER	EVM	BER	EVM	BER			
1	----	----	----	----	----	----	3,80	0,016	10^{-40}	0,061	31,37
2	----	----	----	----	----	----	4,44	0,054	10^{-40}	0,068	31,72
3	----	----	----	----	----	----	6,27	0,314	10^{-40}	0,069	31,75
4	----	----	----	----	----	----	7,08	0,471	10^{-40}	0,068	31,45
5	16,78	$5,9 \times 10^{-7}$	8,71	$1,0 \times 10^{-7}$	5,87	$5,8 \times 10^{-5}$	7,39	0,533	10^{-40}	0,068	31,42
6	16,14	$2,1 \times 10^{-7}$	8,65	$8,7 \times 10^{-8}$	5,15	$6,5 \times 10^{-6}$	----	----	10^{-40}	0,066	31,78
7	16,32	$2,8 \times 10^{-7}$	9,28	$5,4 \times 10^{-7}$	5,70	$3,8 \times 10^{-5}$	----	----	10^{-40}	0,061	31,49
8	17,47	$1,5 \times 10^{-6}$	10,04	$3,1 \times 10^{-5}$	6,06	$9,2 \times 10^{-5}$	----	----	10^{-40}	0,061	32,13
9	19,61	$1,5 \times 10^{-5}$	11,92	$6,5 \times 10^{-5}$	7,65	<u>$1,1 \times 10^{-3}$</u>	----	----	10^{-40}	0,060	32,05
10	20,69	$3,9 \times 10^{-5}$	12,71	$1,6 \times 10^{-4}$	9,65	$6,9 \times 10^{-3}$	----	----	10^{-40}	0,068	32,21
11	21,59	$7,7 \times 10^{-4}$	13,56	<u>$3,6 \times 10^{-4}$</u>	11,11	$1,4 \times 10^{-3}$	----	----	10^{-40}	0,061	32,58
12	24,76	<u>$4,9 \times 10^{-4}$</u>	15,66	$1,6 \times 10^{-3}$	16,02	$5,0 \times 10^{-2}$	----	----	10^{-40}	0,069	32,77
13	36,66	$1,3 \times 10^{-2}$	20,93	$1,2 \times 10^{-2}$	----	----	----	----	10^{-40}	0,063	32,79
14	43,20	$2,9 \times 10^{-2}$	----	----	----	----	----	----	10^{-40}	0,065	32,20

Tabla E.3. Resultados obtenidos para la ONT1, en un arreglo de 4 usuarios.

d [Km]	<i>Internet Móvil</i>								<i>VoIP/datos</i>		
	QPSK		16-QAM		64-QAM		256-QAM		BER	Jitter	Q
	EVM	BER	EVM	BER	EVM	BER	EVM	BER			
1	----	----	----	----	----	----	4,28	0,042	10^{-40}	0,068	32,71

2	----	----	----	----	----	----	4,51	0,060	10^{-40}	0,070	32,74
3	----	----	----	----	----	----	5,79	0,228	10^{-40}	0,071	33,64
4	----	----	----	----	----	----	6,29	0,317	10^{-40}	0,073	32,94
5	16,71	$5,2 \times 10^{-7}$	9,36	$6,64 \times 10^{-7}$	5,13	$6,1 \times 10^{-6}$	7,44	0,543	10^{-40}	0,071	33,96
6	16,32	$2,8 \times 10^{-7}$	9,53	$1,0 \times 10^{-6}$	5,00	$3,7 \times 10^{-6}$	----	----	10^{-40}	0,072	33,55
7	16,47	$3,5 \times 10^{-7}$	10,02	$3,0 \times 10^{-6}$	5,43	$1,7 \times 10^{-5}$	----	----	10^{-40}	0,072	33,47
8	17,36	$1,3 \times 10^{-6}$	10,77	$1,2 \times 10^{-5}$	5,99	$7,8 \times 10^{-5}$	----	----	10^{-40}	0,076	33,45
9	19,53	$1,4 \times 10^{-5}$	12,31	$1,1 \times 10^{-4}$	7,15	<u>$6,6 \times 10^{-3}$</u>	----	----	10^{-40}	0,075	33,47
10	22,32	$1,3 \times 10^{-4}$	13,31	$2,9 \times 10^{-4}$	8,16	$2,2 \times 10^{-3}$	----	----	10^{-40}	0,074	33,14
11	24,08	$3,5 \times 10^{-4}$	14,33	<u>$6,8 \times 10^{-4}$</u>	9,48	$6,2 \times 10^{-3}$	----	----	10^{-40}	0,072	33,22
12	25,01	<u>$5,5 \times 10^{-4}$</u>	16,54	$2,5 \times 10^{-3}$	13,12	$2,8 \times 10^{-2}$	----	----	10^{-40}	0,074	32,93
13	32,21	$5,6 \times 10^{-2}$	22,58	$1,8 \times 10^{-2}$	----	----	----	----	10^{-40}	0,073	33,44
14	43,35	$2,9 \times 10^{-2}$	----	----	----	----	----	----	10^{-40}	0,080	33,94

Tabla E.4. Resultados obtenidos para la ONT2, en un arreglo de 4 usuarios.

d [Km]	<i>Internet Móvil</i>								<i>VoIP/datos</i>		
	QPSK		16-QAM		64-QAM		256-QAM		BER	Jitter	Q
	EVM	BER	EVM	BER	EVM	BER	EVM	BER			
1	----	----	----	----	----	----	4,43	0,053	10^{-40}	0,025	31,69
2	----	----	----	----	----	----	5,31	0,154	10^{-40}	0,034	31,75
3	----	----	----	----	----	----	6,24	0,308	10^{-40}	0,027	31,64
4	----	----	----	----	----	----	6,67	0,389	10^{-40}	0,043	31,68
5	16,35	$2,9 \times 10^{-7}$	9,52	$9,9 \times 10^{-7}$	5,41	$1,6 \times 10^{-5}$	7,41	0,537	10^{-40}	0,064	31,42

6	15,88	$1,3 \times 10^{-7}$	9,26	$5,1 \times 10^{-7}$	5,23	$8,8 \times 10^{-6}$	----	----	10^{-40}	0,067	31,33
7	16,17	$2,2 \times 10^{-7}$	9,87	$2,2 \times 10^{-6}$	5,33	$1,3 \times 10^{-5}$	----	----	10^{-40}	0,059	31,15
8	17,40	$1,3 \times 10^{-6}$	10,50	$7,7 \times 10^{-6}$	6,37	$1,8 \times 10^{-4}$	----	----	10^{-40}	0,060	31,22
9	19,87	$1,9 \times 10^{-5}$	12,19	$9,1 \times 10^{-5}$	7,31	<u>$8,3 \times 10^{-3}$</u>	----	----	10^{-40}	0,059	31,11
10	20,95	$4,8 \times 10^{-5}$	13,05	$2,3 \times 10^{-4}$	8,61	$3,3 \times 10^{-3}$	----	----	10^{-40}	0,049	31,92
11	21,19	$5,8 \times 10^{-5}$	13,82	<u>$4,5 \times 10^{-4}$</u>	9,55	$6,5 \times 10^{-3}$	----	----	10^{-40}	0,046	32,01
12	24,43	<u>$4,1 \times 10^{-4}$</u>	15,73	$1,7 \times 10^{-3}$	11,02	$1,4 \times 10^{-2}$	----	----	10^{-40}	0,056	31,00
13	33,92	$8,0 \times 10^{-3}$	22,76	$1,8 \times 10^{-2}$	----	----	----	----	10^{-40}	0,067	31,12
14	42,77	$2,8 \times 10^{-2}$	----	----	----	----	----	----	10^{-40}	0,057	31,44

Tabla E.5. Resultados obtenidos para la ONT3, en un arreglo de 4 usuarios.

<i>d</i> [Km]	<i>Internet Móvil</i>								<i>VoIP/datos</i>		
	QPSK		16-QAM		64-QAM		256-QAM		BER	Jitter	Q
	EVM	BER	EVM	BER	EVM	BER	EVM	BER			
1	----	----	----	----	----	----	3,95	0,023	10^{-40}	0,067	33,48
2	----	----	----	----	----	----	3,98	0,024	10^{-40}	0,065	33,73
3	----	----	----	----	----	----	4,65	0,073	10^{-40}	0,066	33,65
4	----	----	----	----	----	----	5,79	0,229	10^{-40}	0,066	32,14
5	16,90	$6,8 \times 10^{-7}$	9,29	$5,5 \times 10^{-7}$	5,94	$6,9 \times 10^{-5}$	6,82	0,419	10^{-40}	0,068	33,40
6	16,38	$3,1 \times 10^{-7}$	9,05	$2,9 \times 10^{-7}$	5,32	$1,2 \times 10^{-5}$	----	----	10^{-40}	0,073	33,28
7	16,16	$2,1 \times 10^{-7}$	9,74	$1,6 \times 10^{-6}$	5,14	$6,4 \times 10^{-6}$	----	----	10^{-40}	0,067	33,49
8	17,16	$9,8 \times 10^{-7}$	10,24	$4,7 \times 10^{-6}$	6,07	$9,5 \times 10^{-5}$	----	----	10^{-40}	0,070	33,41
9	19,87	$1,9 \times 10^{-5}$	12,42	$1,6 \times 10^{-5}$	7,20	<u>$7,1 \times 10^{-3}$</u>	----	----	10^{-40}	0,068	33,52

10	19,95	$2,1 \times 10^{-5}$	13,20	$2,6 \times 10^{-4}$	9,00	$4,4 \times 10^{-3}$	----	----	10^{-40}	0,065	33,41
11	21,99	$1,0 \times 10^{-4}$	13,82	<u>$4,5 \times 10^{-4}$</u>	11,15	$1,5 \times 10^{-2}$	----	----	10^{-40}	0,067	33,55
12	24,68	<u>$4,7 \times 10^{-4}$</u>	15,93	$1,9 \times 10^{-3}$	13,68	$3,22 \times 10^{-2}$	----	----	10^{-40}	0,063	33,58
13	33,12	$6,8 \times 10^{-3}$	21,36	$1,3 \times 10^{-2}$	----	----	----	----	10^{-40}	0,062	33,16
14	42,23	$2,7 \times 10^{-2}$	----	----	----	----	----	----	10^{-40}	0,062	32,97

Tabla E.6. Resultados obtenidos para la ONT4, en un arreglo de 4 usuarios.

<i>d</i> [Km]	<i>Internet Móvil</i>								<i>VoIP/datos</i>		
	QPSK		16-QAM		64-QAM		256-QAM		BER	Jitter	Q
	EVM	BER	EVM	BER	EVM	BER	EVM	BER			
1	----	----	----	----	----	----	4,18	0,035	10^{-40}	0,065	33,24
2	----	----	----	----	----	----	4,93	0,104	10^{-40}	0,069	32,8
3	----	----	----	----	----	----	5,53	0,187	10^{-40}	0,064	32,87
4	----	----	----	----	----	----	6,33	0,325	10^{-40}	0,078	32,99
5	16,94	$7,2 \times 10^{-7}$	9,35	$6,4 \times 10^{-7}$	5,45	$1,8 \times 10^{-5}$	7,71	0,598	10^{-40}	0,080	33,31
6	16,62	$4,5 \times 10^{-7}$	8,76	$1,2 \times 10^{-7}$	5,15	$6,5 \times 10^{-6}$	----	----	10^{-40}	0,074	33,22
7	16,46	$3,5 \times 10^{-7}$	9,61	$1,2 \times 10^{-6}$	5,91	$6,5 \times 10^{-6}$	----	----	10^{-40}	0,079	33,57
8	17,06	$8,5 \times 10^{-7}$	10,21	$4,4 \times 10^{-6}$	6,46	$2,1 \times 10^{-4}$	----	----	10^{-40}	0,069	33,37
9	20,51	$3,43 \times 10^{-5}$	12,43	$1,2 \times 10^{-4}$	7,21	<u>$7,2 \times 10^{-3}$</u>	----	----	10^{-40}	0,063	33,46
10	21,93	$9,8 \times 10^{-5}$	12,88	<u>$1,9 \times 10^{-4}$</u>	8,73	$3,6 \times 10^{-3}$	----	----	10^{-40}	0,065	33,51
11	23,34	$2,3 \times 10^{-4}$	13,99	$5,2 \times 10^{-4}$	9,65	$6,9 \times 10^{-2}$	----	----	10^{-40}	0,079	33,41
12	25,20	<u>$5,9 \times 10^{-4}$</u>	15,81	$1,7 \times 10^{-3}$	11,16	$1,4 \times 10^{-2}$	----	----	10^{-40}	0,073	33,49
13	33,31	$7,1 \times 10^{-3}$	21,88	$1,5 \times 10^{-2}$	----	----	----	----	10^{-40}	0,069	33,50

14	38,23	$1,6 \times 10^{-2}$	-----	-----	-----	-----	-----	-----	10^{-40}	0,067	33,34
----	-------	----------------------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	------------	-------	-------

Tabla E.7. Resultados obtenidos para la ONT1, en un arreglo de 8 usuarios.

<i>d</i> [Km]	<i>Internet Móvil</i>								<i>VoIP/datos</i>		
	QPSK		16-QAM		64-QAM		256-QAM		BER	Jitter	Q
	EVM	BER	EVM	BER	EVM	BER	EVM	BER			
1	-----	-----	-----	-----	-----	-----	4,44	0,05	10^{-40}	0,034	33,93
2	-----	-----	-----	-----	-----	-----	5,41	0,168	10^{-40}	0,041	33,75
3	-----	-----	-----	-----	-----	-----	6,44	0,345	10^{-40}	0,035	33,64
4	-----	-----	-----	-----	-----	-----	6,71	0,398	10^{-40}	0,057	32,68
5	16,35	$2,9 \times 10^{-7}$	9,18	$4,1 \times 10^{-7}$	5,61	$2,9 \times 10^{-5}$	7,45	0,545	10^{-40}	0,071	33,55
6	15,88	$1,4 \times 10^{-7}$	8,88	$1,8 \times 10^{-7}$	5,23	$8,8 \times 10^{-6}$	-----	-----	10^{-40}	0,068	33,43
7	16,17	$2,2 \times 10^{-7}$	9,65	$1,3 \times 10^{-6}$	5,33	$1,2 \times 10^{-5}$	-----	-----	10^{-40}	0,054	33,18
8	17,40	$1,3 \times 10^{-6}$	9,84	$2,1 \times 10^{-6}$	6,57	$2,6 \times 10^{-4}$	-----	-----	10^{-40}	0,066	33,22
9	19,87	$1,9 \times 10^{-5}$	12,33	$1,1 \times 10^{-4}$	7,41	$5,5 \times 10^{-3}$	-----	-----	10^{-40}	0,063	33,15
10	21,95	$9,9 \times 10^{-5}$	13,39	$3,1 \times 10^{-4}$	8,27	<u>$9,4 \times 10^{-3}$</u>	-----	-----	10^{-40}	0,059	32,93
11	24,19	<u>$3,4 \times 10^{-4}$</u>	13,86	<u>$4,7 \times 10^{-4}$</u>	9,58	$6,6 \times 10^{-2}$	-----	-----	10^{-40}	0,072	32,99
12	27,43	$1,4 \times 10^{-3}$	15,76	$1,7 \times 10^{-3}$	11,35	$1,6 \times 10^{-2}$	-----	-----	10^{-40}	0,071	32,85
13	35,92	$1,2 \times 10^{-2}$	22,76	$1,8 \times 10^{-2}$	-----	-----	-----	-----	10^{-40}	0,063	33,01
14	46,77	$4,0 \times 10^{-2}$	-----	-----	-----	-----	-----	-----	10^{-40}	0,065	32,94

Tabla E.8. Resultados obtenidos para la ONT2, en un arreglo de 8 usuarios.

<i>d</i> [Km]	<i>Internet Móvil</i>								<i>VoIP/datos</i>		
	QPSK		16-QAM		64-QAM		256-QAM		BER	Jitter	Q
	EVM	BER	EVM	BER	EVM	BER	EVM	BER			
1	----	----	----	----	----	----	4,67	0,06	10^{-40}	0,073	32,30
2	----	----	----	----	----	----	5,52	0,185	10^{-40}	0,073	32,52
3	----	----	----	----	----	----	6,65	0,386	10^{-40}	0,074	32,44
4	----	----	----	----	----	----	6,95	0,444	10^{-40}	0,079	32,86
5	16,71	$5,1 \times 10^{-7}$	9,39	$7,2 \times 10^{-7}$	5,54	$2,4 \times 10^{-5}$	7,20	0,595	10^{-40}	0,070	32,51
6	16,48	$3,6 \times 10^{-7}$	8,97	$2,3 \times 10^{-7}$	5,04	$4,3 \times 10^{-6}$	----	----	10^{-40}	0,079	32,34
7	16,11	$2,0 \times 10^{-7}$	9,74	$1,6 \times 10^{-6}$	5,24	$9,1 \times 10^{-6}$	----	----	10^{-40}	0,073	32,81
8	17,12	$9,2 \times 10^{-6}$	10,99	$1,7 \times 10^{-5}$	6,62	$2,8 \times 10^{-4}$	----	----	10^{-40}	0,078	32,21
9	19,91	$2,1 \times 10^{-5}$	12,28	$1,0 \times 10^{-4}$	7,36	<u>$8,8 \times 10^{-4}$</u>	----	----	10^{-40}	0,072	32,51
10	22,01	$1,0 \times 10^{-4}$	13,19	$2,6 \times 10^{-4}$	8,21	$2,3 \times 10^{-3}$	----	----	10^{-40}	0,081	32,37
11	25,93	<u>$8,2 \times 10^{-4}$</u>	14,60	<u>$8,2 \times 10^{-4}$</u>	10,88	$1,3 \times 10^{-2}$	----	----	10^{-40}	0,071	32,90
12	28,11	$1,8 \times 10^{-3}$	18,66	$6,2 \times 10^{-3}$	12,52	$2,3 \times 10^{-2}$	----	----	10^{-40}	0,073	32,58
13	33,33	$7,1 \times 10^{-2}$	25,02	$2,8 \times 10^{-2}$	----	----	----	----	10^{-40}	0,071	32,10
14	39,87	$2,0 \times 10^{-2}$	----	----	----	----	----	----	10^{-40}	0,077	32,49

Tabla E.9. Resultados obtenidos para la ONT3, en un arreglo de 8 usuarios.

<i>d</i> [Km]	<i>Internet Móvil</i>								<i>VoIP/datos</i>		
	QPSK		16-QAM		64-QAM		256-QAM		BER	Jitter	Q
	EVM	BER	EVM	BER	EVM	BER	EVM	BER			
1	----	----	----	----	----	----	4,43	0,054	10^{-40}	0,071	31,90

2	----	----	----	----	----	----	5,69	0,212	10^{-40}	0,061	31,92
3	----	----	----	----	----	----	6,48	0,353	10^{-40}	0,068	31,99
4	----	----	----	----	----	----	7,13	0,481	10^{-40}	0,064	31,85
5	16,96	$7,4 \times 10^{-7}$	9,67	$1,4 \times 10^{-6}$	5,56	$2,5 \times 10^{-5}$	8,01	0,659	10^{-40}	0,071	31,50
6	16,42	$3,3 \times 10^{-7}$	9,34	$6,3 \times 10^{-7}$	5,28	$1,0 \times 10^{-5}$	----	----	10^{-40}	0,065	31,92
7	16,68	$4,9 \times 10^{-7}$	9,14	$3,7 \times 10^{-7}$	5,13	$6,1 \times 10^{-6}$	----	----	10^{-40}	0,070	32,12
8	17,14	$9,5 \times 10^{-7}$	10,09	$3,4 \times 10^{-6}$	5,92	$6,6 \times 10^{-5}$	----	----	10^{-40}	0,068	32,11
9	18,36	$4,3 \times 10^{-5}$	11,99	$7,2 \times 10^{-4}$	7,49	<u>$1,0 \times 10^{-3}$</u>	----	----	10^{-40}	0,073	32,21
10	22,31	$1,3 \times 10^{-4}$	12,79	$1,8 \times 10^{-4}$	8,07	$1,9 \times 10^{-3}$	----	----	10^{-40}	0,064	31,97
11	24,93	<u>$5,3 \times 10^{-4}$</u>	13,96	<u>$5,1 \times 10^{-4}$</u>	11,24	$1,5 \times 10^{-2}$	----	----	10^{-40}	0,065	32,00
12	28,22	$1,9 \times 10^{-3}$	16,05	$1,9 \times 10^{-3}$	13,46	$3,1 \times 10^{-2}$	----	----	10^{-40}	0,068	31,98
13	37,14	$2,4 \times 10^{-2}$	25,02	$2,7 \times 10^{-2}$	----	----	----	----	10^{-40}	0,069	31,90
14	42,26	$1,6 \times 10^{-2}$	----	----	----	----	----	----	10^{-40}	0,071	32,39

Tabla E.10. Resultados obtenidos para la ONT4, en un arreglo de 8 usuarios.

<i>d</i> [Km]	<i>Internet Móvil</i>								<i>VoIP/datos</i>		
	QPSK		16-QAM		64-QAM		256-QAM		BER	Jitter	Q
	EVM	BER	EVM	BER	EVM	BER	EVM	BER			
1	----	----	----	----	----	----	4,23	0,038	10^{-40}	0,059	34,13
2	----	----	----	----	----	----	4,31	0,044	10^{-40}	0,059	34,05
3	----	----	----	----	----	----	5,72	0,217	10^{-40}	0,055	34,14
4	----	----	----	----	----	----	6,88	0,431	10^{-40}	0,057	33,98
5	16,14	$2,1 \times 10^{-7}$	9,66	$1,4 \times 10^{-6}$	5,41	$1,6 \times 10^{-5}$	7,07	0,469	10^{-40}	0,059	33,95

6	15,90	$1,4 \times 10^{-7}$	9,27	$5,3 \times 10^{-7}$	5,29	$1,1 \times 10^{-5}$	----	----	10^{-40}	0,061	33,83
7	16,18	$2,3 \times 10^{-7}$	9,81	$1,9 \times 10^{-6}$	5,15	$6,6 \times 10^{-6}$	----	----	10^{-40}	0,054	33,78
8	17,39	$1,3 \times 10^{-6}$	10,49	$7,6 \times 10^{-6}$	5,85	$5,6 \times 10^{-5}$	----	----	10^{-40}	0,056	33,62
9	18,21	$3,7 \times 10^{-6}$	11,98	$7,1 \times 10^{-4}$	7,34	<u>$8,6 \times 10^{-4}$</u>	----	----	10^{-40}	0,054	32,95
10	21,87	$9,4 \times 10^{-5}$	12,95	$2,1 \times 10^{-4}$	8,91	$4,2 \times 10^{-3}$	----	----	10^{-40}	0,055	32,91
11	25,13	<u>$5,8 \times 10^{-4}$</u>	14,41	<u>$7,2 \times 10^{-4}$</u>	11,50	$1,7 \times 10^{-2}$	----	----	10^{-40}	0,056	33,16
12	28,48	$2,1 \times 10^{-3}$	15,25	$1,3 \times 10^{-3}$	12,96	$2,7 \times 10^{-2}$	----	----	10^{-40}	0,057	32,97
13	35,06	$9,9 \times 10^{-3}$	21,61	$1,4 \times 10^{-2}$	----	----	----	----	10^{-40}	0,065	32,94
14	40,64	$2,2 \times 10^{-2}$	----	----	----	----	----	----	10^{-40}	0,064	33,55

Tabla E.11. Resultados obtenidos para la ONT5, en un arreglo de 8 usuarios.

<i>d</i> [Km]	<i>Internet Móvil</i>								<i>VoIP/datos</i>		
	QPSK		16-QAM		64-QAM		256-QAM		BER	Jitter	Q
	EVM	BER	EVM	BER	EVM	BER	EVM	BER			
1	----	----	----	----	----	----	4,67	0,07	10^{-40}	0,066	33,93
2	----	----	----	----	----	----	4,9	0,100	10^{-40}	0,063	33,85
3	----	----	----	----	----	----	6,29	0,317	10^{-40}	0,065	33,44
4	----	----	----	----	----	----	7,07	0,469	10^{-40}	0,067	33,28
5	16,71	$5,1 \times 10^{-7}$	9,39	$7,2 \times 10^{-7}$	5,77	$4,5 \times 10^{-5}$	7,2	0,495	10^{-40}	0,061	33,15
6	16,49	$3,7 \times 10^{-7}$	9,21	$4,5 \times 10^{-7}$	5,36	$1,3 \times 10^{-5}$	----	----	10^{-40}	0,066	33,41
7	16,77	$5,6 \times 10^{-7}$	9,89	$2,3 \times 10^{-6}$	5,25	$9,4 \times 10^{-6}$	----	----	10^{-40}	0,064	33,32
8	17,39	$1,3 \times 10^{-6}$	10,82	$1,3 \times 10^{-5}$	6,29	$1,5 \times 10^{-5}$	----	----	10^{-40}	0,066	33,22
9	18,65	$5,9 \times 10^{-6}$	11,83	$5,8 \times 10^{-5}$	7,46	<u>$1,0 \times 10^{-3}$</u>	----	----	10^{-40}	0,061	33,45

10	21,21	$5,9 \times 10^{-5}$	12,97	$2,1 \times 10^{-4}$	8,78	$3,7 \times 10^{-3}$	----	----	10^{-40}	0,069	33,19
11	25,85	<u>$7,9 \times 10^{-4}$</u>	13,69	<u>$4,1 \times 10^{-4}$</u>	11,96	$1,9 \times 10^{-2}$	----	----	10^{-40}	0,062	33,51
12	30,54	$3,7 \times 10^{-3}$	16,86	$2,9 \times 10^{-3}$	14,01	$3,4 \times 10^{-2}$	----	----	10^{-40}	0,061	33,44
13	37,22	$1,4 \times 10^{-2}$	23,77	$2,2 \times 10^{-2}$	----	----	----	----	10^{-40}	0,062	33,91
14	47,16	$4,1 \times 10^{-2}$	----	----	----	----	----	----	10^{-40}	0,065	33,94

Tabla E.12. Resultados obtenidos para la ONT6, en un arreglo de 8 usuarios.

<i>d</i> [Km]	<i>Internet Móvil</i>								<i>VoIP/datos</i>		
	QPSK		16-QAM		64-QAM		256-QAM		BER	Jitter	Q
	EVM	BER	EVM	BER	EVM	BER	EVM	BER			
1	----	----	----	----	----	----	4,79	0,088	10^{-40}	0,075	31,80
2	----	----	----	----	----	----	5,29	0,151	10^{-40}	0,072	31,72
3	----	----	----	----	----	----	6,73	0,401	10^{-40}	0,072	31,94
4	----	----	----	----	----	----	6,97	0,448	10^{-40}	0,079	31,92
5	16,72	$5,2 \times 10^{-7}$	9,42	$7,7 \times 10^{-7}$	5,24	$9,1 \times 10^{-6}$	7,30	0,515	10^{-40}	0,072	32,20
6	16,18	$2,3 \times 10^{-7}$	9,18	$4,2 \times 10^{-7}$	4,99	$3,6 \times 10^{-7}$	----	----	10^{-40}	0,078	32,66
7	16,79	$5,8 \times 10^{-7}$	9,76	$1,7 \times 10^{-6}$	5,26	$9,7 \times 10^{-6}$	----	----	10^{-40}	0,071	31,88
8	17,39	$1,3 \times 10^{-6}$	10,74	$1,2 \times 10^{-5}$	5,72	$3,9 \times 10^{-5}$	----	----	10^{-40}	0,079	31,91
9	19,24	$1,1 \times 10^{-5}$	12,02	$7,5 \times 10^{-5}$	6,99	<u>$5,2 \times 10^{-4}$</u>	----	----	10^{-40}	0,074	31,81
10	22,88	$1,8 \times 10^{-4}$	13,65	$3,9 \times 10^{-4}$	8,09	$2,0 \times 10^{-3}$	----	----	10^{-40}	0,079	31,77
11	25,50	<u>$6,8 \times 10^{-4}$</u>	14,74	<u>$9,0 \times 10^{-4}$</u>	10,98	$1,4 \times 10^{-2}$	----	----	10^{-40}	0,069	31,90
12	26,88	$1,2 \times 10^{-3}$	18,73	$6,3 \times 10^{-3}$	12,36	$2,2 \times 10^{-2}$	----	----	10^{-40}	0,074	32,38
13	31,43	$4,6 \times 10^{-2}$	25,98	$3,2 \times 10^{-2}$	----	----	----	----	10^{-40}	0,073	32,60

14	40,26	$2,1 \times 10^{-2}$	-----	-----	-----	-----	-----	-----	10^{-40}	0,071	32,29
----	-------	----------------------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	------------	-------	-------

Tabla E.13. Resultados obtenidos para la ONT7, en un arreglo de 8 usuarios.

<i>d</i> [Km]	<i>Internet Móvil</i>								<i>VoIP/datos</i>		
	QPSK		16-QAM		64-QAM		256-QAM		BER	Jitter	Q
	EVM	BER	EVM	BER	EVM	BER	EVM	BER			
1	-----	-----	-----	-----	-----	-----	4,27	0,041	10^{-40}	0,067	33,57
2	-----	-----	-----	-----	-----	-----	4,99	0,111	10^{-40}	0,069	32,73
3	-----	-----	-----	-----	-----	-----	5,24	0,144	10^{-40}	0,069	32,66
4	-----	-----	-----	-----	-----	-----	6,18	0,297	10^{-40}	0,068	32,59
5	16,39	$3,1 \times 10^{-7}$	9,34	$6,3 \times 10^{-7}$	5,95	$7,1 \times 10^{-5}$	7,78	0,612	10^{-40}	0,064	33,71
6	15,97	$1,6 \times 10^{-7}$	9,13	$3,6 \times 10^{-7}$	5,65	$3,3 \times 10^{-5}$	-----	-----	10^{-40}	0,052	33,47
7	16,41	$3,3 \times 10^{-7}$	9,11	$3,4 \times 10^{-7}$	5,50	$2,1 \times 10^{-6}$	-----	-----	10^{-40}	0,072	33,58
8	17,25	$1,1 \times 10^{-6}$	10,05	$3,2 \times 10^{-6}$	6,61	$2,8 \times 10^{-5}$	-----	-----	10^{-40}	0,063	33,50
9	18,67	$6,1 \times 10^{-5}$	11,86	$6,1 \times 10^{-5}$	7,15	<u>$6,6 \times 10^{-4}$</u>	-----	-----	10^{-40}	0,051	33,54
10	21,57	$7,7 \times 10^{-4}$	12,78	$1,7 \times 10^{-4}$	8,40	$2,7 \times 10^{-3}$	-----	-----	10^{-40}	0,068	33,42
11	26,18	<u>$9,1 \times 10^{-4}$</u>	13,14	<u>$2,5 \times 10^{-4}$</u>	11,30	$1,6 \times 10^{-2}$	-----	-----	10^{-40}	0,064	33,48
12	33,41	$7,3 \times 10^{-3}$	16,29	$2,3 \times 10^{-3}$	14,91	$4,1 \times 10^{-2}$	-----	-----	10^{-40}	0,065	33,54
13	38,60	$1,7 \times 10^{-2}$	22,69	$1,8 \times 10^{-2}$	-----	-----	-----	-----	10^{-40}	0,067	33,22
14	47,97	$4,4 \times 10^{-2}$	-----	-----	-----	-----	-----	-----	10^{-40}	0,067	33,35

Tabla E.14. Resultados obtenidos para la ONT8, en un arreglo de 8 usuarios.

<i>d</i> [Km]	<i>Internet Móvil</i>								<i>VoIP/datos</i>		
	QPSK		16-QAM		64-QAM		256-QAM		BER	Jitter	Q
	EVM	BER	EVM	BER	EVM	BER	EVM	BER			
1	----	----	----	----	----	----	4,14	0,033	10^{-40}	0,062	32,58
2	----	----	----	----	----	----	4,56	0,065	10^{-40}	0,060	32,72
3	----	----	----	----	----	----	5,10	0,125	10^{-40}	0,059	32,67
4	----	----	----	----	----	----	5,98	0,261	10^{-40}	0,058	32,58
5	16,79	$5,8 \times 10^{-7}$	9,04	$2,8 \times 10^{-7}$	6,05	$9,0 \times 10^{-5}$	7,18	0,491	10^{-40}	0,054	32,72
6	16,00	$1,7 \times 10^{-7}$	8,73	$1,1 \times 10^{-7}$	5,75	$4,3 \times 10^{-5}$	----	----	10^{-40}	0,052	32,46
7	16,31	$2,7 \times 10^{-7}$	9,12	$3,5 \times 10^{-7}$	5,33	$1,2 \times 10^{-5}$	----	----	10^{-40}	0,051	32,59
8	17,45	$1,4 \times 10^{-6}$	9,99	$2,8 \times 10^{-6}$	6,31	$1,5 \times 10^{-4}$	----	----	10^{-40}	0,053	33,49
9	19,17	$1,0 \times 10^{-5}$	11,26	$2,7 \times 10^{-5}$	7,02	<u>$5,5 \times 10^{-4}$</u>	----	----	10^{-40}	0,051	32,55
10	22,07	$1,1 \times 10^{-4}$	12,58	$1,4 \times 10^{-4}$	8,09	$2,0 \times 10^{-3}$	----	----	10^{-40}	0,058	33,41
11	26,33	<u>$9,6 \times 10^{-4}$</u>	13,74	<u>$4,2 \times 10^{-4}$</u>	11,32	$1,6 \times 10^{-2}$	----	----	10^{-40}	0,054	32,49
12	34,11	$8,3 \times 10^{-3}$	16,25	$2,2 \times 10^{-3}$	14,99	$4,2 \times 10^{-2}$	----	----	10^{-40}	0,055	32,53
13	39,55	$1,9 \times 10^{-2}$	21,70	$1,5 \times 10^{-2}$	----	----	----	----	10^{-40}	0,057	32,23
14	45,90	$3,7 \times 10^{-2}$	----	----	----	----	----	----	10^{-40}	0,057	32,34

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. Duymovic, E. Unigarro, "*Incidencia a nivel físico de la técnica de modulación M-QAM en un módulo RoF sobre una red FTTh-GPON*", Tesis de pregrado, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia, 2021.
- [2] Third Generation Partnership Project 3GPP, "Release 15 Description, Technical Specification Group Service and System Aspects," Septiembre de 2019.
- [3] Third Generation Partnership Project 3GPP, "Physcals Channels and Modulation (Release 15)," Septiembre de 2019.
- [4] J. Campos, "Understanding the 5G NR Physical Layer". Keysight Technologies, 2017.
- [5] H. K. Al-Musawi, W.P. Ng, Z. Ghassemlooy, C. Lu, N. Lalam, "Experimental Analysis of EVM and BER for Indoor Radio-over-Fiber Networks using Polymer Optical Fiber," *20th European Conference on Networks and Optical Communications*, 2015.
- [6] B. Nebendahl, R. Schmogrow, T. Dennis, A. Josten, D. Hillerkuss, S. Koenig, J. Meyer, M. Dreschmann, M. Winter, M. Huebner, W. Freude, C. Koos, J. Leuthold, "Quality Metrics in Optical Modulations Analysis: EVM and its relation to Q-factor, OSNR, and BER," *2012 Asia Communications and Photonics Conference (ACP)*, 2012.