



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN  
INGENIERIA

IMPLEMENTACIÓN, ANÁLISIS Y  
COMPARACIÓN EXPERIMENTAL DEL  
DESEMPEÑO DE REDES DE FIBRA ÓPTICA,  
PAR TRENZADO Y PLC.

T E S I S  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRA EN INGENIERIA

INGENIERIA ELECTRICA - TELECOMUNICACIONES  
P R E S E N T A:

DOLORES ALEJANDRA VASQUEZ CARBAJAL

TUTOR:  
DR. RAMÓN GUTIÉRREZ CASTREJON

Noviembre 2012



INSTITUTO  
DE INGENIERÍA  
UNAM

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: DR. OLEKSANDR MARTYNYUK  
Secretario: DR. JOSÉ ISMAEL MARTINEZ LÓPEZ  
Vocal: DR. RAMÓN GUTIÉRREZ CASTREJÓN  
1<sup>er</sup>. Suplente: DR. JAVIER GÓMEZ CASTELLANOS  
2<sup>do</sup>. Suplente: DR. ESAU VICENTE VIVAS

Lugar donde se realizó la tesis: INSTITUTO DE INGENIERÍA,  
UNAM, MÉXICO, D.F.

**TUTOR DE TESIS:**

DR. RAMÓN GUTIÉRREZ CASTREJÓN

---

**FIRMA**

# RESUMEN

Los sistemas PLC (*Power Line Communications*) son una tecnología que permite ofrecer servicios de telecomunicaciones de banda ancha, se basan en la utilización de la red de energía eléctrica de media y baja tensión para brindar a los usuarios la transmisión de voz, datos y video [1,2].

En la actualidad hay sectores de la población que por falta de recursos económicos aún no cuentan con servicios de telecomunicaciones, una de las ventajas de las redes PLC es que a través del cableado eléctrico existente se pueden brindar dichos servicios de telecomunicaciones a la mayor parte de la población. Sin embargo, la desventaja principal de esta tecnología es que puede llegar a ser una gran fuente de interferencias para otros sistemas de comunicaciones, entre los que se encuentran las redes de radioaficionados. En la figura I se representa una red PLC.

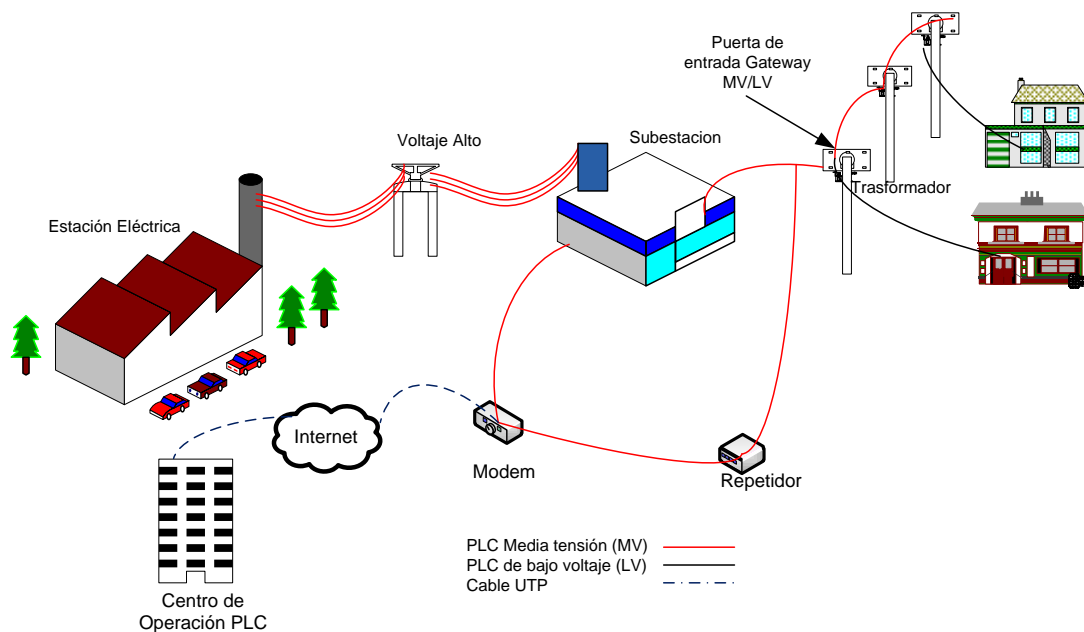


Figura I. Estructura de una red PLC

Actualmente la Comisión Federal de Electricidad (CFE) tiene mucho interés en el estudio de las comunicaciones mediante redes de cable de cobre PLC.

No obstante, también las redes de Fibra Óptica son de gran importancia para dicha empresa, ya que cuenta con una red nacional de Fibra Óptica que se emplea para las aplicaciones técnico administrativas de la misma CFE y hoy en día esta red cuenta con una longitud de 22 mil kilómetros de Fibra Óptica que tiene el potencial de proporcionar servicios a terceros [4].

En la actualidad la tecnología de comunicaciones más utilizada es el cable UTP, ya que tiene un bajo costo y es la tecnología con la que el usuario se encuentra más familiarizado.

En esta tesis se implementará, analizará y se comparará el comportamiento de las redes de cable UTP, Fibra Óptica y PLC para dictaminar cuál de estas tecnologías tiene el mejor desempeño.

**Esta tesis se realizó con  
el apoyo de una beca de la  
Coordinación de Estudios de Posgrado CEP-UNAM**

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por abrirme las puertas del conocimiento y brindarme una excelente formación académica.

A mi tutor el Dr. Ramón Gutiérrez Castrejón, porque nunca me dejó sola en los momentos más difíciles de mi carrera. Por brindarme su apoyo, su confianza, su comprensión y sobre todo porque compartió conmigo un poco del gran conocimiento que posee.

Al Instituto de Ingeniería, por brindarme todas las facilidades para la realización de este trabajo de tesis.

A la Coordinación de Estudios de Posgrado de la UNAM, por el apoyo económico recibido durante la realización de este trabajo de tesis.

A cada uno de los profesores del Posgrado de Ingeniería, por brindarme su apoyo y un poco de su conocimiento a lo largo de estos años, en especial al M.en I. Ricardo Garibay Jiménez.

## **DEDICATORIAS**

A mis padres María y Pedro porque aunque les fallé, me brindaron todo su amor y su cariño para seguir adelante, gracias por darme la vida y sobre todo por apoyarme siempre.

A Jesús Alejandro, por ser mi nuevo compañero, por demostrarme día con día su amor y por brindarme su apoyo incondicionalmente.

A mi hijo Guillermo Alejandro, por ser la personita que me llena de alegría todos los días.

A mis hermanas, Isabel, Ana, Vero y Dulce por ser parte importante de mi vida, por su apoyo y por sus consejos.

A Guillermo, porque fue un gran hermano y porque sé que donde quiera que esté siempre estará cuidándome, gracias por todos los momentos divertidos que me hiciste pasar.

A mi tía Catalina y mi prima Erika, por todo el apoyo recibido a lo largo de mi vida.

# CONTENIDO

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| RESUMEN .....         | III |
| AGRADECIMIENTOS ..... | V   |
| DEDICATORIAS .....    | VI  |
| ACRÓNIMOS .....       | XIV |

# ÍNDICE

|   |           |
|---|-----------|
| <b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN .....</b>                         | <b>1</b>  |
| 1.1 Introducción a las tecnologías .....                      | 1         |
| 1.1.1 Fibra Óptica .....                                      | 1         |
| 1.1.1.1 Cables de Fibra Óptica .....                          | 2         |
| 1.1.1.2 Tipos de Fibra Óptica.....                            | 2         |
| 1.1.1.3 Atenuación en la Fibra Óptica.....                    | 3         |
| 1.1.1.4 Dispersión en la Fibra Óptica.....                    | 4         |
| 1.1.1.5 Conexiones en la Fibra Óptica .....                   | 5         |
| 1.1.1.6 Recomendaciones para la Fibra SMF .....               | 6         |
| 1.1.1.6.1 Recomendación G.652 .....                           | 6         |
| 1.1.1.6.1.1 Subcategorías de la recomendación G.652[18] ..... | 7         |
| 1.1.1.6.2 Recomendación G.655 .....                           | 8         |
| 1.1.1.6.2.1 Subcategorías de la recomendación G.655[19] ..... | 8         |
| 1.1.2 UTP .....   | 9         |
| 1.1.2.1 Cable de par trenzado.....                            | 10        |
| 1.1.2.1.1 Cable de par trenzado UTP .....                     | 10        |
| 1.1.2.1.2 Cable de par trenzado STP .....                     | 11        |
| 1.1.3 PLC Power Line Communication .....                      | 12        |
| 1.1.3.1 Principios de la tecnología PLC .....                 | 12        |
| 1.1.3.2 Cable PLC .....                                       | 13        |
| 1.4 Objetivos y motivaciones.....                             | 17        |
| <br>  |           |
| <b>CAPÍTULO 2. TECNOLOGÍAS DE TRANSMISIÓN .....</b>           | <b>18</b> |
| 2.1 Ethernet.....   | 18        |
| 2.1.1 Funcionamiento de Ethernet .....                        | 20        |
| 2.1.2 Modelos OSI y Modelo TCP/IP.....                        | 20        |

|         |  |    |
|---------|--|----|
| 2.1.2.1 | Modelo OSI.....  | 20 |
| 2.1.2.2 | Modelo TCP/IP .....  | 22 |
| 2.1.3   | CSMA/CD.....   | 24 |
| 2.1.4   | Codificación.....  | 26 |
| 2.1.5   | Trama Ethernet.....  | 27 |
| 2.1.6   | Arquitectura de la capa Ethernet.....  | 28 |
| 2.1.7   | Direccionamiento MAC.....  | 29 |
| 2.2     | Fast Ethernet .....  | 30 |
| 2.2.1   | Arquitectura de las capas en Fast Ethernet .....                                 | 30 |
| 2.2.2   | Codificación utilizada en Fast Ethernet .....                                    | 32 |
| 2.2.3   | Trama Fast Ethernet.....   | 34 |
| 2.3     | Gigabit Ethernet.....  | 35 |
| 2.3.1   | Codificación Gigabit Ethernet .....  | 35 |
| 2.3.2   | Arquitectura de las capas Gigabit Ethernet.....                                  | 36 |
| 2.3.3   | Diferencia entre las Tecnologías Ethernet, Fast Ethernet y Gigabit Ethernet..... | 38 |
| 2.4     | PLC .....  | 39 |
| 2.4.1   | OFDM .....   | 39 |
| 2.4.2   | Codificación utilizada en la tecnología PLC .....                                | 40 |
| 2.4.3   | Trama PLC.....   | 42 |
| 2.4.4   | TDMA.....  | 43 |
| 2.4.5   | CSMA/CA.....   | 43 |
| 2.4.6   | Estándar Home Plug AV[20] .....  | 45 |

**CAPÍTULO 3. MEDIOS DE TRANSMISIÓN (IMPLANTACIÓN DE LAS REDES) .....48**

|       |                                 |    |
|-------|---------------------------------|----|
| 3.1   | Red.....                        | 48 |
| 3.2   | Topologías básicas usadas ..... | 48 |
| 3.2.1 | Fibra Óptica .....              | 52 |
| 3.2.2 | Par Trenzado .....              | 55 |
| 3.2.3 | PLC .....                       | 57 |

**CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....60**

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| 4.1       | Introducción .....  | 60 |
| 4.2       | Herramientas de medición .....  | 61 |
| 4.3       | Parámetros de desempeño de cada red .....   | 63 |
| 4.4       | Throughput.....   | 63 |
| 4.5       | Análisis de paquetes durante el proceso de transmisión .....                              | 66 |
| 4.6       | Resultados para las tecnologías estudiadas.....   | 68 |
| 4.6.1     | UTP.....  | 68 |
| 4.6.1.1   | Resultados obtenidos para la Topología punto-multipunto .....                             | 69 |
| 4.6.1.2   | Resultados obtenidos para la Topología punto a punto .....                                | 70 |
| 4.6.1.2.1 | Análisis de paquetes para la topología punto a punto UTP con ruido electromagnético ..... | 72 |
| 4.6.1.2.2 | Análisis de paquetes para la topología punto a punto UTP sin ruido electromagnético.....  | 73 |
| 4.6.2     | FIBRA ÓPTICA.....   | 74 |
| 4.6.2.1   | Resultados obtenidos para la Topología punto-multipunto .....                             | 75 |



|   |    |
|---|----|
| 4.6.2.2 Resultados obtenidos para la Topología punto a punto .....  | 77 |
| 4.6.2.2.1 Análisis de paquetes para la topología punto a punto Fibra Óptica con ruido electromagnético .....                        | 79 |
| 4.6.2.2.2 Análisis de paquetes para la topología punto a punto Fibra Óptica sin ruido electromagnético .....                        | 80 |
| 4.6.3 PLC.....  | 80 |
| 4.6.3.1 Resultados obtenidos para la Topología punto-multipunto.....  | 82 |
| 4.6.3.2 Resultados obtenidos para la Topología punto a punto .....  | 83 |
| 4.6.3.3 Análisis de paquetes para la topología punto a punto prueba PLC con ruido electromagnético .....                            | 85 |
| 4.6.3.4 Análisis de paquetes para la topología punto a punto prueba PLC sin ruido electromagnético.....                             | 87 |
| 4.6.3.5 Análisis de paquetes para la topología punto a punto prueba PLC con ruido electromagnético y filtro supresor de ruido ..... | 89 |
| 4.7 Comparación del desempeño entre las diferentes tecnologías de transmisión .....   | 91 |
| 4.7.1 Topología punto a punto .....   | 91 |
| 4.7.2 Topología punto-multipunto.....   | 93 |

**CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES GENERALES .....95**

**REFERENCIAS .....97**

**ANEXOS A.....98**

## ÍNDICE DE FIGURAS

### CAPÍTULO 1

|  |    |
|--|----|
| Figura 1.1 Cable de Fibra Óptica dúplex.....   | 2  |
| Figura 1.2 Elementos del cable de Fibra Óptica.....  | 2  |
| Figura 1.3 Atenuación de la luz en una Fibra Óptica .....                                  | 4  |
| Figura 1.4 Fenómeno de la dispersión.....  | 4  |
| Figura 1.5 Interferencia Intersimbólica .....  | 5  |
| Figura 1.6 Causas de atenuación por empalmes.....  | 6  |
| Figura 1.7 Cable de par trenzado sin apantallar UTP.....                                   | 10 |
| Figura 1.8 Cable de par trenzado blindado STP .....  | 12 |
| Figura 1.9 Ancho de banda y modulación de las tres generaciones de la tecnología PLC ..... | 13 |
| Figura 1.10 Elementos del cable eléctrico.....   | 14 |

### CAPÍTULO 2

|  |    |
|--|----|
| Figura 2.1 Canal ascendente y Canal descendente .....                                | 19 |
| Figura 2.2 Arquitectura original de Ethernet.....                                    | 20 |
| Figura 2.3 Capas del modelo OSI.....   | 21 |
| Figura 2.4 Modelo TCP/IP .....   | 23 |
| Figura 2.5 Procedimiento CSMA/CD .....   | 25 |
| Figura 2.6 Ejemplo de codificación Manchester (a) y Manchester diferencial (b) ..... | 27 |
| Figura 2.7 Estructura de la trama Ethernet .....                                     | 28 |
| Figura 2.8 Capas del modelo de referencia OSI y Ethernet .....                       | 28 |
| Figura 2.9 Arquitectura de las capas en Ethernet .....                               | 29 |
| Figura 2.10 Arquitectura de las capas en Fast Ethernet .....                         | 31 |
| Figura 2.11 Cambio de estado entre los niveles de tensión.....                       | 33 |
| Figura 2.12 ejemplo para las codificaciones NRZI y MLT-3 .....                       | 34 |
| Figura 2.13 Estructura de la trama Ethernet .....                                    | 35 |
| Figura 2.14 Arquitectura de las capas en Gigabit Ethernet .....                      | 37 |
| Figura 2.15 Sistemas FDM y OFDM .....  | 39 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 2.16 OFDM .....  | 40 |
| Figura 2.17 Constelaciones para cada tipo de modulación .....           | 42 |
| Figura 2.18 Ejemplo TDMA .....  | 43 |
| Figura 2.19 Detección del canal virtual con una red de 4 usuarios ..... | 44 |
| Figura 2.20 Formato de trama larga PLC del estándar HomePlug.....       | 45 |
| Figura 2.21 Formato de trama corta PLC del estándar HomePlug.....       | 46 |

### CAPÍTULO 3

|  |    |
|--|----|
| Figura 3.1 Topología punto-multipunto .....  | 49 |
| Figura 3.2 Topología punto a punto .....   | 50 |
| Figura 3.3 Modelo de referencia OSI en comparación con el protocolo TCP/IP .....                               | 52 |
| Figura 3.4 Topología punto-multipunto de la red de Fibra Óptica.....   | 53 |
| Figura 3.5 Implementación física de la red de Fibra Óptica con 8 clientes y un servidor .....                  | 54 |
| Figura 3.6 Implementación física de la red de Fibra Óptica con un cliente y un servidor .....                  | 54 |
| Figura 3.7. Implementación física de la red de Fibra Óptica con un cliente y un servidor .....                 | 55 |
| Figura 3.8 Topología punto-multipunto de la red con cable UTP.....   | 55 |
| Figura 3.9 Implementación física de la red con cable UTP con 8 clientes y un servidor .....                    | 56 |
| Figura 3.10 Elementos utilizados en la implementación de la red utilizando UTP.....                            | 56 |
| Figura 3.11 Implementación física de la red con cable UTP utilizando un cliente y un servidor .....            | 57 |
| Figura 3.12 Topología punto-multipunto de la red utilizando un par de cable de cobre número 12 .....           | 57 |
| Figura 3.13 Conexión de los Modem PLC, filtro supresor de ruido electromagnético y motor de la licuadora ..... | 58 |
| Figura 3.14 Topología física de la red PLC.....  | 59 |
| Figura 3.15 Implementación física de la topología punto a punto de la red utilizando PLC.....                  | 59 |

### CAPÍTULO 4

|   |    |
|---|----|
| Figura 4.1 Captura de paquetes hecha con Wireshark .....                  | 61 |
| Figura 4.2 Información reportada por el cliente utilizando Iperf .....    | 62 |
| Figura 4.3 Configuración del servidor FTP utilizando el software WinFtp.. | 63 |
| Figura 4.4 Encabezados TCP/IP .....                                       | 64 |
| Figura 4.5 Capas del modelo OSI y su equivalencia con el protocolo        |    |

|   |    |
|---|----|
| TCP/IP .....  | 64 |
| Figura 4.6 Capas del modelo TCP/IP que se albergan en cada uno de los dispositivos de la red .....                      | 66 |
| Figura 4.7 Análisis de paquetes .....   | 67 |
| Figura 4.8 Throughput en capa física para la tecnología UTP .....   | 68 |
| Figura 4.9 Parámetros de latencia y RTT para la tecnología UTP .....  | 69 |
| Figura 4.10 Gráfica del throughput registrado por cada cliente para tecnología UTP .....                                | 70 |
| Figura 4.11 Gráfica del comportamiento del throughput contra número de medición, para la tecnología UTP .....           | 72 |
| Figura 4.12 Gráfica del flujo de paquetes para la prueba UTP con ruido electromagnético .....                           | 73 |
| Figura 4.13 Gráfica del flujo de paquetes para la prueba UTP sin ruido electromagnético.....                            | 74 |
| Figura 4.14 Throughput en capa física para la tecnología Fibra Óptica .....   | 75 |
| Figura 4.15 Parámetros de latencia y RTT para la tecnología Fibra Óptica .....  | 75 |
| Figura 4.16 Gráfica del comportamiento del throughput contra número de cliente, para la prueba de Fibra Óptica .....    | 76 |
| Figura 4.17 Gráfica del comportamiento del throughput contra número de medición, para la tecnología Fibra Óptica.....   | 78 |
| Figura 4.18 Gráfica del flujo de paquetes para la prueba de Fibra Óptica con ruido electromagnético .....               | 79 |
| Figura 4.19 Gráfica del flujo de paquetes para la prueba de Fibra Óptica sin ruido electromagnético .....               | 80 |
| Figura 4.20 Throughput en capa física para la tecnología PLC .....  | 81 |
| Figura 4.21 Parámetros de latencia y RTT para la tecnología PLC .....   | 81 |
| Figura 4.22 Gráfica del comportamiento del throughput contra número de cliente, para la prueba de PLC.....              | 83 |
| Figura 4.23 Gráfica del comportamiento del throughput contra número de experimento, para la prueba de PLC.....          | 85 |
| Figura 4.24 Gráfica del flujo de paquetes para la prueba de PLC con ruido electromagnético.....                         | 86 |
| Figura 4.25 Gráfica del flujo de paquetes para la prueba PLC sin ruido electromagnético.....                            | 88 |
| Figura 4.26 Gráfica del flujo de paquetes para la prueba PLC con ruido electromagnético y filtro supresor de ruido..... | 90 |
| Figura 4.27 Comparación del comportamiento de las tres tecnologías.....   | 92 |
| Figura 4.28 Comparación del throughput FTP de las tres tecnologías.....   | 92 |
| Figura 4.29 Comparación del comportamiento de las tres tecnologías.....   | 94 |

# ÍNDICE DE TABLAS

## CAPÍTULO 1

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1.1 Valores y características importantes para la fibra G.652A[18] .....       | 7  |
| Tabla 1.2 Valores y características importantes para la fibra G.652B[18].....        | 7  |
| Tabla 1.3 Valores y características importantes para la fibra G.652C[18].....        | 7  |
| Tabla 1.4 Valores y características importantes para la fibra G.655D[19] ....        | 8  |
| Tabla 1.5 Valores y características importantes para la fibra G.655E[19] .....       | 9  |
| Tabla 1.6 Servicios que comparten la banda de frecuencias con los sistemas PLC ..... | 15 |

## CAPÍTULO 2

|  |    |
|--|----|
| Tabla 2.1. Tipos de cables empleados en Fast Ethernet .....                  | 30 |
| Tabla 2.2 Descripción de la arquitectura de las capas en Fast Ethernet.....  | 31 |
| Tabla 2.3 Representación de los datos en codificación 4B/5B .....            | 32 |
| Tabla 2.4 Medio físico y sus diferentes codificaciones.....                  | 33 |
| Tabla 2.5. Tipos de cables empleados en Gigabit Ethernet.....                | 35 |
| Tabla 2.6 Descripción de la arquitectura de las capas en Gigabit Ethernet... | 37 |
| Tabla 2.7 Tiempo de bit.....   | 38 |
| Tabla 2.8 Espacio intertrama .....   | 38 |
| Tabla 2.9 Tiempo de ranura.....  | 38 |
| Tabla 2.10 Numero de portadoras para los estándares PLC .....                | 41 |
| Tabla 2.11 Bits necesarios para distintos tipos de modulación .....          | 41 |

## CAPÍTULO 3

|   |    |
|---|----|
| Tabla 3.1 Dirección IP de cada uno de los elementos de la red ..... | 50 |
| Tabla 3.2. Descripción del equipo utilizado en las pruebas .....    | 51 |

|  |    |
|--|----|
| Tabla 3.3 Características principales de la Fibra Óptica .....           | 53 |
| Tabla 3.4 Características principales del cable UTP .....                | 56 |
| Tabla 3.5 Características principales del cable de cobre utilizado ..... | 58 |

## CAPÍTULO 4

|   |    |
|---|----|
| Tabla 4.1 Valores del Throughput y tiempo para tecnología UTP en topología punto-multipunto ..... | 69 |
| Tabla 4.2 Valores del Throughput y tiempo para tecnología UTP en topología punto a punto .....    | 71 |
| Tabla 4.3 Valores del throughput y tiempo para la tecnología de Fibra Óptica .....                | 76 |
| Tabla 4.4 Valores del throughput y tiempo para tecnología de Fibra Óptica                         | 77 |
| Tabla 4.5 Valores de tiempo y throughput del cliente número 8 .....                               | 78 |
| Tabla 4.6 Valores del throughput y tiempo para la tecnología PLC .....                            | 82 |
| Tabla 4.7 Valores del throughput y tiempo para tecnología PLC y topología punto a punto .....     | 84 |
| Tabla 4.8 Valores de tiempo y throughput del cliente número 8 .....                               | 84 |
| Tabla 4.9 Resumen de los datos obtenidos para las tres tecnologías .....                          | 93 |

# ACRÓNIMOS

|         |   |   |
|---------|---|---|
| CWDM    | Coarse Wavelength Division Multiplexing           | -Sistemas de multiplexación por división de longitud de onda gruesa |
| DPL/BPL | Digital Power Line/Broadband over Power Line      | - Envío de datos a través de cable de cobre eléctrico               |
| DSSS    | Direct Sequence Spread Spectrum                   | -Espectro Esparcido de Secuencia Directa                            |
| DWDM    | Dense Wavelength Division Multiplexing            | -Sistemas de multiplexación por división de longitud de onda densa  |
| EMI     | Electro-Magnetic Interference                     | - Interferencia electromagnética                                    |
| ETSI    | European telecommunications Standard Institute    | - Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones                 |
| FCC     | Federal Communications Commission                 | - Comisión Federal de Comunicaciones                                |
| FTP     | File Transfer Protocol                            | -Protocolo de transferencia de archivos                             |
| GMII    | Gigabit Medium Independent Interface              | -Interfaz Gigabit independiente del medio                           |
| IEEE    | Institute of Electrical and Electronics Engineers | - Instituto de Ingenieros en Electricidad y Electrónica             |
| MAC     | Media Access Control                              | -Control de acceso al medio   |
| MDI     | Medium Dependent Interface                        | -Interfaz Dependiente del Medio                                     |
| OFDM    | Orthogonal Frequency Division Multiplexing        | - Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales            |
| PCS     | Physical Coding Sublayer                          | -Subcapa de codificación física                                     |
| PLC/PLT | Power Line Communication/Power Line Transmission  | -Envío de datos a través de cable de cobre eléctrico                |
| PMA     | Physical Media Attachment                         | -Subcapa de conexión al medio                                       |
| PMA     | Physical Medium Attachment                        | -Subcapa de conexión al medio                                       |
| PMD     | Physical Medium Dependent                         | -Subcapa dependiente del medio                                      |
| RFI     | Radio Frequency Interference                      | -Interferencia de radio frecuencia                                  |
| RTT     | Round Trip Time                                   | retardo de ida y vuelta   |
| STP     | Shielded Twisted-Pair                             | -Cable de par trenzado blindado                                     |
| UTP     | Unshielded Twisted-Pair                           | -Cable de par trenzado no blindado                                  |

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 Introducción a las tecnologías

#### 1.1.1 Fibra Óptica

Hoy en día el papel que desempeña la Fibra Óptica es importante, ya que cuenta con un gran ancho de banda y la atenuación que sufre la señal al transmitirse por este medio es significativamente baja. Por tal razón, este medio es utilizado para la transmisión de señales a larga distancia ya sea en redes LAN, MAN o WAN.

Adicionalmente, otra ventaja relevante de la Fibra Óptica es que no es afectada por interferencias electromagnéticas (EMI, Electro-Magnetic Interference)<sup>1</sup> ni de radiofrecuencia (RFI, Radio Frequency Interference) y tampoco es capaz de generarlas.

Para representar los datos a transmitir en la Fibra Óptica se utilizan pulsos de luz, la presencia de un pulso de luz indica un bit 1 y la ausencia del pulso de luz indica un bit 0.

---

<sup>1</sup> Todas las abreviaciones técnicas están incluidas en el apartado “Acrónimos”.



### 1.1.1.1 Cables de Fibra Óptica

El cable de Fibra Óptica está compuesto por dos fibras de vidrio y cada una de ellas se encuentra revestida con su propia funda. Una de las fibras se encarga de transmitir los datos (Tx) y la segunda fibra es la encargada recibir los datos (Rx). Con esta distribución se logra un enlace full dúplex, la figura 1.1 muestra un ejemplo del cable de Fibra Óptica dúplex.



Figura 1.1 Cable de Fibra Óptica dúplex

Los cables de Fibra Óptica constan principalmente de cinco componentes, tal como lo muestra la figura 1.2.

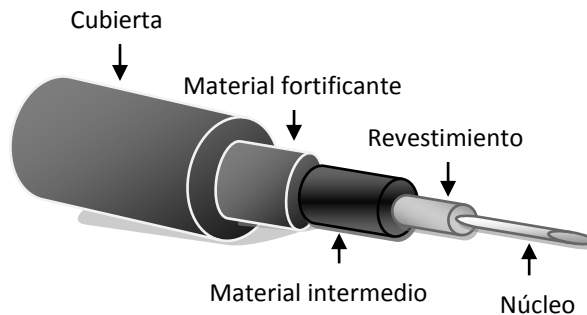


Figura 1.2 Elementos del cable de Fibra Óptica

- Núcleo: filamento de vidrio con un índice de refracción  $\eta_1$ .
- Revestimiento: cubierta del núcleo fabricada en vidrio con un índice de refracción  $\eta_2$  menor al índice de refracción del núcleo  $\eta_1$ .
- Material intermedio: este elemento normalmente es de plástico y sirve para proteger al núcleo.
- Material fortificante: compuesto generalmente por hilos de kevlar, su función es prevenir que el cable sea estirado durante su manejo.
- Cubierta: su papel es proteger a los demás elementos contra contaminantes externos.

### 1.1.1.2 Tipos de Fibra Óptica

Dependiendo del modo de propagación de la luz en una Fibra Óptica, esta se puede clasificar en dos grupos esenciales:

- *Fibra multimodo*: en este tipo de Fibra los haces de luz viajan por diferentes trayectorias (modos de propagación) y a su vez se pueden clasificar en dos categorías:
  - *Fibra multimodo con índice de refracción escalonado*: su núcleo posee un índice de refracción constante y se utiliza para la transferencia de datos a

corta distancia. Este tipo de fibra se caracteriza por presentar dispersión intermodal.

- *Fibra multimodo con índice de refracción gradual*: se caracteriza por que el índice de refracción del núcleo no es constante ya que disminuye gradualmente desde el centro hacia fuera. Esta Fibra se utiliza para la transmisión de datos a distancias medias y también es afectada, pero en menor proporción que la Fibra multimodo, de dispersión intermodal.
- *Fibra monomodo*: se caracteriza por tener un diámetro de núcleo relativamente pequeño (8  $\mu\text{m}$  a 10  $\mu\text{m}$ ) y por consecuencia sólo se propaga un haz de luz. Esta fibra es ideal para la transmisión de datos de gran velocidad y a largas distancias. La Fibra monomodo tiene muy poca diferencia entre los índices de refracción del núcleo y del revestimiento, además gracias al tamaño de su núcleo se elimina la dispersión intermodal.

En este trabajo nos enfocaremos en las Fibras Ópticas del tipo monomodo que se utilizan en los sistemas de transmisión de información, ya que su precio (comparadas con las Fibras multi-modo) es cada vez menor y cada día su uso se ha hecho más popular.

Adicionalmente, existen dos fenómenos principales que limitan la capacidad de transmisión de la Fibra Óptica: la atenuación y la dispersión. Tales fenómenos se explican en las siguientes secciones.

### 1.1.1.3 Atenuación en la Fibra Óptica

La *atenuación* es la pérdida que sufre la señal óptica cuando ésta se propaga a través la Fibra Óptica, esta pérdida se calcula mediante la comparación del nivel de potencia a la entrada y la salida. La atenuación de la Fibra se mide en decibelios por kilómetro [dB/km] y depende de la longitud de onda de la señal. La ecuación que se muestra a continuación permite calcular la atenuación.

[1]

$$\text{Atenuación en decibelios [dB]} = 10 \log_{10} \left( \frac{P_{\text{Transmitida}}}{P_{\text{Recibida}}} \right)$$

Existen tres longitudes de onda en las cuales es común la transmisión de datos en la Fibra Óptica, estas longitudes registran una baja atenuación de la señal y se ubican en 850nm, 1310nm y 1550nm. La figura 1.3 muestra el valor de atenuación para cada una de las longitudes de onda anteriores.

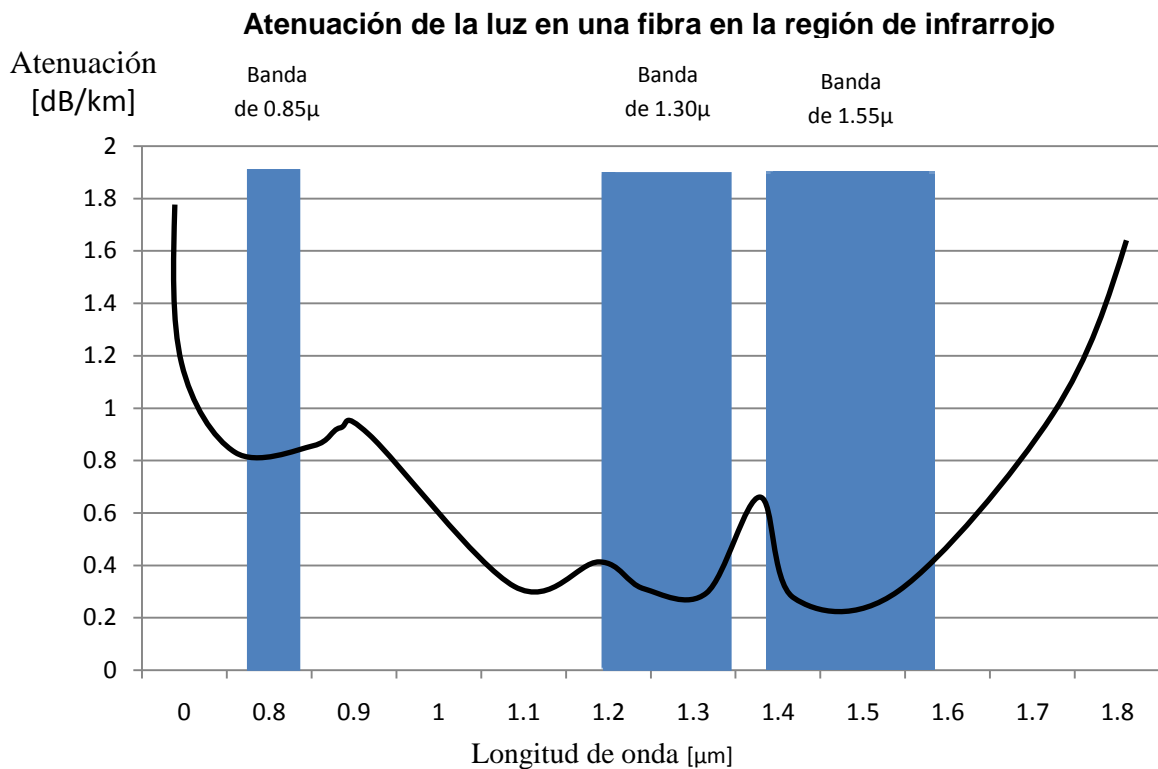


Figura 1.3 Atenuación de la luz en una Fibra Óptica.

### 1.1.1.4 Dispersión en la Fibra Óptica

La *dispersión* es un fenómeno inherente de la Fibra Óptica, dicho fenómeno causa un ensanchamiento de los pulsos ópticos que representan a los bits de información que se transmiten a lo largo de la Fibra Óptica. La figura 1.4 representa el efecto de este fenómeno.

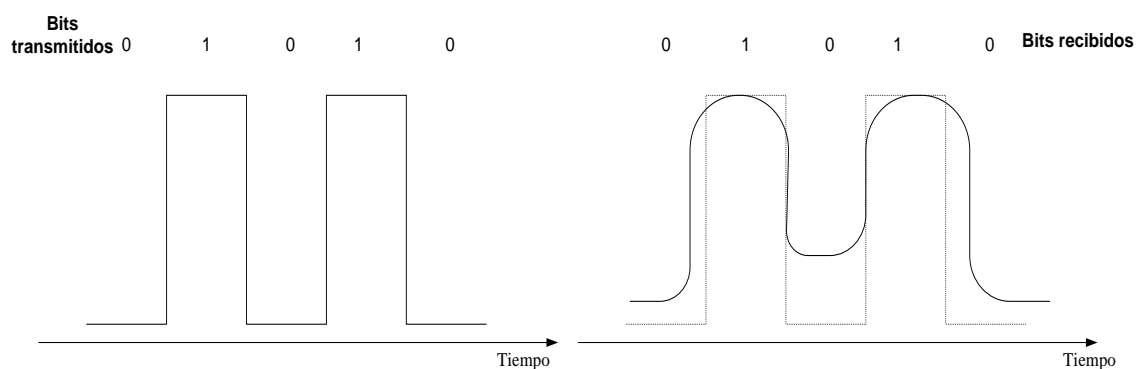


Figura 1.4 Fenómeno de la dispersión

Cuando el ensanchamiento de los pulsos es demasiado grande, éstos se enciman sobre los pulsos vecinos y a este efecto se le conoce como Interferencia Intersimbólica o ISI. Este efecto se puede apreciar en la figura 1.5

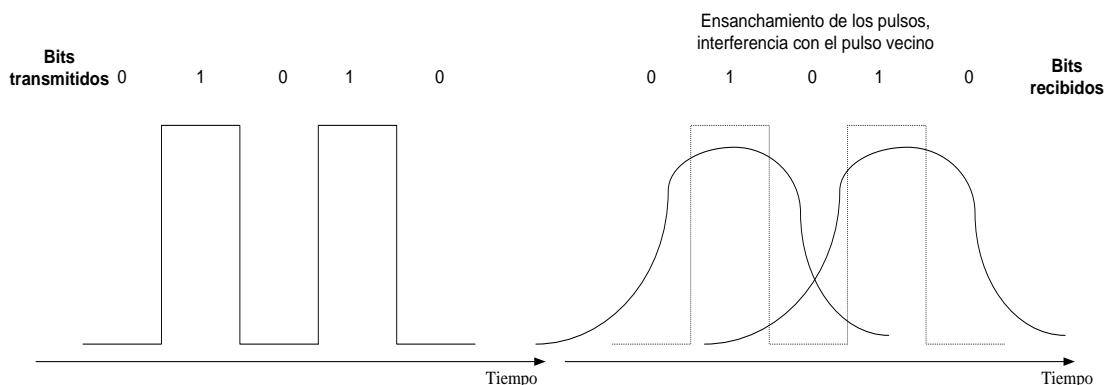


Figura 1.5 Interferencia Intersimbólica

### 1.1.1.5 Conexiones en la Fibra Óptica

Para poder formar enlaces de Fibra Óptica o contar con un cable de fibra tan extenso como se requiera, se realizan conexiones físicas entre las fibras. Los medios para unirlos son los siguientes:

1. **Conectores:** la principal desventaja de este medio de conexión es que provoca una pérdida de luz entre un 10 y 20% aproximadamente, sin embargo, su uso es común en conexiones no permanentes.
2. **Empalmes mecánicos:** mediante este método de unión se juntan dos extremos en una manga especial que los sujeta en su lugar, el inconveniente que presenta este método es que agrega una pérdida de luz del 10%.
3. **Fusionando dos tramos de fibra:** debido a que mediante este método se tiene muy poca atenuación, es considerado como el mejor método de unión para conexiones permanentes.

El empalme de dos Fibras Ópticas se realiza por medio de fusión o adhesión. Al realizarse un empalme, se producen atenuaciones en la señal óptica debido a diferentes factores como son; diferencia entre los índices de refracción, diferencia entre diámetros de los núcleos, desalineamiento de los ejes, inclinación de los ejes, diferencia de apertura numérica, entre otros. En la figura 1.6 se muestran algunos de estos factores.

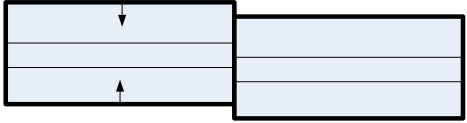
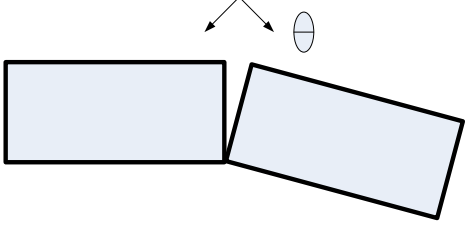
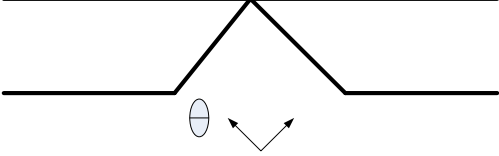
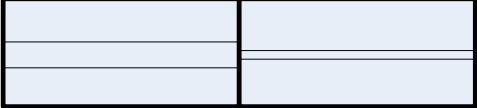
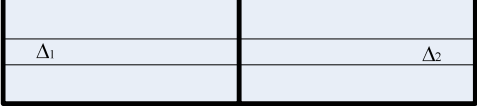
| Causa que introducen pérdidas | Empalmes   |
|-------------------------------|--|
| Desalineamiento               |    |
| Inclinación de ejes           |    |
| Inclinación de las caras      |    |
| Diferencia de núcleos         |   |
| Diferencias de índices        |  |

Figura 1.6 Causas de atenuación por empalmes

### 1.1.1.6 Recomendaciones para la Fibra SMF

La ITU-T (International Telecommunication Union) a través de sus recomendaciones G.652 y G.655 define las características y especificaciones técnicas para las fibras monomodo SMF (Single-Mode optical Fiber). Tales recomendaciones describen los factores geométricos, mecánicos y de transmisión de este tipo de Fibra Óptica. Las fibras que cumplen con estas recomendaciones son las más utilizadas comercialmente ya que aseguran un funcionamiento óptimo.

#### 1.1.1.6.1 Recomendación G.652

La fibra que cumple con esta recomendación se encuentra optimizada para funcionar en la longitud de onda de 1310 nm, es decir, que luz que viaja a través de la Fibra Óptica en esa longitud de onda ( $\lambda_0$ ) no presenta dispersión óptica. Esta fibra también puede operar en la longitud de onda de 1550 nm, pero su funcionamiento no está optimizado para trabajar en esa longitud de onda [18].

La recomendación G.652 define en las características físicas de la fibra, que el diámetro del revestimiento debe ser de 125  $\mu m$  con una tolerancia de  $\pm 1 \mu m$ .

### 1.1.1.6.1.1 Subcategorías de la recomendación G.652[18]

- **G.652.A:** describe los atributos y los valores necesarios para soportar velocidades de transmisión de hasta 10 Gbps con una distancia máxima de 40 km. En la tabla 1.1 se muestran las características principales de las Fibras Ópticas que siguen la recomendación G.652A.

| Características                        |                  | Valor                           |
|--|------------------|---------------------------------|
| Atenuación $\lambda = 1310 \text{ nm}$ |                  | 0.5 dB/km                       |
| Atenuación $\lambda = 1550 \text{ nm}$ |                  | 0.4 dB/km                       |
| Coeficiente de Dispersión cromática    | $\lambda_{0min}$ | 1300 nm                         |
|  | $\lambda_{0max}$ | 1324 nm                         |
|  | $S_{0max}$       | 0.093 ps/(nm <sup>2</sup> · km) |
| Longitud de onda de corte              |                  | 1260 nm                         |

Tabla 1.1 Valores y características principales para la fibra G.652A [18]

- **G.652.B:** describe los atributos y valores recomendados que son necesarios para soportar velocidades de transmisión superiores. En la tabla 1.2 se describen las características de la Fibra Óptica correspondientes al estándar G.652 B.

| Características                        |                  | Valor                           |
|--|------------------|---------------------------------|
| Atenuación $\lambda = 1310 \text{ nm}$ |                  | 0.4 dB/km                       |
| Atenuación $\lambda = 1550 \text{ nm}$ |                  | 0.35dB/km                       |
| Coeficiente de Dispersión cromática    | $\lambda_{0min}$ | 1300 nm                         |
|  | $\lambda_{0max}$ | 1324 nm                         |
|  | $S_{0max}$       | 0.093 ps/(nm <sup>2</sup> · km) |
| Longitud de onda de corte              |                  | 1260 nm                         |

Tabla 1.2 Valores y características importantes para la fibra G.652B [18]

- **G.652.C:** semejante a la subcategoría G.652.A pero, permite transmisiones en las longitudes de onda en el rango de 1360 nm a 1530 nm debido a que elimina los llamados “picos de agua” de atenuación. En la tabla 1.3 se muestran las características con las que deben contar las Fibras Ópticas que cumplen con el estándar G.652 C.

| Características                        |                  | Valor                           |
|--|------------------|---------------------------------|
| Atenuación $\lambda = 1310 \text{ nm}$ |                  | 0.4 dB/km                       |
| Atenuación $\lambda = 1550 \text{ nm}$ |                  | 0.35 dB/km                      |
| Coeficiente de Dispersión cromática    | $\lambda_{0min}$ | 1300 nm                         |
|  | $\lambda_{0max}$ | 1324 nm                         |
|  | $S_{0max}$       | 0.093 ps/(nm <sup>2</sup> · km) |
| Longitud de onda de corte              |                  | 1260 nm                         |

Tabla 1.3 Valores y características importantes para la fibra G.652C[18]

- **G.652.D:** Semejante a G.652.B, pero permite transmisiones en las longitudes de onda ampliada desde 1360 nm a 1530 nm.

### 1.1.1.6.2 Recomendación G.655

La fibra que cumple con la recomendación G.655 se encuentra optimizada para trabajar en la longitud de onda de 1530 nm y 1565 nm. Para minimizar los efectos no lineales que pueden ser dañinos en los sistemas DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing), el coeficiente de dispersión cromática se mantiene con un valor positivo a lo largo de las longitudes de onda de 1530 nm a 1565 nm.

Sin embargo, dicha fibra también puede operar en la longitud de onda superiores de hasta 1625 nm y en longitudes de onda inferiores de hasta 1460 nm, donde el coeficiente de dispersión cromática puede cruzar el cero y tomar valores negativos para trabajar con sistemas CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing) los cuales no se ven afectados por los efectos no lineales. [19]

#### 1.1.1.6.2.1 Subcategorías de la recomendación G.655 [19]

- **G.655.D:** define los requerimientos del coeficiente de dispersión cromática como un par de curvas limitadoras en función de la longitud de onda para valores comprendidos entre 1460 nm y 1625 nm. La tabla 1.4 muestra los requerimientos necesarios con los que la Fibra Óptica debe contar para utilizar la recomendación G.655 D.

| Características  |   | Valor                                    |
|--|---|--|
| Atenuación $\lambda = 1550 \text{ nm}$                       |   | 0.35 dB/km                               |
| Atenuación $\lambda = 1625 \text{ nm}$                       |   | 0.4 dB/km                                |
| Coeficiente de Dispersión cromática rango $ps/(nm \cdot km)$ | $D_{\min}(\lambda): 1460-1550 \text{ nm}$ | $\frac{7.00}{90}(\lambda - 1460) - 4.20$ |
|  | $D_{\min}(\lambda): 1550-1625 \text{ nm}$ | $\frac{2.97}{75}(\lambda - 1550) + 2.80$ |
|  | $D_{\max}(\lambda): 1460-1550 \text{ nm}$ | $\frac{2.91}{90}(\lambda - 1460) + 3.29$ |
|  | $D_{\max}(\lambda): 1550-1625 \text{ nm}$ | $\frac{5.06}{75}(\lambda - 1550) + 6.20$ |
| Longitud de onda de corte                                    |   | 1450 nm                                  |

Tabla 1.4 Valores y características importantes para la fibra G.655D [19]

- **G.655.E:** Similar a G.655.D, esta recomendación está diseñada para los sistemas que tienen un menor espaciado intercanal. Ya que a diferencia de la recomendación G.655.D, los valores de la tabla 1.4 son más elevados en la recomendación G.655.E. Las fibras que cumplen con esta recomendación cuentan con un coeficiente de dispersión positivo y distinto de cero para longitudes de onda superiores a 1460 nm.

| <b>Características</b>                                       |   | <b>Valor</b>                             |
|--|---|--|
| Atenuación $\lambda = 1550 \text{ nm}$                       |   | 0.35 dB/km                               |
| Atenuación $\lambda = 1625 \text{ nm}$                       |   | 0.4 dB/km                                |
| Coeficiente de Dispersión cromática rango $ps/(nm \cdot km)$ | $D_{\min}(\lambda): 1460-1550 \text{ nm}$ | $\frac{5.42}{90}(\lambda - 1460) + 0.64$ |
|  | $D_{\min}(\lambda): 1550-1625 \text{ nm}$ | $\frac{3.30}{75}(\lambda - 1550) + 6.06$ |
|  | $D_{\max}(\lambda): 1460-1550 \text{ nm}$ | $\frac{4.65}{90}(\lambda - 1460) + 4.66$ |
|  | $D_{\max}(\lambda): 1550-1625 \text{ nm}$ | $\frac{4.12}{75}(\lambda - 1550) + 9.31$ |
| Longitud de onda de corte                                    |   | 1450 nm                                  |

Tabla 1.5 Valores y características importantes para la fibra G.655E [19]

Las aplicaciones de la Fibra Óptica son entre otras: la telefonía, la automatización industrial, computación y sistemas de televisión por cable, entre otras.

Comúnmente la Fibra Óptica es utilizada para interconectar redes WAN que se caracterizan por comunicar sistemas a larga distancia, sin embargo, este medio de transmisión también se utiliza en redes LAN (redes de corta distancia) en las cuales se requieren altas velocidades de transmisión de datos.

A continuación se comentan algunos de los proyectos a nivel mundial sobre redes de Fibra Óptica.

El pasado 17 de mayo de 2011 durante la celebración del Día Internacional del Internet, el gobierno de Colombia presentó una licitación en la que invertirá cerca de 200 millones de dólares para elevar a 700 el número de municipios conectados a internet de banda ancha en ese país [8]

La Universidad Politécnica de Valencia anunció, que desde el pasado 11 de octubre del 2010 coordina un proyecto para ofrecer conexiones a Internet de 10 Gbps a cada usuario a través de una “nueva arquitectura del entramado de Fibra Óptica”, todo esto con el fin de mejorar los servicios de internet, telefonía, televisión y wifi que lleven a lograr avances en servicios de seguridad y control en el hogar. [16]

En México, Telmex amplía su red de Fibra Óptica para así aumentar 10 veces la velocidad que actualmente brinda en su servicio de Internet, la empresa revela que esta red de Fibra Óptica cubrirá 40 ciudades. Para cumplir con este proyecto, Alcatel-Lucent (una empresa de comunicaciones francesa) ayuda a Telmex a cumplir su objetivo. [11]

## 1.1.2 UTP

El cable de par trenzado es utilizado generalmente para la transmisión de voz en comunicaciones telefónicas y para el envío de datos en las redes Ethernet. El cable de par trenzado está compuesto por 8 cables de cobre que son agrupados en 4 pares, dependiendo del estándar con el que se trabaja se utilizan diferentes pares para el envío y recepción de datos.



Para los estándares de Ethernet y Fast Ethernet se utiliza dos pares de cable, uno de éstos sirven para la transmisión de datos (Tx) y el otro sirve para la recepción de datos (Rx), los pares sobrantes no se utilizan en estos casos.

Para el estándar Gigabit Ethernet se utilizan los 4 pares dos de ellos para el envío de datos (Tx) y los otros dos pares para la recepción respectivamente.

El cable UTP utiliza el trenzado entre pares de cables para eliminar el campo electromagnético de cada cable individual, es decir, cuando la corriente circula por un cable genera un campo electromagnético en una dirección, el cual puede ser perjudicial e interpretado como ruido electromagnético por los cables que se encuentran a su alrededor.

Si se trenzan los cables individuales de par en par y en cada par uno de los cables transporta la señal original y el otro la misma señal pero invertida, los campos electromagnéticos de cada cable individual serán opuestos entre sí y se cancelarán.

### **1.1.2.1 Cable de par trenzado**

Existen dos tipos de cable de par trenzado:

- Cable de par trenzado blindado (STP, Shielded Twisted-Par)
- Cable de par trenzado no blindado (UTP, Unshielded Twisted-Par)

#### **1.1.2.1.1 Cable de par trenzado UTP**

El cable UTP está compuesto por cuatro pares de cable de cobre, cada cable está cubierto por un aislante plástico y están catalogados por colores. Los alambres del cable UTP se encuentran trenzados en pares tal como se muestra en la figura 1.7 y finalmente se encuentran protegidos por una cubierta plástica exterior. Se utiliza el conector RJ-45 como parte terminal de un cable UTP.

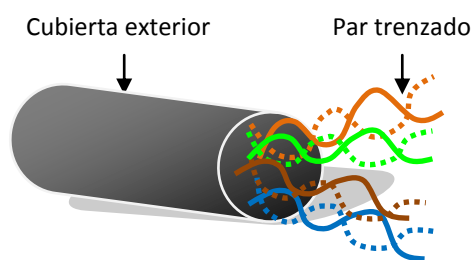


Figura 1.7 Cable de par trenzado sin apantallar UTP

Las ventajas que presenta el cable UTP son las siguientes; no requiere conexiones a tierra, su diámetro es pequeño a comparación del cable STP, su instalación es muy fácil, es de bajo costo y la colocación del conector como parte terminal del cable es relativamente sencilla.

Las principales desventajas son; la limitación a una longitud máxima de 100 metros [5], la susceptibilidad al ruido eléctrico y a las interferencias.

Adicionalmente, su velocidad y rendimiento de transferencia es de 10 Mbps a 1 Gbps.

Los tipos de cable UTP son los siguientes:

- Categoría 1 (CAT 1): esta categoría no es adecuada para la transmisión de datos y solo se utiliza para comunicaciones telefónicas, el cable que pertenece a esta categoría está compuesto por dos o cuatro pares trenzados.
- Categoría 2 (CAT 2): usado para voz y datos de baja velocidad, transmite datos a una velocidad superior a 4 Mbps, sin embargo, en la actualidad no se emplean para la transmisión de datos. Los cables de esta categoría contienen dos o cuatro pares trenzados.
- Categoría 3 (CAT 3): se emplea para la transmisión de voz y datos con una velocidad de hasta 10 Mbps. Los cables de esta categoría constan de cuatro pares trenzados con trece vueltas por cada metro y se utiliza en redes Ethernet 10BaseT.
- Categoría 4 (CAT 4): consta de cuatro pares trenzados y se utilizan para transmitir voz y datos con velocidades de hasta 16 Mbps, esta categoría es comúnmente utilizada en las redes Token Ring.
- Categoría 5 (CAT 5): transmite a velocidades de 100 Mbps y se utiliza en redes Fast Ethernet.
- Categoría 5e (CAT 5e): se utilizan en las nuevas instalaciones con velocidad de transmisión de hasta 1 Gbps. Por lo general, esta categoría se utiliza en redes Gigabit Ethernet (GigE).
- Categoría 6 (CAT 6): se utiliza en redes Gigabit Ethernet, su especificación fue publicada en febrero del 2003.

### **1.1.2.1.2 Cable de par trenzado STP**

El cable STP está formado por 4 pares de alambres de cobre, cada par está envuelto por una fina lámina metálica y otra lámina metálica cubre por completo a los cuatro pares. Mediante esta técnica de ensamblaje, se reduce el ruido electromagnético generado tanto de forma interna como externa.

Los conductores utilizados en este cable son más gruesos que los empleados en el cable UTP, esto permite al cable STP tener un rango de operación de hasta 500 metros sin necesidad de repetidores. Debido a que el cable STP cuenta con una excelente inmunidad contra interferencias externas, esto le permite desarrollar velocidades de transmisión mayores que las del cable UTP. El presente trabajo presta énfasis al cable UTP. En la figura 1.8 se muestra los componentes del cable STP.

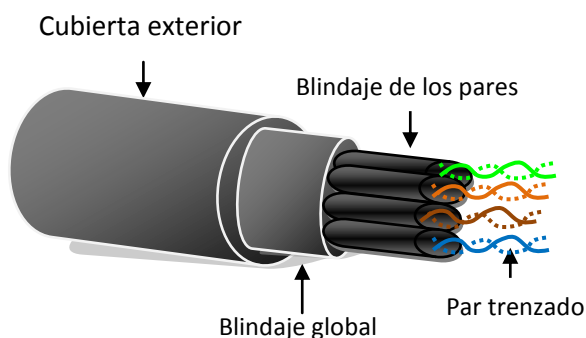


Figura 1.8 Cable de par trenzado blindado STP

La instalación del cable STP es más compleja ya que los blindajes metálicos deben estar conectados a tierra, si la conexión no es correcta el cable STP es susceptible al ruido. Otra desventaja es que el aislante y blindaje aumentan el tamaño, peso y costo del cable.

La longitud máxima por segmento es de 500 metros y su velocidad y rendimientos de transferencia son de 10 a 100 Mbps.

Hoy en día existen diferentes aplicaciones del cable de par trenzado UTP, la mayoría de las redes LAN son implantadas con tecnología UTP por el bajo costo y la eficiencia del cable UTP.

### 1.1.3 PLC Power Line Communication

La tecnología PLC recibe distintos nombres según la norma del país en que se encuentre. Por un lado de acuerdo a la ETSI (European telecommunications Standard Institute), que es un organismo de regulación de las telecomunicaciones de Europa, se denomina a esta tecnología como PLC/PLT (Power Line Communication/Power Line Transmission). Por otro lado, según la FCC (Federal Communications Commission) que es un organismo de regulación de las telecomunicaciones de Estados Unidos de Norteamérica, define esta tecnología como DPL/BPL (Digital Power Line/Broadband over Power Line).

En este trabajo vamos a referirnos a esta tecnología como PLC (Power Line Communication).

#### 1.1.3.1 Principios de la tecnología PLC

PLC es un sistema de comunicación que utiliza como canal de transmisión de datos a las líneas de potencia. Esta tecnología se basa en las redes eléctricas permitiendo a los usuarios finales conectarse a la red de datos por medio de enchufes eléctricos.

En la década de 1950 se desarrolló la tecnología PLC y debido a su baja velocidad de transmisión, baja funcionalidad y alto costo, no se aplicó como medio de comunicación en esa época.

No fue sino hasta en los años 60, que se utilizaron por primera vez las redes eléctricas para transportar señales de voz, comando y control (Power Lines Carriers). Y fue hasta la década de 1990, cuando se demostró que utilizando métodos de modulación sofisticados, se podía transmitir una gran cantidad de datos a través de las líneas eléctricas a cortas distancias.

La primera generación de tecnología PLC se conoció en el año 2000, dicha generación se caracterizaba por contar con una capacidad de trasmisión de 1 Mbps a 4 Mbps y por utilizar la modulación DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum).

La segunda generación entró en vigor en el año 2002 y contaba con una capacidad de transmisión de datos de 10 Mbps a 45 Mbps, esta generación de PLC utilizaba modulación OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing).

La tercera generación surgió en el 2004 y cuenta con una capacidad de trasmisión de 80 Mbps a 200Mbps, a partir de esta generación se continúa utilizando la modulación OFDM.

La figura 1.9 muestra el ancho de banda y modulación utilizada en cada una de las tres generaciones de la tecnología PLC.

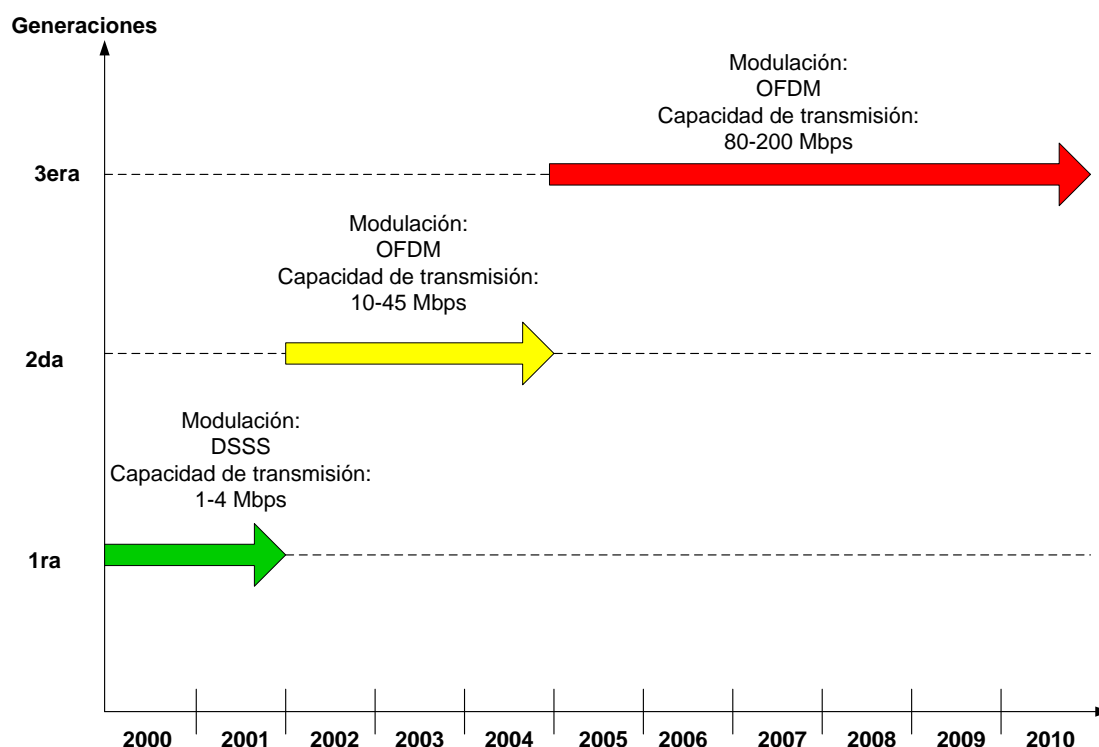


Figura 1.9 Ancho de banda y modulación de las tres generaciones de la tecnología PLC

### **1.1.3.2 Cable PLC**

El medio físico empleado en los sistemas PLC son los cables eléctricos. Existe una gran diversidad de cables eléctricos clasificados por su capacidad de conducción, aplicación, forma, tamaño (calibre o grosor), tipo de aislamientos, entre otros. En la

figura 1.10 se presenta de manera general un cable eléctrico y sus principales componentes.

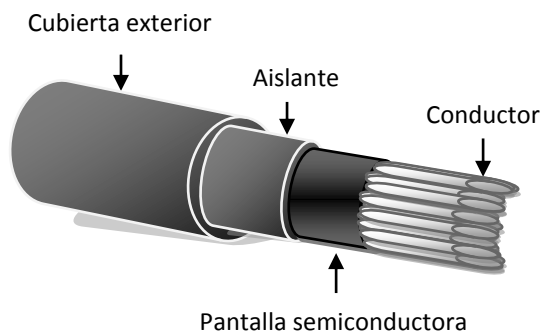


Figura 1.10 Elementos del cable eléctrico

A continuación se describe la función que desempeña cada uno de los componentes del cable eléctrico.

**Conductor:** los conductores eléctricos están fabricados de materiales capaces de conducir la electricidad a través de la transferencia de electrones de manera eficiente y a bajo costo, los materiales más utilizados para la construcción de conductores eléctricos son el cobre y el aluminio, el primero de ellos presenta mejores características eléctricas y mecánicas que el segundo [8]. Una ventaja del aluminio sobre el cobre es que es más liviano y se utiliza en la construcción de cables para voltajes de 230-750 [kV] principalmente. Es común encontrar muchos cables hechos con aleaciones de estos dos materiales y esto se hace con el fin de aprovechar las características de ambos conductores.

**Pantallas semiconductoras:** son un elemento importante en el cable eléctrico ya que confina el campo eléctrico y lo distribuye uniformemente, también ayuda a reducir el deterioro del aislamiento si el cable es expuesto a agentes dañinos inmersos en el ambiente en el que se encuentre instalado.

**Aislante:** ayuda al conductor a poder soportar altos voltajes, variaciones de temperatura provocadas por corrientes de grandes cargas conectadas e incluso corrientes de corto circuito. Existen dos tipos de aislantes; PVC (Policloruro de Vinilo) y EP (Etileno Propileno). Ambos tipos proveen protección contra humedad, calor, presencia de agua, emisión de humo y otros agentes nocivos para el conductor.

**Cubierta exterior:** consiste principalmente de polietileno y su función es evitar que la energía eléctrica entre en contacto con las personas u objetos que puedan provocar un corto circuito en la instalación, también protege al cable de esfuerzos mecánicos para evitar su deterioro y garantizar un largo periodo de vida.

Las líneas de potencia son caracterizadas comúnmente como un medio hostil para la transmisión de datos debido a:

- Impedancia variable, debido a que las cargas pueden ser encendidas y apagadas de manera aleatoria.
- Ruido en la línea, ocasionado por motores, señales de radio, fuentes alimentadoras entre otras.
- Alta atenuación de la señal, es dependiente de los tipos de derivación y de las conexiones.
- Incremento o decremento de la atenuación en la señal por factores climáticos como la lluvia, la nieve, niebla o hielo.
- Factores técnicos ocasionados por la reflexión, esta ocurre en lugares donde existen cambios de impedancia. La reflexión provoca un incremento en el BER (el BER es el cociente entre los bits recibidos erróneamente y los bits enviados).

Como se mencionó anteriormente, los sistemas PLC pueden llegar a ser una gran fuente de interferencias para sistemas que trabajan en la banda de frecuencias High Frequency (HF), las cuales se ubican entre 3 y 30 MHz, ya que actúan como antenas produciendo radiación electromagnética en el ambiente. Esto ocasiona interferencia electromagnética a los sistemas de transmisión en onda corta, aeronáutica, militar, radioaficionados, entre otros. La tabla 1.6 muestra los servicios que operan en la banda de frecuencias entre 1 y 30 [MHz].

| <b>Servicios</b>  | <b>Banda Utilizada [MHz]</b>  |
|---|---|
| Transmisión de corta y media onda                       | [1.3-1.6], [3.9-4.0], [5.9-6.2], [7.1-7.35], [9.4-9.9], [13.5-13.8], [15.1-15.6], [25.6-26.1]                                 |
| Transmisión móvil naval                                 | [1.8-2.0], [2.0-2.02]   |
| Radioaficionado   | [1.81-1.85], [3.5-3.8], [7.0-7.1], [10.1-10.15], [14.0-14.35], [18.0-18.16], [21.0-21.4], [28.0-29.7]                         |
| Comunicaciones militares de larga distancia (OTAN & UK) | [2.0-2.04], [2.3-2.5]   |
| Aeronáutica   | [2.8-3.0], [3.02-3.15], [3.4-3.5], [3.8-3.9], [4.4-4.65], [5.4-5.68], [6.6-6.7], [8.81-8.96], [10.0-11.1], [21-22], [23-23.2] |

Tabla 1.6 Servicios que comparten la banda de frecuencias con los sistemas PLC

Para reducir los niveles de EMI es necesario que el diseño de los equipos PLC se adapte a lo que se conoce como Compatibilidad Electromagnética (EMC). La compatibilidad electromagnética es la capacidad de los dispositivos o sistemas para funcionar satisfactoriamente en un ambiente electromagnético sin producir interferencia a otros sistemas.

Hoy en día la tecnología PLC es utilizada en Europa, Asia y Norteamérica algunas de sus aplicaciones se enuncian a continuación:

*Redes inteligentes de suministro de energía eléctrica y AMR de banda ancha.* Al combinar los medidores automáticos AMR (Automatic Meter Reading) de consumo de

energía eléctrica con la tecnología PLC, se crea una red inteligente que permite enviar los parámetros eléctricos y de facturación a la compañía suministradora, esto evita la presencia de personal para la toma de lectura y registro de consumo de energía eléctrica.

*Seguridad y vigilancia.* Los Circuitos Cerrados de Televisión (CCTV) son usados para garantizar seguridad y vigilancia en edificios, oficinas y hogares. Las cámaras utilizadas combinadas con la tecnología PLC permiten la transferencia de información de audio y video al centro de monitoreo.

Aunque existen muchas ventajas para los sistemas PLC, existen muchos países que han descartado su uso e implementación ya que lo consideran una gran fuente de interferencias. Por ejemplo, en Japón se realizó un estudio en el año 2002 por parte del Grupo de Estudio sobre PLC (MPHPT) y se determinó que las fugas de onda radioeléctricas causadas por las líneas eléctricas son perjudiciales para los usuarios que utilizan la banda de frecuencias entre 2 y 30 MHz, sin embargo, los sistemas PLC se siguieron empleando.

En el año 2004 a las empresas se les permitió experimentar con la tecnología PLC bajo rigurosas reglas, algunas de ellas eran: los equipos tenían que estar diseñados para reducir la fuga de radiación electromagnética que provenían de las líneas eléctricas, las bandas que se les permitieron utilizar eran de 2 a 30 MHz; si existía alguna interferencia, las empresas estaban obligadas a suspender inmediatamente los experimentos, encontrar las causas y resolverlas. No se les permitía proseguir con el experimento hasta que confirmaran que las interferencias no volverían a ocurrir [11].

Aunque existe una regulación por parte del gobierno de Japón, en la cual se especifica que los sistemas PLC solo se utilizarán dentro de las casas, esta regulación solo contempla el modo en el que se conecta el módem PLC a la toma de Corriente Alterna (CA). Miles de radioaficionados, usuarios de onda corta y los radio astrónomos no están de acuerdo con esta regulación, ya que la consideran defectuosa y con muchos problemas [12].

Por otro lado en España, la Unión de Radioaficionados de ese país con apoyo del colectivo de radioaficionados en todo el mundo, tienen una enorme inquietud por las interferencias generadas por el sistema PLC y argumentan que esta tecnología genera interferencias en la banda HF la cual utilizan en sus comunicaciones. En consecuencia emprendieron una campaña llamada “anti-PLC” con un lema muy peculiar: “¿PLC? NO GRACIAS”, ellos declaran no estar en contra de esta tecnología y lo único que exigen es que las frecuencias utilizadas por los radioaficionados estén libres de interferencias. [13]

Este grupo de radioaficionados explica que las líneas eléctricas al momento de implementar la tecnología PLC actúan como una antena gigante y por tal motivo sus señales pueden ser captadas por equipos de radioaficionados así como por equipo de comunicaciones aéreas, entre otros. [13]

No obstante, existen países que aun realizan estudios de esta tecnología.

España pretende instalar en las redes eléctricas un “contador doméstico inteligente” el cual funciona con tecnología PLC, este contador se encargara de transmitir en todo momento los datos del consumo de hogares, oficinas y tiendas. Esto es con el fin de ahorrar energía y costos de funcionamiento. [12]

## **1.4 Objetivos y motivaciones**

El objetivo del trabajo de tesis que aquí se presenta es comparar experimentalmente el desempeño de tres medios de transmisión guiados comúnmente utilizados hoy en día, los cuales son: Fibra Óptica, par trenzado y cable de cobre. Para los primeros dos medios se utilizará como tecnología de transmisión aquella basada en el protocolo IEEE 802.3 y para el tercer medio se empleará la tecnología PLC (Power Line Communications). Para cumplir este objetivo se implementará una pequeña red basada en switches que permiten el uso de los tres medios de transmisión anteriormente mencionados. El desempeño de cada uno de los medios de transmisión se cuantificará utilizando software especializado que proporciona información acerca del ancho de banda, pérdida de paquetes, ocupación de canal, entre otros.



# CAPÍTULO 2

## TECNOLOGÍAS DE TRANSMISIÓN

### 2.1 Ethernet

Ethernet es la tecnología de Red de Área Local (LAN) más utilizada a nivel mundial, tiene sus comienzos en la década de 1970 y hasta la fecha ha evolucionado con el fin de transmitir información a velocidades cada vez más rápidas. Un claro ejemplo de este hecho es que Ethernet se ha adaptado a usar como medio de transmisión la Fibra Óptica, para aprovechar el gran ancho de banda y un bajo nivel de errores con el fin de ofrecer tasas de transmisión de hasta 10 Gbps.

Ethernet se basa en el sistema ALOHANET, este sistema fue diseñado en el año 1973 en la isla de Hawaii por el investigador Norman Abramson y sus colegas de la Universidad de Hawaii. ALOHANET permitía conectar diversas estaciones a la computadora principal de Honolulu mediante un acceso ordenado a la banda de radiofrecuencia utilizada en la isla. Este sistema utilizaba radios de onda corta de dos

frecuencias: un canal ascendente (up-link) y otro descendente (down-link). De esta manera, cuando un usuario deseaba transmitir, sólo tenía que enviar su información por el canal ascendente. Si durante la transmisión actual ningún otro usuario intentaba transmitir, muy probablemente el paquete transmitido llegaría a su destino y su recepción sería confirmada por el canal descendente. Si existía contención por dos o más usuarios en el acceso al canal ascendente, el paquete transmitido colisionaba con los paquetes de otros usuarios, ocasionando así, que el paquete no llegara a su destino y en consecuencia la terminal transmisora tuviera que reenviar su información a causa de no recibir confirmación del receptor.

Este sistema trabajaba eficientemente cuando existía muy poco tráfico, sin embargo, cuando el tráfico era abundante el sistema dejaba de funcionar.

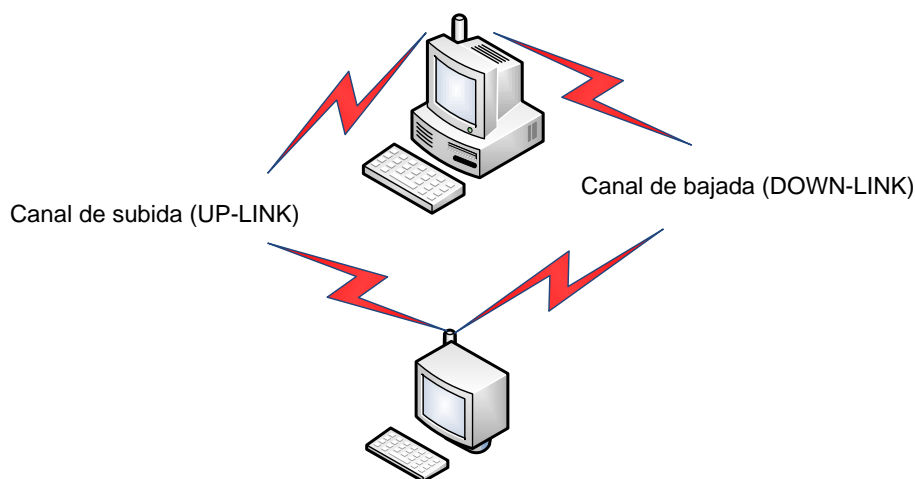


Figura 2.1 Canal ascendente y Canal descendente

Al cabo de unos años, Robert Metcalfe y sus compañeros de Xerox se basaron en el sistema ALOHANET para diseñar e implementar en 1976 la primera red LAN del mundo, a la cual se le llamó Ethernet [1]. Esta red consistió en conectar PCs e impresoras por medio de transceptor a un cable coaxial grueso llamado éter, el cual contaba con una longitud de 2.5 km y tenía repetidores cada 500 metros. La red operaba a una velocidad de 2.94 Mbps y en ella podían ser conectadas hasta 256 máquinas.

El término "Ethernet" abarca las tecnologías Ethernet, Fast Ethernet, Gigabit Ethernet y 10 Gigabit Ethernet.

Ethernet es una tecnología simple, fiable, de fácil mantenimiento, bajo costo de instalación así como de actualización y cuenta con la facilidad de incorporar nuevas tecnologías.

## 2.1.1 Funcionamiento de Ethernet

Ethernet contaba con una mejora sobre ALOHANET, la cual consistía principalmente en el sensado del canal antes de transmitir. En caso de que el canal se encontrara libre, la transmisión se llevaba a cabo. De lo contrario, si se determinaba que el canal estaba ocupado, el usuario se abstenía de su intento por transmitir hasta que finalizara la transmisión en curso. Mediante esta técnica se lograba una mayor eficiencia en comparación a la técnica de ALOHANET.

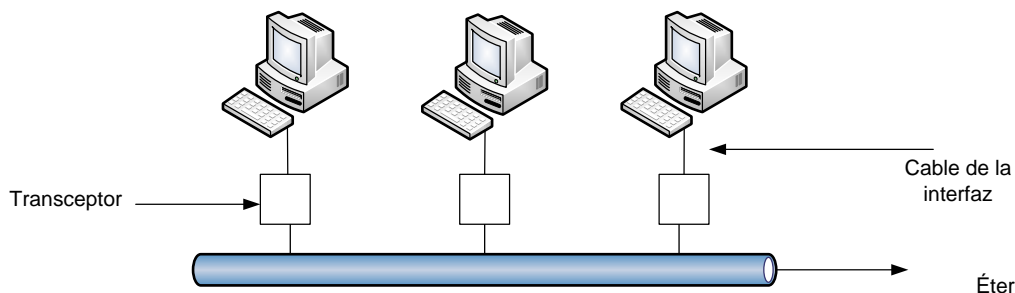


Figura 2.2 Arquitectura original de Ethernet

## 2.1.2 Modelos OSI y Modelo TCP/IP

El modelo OSI y el modelo o conjunto de protocolos TCP/IP definen el proceso de comunicación entre dos dispositivos de red. En la actualidad la pila de protocolos TCP/IP es la más utilizada, sin embargo, el modelo de referencia OSI se sigue utilizando porque define explícitamente las tareas que se deben desempeñar en cada una de sus capas para que los datos viajen a través de la red. Con ello se logra una mejor comprensión de las funciones de las capas del modelo TCP/IP, ya que ambos modelos presentan una equivalencia entre sus capas.

Básicamente el modelo de referencia OSI es un conjunto de normas que la mayoría de los fabricantes utilizan para facilitar la compatibilidad entre dispositivos de red.

Por otro lado, el modelo TCP/IP (Transmission Control Protocol / Internet Protocol) fue creado con el fin de lograr una conexión de un dispositivo a otro no importando el tipo de conexión física que pudiera existir entre estos dos puntos como por ejemplo Fibra Óptica, UTP o conexiones inalámbricas.

### 2.1.2.1 Modelo OSI

El modelo de referencia OSI explica paso a paso el camino que debe seguir un paquete de datos al ser enviado desde las aplicaciones del emisor hasta que llega a las aplicaciones del receptor. De esta manera cada una de las capas del modelo define el proceso de encapsulación y los protocolos utilizados para que cada paquete de información sea tratado como una unidad y se transmita a la capa siguiente.

La figura 2.3 muestra que el paquete de datos al ser emitido por el transmisor y al viajar éste a través de las 7 capas del modelo OSI, cada una de éstas lo encapsula y le coloca un encabezado. Por el contrario, cuando el paquete es recibido por el receptor cada una de las capas le quita el encabezado y lo desencapsula, permitiendo así que solo los datos o información lleguen hasta las aplicaciones del receptor.

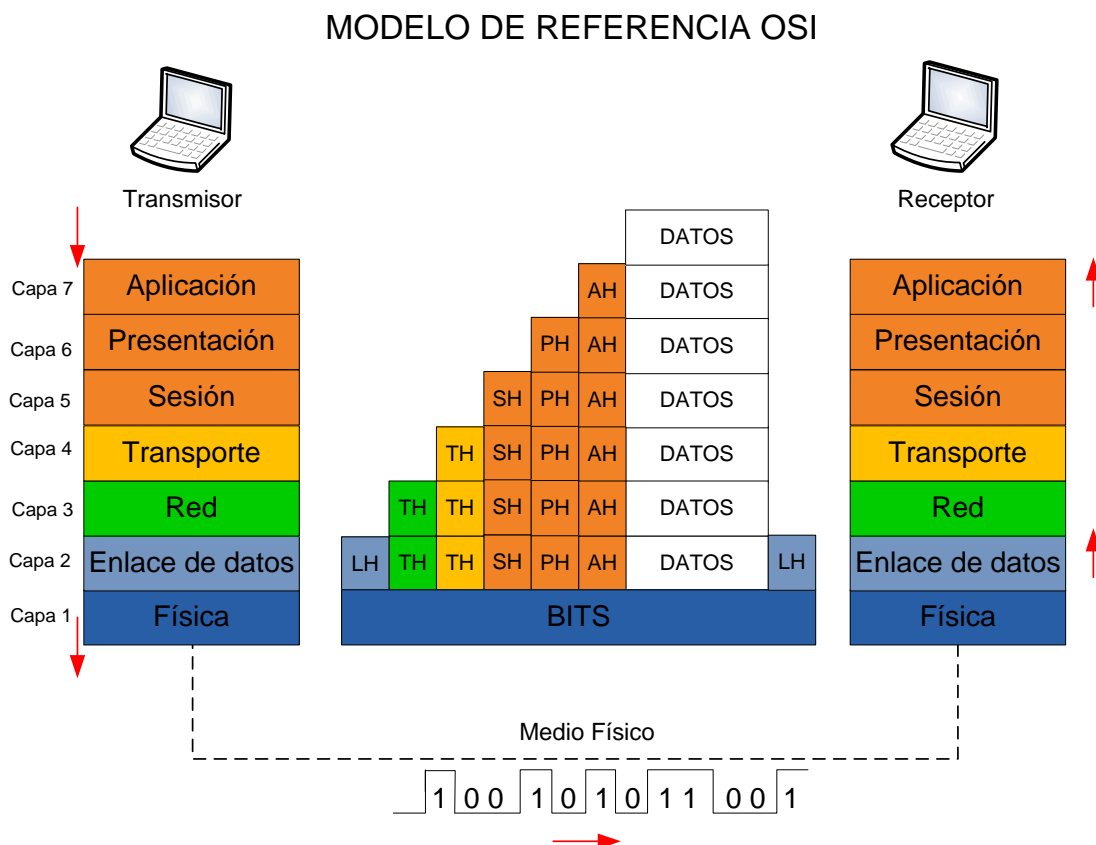


Figura 2.3 Capas del modelo OSI

Como se aprecia en la figura 2.3 el modelo OSI está compuesto por 7 capas, las cuales se explican a continuación:

**Capa 7 Aplicación:** su trabajo es proporcionar una interfaz para interactuar con el usuario accediendo a las aplicaciones como documentos, hojas de cálculo, etc., así mismo en la capa 7 se especifica el proceso para llevar a cabo la autenticación del usuario.

**Capa 6 Presentación:** su tarea es garantizar que los datos que se envían de la capa de Aplicación del emisor puedan ser interpretados y leídos en la capa de Aplicación del receptor, esto se logra negociando y definiendo el tipo de datos por ejemplo JPEG, ASCII etc., si no logra negociarlo ni definirlo se da a la tarea de encontrar un formato de texto común. Otra de las tareas importantes en esta capa es la encriptación de datos.

**Capa 5 Sesión:** se encarga de definir el inicio, la gestión y el cierre de una conversación entre dos usuarios.

**Capa 4 Transporte:** su función es garantizar la entrega de datos a través de la red proporcionando la detección y recuperación de errores, asimismo esta capa brinda tareas de control del flujo.

**Capa 3 Red:** se encarga de identificar a cada dispositivo de la red mediante una dirección lógica, adicionalmente define el camino por el cual viajara el paquete tomando en cuenta la dirección IP destino y la dirección IP fuente.

**Capa 2 Enlace de datos:** se ocupa del direccionamiento físico, también esta capa define una secuencia de verificación de datos con el fin de que el receptor identifique errores en la transmisión y así lograr que los datos que pasan a través de un enlace físico sean fiables.

**Capa 1 Física:** se encarga de las características físicas del medio de transmisión como el uso de conectores específicos para cada medio y la codificación, en esta capa se definen los estándares de los diferentes medios físicos.

### **2.1.2.2 Modelo TCP/IP**

El modelo TCP/IP define un conjunto de protocolo los cuales garantizan la comunicación entres dos dispositivos que se encuentran conectados por diferentes tipos de conexiones físicas, el modelo TCP/IP se divide en cuatro capas: Aplicación, Transporte, Internet y Acceso a la red, en la figura 2.4 se muestra la estructura de las capas del modelo TCP/IP y el camino que sigue un paquete de datos al ser enviado de un dispositivo hacia un receptor, se aprecia que cada una de las cuatro capas del modelo TCP/IP agrega un encabezado que es encasulado y remitido a la capa siguiente, al llegar al receptor cada capa desencapsula y elimina el encabezado permitiendo así que solo se reciban los datos reales.

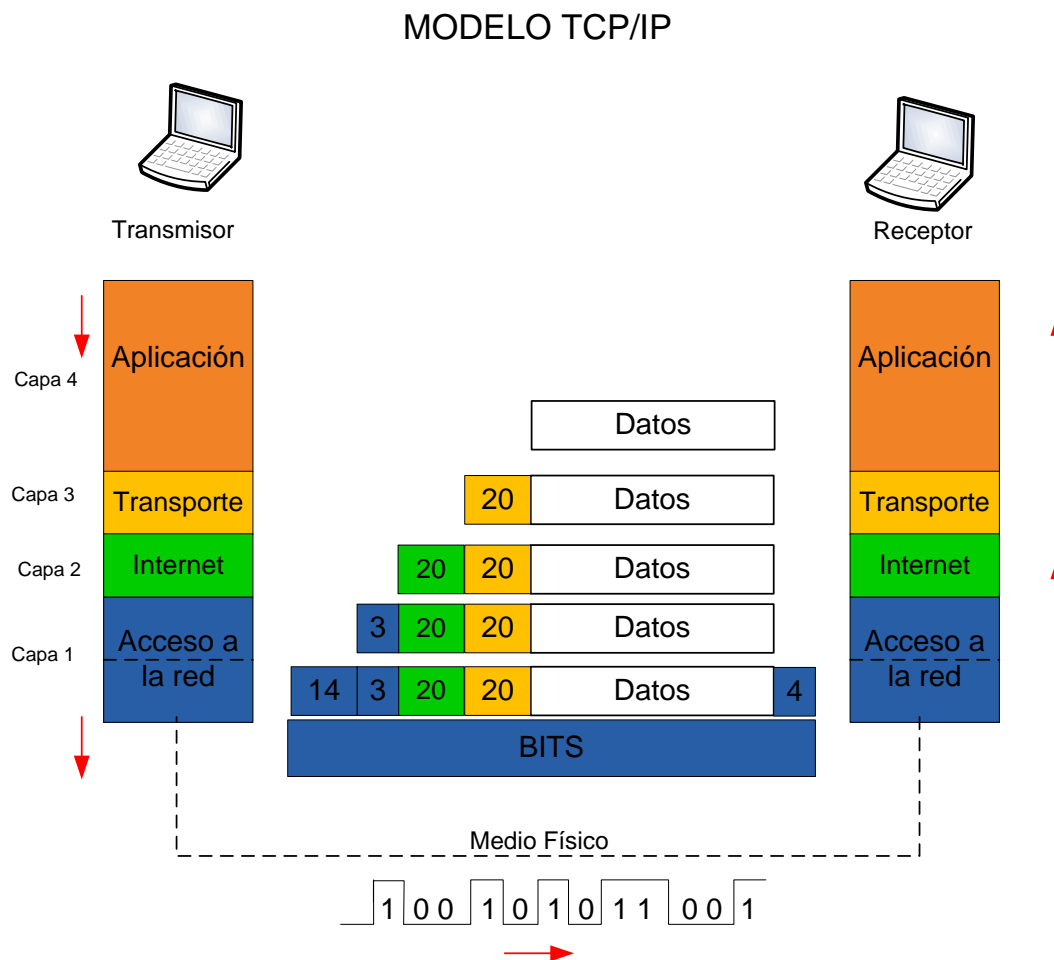


Figura 2.4 Modelo TCP/IP

El modelo TCP/IP está estructurado por 4 capas las cuales se describen a continuación:

**Capa de Aplicación:** esta capa abarca las capas de Aplicación, Presentación y Sesión del modelo OSI. Una de las muchas tareas que lleva a cabo esta capa es la de proveer los servicios necesarios para que las aplicaciones se ejecuten correctamente en un dispositivo, adicionalmente se encarga de asegurar que los datos sean encapsulados para pasar a la capa de Transporte.

**Capa de Transporte:** su tarea es segmentar y reensamblar los datos que provienen de la capa de Aplicación, para ello utiliza dos protocolos los cuales se denominan TCP y UDP. Cuando se utiliza TCP, se crea una conexión entre el Receptor y Transmisor antes de enviar los datos. La transmisión de los datos a través de esta conexión son fiables, ya que cuentan con un número de secuencia y con un acuse de recibo (ACK) que permiten asegurar la entrega de la información. El primero de ellos indica cuál es el siguiente segmento que se espera recibir y el segundo es para confirmar la recepción de los datos. En el caso de utilizar UDP, los datos son enviados hacia el Receptor sin haber creado una conexión previamente.

**Capa de Internet:** la función de esta capa es decidir la mejor ruta para el envío de la información, adicionalmente en esta capa se lleva a cabo la conmutación de paquetes.

**Capa de Acceso a la Red:** abarca la capa Física y la capa de Enlace de Datos del modelo OSI. Esta capa es la encargada de encapsular los paquetes de la capa de Internet en tramas, así mismo, esta capa es la responsable del direccionamiento físico.

### 2.1.3 CSMA/CD

Para reducir la probabilidad de colisiones dentro de la red, se implementa la técnica de Carrier Sense Multiple Access con Detección de Colisiones (CSMA/CD). Este mecanismo especifica que los usuarios deben saber el estado del canal de transmisión antes de iniciar su transmisión.

Si un usuario sensa el canal y determina que está ocupado, se espera a que finalice la transmisión en curso. Por el contrario, si se sensa el canal y se determina que éste se encuentra libre, el usuario transmitirá su información.

En este escenario todo parece sencillo pero, ¿qué pasaría si dos o más computadoras esperan a que termine la transmisión actual y luego empiezan a transmitir al mismo tiempo?, como resultado, se presentaría una colisión y los frames de datos de los usuarios se destruirían.

Si se llegara a presentar una colisión, la técnica de CSMA/CD indica que se debe enviar una señal de *jamming* a todos los usuarios de la red para indicarles que ha ocurrido una colisión. Una vez recibida esta señal, los usuarios involucrados en la colisión ejecutan el algoritmo de *backoff*. Este algoritmo permite a los usuarios involucrados en la colisión, escoger un slot de tiempo aleatorio en el cual pueden transmitir su información.

De la forma anterior es muy poco probable pero no imposible que los usuarios involucrados en una colisión vuelvan a escoger el mismo slot de tiempo para transmitir su información y vuelvan a colisionar, si esto se llegara a presentar, el rango de slots de tiempo se incrementa de manera exponencial para hacer cada vez menos probable que los usuarios vuelvan a escoger el mismo slot de tiempo para transmitir y colisionen nuevamente.

El rango de slots en los cuales un usuario puede transmitir se llama ventana de contención y deja de incrementarse hasta que los mismos usuarios involucrados en una colisión pasada dejan de colisionar nuevamente o hasta que la trama ha colisionado un número consecutivo de ocasiones y en consecuencia es descartada. Una vez que los usuarios involucrados en la colisión logran transmitir sus frame exitosamente ya no ejecutan el algoritmo de *backoff* y vuelven a iniciar el proceso de escucha o sensado del canal.

En la figura 2.5 se muestra un diagrama explicando el proceso CSMA/CD.

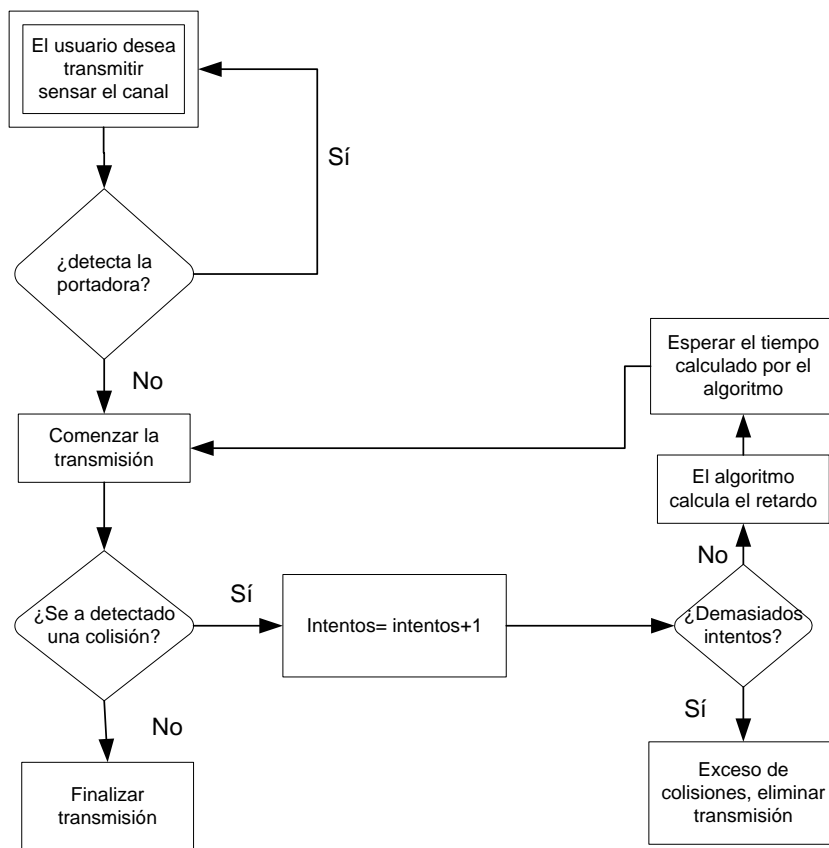


Figura 2.5 Procedimiento CSMA/CD

CSMA/CD es un protocolo de capa 2 y se considera como no determinista, donde todos los dispositivos de la red que desean transmitir sensan el canal y comprueban si el medio está libre u ocupado. Dependiendo de cómo actúen los dispositivos de la red podemos clasificar el método CSMA/CD en:

- **CSMA no-persistente:** sí al sensar el canal éste se encuentra ocupado, el dispositivo espera un tiempo aleatorio y vuelve a sensar el canal. Si lo detecta libre, inmediatamente trasmite.
- **CSMA 1-persistente:** sí al sensar el canal éste se encuentra ocupado, el dispositivo sensa el canal constantemente sin esperar un tiempo aleatorio. Cuando detecta el canal libre entonces trasmite. Aunque existe el riesgo de que otro dispositivo transmitiera durante un retardo de propagación produciéndose una colisión (probabilidad = 1).
- **CSMA p-persistente:** sí al sensar el canal éste se encuentra ocupado, el dispositivo sensa el canal constantemente sin esperarse un tiempo aleatorio. Cuando detecta el canal libre, el dispositivo decide si trasmite o no. Para esto efectúa un algoritmo el cual asigna una disposición de transmitir con una probabilidad  $p$ , o seguir a la espera (probabilidad=  $1-p$ ). Si el dispositivo no trasmite, en el siguiente tiempo volverá a ejecutar el mismo algoritmo hasta transmitir.



## **2.1.4 Codificación**

Ethernet no usa la codificación binaria directa (0 volts para un bit 0 y 5 volts para una bit 1), ya que los dispositivos no distinguen un cero lógico (bit 0) de una ausencia de voltaje (0 volts), por tal motivo Ethernet utiliza la codificación Manchester.

La codificación Manchester consiste en dividir cada tiempo de bit en dos intervalos iguales, es decir, un bit 1 se representa con un voltaje alto (+0.85 volts) en el primer intervalo de tiempo seguido de un voltaje bajo (-0.85 volts) durante el segundo intervalo. Por su parte para representar un 0 lógico, se envía un voltaje bajo (-0.85 volts) en el primer intervalo de tiempo seguido de un voltaje alto (+0.85 volts) durante el segundo intervalo. Con este tipo de codificación se asegura que el receptor se sincronice con el emisor sin necesidad de un reloj externo.

La principal desventaja de la codificación Manchester es el consumo de ancho de banda ya que requiere del doble, debido a que hay dos transiciones por tiempo de bit, es decir su eficiencia es del 50% (1bit en 2 baudios  $1/2= 0.5$ ).

Al igual que la codificación Manchester, en la codificación Manchester diferencial existe un cambio en la mitad del periodo de bit, es decir, un bit 1 se representa mediante la ausencia de un cambio al inicio del primer intervalo con respecto al segundo intervalo del bit anterior, un bit 0 se indica mediante la presencia de un cambio al inicio del primer intervalo con respecto al segundo intervalo del bit anterior.

Una ventaja del código Manchester diferencial es que ofrece mejor inmunidad al ruido, pero utiliza equipo más complejo. Ethernet no utiliza este tipo de codificación sin embargo existen estándares que si la utilizan como el estándar IEEE 802.5 token ring.

En la figura 2.6 se muestra un ejemplo del código Manchester (a) y el código Manchester diferencial (b):

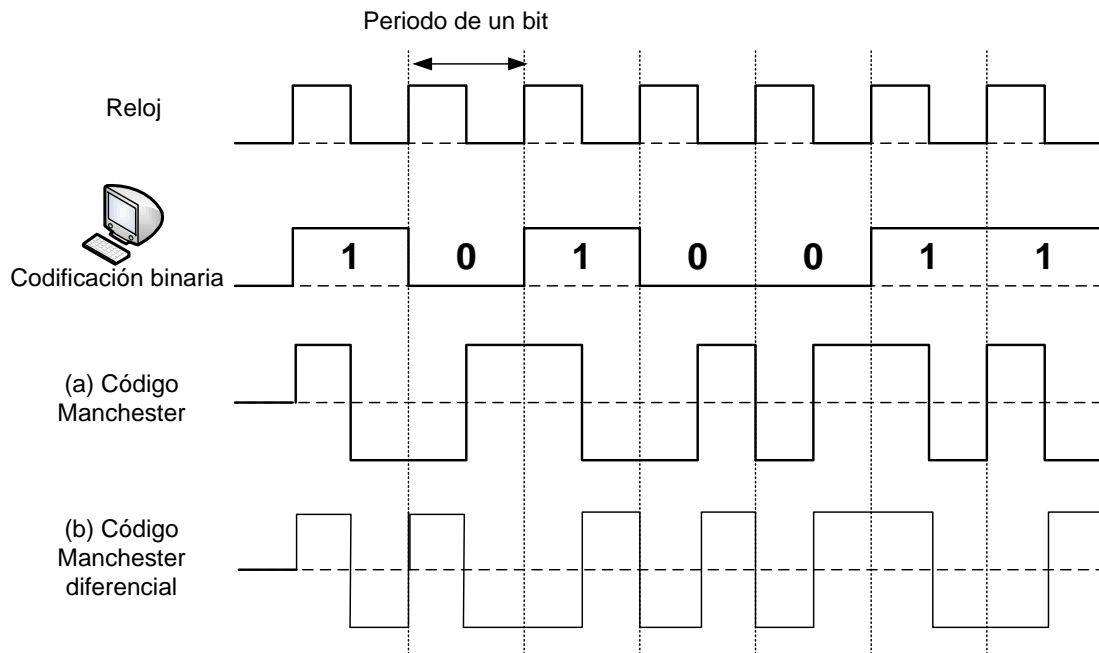


Figura 2.6 Ejemplo de codificación Manchester (a) y Manchester diferencial (b)

## 2.1.5 Trama Ethernet

Cuando un dispositivo desea comunicarse con otro en una red Ethernet, el flujo de datos en capa física no es suficiente para lograr la comunicación. Las tramas ayudan a obtener información importante para que los dispositivos se comuniquen entre sí, por ejemplo:

- ¿Qué dispositivo se quiere comunicar con otros?
- ¿Cuándo comienza y termina la comunicación entre dispositivos?
- ¿Qué errores han ocurrido durante la comunicación?
- ¿Dónde se ubican los datos?

La trama involucra toda esa información, la cual es esencial para una buena comunicación entre los dispositivos. Una trama es un conjunto de bits que se transmiten en capa 2 (Capa de Enlace de Datos) como una unidad.

La estructura de la trama se muestra en la figura 2.7 y es muy similar para todas las velocidades de Ethernet (10/100/1000/10000 Mbps). Ya que todas las tramas comparten la misma secuencia de campos.

|                      |               |                              |                             |                          |                                   |                |
|----------------------|---------------|------------------------------|-----------------------------|--------------------------|-----------------------------------|----------------|
| Preámbulo<br>7 bytes | SFD<br>1 byte | Dirección Destino<br>6 bytes | Dirección Origen<br>6 bytes | Longitud/Tipo<br>2 bytes | Datos /Relleno<br>46 a 1500 bytes | FCS<br>4 bytes |
|----------------------|---------------|------------------------------|-----------------------------|--------------------------|-----------------------------------|----------------|

Trama Ethernet 802.3

Figura 2.7 Estructura de la trama Ethernet

A continuación se muestra la función que desempeña cada uno de los campos de la trama Ethernet:

|   |  |
|---|--|
| <b>Preámbulo</b>                          | Se utiliza para la sincronización  |
| <b>SFD delimitador de trama de inicio</b> | Marca el final de la información de temporización  |
| <b>Destino</b>                            | Dirección MAC destino  |
| <b>Origen</b>                             | Dirección MAC origen   |
| <b>Longitud/Tipo</b>                      | Proporciona la longitud de la trama o identifica el protocolo de capa superior                 |
| <b>Datos</b>                              | Información del usuario  |
| <b>Relleno</b>                            | Bits de relleno para transmitir una trama Ethernet válida, cuya longitud mínima es de 64 bytes |
| <b>FCS</b>                                | Secuencia de verificación de datos, comprobación de daños en la trama                          |

## 2.1.6 Arquitectura de la capa Ethernet

Ethernet basa su funcionamiento en las capas 1 y 2 del modelo OSI, estas capas son Física y Enlace de Datos respectivamente. La figura 2.8 muestra las capas en las cuales se define la tecnología de transmisión Ethernet.

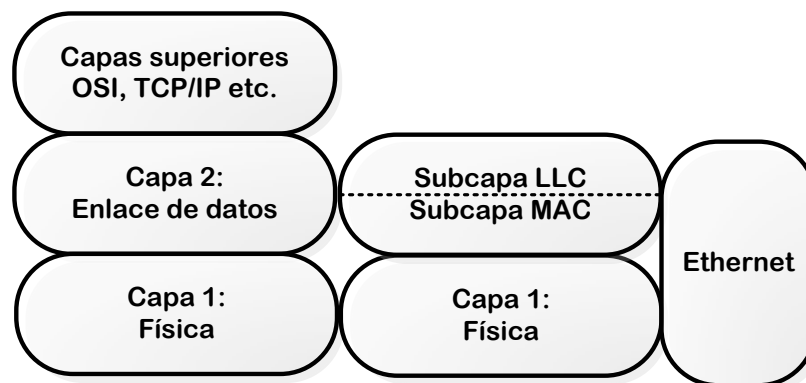


Figura 2.8 Capas del modelo de referencia OSI y Ethernet

La capa de Enlace de Datos del modelo OSI, se divide a su vez en dos subcapas las cuales se enuncian a continuación:

- Control de Enlace Lógico (LLC): identifica los diferentes tipos de protocolo de la capa superior, se encarga de la encapsulación, realiza control de errores y control de flujo.

- Control de acceso al Medio (MAC): su trabajo es definir y controlar el modo de acceso al medio por parte de los usuarios y el modo de transmitir las tramas por el medio físico, también se encarga del direccionamiento físico.

La Capa Física define los tipos de interfaces del medio de transmisión, los tipos de señales y su codificación.

### **2.1.7 Direccionamiento MAC**

Cada computadora tiene una manera única de identificarse en la red y lo hace mediante una dirección física o dirección MAC (Media Access Control). Ethernet utiliza las direcciones MAC para identificar a cada dispositivo de forma individual y los dispositivos que carecen de esta dirección no pueden comunicarse entre sí.

Una dirección MAC tiene una longitud de 48 bits representados en 12 dígitos hexadecimales, los primeros 6 dígitos los administra la IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) e identifican al fabricante y al distribuidor, los 6 dígitos restantes comprenden el número de serie propio de la interfaz.

En la figura 2.9 se muestran las subcapas de la capa de Enlace de Datos. Para enviar un paquete de datos, los datos se transmiten de las capas superiores de los modelos OSI o del modelo TCP/IP a la subcapa LLC. A partir de ahí los datos se entregan directamente de la capa MAC, esta capa MAC entrega los datos a la subcapa PMA (Physical Media Attachment) y después los datos son enviados al medio físico.

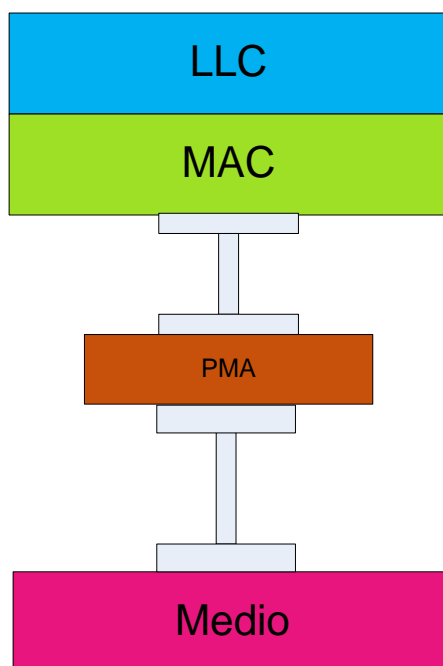


Figura 2.9 Arquitectura de las capas en Ethernet

## 2.2 Fast Ethernet

Los principios de la tecnología Fast Ethernet se remontan al año 1992 cuando la IEEE convocó al comité de trabajo 802.3 con el fin de crear una LAN más rápida. Las propuestas realizadas consistían en mantener al estándar IEEE 802.3 exactamente como estaba pero hacerlo más rápido. Otra propuesta fue rehacer la tecnología por completo para que tuviera muchas características nuevas (como tráfico en tiempo real y voz digitalizada). Por su parte, el comité de trabajo decidió mantener a Ethernet tal como estaba pero mejorando la velocidad, tal decisión fue tomada basándose en las siguientes razones:

1. Necesidad de compatibilidad con las LANs Ethernet existentes.
2. El temor de tener problemas no previstos con un protocolo nuevo.
3. El deseo de contar con un protocolo terminado antes de que la tecnología cambiara.

Con estas mejoras nació un nuevo protocolo llamado Fast Ethernet, el cual definía el mismo formato de trama y el mismo método de acceso al medio (CSMA/CD).

Esta nueva versión del estándar 802.3 fue aprobada oficialmente por la IEEE en junio de 1995 y es conocida con el nombre 802.3u o Fast Ethernet.

Se quería mantener todos los formatos, interfaces y reglas de procesamientos anteriores, y sólo reducir el tiempo de bits de 100 ns a 10 ns. El diseño de Fast Ethernet se basaba en el cableado 10Base-T, esto provoco que todos los sistemas Fast Ethernet utilizaran concentradores y conmutadores; no se permitían los conectores BNC y cable coaxial.

Las dos tecnologías que se hicieron más populares en Fast Ethernet son:

100BaseTX y 100BaseFx, la primera es basada en cable UTP y la segunda en Fibra Óptica multimodo.

La tabla 2.1, muestra el tipo de cable y el segmento máximo utilizado en Fast Ethernet.

| Norma      | Cable                       | Distancia máxima [m] |
|------------|-----------------------------|----------------------|
| 100Base-T4 | UTP categoría 3             | 100                  |
| 100Base-TX | UTP categoría 5 en adelante | 100                  |
| 100Base-FX | Fibra Óptica multimodo      | 2000                 |

Tabla 2.1. Tipos de cables empleados en Fast Ethernet

### 2.2.1 Arquitectura de las capas en Fast Ethernet

En la figura 2.10 se muestra una arquitectura de las subcapas de la capa de Enlace de Datos y la capa Física. Para enviar un paquete de datos, los datos se transmiten de las capas superiores a la subcapa LLC. A partir de ahí se pasa a la subcapa MAC y luego, dependiendo de si se trata de 100BaseT4 o 100BaseTX /100BaseFX, seguirá su camino ya sea por el extremo derecho o izquierdo de la figura.

A diferencia de Fast Ethernet, Ethernet entrega los paquetes de datos directamente de la capa MAC a la subcapa PMA y de ahí al medio físico.

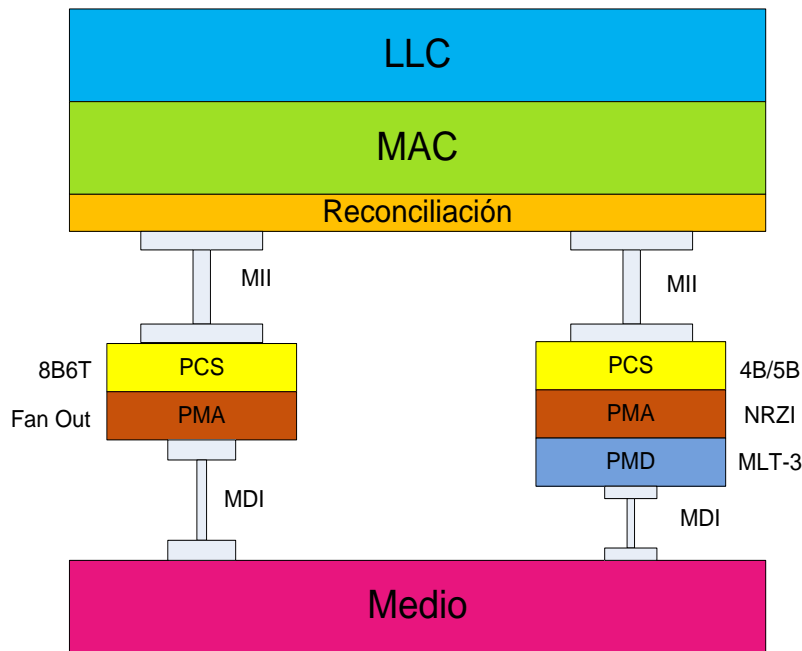


Figura 2.10 Arquitectura de las capas en Fast Ethernet

En la tabla 2.2 se describe la tarea que realiza cada una de las subcapas de la arquitectura Fast Ethernet:

| Nombre |                              |  |
|--------|------------------------------|--|
| MII    | Medium Independent Interface | Dispositivo que convierte las diversas señales recibidas del medio físico a señales de datos estandarizados.   |
| MDI    | Medium Dependent Interface   | Dispositivo que es usado para la conexión física entre la interface y el cable de red (conector RJ-45 para par trenzado ó conector para Fibra Óptica)  |
| PCS    | Physical Coding Sublayer     | Se encarga de codificar y decodificar 8B/6T o 4B/5B dependiendo del medio, además ejecuta el proceso CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection) y es la encargada de determinar la velocidad así como el modo de transmisión (half o full dúplex). |
| PMA    | Physical Medium Attachment   | Se encarga de gestionar los grupos de símbolos. Codifica y decodifica Fan Out y NRZI.  |
| PMD    | Physical Medium Dependent    | Genera las señales ópticas o eléctricas dependiendo del medio, codifica y decodifica la señal.   |

Tabla 2.2 Descripción de la arquitectura de las capas en Fast Ethernet

## 2.2.2 Codificación utilizada en Fast Ethernet

La tecnología Fast Ethernet necesita algunos requerimientos extra para lograr el incremento en su velocidad de transmisión. Los bits que se envían tienen una duración más corta pero la operación ocurre con más frecuencia. Fast Ethernet utiliza dos pasos diferentes en la codificación.

En Fibra Óptica así como cable UTP categoría 5 y superior, se utilizan las siguientes codificaciones:

La primera parte de la codificación utiliza una técnica llamada 4bits/5bits (4B/5B), la tabla 2.3 muestra el mapeo de los bits de entrada con el símbolo de salida. Cada símbolo se representa con 5 bits lo que significa que hay 32 combinaciones posibles, sin embargo, sólo existen 16 símbolos válidos. El resto de los símbolos que no son utilizados para control o para representar una condición IDLE (código de relleno entre stream), se consideran inválidos y no son usados en 100BaseX. El símbolo de 5 bits en el cual todos los bits son uno lógico, indica la condición IDLE. Esta condición es transmitida en la ausencia de datos.

La codificación 4B/5B no permite más de tres ceros continuos en la representación de un símbolo de 5 bits.

| Cadena 4-bit | Símbolo 5-bit |
|--------------|---------------|
| 0000         | 11110         |
| 0001         | 01001         |
| 0010         | 10100         |
| 0011         | 10101         |
| 0100         | 01010         |
| 0101         | 01011         |
| 0110         | 01110         |
| 0111         | 01111         |
| 1000         | 10010         |
| 1001         | 10011         |
| 1010         | 10110         |
| 1011         | 10111         |
| 1100         | 11010         |
| 1101         | 11011         |
| 1110         | 11100         |
| 1111         | 11101         |

Tabla 2.3 Representación de los datos en codificación 4B/5B

La segunda parte de la codificación depende del medio ya sea cobre o Fibra Óptica. La tabla 2.4 muestra las diferentes codificaciones de los medios que utilizan Fast Ethernet.

| Medio | Norma     | Codificación | Señalización   |
|-------|-----------|--------------|----------------|
| Cobre | 100BaseT4 | 8B/6T        | fan out        |
| Cobre | 100BaseTX | 4B/5B        | NRZI           |
| Fibra | 100BaseFX | 4B/5B        | NRZI-3 (MLT-3) |

Tabla 2.4 Medio físico y sus diferentes codificaciones

En la primera parte de la codificación para Fast Ethernet, cada símbolo codificado con 4B/5B es visualizado como un valor binario y en la segunda parte de la codificación, cada valor binario resultante se representa utilizando NRZI o MLT-3 dependiendo del medio físico utilizado.

En la codificación NRZI (No Return to Zero Inverted) cada 1 lógico causa un cambio de transición de (-1V a +1V y viceversa). El 0 lógico no causa cambio de transición.

Mediante esta codificación al representar un 1 lógico, la primera mitad del tiempo de bit se mantiene en la tensión del bit anterior y la segunda mitad del tiempo de bit se coloca en el voltaje extremo contrario. Al representar un 0 lógico, todo el tiempo de bit mantiene la tensión del bit anterior.

En la codificación MLT-3 (MultiLevel Threshold-3) el 0 lógico no causa transición, manteniendo el nivel de tensión del bit anterior.

El 1 lógico en la codificación MLT-3 causa una transición, cambiando el nivel de tensión anterior al nivel de tensión siguiente y lo mantiene durante todo el tiempo de bit. Los niveles de tensión válidos son -1, 0, +1 y son cíclicos. La figura 2.11 muestra el cambio de estado entre los niveles de tensión.

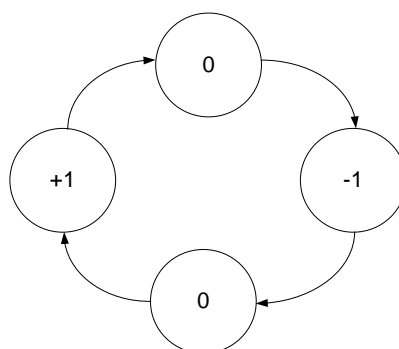


Figura 2.11 Cambio de estado entre los niveles de tensión.

En la figura 2.12 se observa un ejemplo para las codificaciones NRZI y MLT-3



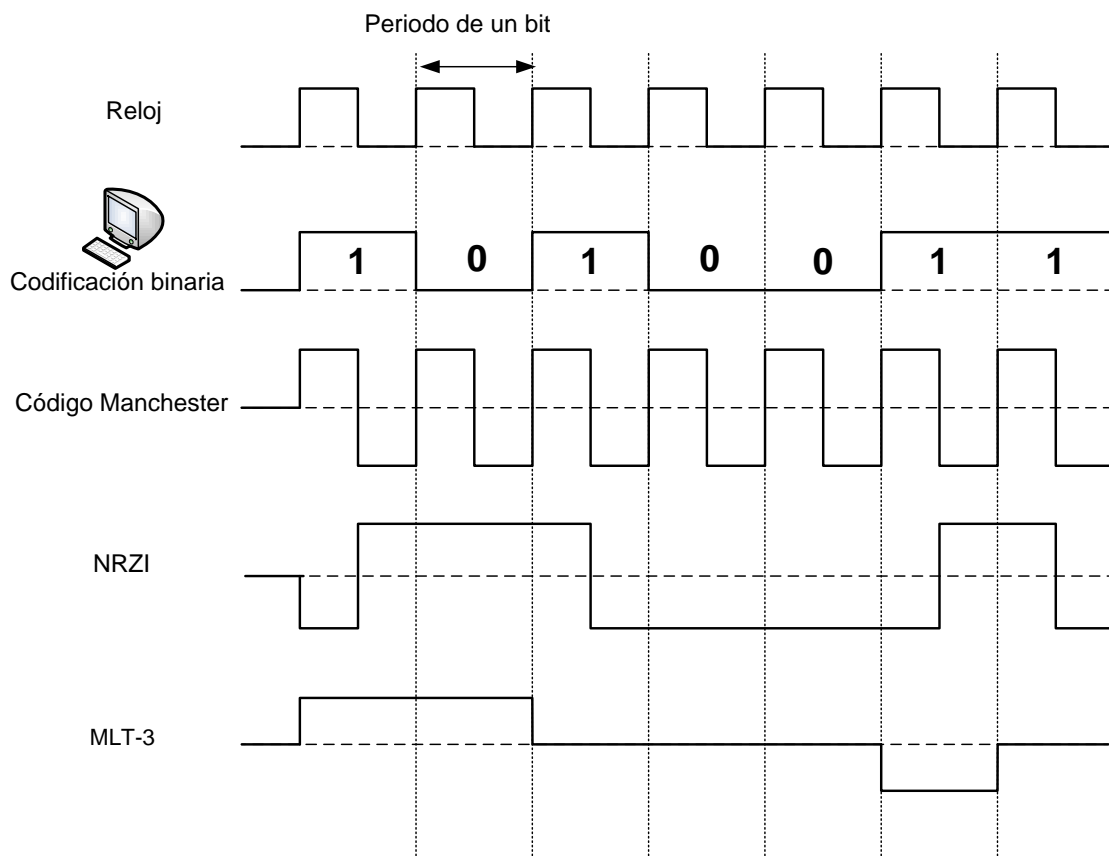


Figura 2.12 Ejemplo para las codificaciones NRZI y MLT-3

Para cable UTP categoría 3 se utilizan dos pasos diferentes para la codificación:

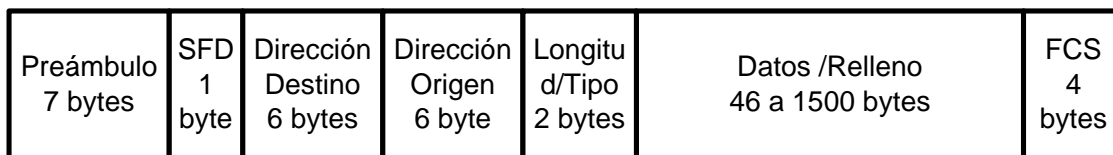
La primera parte consiste en la codificación llamada 8B/6T, este tipo de codificación representa 8 bits con un código de 6 símbolos que pueden tener tres valores (3 niveles: +,-,0). Con una palabra de 8 bits se pueden tener 256 códigos diferentes y se tienen disponibles  $3^6$  ó 729 símbolos de tres estados [6]. Por ejemplo el código 0000 0000 es representado como +-00+-. No se transmite señal si no hay datos. Para los caracteres de control así como para los caracteres delimitadores de comienzo y fin son usados nueve símbolos.

La segunda parte consiste en el multiplexado T4 (fan out). El cable UTP categoría 3 consta de cuatro pares, tres de ellos se utilizan para el envío de datos y el par restante se emplea para escuchar.

La tarea que realiza el multiplexado T4 es dividir la señal para poder ser transmitida ordenadamente en tres pares. Por tal razón 100BaseT4 no es full dúplex.

### 2.2.3 Trama Fast Ethernet

Como se mencionó anteriormente, la trama de Fast Ethernet es la misma que la utilizada en Ethernet tal y como se muestra en la figura 2.13.



Trama Ethernet 802.3

Figura 2.13 Estructura de la trama Ethernet

Donde:

|   |   |
|---|---|
| <b>Preámbulo</b>                          | Se utiliza para sincronización  |
| <b>SFD delimitador de trama de inicio</b> | Marca el final de la información de temporización                                   |
| <b>Destino</b>                            | Dirección MAC destino   |
| <b>Origen</b>                             | Dirección MAC origen  |
| <b>Longitud/Tipo</b>                      | Proporciona la identificación del protocolo   |
| <b>Datos</b>                              | Información del usuario   |
| <b>Relleno</b>                            | Bits de relleno para transmitir una trama Ethernet valida (longitud mínima 64 byte) |
| <b>FCS</b>                                | Secuencia de verificación de datos, comprobación de daños en la trama               |

## 2.3 Gigabit Ethernet

Una vez que se consiguió Fast Ethernet se intentó pasar a un sistema más veloz, el cual fuera capaz de soportar hasta 1000 Mbps utilizando como medio de transmisión par trenzado y Fibra Óptica. La tabla 2.5 muestra el tipo de cable y el segmento máximo utilizado en Gigabit Ethernet.

| Norma       | Cable                  | Distancia máxima [m] |
|-------------|------------------------|----------------------|
| 1000Base-SX | Fibra Óptica multimodo | 550                  |
| 1000Base-LX | Fibra Óptica monomodo  | 5000                 |
| 1000Base-CX | 2 pares de STP         | 25                   |
| 1000Base-T  | 4 pares de UTP         | 100                  |

Tabla 2.5. Tipos de cables empleados en Gigabit Ethernet [17]

La fibra multimodo utilizada en Gigabit Ethernet debe tener un diámetro de núcleo de 50 y 62.5  $\mu m$ , mientras que la fibra monomodo debe tener un diámetro de núcleo de 9  $\mu m$  y 10  $\mu m$ .

El desarrollo de las redes Gigabit Ethernet ha sido simultáneo con el desarrollo de las Fibras Ópticas, éstas han sido un buen medio de transporte para trasladar varios Gigabits por segundo a largas distancias y con muy pocos errores.

### 2.3.1 Codificación Gigabit Ethernet

La codificación que emplea la tecnología Gigabit Ethernet depende del medio físico utilizado ya sea cobre o Fibra Óptica.

Si se usa Fibra Óptica, la codificación que se emplea es 8B/10B. Esta codificación convierte cada Byte de entrada de 8 bits a un Byte de salida de 10 bits.

Con una palabra de 10 bits, se pueden tener hasta 1024 combinaciones posibles, sin embargo, no todas las combinaciones son empleadas en Gigabit y se deben tener en cuenta las siguientes reglas:

- Ningún Byte de salida debe tener más de cuatro bits idénticos seguidos
- Ningún Byte de salida debe tener más de seis bits 0 y seis bits 1

Las consideraciones anteriores se implementan con el objetivo de que el receptor y el emisor se mantengan en sincronía.

Cuando se usa cable UTP en Gigabit Ethernet se emplea una codificación diferente. Debido a que se utilizan los 4 pares de cable trenzado y en cada par se transmite un símbolo, se transmitirán cuatro símbolos en paralelo.

Cada símbolo se codifica con dos bits y se mapea a uno de cinco niveles de voltaje (+2,+1,0,-1 y -2). Por lo tanto, se transmiten dos bits por cada par de cable trenzado y ocho bits por ciclo de reloj. Se logra la velocidad de 1 Gbps al ejecutarse un ciclo de reloj de 125 MHz. A continuación se muestra el cálculo del procedimiento anterior:

$$(pares) \left( \frac{1 \text{ simbolo}}{1 \text{ par}} \right) \left( \frac{2 \text{ bits}}{1 \text{ simbolo}} \right) \left( \frac{125 \times 10^6 \text{ ciclos}}{1 \text{ segundo}} \right) = 1 \times 10^9 \frac{\text{bits}}{\text{segundo}}$$

### **2.3.2 Arquitectura de las capas Gigabit Ethernet**

En la figura 2.14 se describe la arquitectura de las capas que se utilizan en Gigabit Ethernet.

A diferencia de la arquitectura o pila de subcapas utilizada en Ethernet y Fast Ethernet, en Gigabit Ethernet la pila de protocolos se unifica, ello se traduce a que no importa el medio físico del que se trate ya sea de fibra, UTP o cable de cobre.

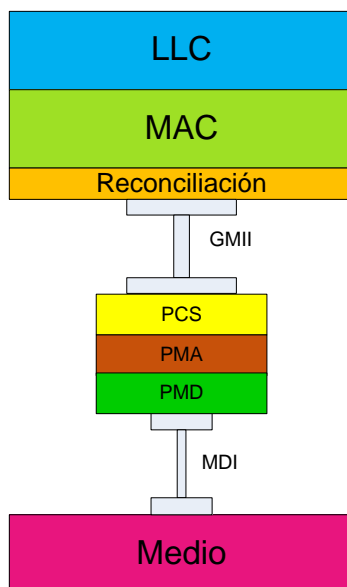


Figura 2.14 Arquitectura de las capas en Gigabit Ethernet

En la tabla 2.6 se describen las tareas que realizan cada una de las subcapas de la arquitectura Gigabit Ethernet:

| Siglas | Nombre                               | Significado  |
|--------|--------------------------------------|--|
| GMI    | Gigabit Medium Independent Interface | Dispositivo que convierte las diversas señales recibidas del medio físico a señales de datos estandarizados.   |
| MDI    | Medium Dependent Interface           | Dispositivo que es usado para la conexión física entre la interface y el cable de la red (conector RJ-45 para par trenzado ó conector para Fibra Óptica)   |
| PCS    | Physical Coding Sublayer             | Subcapa que se encarga de codificar y decodificar, además ejecuta el proceso CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection) y es la encargada de determinar la velocidad así como el modo de transmisión (half o full dúplex). |
| PMA    | Physical Medium Attachment           | Se encarga de gestionar los grupos de símbolos.  |
| PMD    | Physical Medium Dependent            | Es la conexión física al medio: transceptores para Fibra Óptica o un conector RJ45 para UTP.   |

Tabla 2.6 Descripción de la arquitectura de las capas en Gigabit Ethernet

### 2.3.3 Diferencia entre las Tecnologías Ethernet, Fast Ethernet y Gigabit Ethernet

Las diferencias entre estas tres tecnologías son el tiempo de bit, el espacio intertrama y el tiempo de ranura.

En Ethernet al tener una velocidad de transmisión de 10 Mbps, 1 bit en la subcapa MAC necesita 100 nanosegundos para transmitirse. En Fast Ethernet con una velocidad de transmisión de 100 Mbps, el mismo bit necesita 10 ns para ser enviado y para Gigabit Ethernet con una velocidad de 1000 Mbps, el mismo bit sólo necesita 1 ns para ser transmitido. La tabla 2.7 muestra el tiempo necesario para transmitir un bit en los diferentes estándares de Ethernet.

| Velocidad Ethernet    | Tiempo de bit    |
|-----------------------|------------------|
| 10 Mbps               | 100 nanosegundos |
| 100 Mbps              | 10 nanosegundos  |
| 1000 Mbps = 1 Gbps    | 1 nanosegundos   |
| 10,000 Mbps = 10 Gbps | 0.1 nanosegundos |

Tabla 2.7 Tiempo de bit [17]

En la tabla 2.8 se muestra el espacio mínimo entre dos tramas de datos, este espacio comprende desde el último bit del campo FCS de la primera trama hasta el primer bit del preámbulo de la segunda trama. Después de que un usuario envía una trama, los otros usuarios deberán esperar un espacio inter trama de 96 veces el tiempo de bit, antes de que cualquiera de ellos intente transmitir. Este espacio inter trama varía de acuerdo al valor de tiempo de bit para cada una de las versiones de Ethernet.

| Velocidad Ethernet    | Espacio intertrama | Tiempo que necesita |
|-----------------------|--------------------|---------------------|
| 10 Mbps               | 96 tiempo de bit   | 9.6 $\mu$ s         |
| 100 Mbps              | 96 tiempo de bit   | 0.96 $\mu$ s        |
| 1000 Mbps = 1 Gbps    | 96 tiempo de bit   | 0.096 $\mu$ s       |
| 10,000 Mbps = 10 Gbps | 96 tiempo de bit   | 0.0096 $\mu$ s      |

Tabla 2.8 Espacio intertrama [17]

Conforme aumenta la velocidad de las versiones de Ethernet, disminuye el retardo. Este intervalo de tiempo comienza desde que el paquete se transmite, es decir, desde que sale de la capa de Aplicación del transmisor hasta llega a la capa de Aplicación del receptor.

| Velocidad Ethernet    | Tiempo de ranura   | Intervalo de tiempo |
|-----------------------|--------------------|---------------------|
| 10 Mbps               | 512 tiempo de bit  | 51.2 $\mu$ s        |
| 100 Mbps              | 512 tiempo de bit  | 5.12 $\mu$ s        |
| 1000 Mbps = 1 Gbps    | 4096 tiempo de bit | 4.096 $\mu$ s       |
| 10,000 Mbps = 10 Gbps | --                 | --                  |

Tabla 2.9 Tiempo de ranura [17]

## 2.4 PLC

La tecnología PLC está basada en la modulación OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). OFDM es un sistema multicarrier y su principio es dividir el mensaje a transmitir en varias cadenas de bits, las cuales serán transmitidas en un conjunto de subportadoras ortogonales que son independientes entre sí [6], esta independencia se debe a que la frecuencia central de cada portadora coincide con los nulos de las otras portadoras y así se evita la interferencia entre ellas mismas. A continuación se presentan los principios de la modulación OFDM y los diferentes procesos que sufren los datos al ser enviados por un sistema PLC.

### 2.4.1 OFDM

Como se comentó en el capítulo 1, con la entrada en vigor de la segunda generación en el año 2002, los sistemas PLC pasaron a estar basados en la modulación OFDM (Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales). Esta es una técnica de acceso múltiple al medio que divide la porción del espectro disponible en un conjunto de subportadoras o subcanales. Los sistemas OFDM son una variación de los sistemas FDM, ver figura 9. A diferencia de FDM, OFDM no necesita de bandas de guarda entre portadoras y éstas se pueden traslapar ya que son ortogonales, es decir, la frecuencia central de cada portadora coincide con los nulos de las otras portadoras, por esta razón no hay interferencia en el punto central de la portadora y se tiene un mejor aprovechamiento del espectro.

Cada uno de los usuarios transmite su información segmentada a través de un conjunto de subportadoras o subcanales y la cantidad de portadoras que se le asignan es proporcional a la cantidad de información que envía [16].

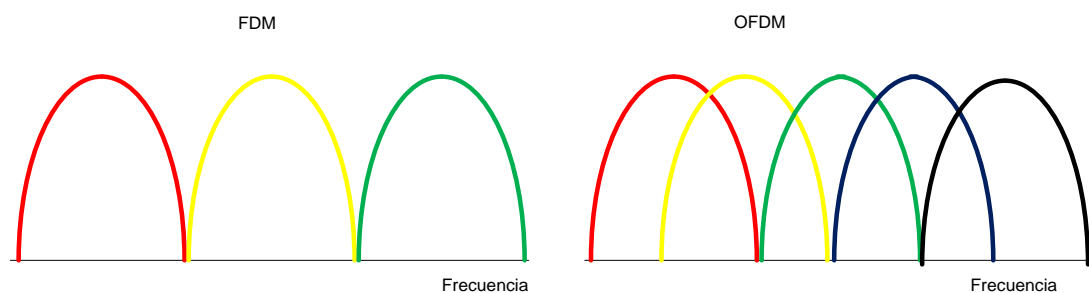


Figura 2.15 Sistemas FDM y OFDM

En el espectro en frecuencia de un sistema OFDM se observa una superposición de las señales sin causar interferencia con esto se aprovecha al máximo el ancho de banda disponible, ver figura 2.16.

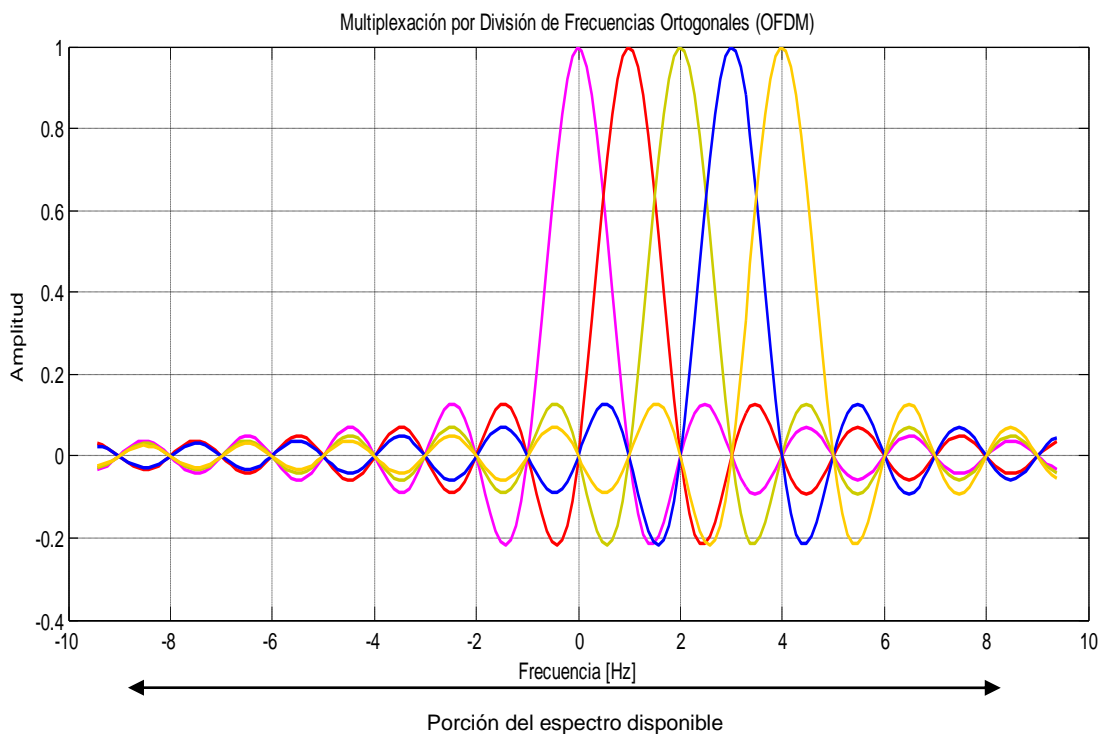


Figura 2.16 OFDM

La tecnología PLC utiliza este tipo de modulación, ya que hace posible una alta transmisión de datos sobre canales hostiles como lo son las líneas de transmisión eléctricas. OFDM se implementa para usar moduladores y demoduladores para cada subportadora.

## 2.4.2 Codificación utilizada en la tecnología PLC

Para la transmisión de información a través del canal, la tecnología PLC usa la técnica de Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales (OFDM), ésta consiste en transmitir simultáneamente la información de distintas fuentes al mismo tiempo, pero utilizando una frecuencia distinta en cada fuente.

La transmisión de información de cada una de las fuentes se realiza utilizando portadoras, que son frecuencias que pueden traslaparse por tener características de ortogonalidad y no interferir entre sí, ya que cada una de las frecuencias centrales de las portadoras coincide con los nulos de las otras portadoras.

El número de portadoras que se asigna a cada fuente es proporcional a la cantidad de información que tenga por enviar. El número de portadoras utilizado en un sistema depende del estándar que se esté utilizando. En la tabla 2.9 muestra la relación entre el número de portadoras, el rango de frecuencias utilizable y la velocidad de transmisión de los estándares.

**IMPLEMENTACIÓN, ANÁLISIS Y COMPARACIÓN EXPERIMENTAL DEL DESEMPEÑO DE REDES DE FIBRA ÓPTICA, PAR TRENZADO Y PLC.**

| <b>Estándar</b> | <b>Portadoras</b>                              | <b>Rango de Frecuencias [MHz]</b> | <b>Velocidad de transmisión [Mbps]</b> |
|-----------------|--|-----------------------------------|--|
| HOMEPLUG        | 84   | 4.5 – 21                          | Hasta 14                               |
| DS2             | 1280<br>768 para up-link<br>512 para down-link | Hasta 30                          | 45 y 200                               |

Tabla 2.10 Numero de portadoras para los estándares PLC

En OFDM cada una de las portadoras es modulada en amplitud y fase utilizando la Modulación de Amplitud en Cuadratura (QAM). Con esta modulación, cada una de las portadoras representa un símbolo de  $n$  bits.

A continuación se muestra la relación entre el número de símbolos y el número de bits por símbolo ( $n$ ).

$$n = \log_2(\text{número de símbolos})$$

La tabla 2.10 contiene la relación del número de bits que son necesarios para representar un determinado número de símbolos para distintos tipos de modulación:

| Modulación | Símbolos | Bits por símbolo |
|------------|----------|------------------|
| QPSK       | 4        | 2                |
| 4-QAM      | 4        | 2                |
| 16-QAM     | 16       | 4                |
| 64-QAM     | 64       | 6                |

Tabla 2.11 Bits necesarios para distintos tipos de modulación

A fin de representar a cada uno de los símbolos en amplitud y fase, la figura 2.17 muestra un plano con la distribución de símbolos (constelaciones) para cada tipo de modulación anterior.



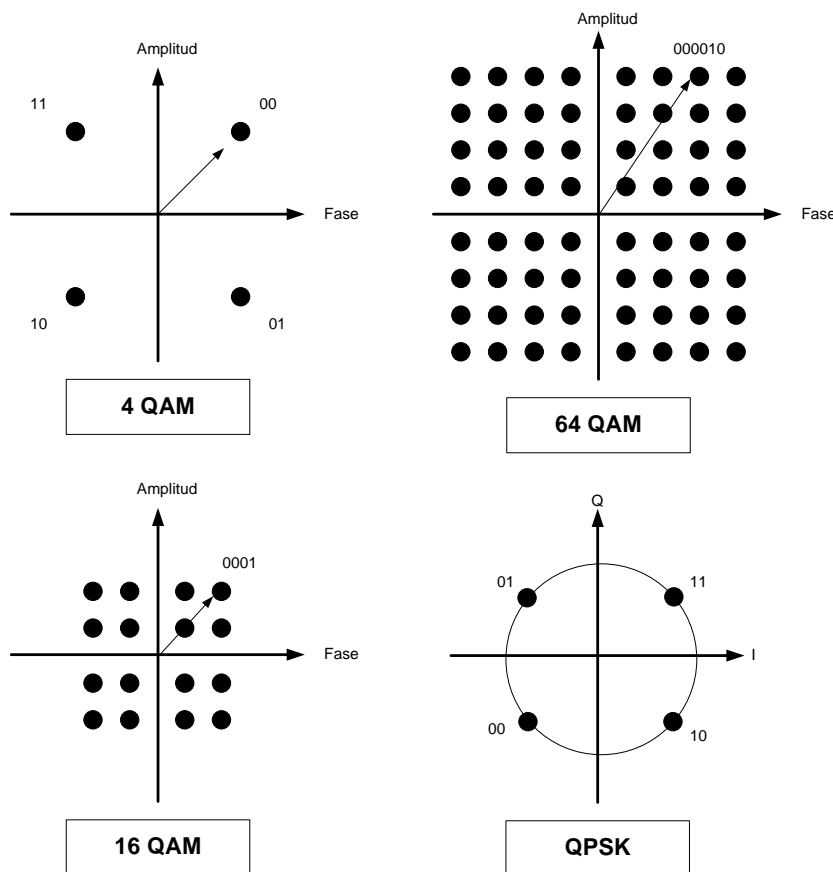


Figura 2.17 Constelaciones para cada tipo de modulación

### 2.4.3 Trama PLC

La tecnología PLC trabaja en las capas 1 y 2 del modelo OSI y en la capa 1 del modelo TCP/IP, estas capas llevan por nombre Física y Enlace si hablamos del modelo OSI y capa de Acceso a la Red si se trata de la pila de protocolos TCP/IP.

La capa Física se encarga de definir las especificaciones electromecánicas de operación como son especificaciones de cableado, conectores, conexiones y niveles de voltaje necesarios para mantener activo un enlace.

La capa de Enlace de Datos se encarga del encapsulamiento de la información en frames o tramas y de la identificación de cada uno de los elementos de red mediante una dirección MAC.

Dos o más elementos al estar conectados a la misma red, tienen una alta probabilidad de transmitir su información al mismo tiempo sobre el mismo medio y ello implica un alto número de colisiones. La tecnología PLC utiliza dos métodos para controlar el acceso al canal y evitar las colisiones entre los elementos de la red llamados TDMA y CSMA/CA.

## 2.4.4 TDMA

TDMA o Time Division Multiple Access – Acceso Múltiple por División de Tiempo, es una técnica de multiplexación en la que la porción del espectro disponible es usado por una fracción de tiempo por cada transmisor o fuente de información que componen la red. En esta técnica, la fracción de tiempo se conoce como “slot” o “ranura de tiempo”. La figura 2.18 muestra un ejemplo donde tres fuentes de información comparten el medio de transmisión.

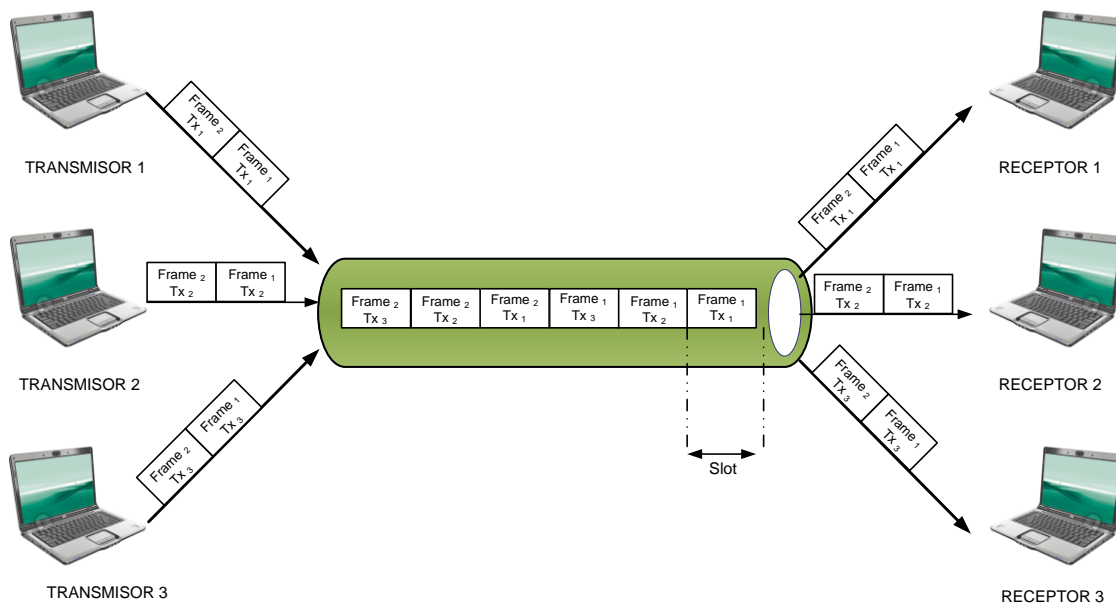


Figura 2.18 Ejemplo TDMA

## 2.4.5 CSMA/CA

CSMA/CA o Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance – Acceso Múltiple por Detección de Portadora con Evitación de Colisiones, es una técnica que permite el uso del mismo medio de transmisión por distintos usuarios, mediante esta técnica se realiza una detección del canal físico y virtual a fin de reducir las colisiones en la red.

La detección del canal físico consiste en lo siguiente, en el momento en que un usuario desea transmitir sensa el canal y si éste se encuentra libre entonces transmite su trama completa. Si en el proceso de sensado se encuentra ocupado el canal, entonces el usuario se espera hasta que el medio se encuentre libre para comenzar su transmisión. Si durante el proceso de transmisión ocurre una colisión, los usuarios involucrados ejecutan el algoritmo de *exponential backoff*, mediante el cual cada uno de ellos escoge de forma aleatoria un *slot* dentro de un conjunto de *slots* o *ventana* para volver a intentar transmitir su información. Si los usuarios involucrados en la colisión llegan a escoger slots iguales, tratarán de transmitir al mismo tiempo y ello llevará a una colisión nuevamente, en estos casos y subsecuentes la ventana crece de tamaño de forma exponencial de tal forma que los usuarios puedan escoger un slot

para transmitir dentro de un conjunto cada vez mayor y ello disminuya la probabilidad de que dos o más usuarios escojan el mismo tiempo para transmitir.

La detección del canal virtual se basa en la propagación de tramas especiales dentro de la red. Tales tramas pueden ser Request To Send (RTS), Clear To Send (CTS) y el Network Allocation Vector (NAV). El RTS se usa por un usuario cuando quiere advertir a otro que desea comunicarse con él, es decir, mediante este mensaje se le solicita permiso para poder enviarle una trama. La trama CTS se utiliza como respuesta a la trama RTS, mediante este mensaje se está permitiendo que se le envíe la trama de información. El NAV es un tiempo que se asignan personalmente los usuarios de la red ante la escucha de una trama RTS o CTS, este tiempo es un recordatorio interno de cada usuario para abstenerse de transmitir mientras se completa la transmisión involucrada en las tramas RTS y CTS. La figura 2.19, muestra el uso e interacción de estas tramas en una red de 4 usuarios.

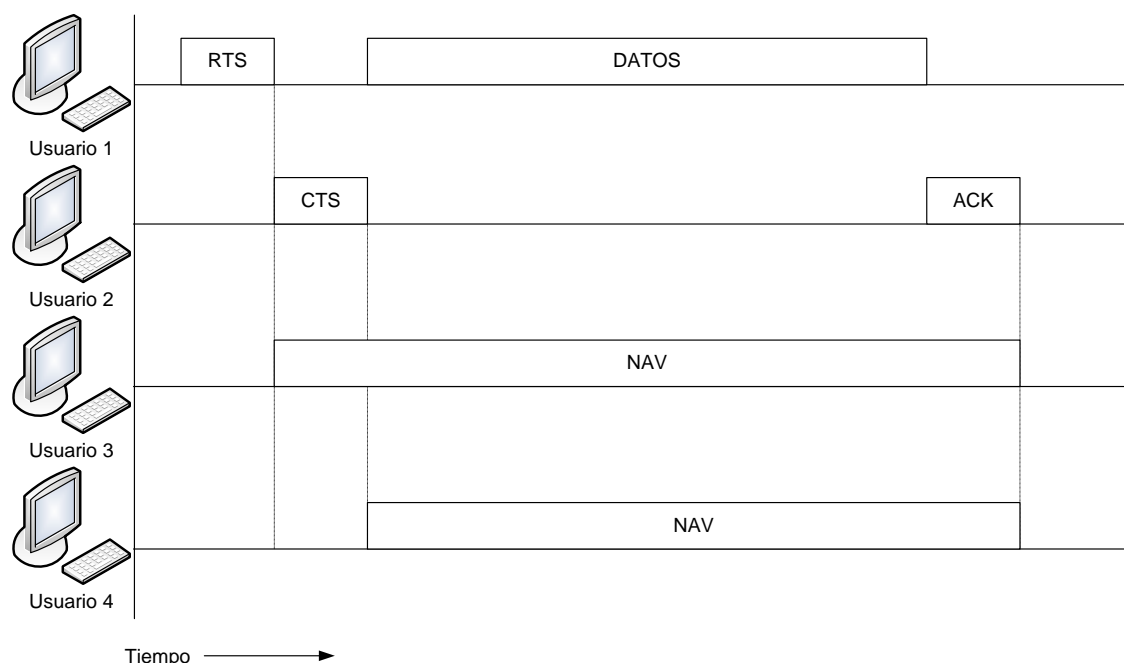


Figura 2.19 Detección del canal virtual con una red de 4 usuarios

En la figura 2.19 el usuario número 1 desea comunicarse con el usuario número 2, el usuario 3 está dentro del rango de cobertura del usuario 1 y el usuario 4 está dentro del rango de cobertura del usuario 2 pero no dentro del rango de cobertura del usuario 1.

El usuario 1 le pide permiso al usuario 2 para enviarle información mediante la trama RTS, como el usuario 3 está dentro del rango de cobertura del usuario 1, esta trama es vista también por él. En este sentido, el usuario 3 en base a la trama RTS puede estimar el tiempo que el medio estará ocupado por la transmisión de los datos y el ACK correspondiente, entonces se abstiene de su intento por transmitir y se coloca para sí mismo un tiempo de NAV.

Cuando el usuario 2 le envía la trama CTS al usuario 1 para indicarle que le puede enviar información, dado que el usuario 4 está dentro del rango de cobertura del usuario 2, esta trama también es vista por él. De esta manera, el usuario 4 estima el tiempo que el medio estará ocupado por la transmisión de los datos y el ACK, por lo que se abstiene de cualquier intento de transmitir y se coloca para sí mismo un tiempo de NAV.

En cuanto el CTS es recibido por el usuario 1, éste envía la información y activa el temporizador ACK, este temporizador es un tiempo aproximado dentro del cual el usuario 1 espera recibir la trama ACK que confirme que el usuario 2 recibió la información, si este temporizador se agota y no se recibe el ACK, se asumirá que la información no llegó y se reenviará. En este ejemplo se muestra que el usuario 2 recibe la información correctamente puesto que envía la trama ACK y posteriormente se libera el canal.

### 2.4.6 Estándar Home Plug AV[20]

Existen dos tipos de tramas que se transmiten en HomePlug, el primer tipo son las tramas largas y el segundo tipo son las tramas cortas. Las tramas largas se utilizan para transmitir información de administración, control o datos. Las tramas cortas consisten en un limitador de respuesta y se ocupan en el protocolo para el control de errores Stop and Wait - ARQ (Automatic Repeat Request). Este protocolo se usa para que el nodo transmisor no envíe la siguiente trama hasta no recibir un acuse de recibo (ACK) por parte del nodo receptor, que indique que se ha recibido la trama actual correctamente.

En el Stop and Wait – ARQ si el nodo transmisor no recibe mediante una trama corta un ACK, un error de recepción de trama (NACK) o la imposibilidad para recibir la trama (FAIL) por parte del nodo receptor durante un lapso de tiempo llamado temporizador o timeout, el transmisor reenviará de forma automática la trama en cuestión.

En las figuras 2.20 y 2.21 se muestra el formato de cada una de las tramas empleadas en el estándar HomePlug.

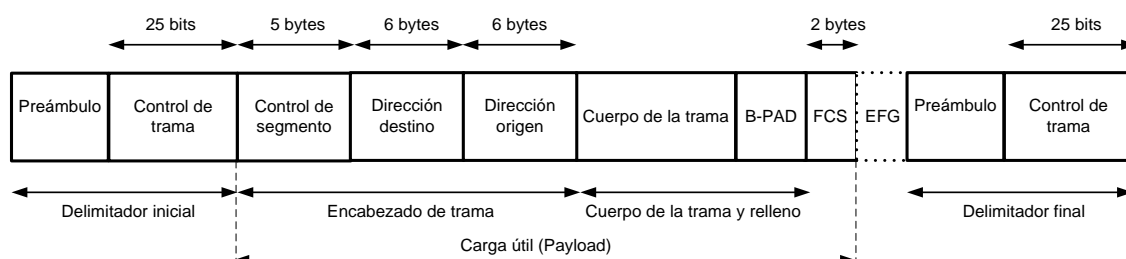


Figura 2.20 Formato de trama larga PLC del estándar HomePlug

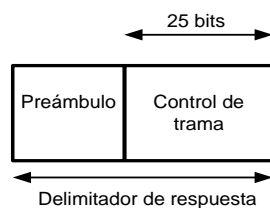


Figura 2.21 Formato de trama corta PLC del estándar HomePlug

A continuación se describen los campos que conforman a cada una de las tramas usadas en el estándar de comunicaciones HomePlug.

**Limitador inicial.** Indica el inicio y longitud de la trama.

**Limitador final.** Indica el fin de la trama y anuncia la prioridad de acceso al canal.

Cada limitador está compuesto por dos campos: preámbulo y control de trama.

**Preámbulo.** Denota el inicio de un limitador ya sea éste inicial o final.

**Control de trama.** Este campo se compone de los siguientes subcampos:

|  |                              |  |
|--|------------------------------|--|
| <b>Control de trama del Delimitador inicial</b>      | Control de contención        | Cuando este campo es activado o puesto en "1", impide que las tramas con la misma prioridad o inferior que la trama actual accedan al medio. Las tramas con una mayor prioridad pueden acceder al medio antes que la trama actual. |
|  | Longitud de trama            | Contiene la longitud del payload o carga útil en símbolos OFDM.  |
| <b>Control de trama del Delimitador final</b>        | Control de contención        | Este campo transmite la misma información que su homólogo del delimitador inicial.   |
|  | Prioridad de acceso al canal | Aquí se indica la prioridad de la trama larga actual   |
| <b>Control de trama del Delimitador de respuesta</b> | Tipo                         | Este campo transmite la misma información que su homólogo del delimitador inicial.   |
|  | Prioridad de Acceso al canal | Indica la prioridad de la trama larga anterior.  |

**Control de segmento.** Campo que contiene información necesaria para que el usuario destino reconstruya correctamente un paquete que ha sido segmentado. Por una parte si la trama transmitida es un fragmento, contiene el número de fragmento de

una misma trama. Por otra parte, si la trama transmitida es una trama completa, especifica el número de trama de una misma secuencia de tramas.

**Dirección Destino.** Contiene la dirección del usuario al cual se dirige la trama.

**Dirección Fuente.** Contiene la dirección del usuario del cual proviene la trama.

**Cuerpo de la trama.** Campo que transmite los datos del usuario fuente al usuario destino.

**Bits de relleno (B-PAD).** En este campo se colocan los bits de relleno para completar el tamaño mínimo de la trama.

**Suma de verificación de trama (FCS).** Este campo se utiliza para la detección de errores en la trama que se ha transmitido.

**End of Frame Gap (EFG).** Es un retardo de procesamiento de 1.5  $\mu$ s que antecede a los campos preámbulo y control de trama de un delimitador final en una trama larga.

# CAPÍTULO 3

## MEDIOS DE TRANSMISIÓN (IMPLEMENTACIÓN DE LA RED)

### 3.1 Red

A fin de analizar y comparar las tecnologías antes mencionadas se implementaron dos topologías diferentes en las que se cambió el medio físico entre cable UTP, Fibra Óptica y cable de cobre calibre número 12.

### 3.2 Topologías básicas usadas

Las topologías físicas utilizadas son del tipo estrella ya que están formadas por dos concentradores o conmutadores de paquetes. Se implementó este tipo de topología por dos razones principales, la primera es que se utilizó el equipo que ya se tenía en el laboratorio y la segunda es que con esta configuración de red se pudieron llevar a cabo las diferentes pruebas sin que ello implicara grandes cambios en la estructura de red.

Una ventaja adicional con este tipo de topología es que si una computadora localizada en uno de los nodos falla, esto no afecta el desempeño de las demás computadoras localizadas en los otros nodos.

Para identificar a cada una de las topologías utilizadas en este trabajo, las llamaremos topología punto-multipunto y topología punto a punto. En seguida se muestra las figuras que representan las topologías utilizadas y su respectiva descripción.

La figura 3.1 muestra la distribución y conexión de los equipos para implementar la topología punto-multipunto.

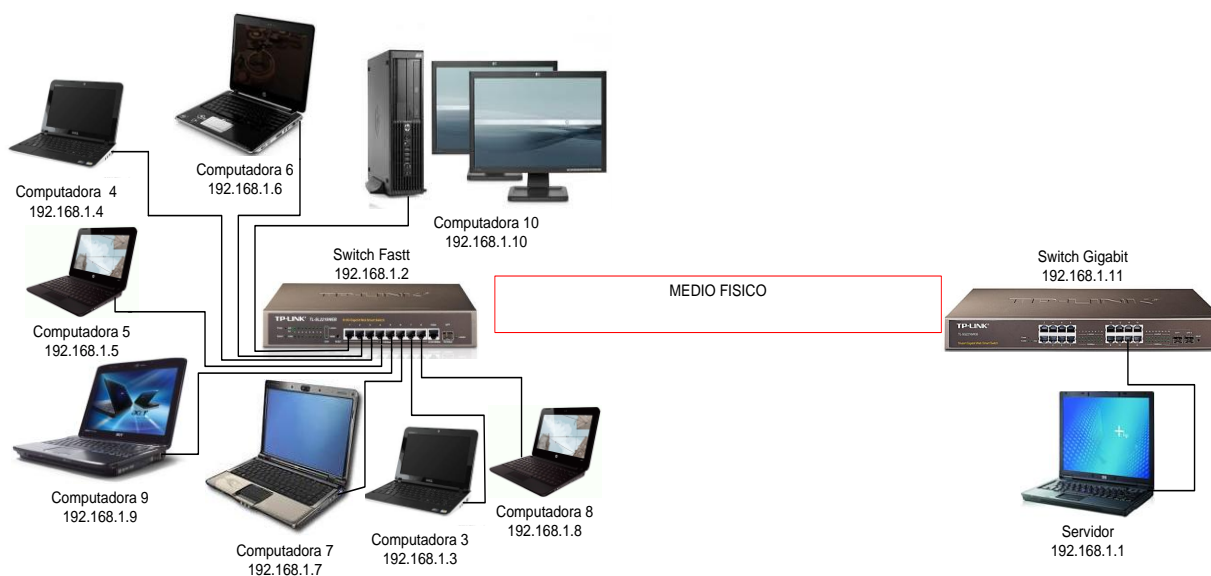


Figura 3.1 Topología punto-multipunto

En la figura 3.1 se muestra un conjunto de 9 computadoras, 8 de éstas se encuentran conectadas a un switch Fast Ethernet mediante el uso de cables UTP con una longitud máxima de 2 m. Estas computadoras desempeñan la función de cliente. La computadora restante se encuentra conectada a un switch Gigabit Ethernet usando un cable UTP de 1 m y desempeña la tarea del servidor FTP (File Transfer Protocol). Las características de ambos switches, así como de las computadoras utilizadas, se especifican en el apéndice A. Durante las pruebas realizadas el medio físico que conecta a ambos switches cambia.

Para lograr la comunicación entre todos los elementos pertenecientes a la red, se le configuró a cada uno de ellos una dirección IP, válida dentro de la red 192.168.1.0, con una máscara de 255.255.255.0 y un Gateway 192.168.1.254. En la tabla 3.1 se muestra la relación entre el nombre del equipo y su dirección de red.



| Equipo                | Dirección IP |
|-----------------------|--------------|
| <b>Servidor</b>       | 192.168.1.1  |
| <b>Computadora 3</b>  | 192.168.1.3  |
| <b>Computadora 4</b>  | 192.168.1.4  |
| <b>Computadora 5</b>  | 192.168.1.5  |
| <b>Computadora 6</b>  | 192.168.1.6  |
| <b>Computadora 7</b>  | 192.168.1.7  |
| <b>Computadora 8</b>  | 192.168.1.8  |
| <b>Computadora 9</b>  | 192.168.1.9  |
| <b>Computadora 10</b> | 192.168.1.10 |
| <b>Switch FE</b>      | 192.168.1.2  |
| <b>Switch GE</b>      | 192.168.1.11 |

Tabla 3.1 Dirección IP de cada uno de los elementos de la red

Por otra parte la figura 3.2 presenta la topología punto a punto. Esta topología consta de dos computadoras, una de ellas se encuentra conectada a un switch Fast Ethernet mediante un cable UTP de 1 m y desempeña la función de cliente, la otra computadora se conecta a un switch Gigabit Ethernet mediante un cable UTP de 1 m y actúa servidor FTP. Las características de ambos switches se especifican en el apéndice A. Durante las pruebas realizadas el medio físico que conecta a ambos switches cambia.

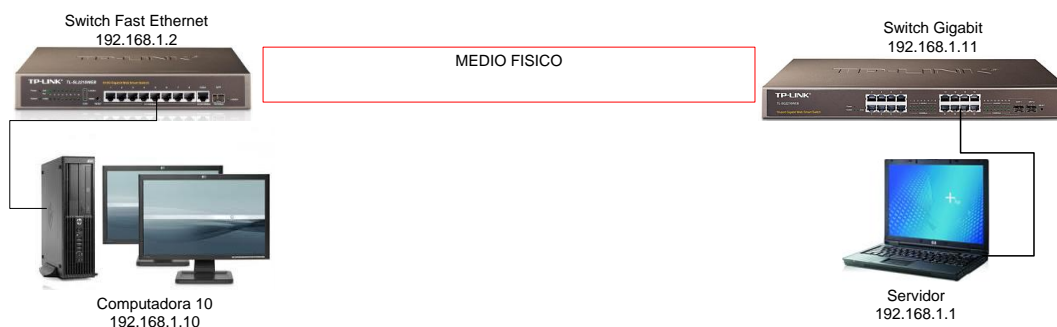


Figura 3.2 Topología punto a punto

Para permitir conectividad en la topología punto a punto, se utilizó el mismo segmento de red, máscara y dirección de Gateway que con la topología multipunto. A manera de cliente se utilizó la computadora número 10.

El equipo utilizado para la implementación de las dos topologías se describe en la tabla 3.2, asimismo, en el apéndice A se presenta la descripción técnica del material utilizado.

| Equipo  | Descripción   |
|---|---|
| <b>Switch Gigabit Ethernet</b><br><br><b>Switch Fast Ethernet</b> | Este equipo es capaz de gestionar las tramas de cada uno de los ordenadores que se encuentren conectados a sus puertos y así definir un dominio de colisión para cada uno de ellos.   |
| <b>Computadora personal</b>                                       | Ordenador portátil que tiene dos funciones. Por una parte sirve para administrar y configurar la red y por otra parte funciona como cliente o servidor FTP.   |
| <b>Motor de licuadora</b>   | <p>Dispositivo eléctrico que al estar conectado a la red funciona como generador de ruido, con el fin de producir interferencia en los medios físicos analizados mediante la radiación de campos electromagnéticos producidos durante su funcionamiento.</p> <p>Cuando se activa la licuadora, la corriente eléctrica circula y produce un campo magnético, el cual al interactuar con los magnetos del motor de la licuadora, lo hacen girar.</p> <p>Por tal razón el ruido que genera el motor de licuadora es electromagnético. Durante la realización de las pruebas el motor de licuadora fue colocado a 5 centímetros del medio físico bajo prueba y a una distancia de 2 metros con respecto a la ubicación de las computadoras, switches y cables de conexión, esto con el único fin de causar una mínima interferencia electromagnética sobre estos últimos.</p> |

Tabla 3.2. Descripción del equipo utilizado en las pruebas.

Para cada uno de los medios físicos bajo prueba, se realizaron dos tipos de análisis, tanto para la topología punto a punto, como para la punto-multipunto. Los análisis se demuestran:

*A) Análisis de red sin ruido electromagnético.*

*B) Análisis de red con ruido electromagnético.*

La finalidad de esta prueba fue la de evaluar cómo afecta el ruido electromagnético al desempeño de cada medio físico, es decir, cable UTP, cable de cobre para tecnología PLC y Fibra Óptica. Para ello, en el análisis B se aplicó el ruido electromagnético (se accionó la licuadora) a intervalos de 5 minutos con una duración de 60 segundos

Las pruebas realizadas consistieron en que las computadoras empleadas en ambas topologías que desempeñan el papel de cliente descarguen de manera simultánea un archivo almacenado en el servidor FTP. El nombre de este archivo es *Carpeta.zip* y cuenta con una longitud de *418223085 bytes*.

Los switches que se utilizaron para las pruebas son fabricados por la empresa TP LINK. Uno de ellos, denominado switch Gigabit Ethernet, se puede interconectar ya sea a través de sus 16 puertos RJ45 para Ethernet a una velocidad de 1000 Mbps o a través de sus dos puertos SFP para el soporte de Fibra Óptica a una velocidad de

1000 Mbps. El otro switch, denominado Fast Ethernet, se puede interconectar utilizando cualquiera de sus 8 puertos RJ45 para Ethernet a una velocidad de 100 Mbps, mediante 1 puerto RJ45 para Ethernet a una velocidad de 1000 Mbps, y a través de su puerto SFP para el soporte de Fibra Óptica a una velocidad de 1000 Mbps. Gracias a estas características, los switches se pudieron utilizar en las pruebas de las tres tecnologías empleadas en el presente trabajo. Tanto en la topología multi-punto como en la punto a punto, las computadoras cliente se conectaron a los puertos RJ45 del switch Fast Ethernet, tal y como se muestra en las figuras 3.1 y 3.2. El servidor se conectó a un puerto RJ45 del switch Gigabit Ethernet.

El protocolo que se utilizó para la transferencia del archivo es FTP<sup>2</sup>, el cual está basado en un ambiente cliente-servidor. Este protocolo trabaja en la capa de Aplicación de la pila de protocolos TCP/IP utilizando los puertos 20 y 21. En la figura 3.3 se muestra la comparación del modelo OSI con la pila de protocolos TCP/IP.

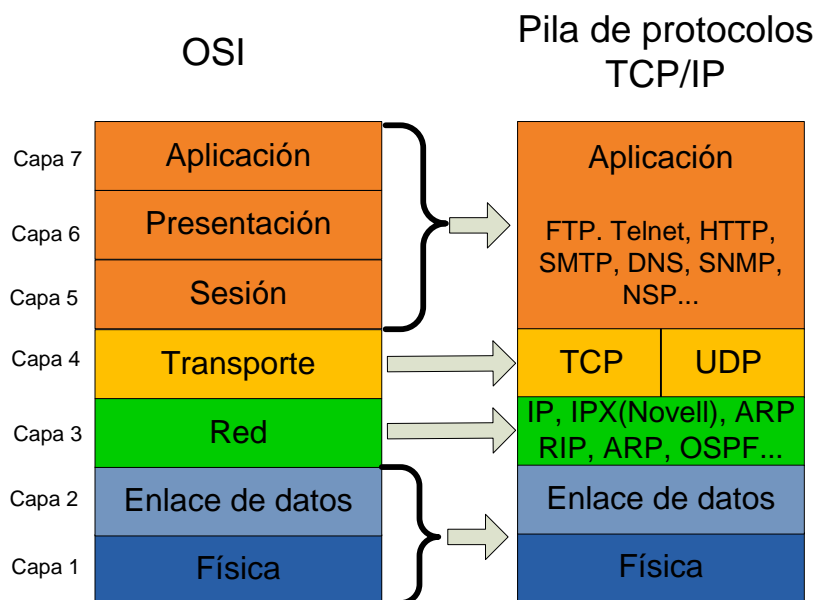


Figura 3.3 Modelo de referencia OSI en comparación con el protocolo TCP/IP.

### 3.2.1 Fibra Óptica

La figura 3.4 muestra la configuración de la topología punto-multipunto usando como medio de transmisión Fibra Óptica. Cada extremo de la Fibra Óptica fue conectada directamente a un transceptor SFP (Small Form-Factor Pluggable)<sup>3</sup> mediante conectores LC y a su vez cada transceptor fue conectado a la ranura de expansión SF de cada uno de los switches.<sup>4</sup>

<sup>2</sup> <http://www.rfc-es.org/rfc/rfc0959-es.txt>

<sup>3</sup> SFP su descripción técnica se encuentra en el Apéndice A de este trabajo de tesis.

<sup>4</sup> Las descripción técnica de cada uno de los switches utilizando se encuentran en el Apéndice A.

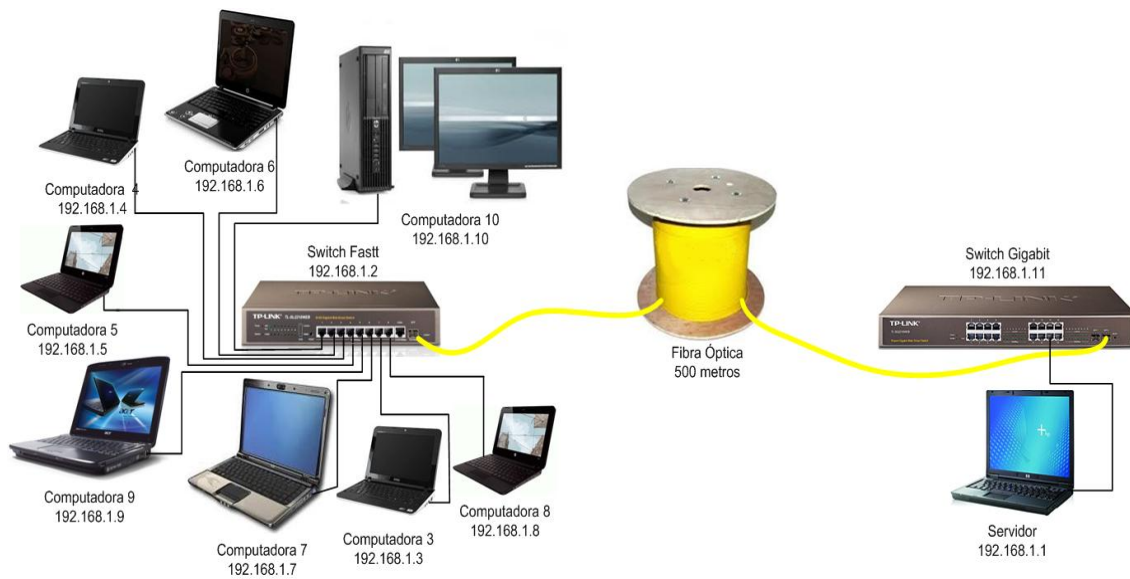


Figura 3.4. Topología punto-multipunto de la red de Fibra Óptica

La Fibra Óptica que se utilizó como medio físico es monomodo, la tabla 3.3 muestra sus características principales.

| Características           | Descripción                                   |
|---------------------------|---|
| Marca                     | Corning                                       |
| Longitud de cable         | 500 metros                                    |
| Diámetro del núcleo       | 9 $\mu m$                                     |
| Diámetro de revestimiento | 125 $\mu m$                                   |
| Estándar                  | ITU-T G.652                                   |
| Conector                  | LC  |
| OFNR                      | Sin componentes que conduzcan la electricidad |

Tabla 3.3 Características principales de la Fibra Óptica

En la figura 3.5 se muestra la implementación física de la red que se utilizó en el laboratorio para realizar las pruebas con Fibra Óptica.



Figura 3.5 Implementación física de la red de Fibra Óptica con 8 clientes y un servidor.

Asimismo, la figura 3.6 muestra la topología punto a punto de la red que se implementó en el laboratorio usando Fibra Óptica como medio físico.



Figura 3.6 Implementación física de la red de Fibra Óptica con un cliente y un servidor

En la figura 3.7 se muestra el carrete de Fibra Óptica y junto a éste se encuentra el motor de la licuadora que se empleó para generar ruido electromagnético en el medio físico.



Figura 3.7. Implementación física de la red de Fibra Óptica con un cliente y un servidor

### 3.2.2 Par Trenzado

A fin de evaluar el comportamiento de la red utilizando como medio físico cable par trenzado no blindado, la figura 3.8 muestra la topología punto-multipunto de la red con cable UTP. Cada uno de los extremos del carrete de cable UTP fue conectado a un puerto RJ-45 a 1000Mbps.

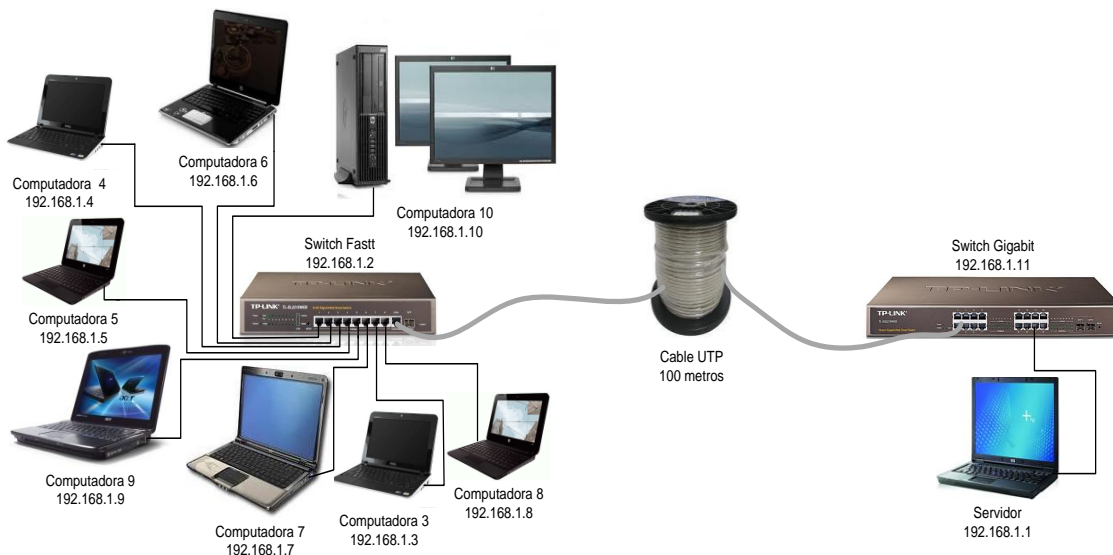


Figura 3.8 Topología punto-multipunto de la red con cable UTP

El cable UTP que se utilizó como medio físico es categoría 5e, en la tabla 3.4 se muestran sus características principales.

| Características   | Descripción |
|-------------------|-------------|
| Marca             | MITZU       |
| Categoría         | 5e          |
| Longitud de cable | 100 metros  |
| Pares             | 4           |
| Estándar          | Ethernet    |
| Conector          | RJ45        |

Tabla 3.4 Características principales del cable UTP

La figura 3.9 muestra la implementación de la topología punto-multipunto de la red utilizando como medio físico al cable UTP.



Figura 3.9. Implementación física de la red con cable UTP con 8 clientes y un servidor

En la figura 3.10 se observa el motor de la licuadora y el carrete de 100 metros de cable UTP que se utilizaron en esta prueba.

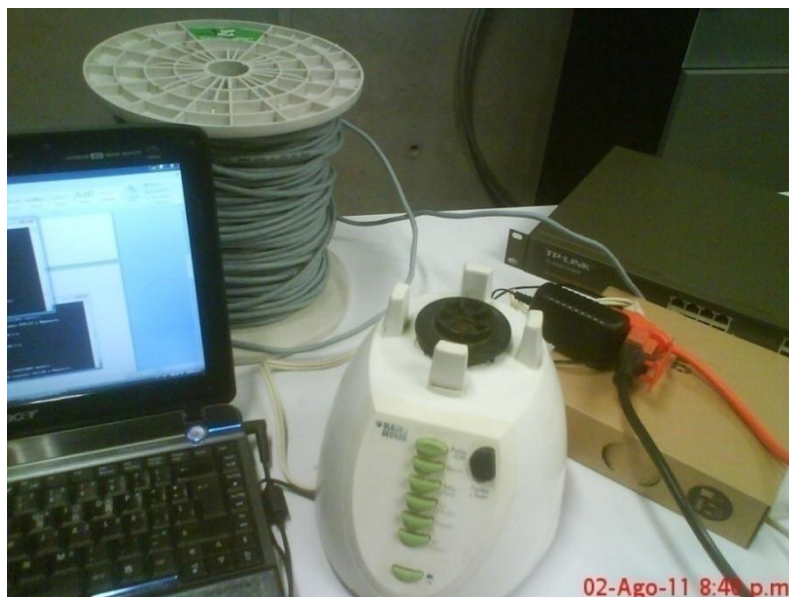


Figura 3.10. Elementos utilizados en la implementación de la red utilizando UTP

Por su parte la figura 3.11 muestra la topología punto a punto de la red utilizando cable UTP. El motor de la licuadora se encuentra a una distancia de 2 metros de las computadoras que funcionan como cliente y servidor.



Figura 3.11. Implementación física de la red con cable UTP utilizando un cliente y un servidor

### 3.2.3 PLC

En la figura 3.12 se presenta la topología punto-multipunto de la red utilizando como medio físico un par de cable de cobre calibre 12.

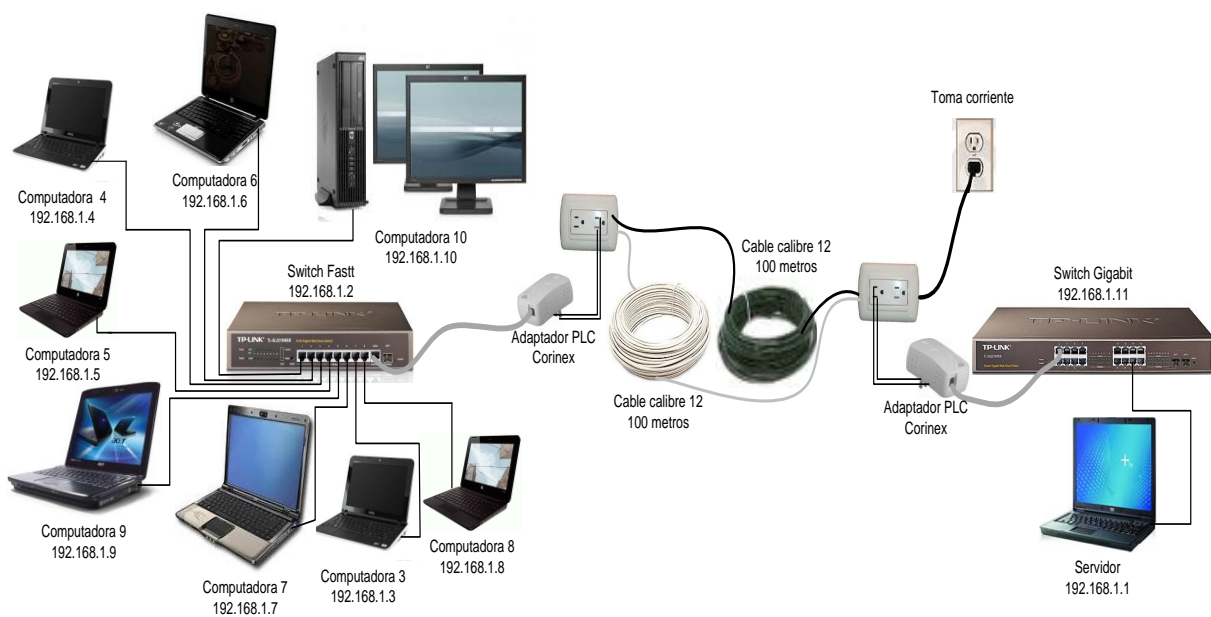


Figura 3.12 Topología punto-multipunto de la red utilizando cable de cobre número 12.



La figura 3.13 muestra las conexiones realizadas para utilizar la tecnología PLC. En esta figura se observa que para lograr conectar los dos módems PLC al cable de cobre, se tomó cada uno de los extremos de los dos carretes de cable de cobre y se conectaron a los toma corrientes 1 y 2. Para que circulara corriente eléctrica se le añadió al toma corriente 2 un par de cable de cobre con una longitud de 2 [m] y en la punta de dicho cable se colocó una clavija convencional, la cual se conectó directamente a un toma corriente del Instituto de Ingeniería. Los módems PLC se conectaron directamente a los toma corrientes 1 y 2. Para lograr la conexión a los switches, los modem PLC contaban con un puerto RJ-45 donde se conectó a cada uno de ellos un extremo de cable UTP con una longitud de 1 [m], para después conectar el otro extremo de dicho cable a los puertos 1000 Mbps de los switches.

Siguiendo la misma figura, se observa que para llevar a cabo de la prueba de ruido electromagnético se utilizó un motor de licuadora, el cual fue conectado al toma corriente 1. Para disminuir los efectos causados por el ruido electromagnético, se colocó un filtro supresor de ruido en dicho toma corriente y a su vez, el motor de la licuadora fue conectado al filtro supresor de ruido.

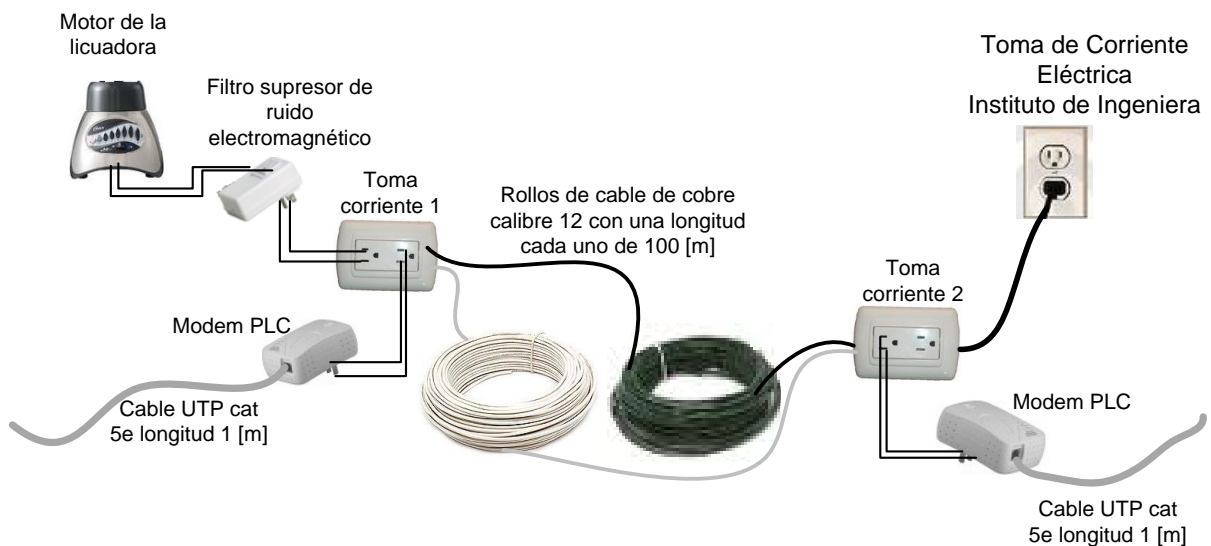


Figura 3.13 Conexión de los modem PLC, filtro supresor de ruido electromagnético y motor de la licuadora

En la tabla 3.5 se muestran las características principales del cable de cobre que se utilizó como medio físico.

| <b>Características</b>           | <b>Descripción</b> |
|----------------------------------|--------------------|
| Marca                            | Condumex           |
| Longitud de cable                | 100 metros         |
| Calibre                          | 12                 |
| RoHS                             | si                 |
| Número de alambres del conductor | 19                 |
| Diámetro del conductor           | 2.26 mm            |

Tabla 3.5 Características principales del cable de cobre utilizado.

En la figura 3.14 se muestran los elementos físicos que permitieron implementar la topología punto-multipunto de la red utilizando un par de cable de cobre como medio

físico. Asimismo, en esta figura se muestra el elemento generador de ruido electromagnético.



Figura 3.14. Topología física de la red PLC

En la figura 3.15 se observa la topología punto a punto de la red utilizando un par de cable de cobre, en esta figura el motor de la licuadora se encuentra a una distancia de 2 metros con respecto a las laptops.



Figura 3.15 Implementación física de la topología punto a punto de la red utilizando PLC

# CAPÍTULO 4

## ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 4.1 Introducción

Las arquitecturas que se describieron en el capítulo anterior fueron realizadas con el fin de obtener datos que ayuden a la comparación de las tres tecnologías estudiadas en este trabajo. Con el propósito de observar y contrastar su comportamiento, se crearon las dos topologías siguientes, mencionadas en el capítulo anterior:

- Topología punto-multipunto, consta de 8 clientes conectados al switchFast Ethernet y un servidor conectado al switch Gigabit Ethernet. Los switches se conectan entre sí por el medio a ser analizado.
- Topología punto a punto, la cual cuenta con 1 cliente conectado al switchFast Ethernet y un servidor conectado al switch Gigabit Ethernet. Los switches se conectan entre sí por el medio a ser analizado.

La topología punto-multipunto se utilizó para analizar el comportamiento de la red al introducir tráfico al medio físico de manera simultánea por los 8 clientes y así intentar lograr la saturación del canal de datos.

La topología punto a punto se hizo con el fin de observar el comportamiento de las tres tecnologías al sólo tener un cliente y un servidor.

Así mismo, para observar el comportamiento de ambas topologías durante la transmisión de información en presencia de interferencia electromagnética, se introdujo el ruido electromagnético generado por el motor de la licuadora.

## 4.2 Herramientas de medición

Las herramientas utilizadas en la obtención de los parámetros de desempeño que caracterizan a cada una de las tecnologías en estudio tales como RTT (*round-trip time*), ancho de banda, throughput, latencia y paquetes perdidos, se describen a continuación.

### Wireshark

Es un software de uso libre que permite capturar los paquetes que pasan por un interface indicando el tiempo en el que se captura, el nombre del protocolo utilizado y un resumen de la función que realiza dicho paquete. Asimismo, esta herramienta permite identificar los paquetes que se han perdido en una conexión. En la figura 4.1 se muestra un ejemplo de captura de paquetes utilizando el software Wireshark.

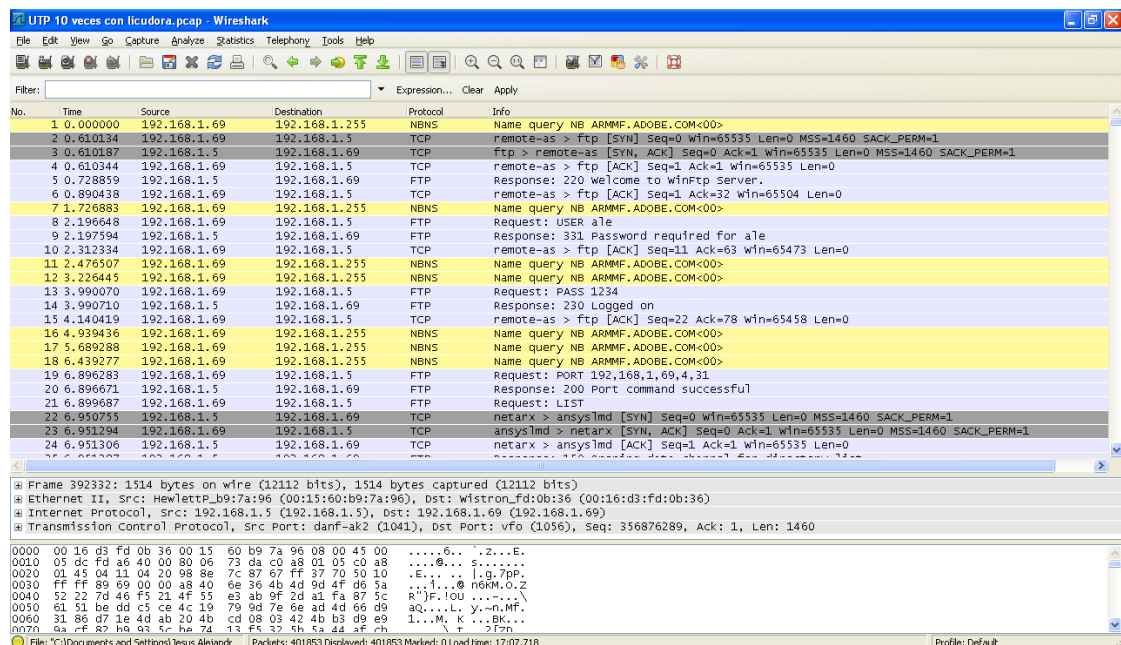


Figura 4.1 Captura de paquetes hecha con Wireshark.

## Iperf

Es una herramienta de uso libre que, utilizando un ambiente cliente-servidor, permite medir el ancho de banda y la calidad de un enlace de red, dicha calidad puede ser medida a través de la latencia o RTT (mediante el comando ping), el Jitter (variación en la latencia) y la pérdida de datagramas. Los últimos dos parámetros son medidos utilizando el protocolo UDP. En la figura 4.2 se muestra un ejemplo del ancho de banda y la cantidad de bytes recibidos por el cliente Iperf.

```
ca\ Símbolo del sistema
Microsoft Windows XP [Versión 5.1.2600]
(C) Copyright 1985-2001 Microsoft Corp.
C:\Documents and Settings\Jesus Alejandro>cd C:\Documents and Settings\Jesus Alejandro\Escritorio\
C:\Documents and Settings\Jesus Alejandro\Escritorio>iperf -c 192.168.1.2
k -m -t900
-----
Client connecting to 192.168.1.2, TCP port 5001
TCP window size: 8.00 KByte (default)
-----
[1412] local 192.168.1.10 port 4960 connected with 192.168.1.2 port 5001
[ ID] Interval          Transfer          Bandwidth
[1412] 0.0- 1.0 sec      10904 KBytes      89326 Kbits/sec
[1412] 1.0- 2.0 sec      10592 KBytes      86770 Kbits/sec
[1412] 2.0- 3.0 sec      10896 KBytes      89260 Kbits/sec
[1412] 3.0- 4.0 sec      10680 KBytes      87491 Kbits/sec
[1412] 4.0- 5.0 sec      10672 KBytes      87425 Kbits/sec
[1412] 5.0- 6.0 sec      10840 KBytes      88801 Kbits/sec
[1412] 6.0- 7.0 sec      10688 KBytes      87556 Kbits/sec
[1412] 7.0- 8.0 sec      10888 KBytes      89194 Kbits/sec
[1412] 8.0- 9.0 sec      10616 KBytes      86966 Kbits/sec
[1412] 9.0-10.0 sec     10800 KBytes      88474 Kbits/sec
[1412] 10.0-11.0 sec     10776 KBytes      88277 Kbits/sec
[1412] 11.0-12.0 sec     10712 KBytes      87753 Kbits/sec
[1412] 12.0-13.0 sec     10592 KBytes      86770 Kbits/sec
[1412] 13.0-14.0 sec     10632 KBytes      87097 Kbits/sec
[1412] 14.0-15.0 sec     10936 KBytes      89588 Kbits/sec
[1412] 15.0-16.0 sec     10752 KBytes      88080 Kbits/sec
[1412] 16.0-17.0 sec     10784 KBytes      88343 Kbits/sec
[1412] 17.0-18.0 sec     10768 KBytes      88211 Kbits/sec
[1412] 18.0-19.0 sec     10576 KBytes      86639 Kbits/sec
[1412] 19.0-20.0 sec     10880 KBytes      89129 Kbits/sec
[ ID] Interval          Transfer          Bandwidth
[1412] 20.0-21.0 sec     10736 KBytes      87949 Kbits/sec
```

Figura 4.2 Información reportada por el cliente utilizando Iperf.

## WinFtp Server

Es un software para ambientes Windows, el cual instalado en una computadora, la convierte en un servidor FTP simple, eficaz y confiable. Esta herramienta tiene la capacidad de cifrar o encriptar la información que viaja a través del cliente y del servidor utilizando el protocolo SSL. La figura 4.3 muestra la interfaz gráfica del software WinFtp y la configuración inicial de este servidor.

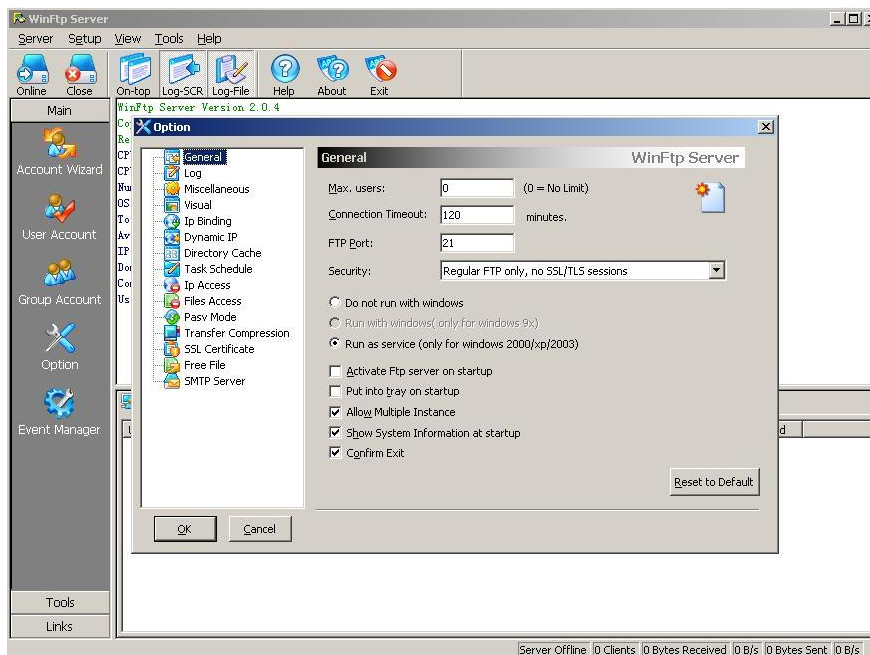


Figura 4.3 Configuración del servidor FTP utilizando el software WinFtp

### 4.3 Parámetros de desempeño de cada red

Para evaluar el desempeño de cada una de las tecnologías, se utilizaron los siguientes parámetros:

**Ancho de banda:** Es la cantidad de datos por unidad de tiempo que pueden ser transmitidos por un enlace, este valor se encuentra especificado en el estándar correspondiente a cada tecnología.

**Latencia:** Tiempo que tarda un paquete en llegar al destino.

**RTT- Round Trip Time (retardo de ida y vuelta):** Tiempo que se tarda un paquete en alcanzar su destino y regresar al origen de donde partió.

**Paquetes perdidos:** Datos perdidos en el canal.

**Throughput:** Es la cantidad de datos que se transfieren con éxito en un periodo de tiempo, y por tanto representa un parámetro de desempeño importante. En el siguiente apartado se explicará la diferencia entre el throughput de capa de Aplicación y el throughput de capa Física.

### 4.4 Throughput

El throughput no es el mismo en todas las capas de un sistema de telecomunicaciones, ello es debido a que cada capa añade su propio encabezado al paquete que proviene de capa superior y utiliza protocolos cada vez más complejos en el manejo del paquete.

El total de encabezados que utiliza el protocolo TCP/IP es de 61 bytes. La figura 4.4 muestra el tamaño del encabezado que añade cada una de las capas al paquete que

proviene de capa superior, esto afecta directamente la medición del throughput y por tal razón, el throughput de capa de Aplicación no es el mismo throughput de capas inferiores.

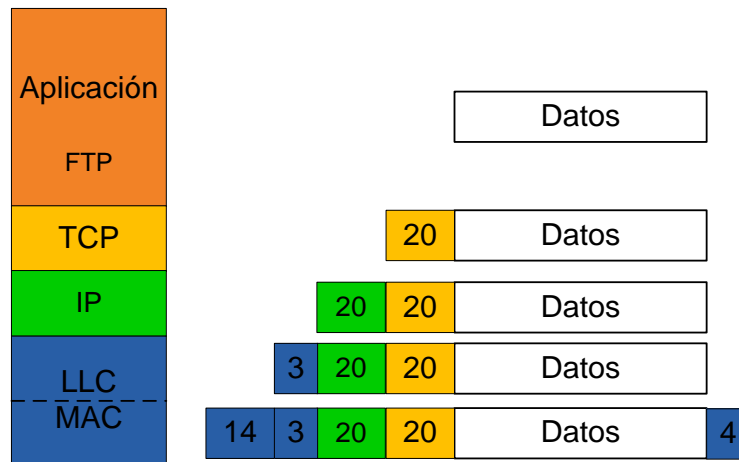


Figura 4.4 Encabezados TCP/IP

Debido a que FTP es un protocolo de capa de Aplicación, nuestros resultados reflejarán el throughput en esta capa, sin embargo, cabe mencionar que el throughput medido en esta capa no es el mismo que el de capa Física por las razones anteriormente mencionadas. La figura 4.5 muestra las capas del modelo OSI y su equivalencia con la pila de protocolos TCP/IP.

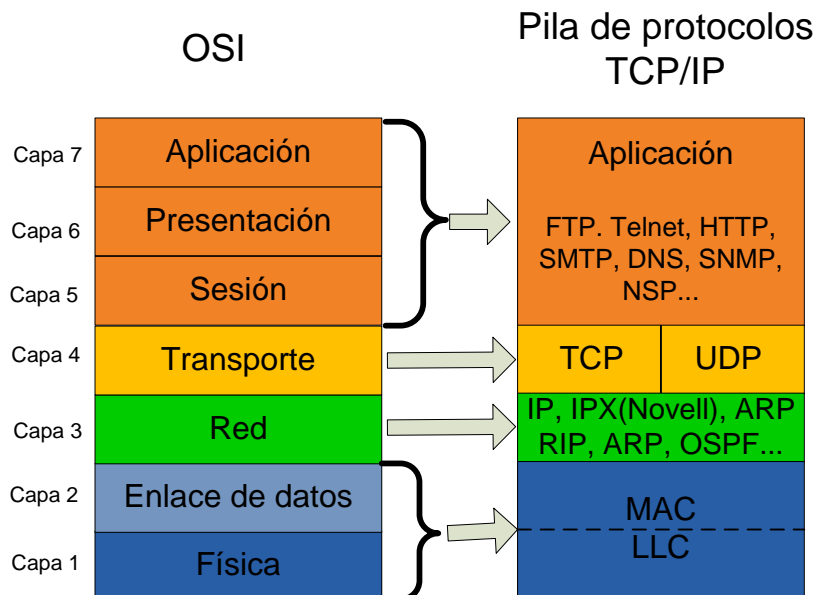


Figura 4.5 Capas del modelo OSI y su equivalencia con el protocolo TCP/IP

El **throughput máximo en capa Física** es el volumen máximo de información que puede atravesar el enlace independientemente del tipo de tráfico y es la medición más simple del throughput. Ésta cantidad de tráfico depende del medio físico que se esté utilizando y se encuentra especificada en un estándar. Por ejemplo, para la tecnología UTP y Fibra óptica el estándar que se utilizó fue Fast Ethernet, el cual especifica una

tasa de transferencia de 100 Mbps y por lo tanto, el throughput máximo en capa Física es 100 Mbps.

Por otro lado para la tecnología PLC el estándar utilizado fue Home Plug, el cual especifica un flujo de datos de 45 Mbps; 27 Mbps en bajada o downlink y 18 Mbps en subida o uplink, por lo que tomaremos como throughput máximo de capa Física 27Mbps.

Para calcular el throughput real que se genera en capa de Aplicación es necesario saber el tamaño del archivo que será enviado y el tiempo que toma en completarse la transferencia, tal como lo expresa la siguiente ecuación:

$$FTP\_Throughput = \frac{\text{Tamaño del archivo [MByte]} \times \frac{8 [bits]}{1[Byte]}}{\text{Tiempo [s]}}$$

De esta manera se calcula el throughput en capa de Aplicación para las tres tecnologías, tomando el tiempo promedio de transmisión que se obtuvo en la topología punto a punto y que el tamaño del archivo a transmitirse es de 418223085 bytes.

### **Fibra Óptica**

$$FTP\_Throughput_{\text{Aplicación}} = \frac{418223085 [MByte]}{131.231 [s]} \times \frac{8 [bits]}{1[Byte]}$$

$$FTP\_Throughput_{\text{Aplicación}} = 25.495 \text{ Mbps}$$

### **UTP**

$$FTP\_Throughput_{\text{Aplicación}} = \frac{418223085 [MByte]}{135.742 [s]} \times \frac{8 [bits]}{1[Byte]}$$

$$FTP\_Throughput_{\text{Aplicación}} = 24.648 \text{ Mbps}$$

### **PLC**

$$FTP\_Throughput_{\text{Aplicación}} = \frac{418223085 [MByte]}{624.384[s]} \times \frac{8 [bits]}{1[Byte]}$$

$$FTP\_Throughput_{\text{Aplicación}} = 5.358 \text{ Mbps}$$



## 4.5 Análisis de paquetes durante el proceso de transmisión

Debido a que se observó un comportamiento similar en las tres tecnologías, este apartado se encarga de describir el procedimiento de la transmisión de un paquete y los pasos involucrados en el proceso de transmisión, es decir, desde el inicio y hasta el cierre de la conexión.

La figura 4.6 muestra la trayectoria que recorre un paquete que se genera en la capa de Aplicación del servidor hasta que llega a la capa de Aplicación del cliente. Durante este recorrido, cada capa de cada uno de los dispositivos por los que atraviesa el paquete coloca o quita el encabezado para poder interpretarlo. Este mecanismo es el mismo en cada una de las tecnologías en estudio y al cambiar el medio de transmisión, sólo varía el throughput y el tiempo empleado en la transmisión de la información.

Asimismo, la figura 4.6 representa las capas del protocolo TCP/IP que se albergan en cada uno de los dispositivos que conforman la red. Nótese que para que un paquete viaje desde el servidor al cliente o viceversa en el tipo de topología que se analiza en este trabajo, la información tiene que atravesar por 19 capas distintas, tal y como se enumeran en la figura.

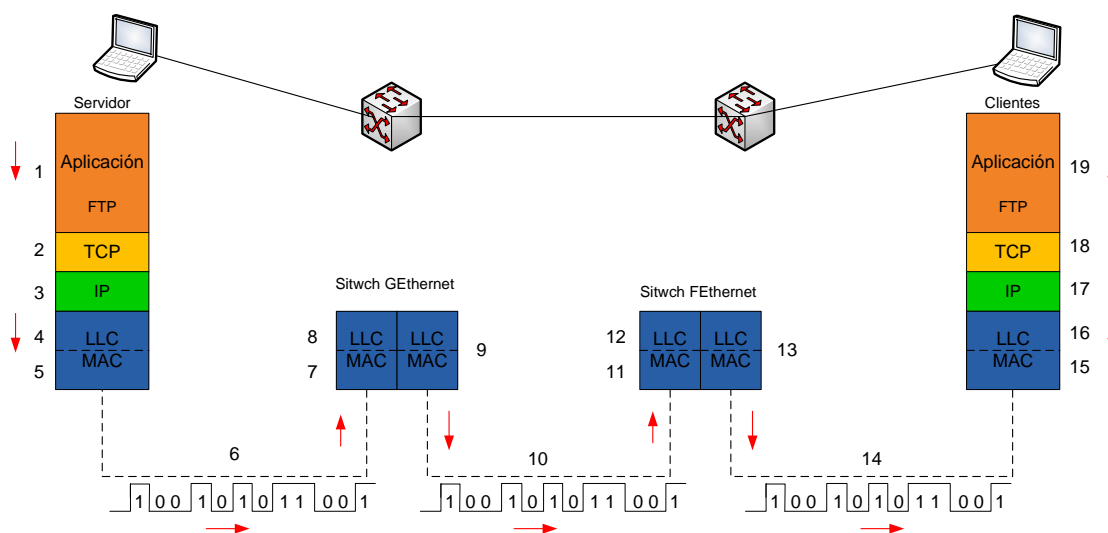


Figura 4.6 Capas del modelo TCP/IP que se albergan en cada uno de los dispositivos de la red

Una vez analizadas las capturas de tráfico de cada una de las tecnologías en estudio, se observa que éstas siguen el patrón que se muestra en la figura 4.7. Esta figura exhibe que el proceso de transmisión de paquetes se lleva a cabo en 4 partes o intervalos, en el primero se observa el saludo de tres vías del protocolo TCP (ThreeWayHandshake), el segundo es utilizado para la autenticación del cliente ante el servidor FTP, el tercer intervalo de paquetes es para el envío de datos y por último, el cuarto intervalo es utilizado para el cierre de la conexión.

# IMPLEMENTACIÓN, ANÁLISIS Y COMPARACIÓN EXPERIMENTAL DEL DESEMPEÑO DE REDES DE FIBRA ÓPTICA, PAR TRENZADO Y PLC.

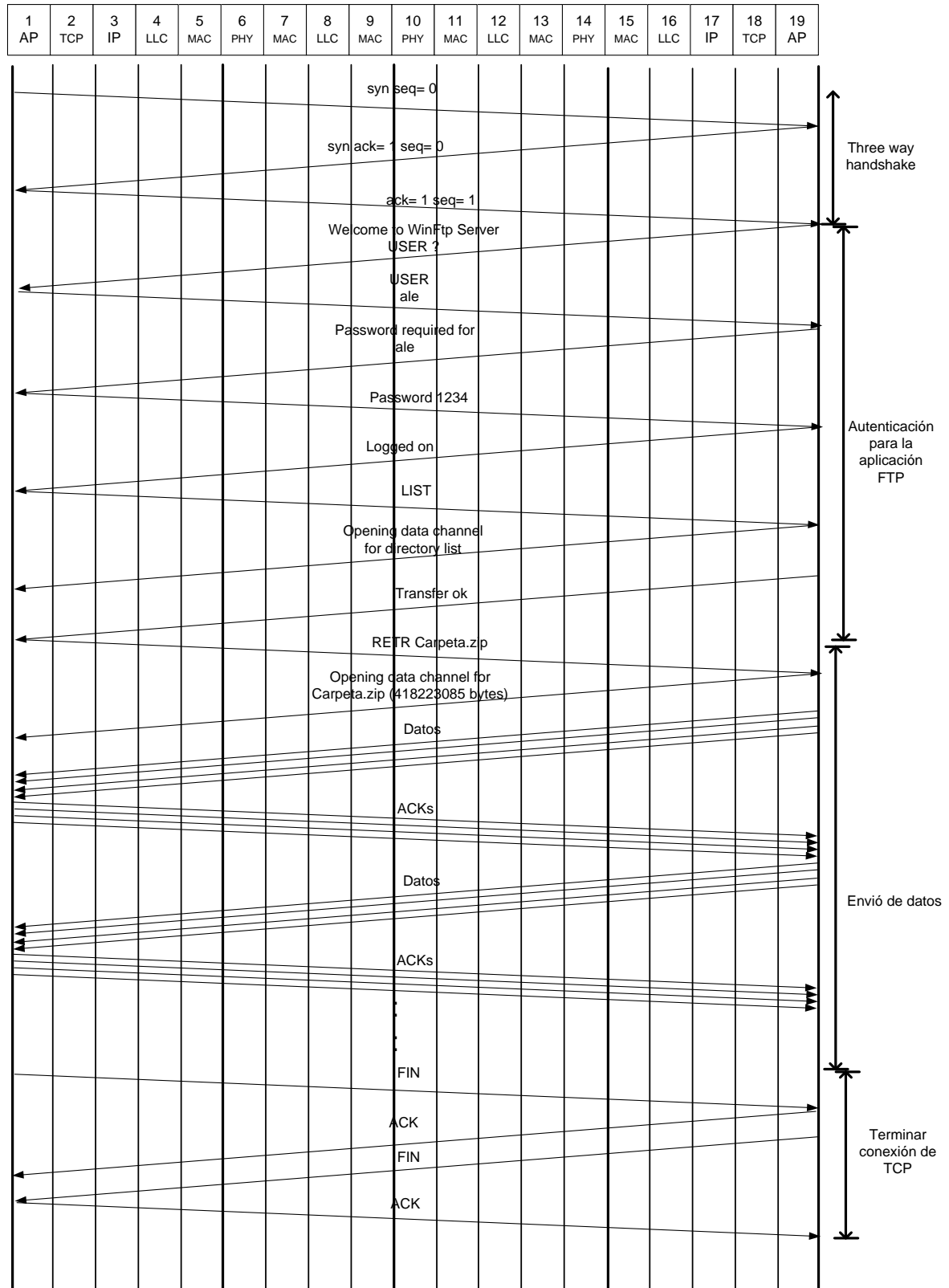


Figura 4.7 Análisis de paquetes

En los siguientes apartados se describirán y analizarán los resultados de las tres tecnologías de forma individual.

## 4.6 Resultados para las tecnologías estudiadas

### 4.6.1 UTP

Como se mencionó en el apartado anterior, para la tecnología UTP tomamos el ancho de banda especificado en el estándar IEEE 802.3u(FastEthernet), el cual define un throughput máximo de 100 Mbps.

En la figura 4.8 se muestra la velocidad de transmisión en capa física obtenida con el software Iperf, la cual resulta ser de 87.949 Mbps y es muy cercana a la especificada en el estándar.

```
ca Símbolo del sistema
Microsoft Windows XP [Versión 5.1.2600]
(C) Copyright 1985-2001 Microsoft Corp.

C:\Documents and Settings\Jesus Alejandro>cd C:\Documents and Settings\Jesus Alejandro\Escritorio\
C:\Documents and Settings\Jesus Alejandro\Escritorio>iperf -c 192.168.1.2
k -m -t900

-----
Client connecting to 192.168.1.2, TCP port 5001
TCP window size: 8.00 KByte (default)
-----
[1412] local 192.168.1.10 port 4960 connected with 192.168.1.2 port 5001
[ ID] Interval      Transfer      Bandwidth
[1412] 0.0- 1.0 sec    10904 KBytes  89326 Kbits/sec
[1412] 1.0- 2.0 sec    10592 KBytes  86770 Kbits/sec
[1412] 2.0- 3.0 sec    10896 KBytes  89260 Kbits/sec
[1412] 3.0- 4.0 sec    10680 KBytes  87491 Kbits/sec
[1412] 4.0- 5.0 sec    10672 KBytes  87425 Kbits/sec
[1412] 5.0- 6.0 sec    10840 KBytes  88801 Kbits/sec
[1412] 6.0- 7.0 sec    10688 KBytes  87556 Kbits/sec
[1412] 7.0- 8.0 sec    10888 KBytes  89194 Kbits/sec
[1412] 8.0- 9.0 sec    10616 KBytes  86966 Kbits/sec
[1412] 9.0-10.0 sec   10800 KBytes  88474 Kbits/sec
[1412] 10.0-11.0 sec   10776 KBytes  88277 Kbits/sec
[1412] 11.0-12.0 sec   10712 KBytes  87753 Kbits/sec
[1412] 12.0-13.0 sec   10592 KBytes  86770 Kbits/sec
[1412] 13.0-14.0 sec   10632 KBytes  87097 Kbits/sec
[1412] 14.0-15.0 sec   10936 KBytes  89588 Kbits/sec
[1412] 15.0-16.0 sec   10752 KBytes  88080 Kbits/sec
[1412] 16.0-17.0 sec   10784 KBytes  88343 Kbits/sec
[1412] 17.0-18.0 sec   10768 KBytes  88211 Kbits/sec
[1412] 18.0-19.0 sec   10576 KBytes  86639 Kbits/sec
[1412] 19.0-20.0 sec   10880 KBytes  89129 Kbits/sec
[ ID] Interval      Transfer      Bandwidth
[1412] 20.0-21.0 sec   10736 KBytes  87949 Kbits/sec
```

Figura 4.8 Throughput en capa física para la tecnología UTP

La figura 4.9 presenta los valores obtenidos para la latencia y el RTT usando la tecnología UTP, estos valores resultan ser menor a un 0[ms], con ayuda del software Wireshark, se capturaron los paquetes de datos de un ping enviado del cliente al servidor obteniendo los parámetros de latencia y RTT, estos valores son 2.31 [μs] y 4.62[μs] respectivamente.

```

c:\ Símbolo del sistema
Paquetes: enviados = 4, recibidos = 4, perdidos = 0
(0% perdidos),
Tiempos aproximados de ida y vuelta en milisegundos:
Mínimo = 0ms, Máximo = 0ms, Media = 0ms

C:\Documents and Settings\Ale Uasquez>tracert 192.168.1.10
Traza a 192.168.1.10 sobre caminos de 30 saltos como máximo.
 1 <1 ms <1 ms <1 ms 192.168.1.10
Traza completa.
C:\Documents and Settings\Ale Uasquez>tracert 192.168.1.10
Traza a 192.168.1.10 sobre caminos de 30 saltos como máximo.
 1 2573 ms <1 ms <1 ms 192.168.1.10
Traza completa.
C:\Documents and Settings\Ale Uasquez>ping 192.168.1.10
Haciendo ping a 192.168.1.10 con 32 bytes de datos:
Respuesta desde 192.168.1.10: bytes=32 tiempo<1m TTL=128
Respuesta desde 192.168.1.10: bytes=32 tiempo<1m TTL=128
Respuesta desde 192.168.1.10: bytes=32 tiempo<1m TTL=128
Respuesta desde 192.168.1.10: bytes=32 tiempo<1m TTL=128
Estadísticas de ping para 192.168.1.10:
Paquetes: enviados = 4, recibidos = 4, perdidos = 0
(0% perdidos),
Tiempos aproximados de ida y vuelta en milisegundos:
Mínimo = 0ms, Máximo = 0ms, Media = 0ms
    
```

Figura 4.9 Parámetros de latencia y RTT para la tecnología UTP

### 4.6.1.1 Resultados obtenidos para la Topología punto-multipunto

Como se mencionó en el capítulo anterior, la topología punto-multipunto está compuesta de 8 clientes y 1 servidor. La tabla 4.1 contiene los valores del tiempo total de la transmisión del archivo y el throughput en capa de Aplicación registrado por cada uno de los clientes usando la tecnología UTP. Esta misma tabla contiene ambos valores para cada cliente en los dos escenarios en estudio, es decir, con y sin interferencia electromagnética.

| No. Cliente     | PRUEBA SIN RUIDO ELECTROMAGNÉTICO |                   | PRUEBA CON RUIDO ELECTROMAGNÉTICO |                   |
|-----------------|-----------------------------------|-------------------|-----------------------------------|-------------------|
|                 | Tiempo [s]                        | Throughput [Mbps] | Tiempo [s]                        | Throughput [Mbps] |
| 1               | 914.58                            | 3.65832           | 845.20                            | 3.95856           |
| 2               | 690.72                            | 4.84392           | 625.30                            | 5.35072           |
| 3               | 439.16                            | 7.61864           | 454.33                            | 7.36416           |
| 4               | 482.28                            | 6.93744           | 507.56                            | 6.59192           |
| 5               | 434.36                            | 7.70280           | 447.44                            | 7.47768           |
| 6               | 333.45                            | 10.03376          | 323.55                            | 10.34096          |
| 7               | 754.53                            | 4.43424           | 766.88                            | 4.36288           |
| 8               | 287.22                            | 11.64888          | 306.30                            | 10.92336          |
| <b>Promedio</b> | <b>542.03</b>                     | <b>7.10975</b>    | <b>534.57</b>                     | <b>7.04628</b>    |

Tabla 4.1 Valores del Throughput y tiempo para tecnología UTP en topología punto-multipunto

La figura 4.10 muestra una gráfica de los valores de la tabla 4.1, donde se puede observar que de acuerdo al comportamiento del throughput de capa de Aplicación registrado por cada uno de los clientes, éste no se ve prácticamente afectado por el ruido electromagnético del motor de la licuadora ya que tiene el mismo comportamiento con y sin esta interferencia electromagnética. En resumen, la tecnología UTP no se afecta por la presencia del ruido electromagnético causado por el motor de la licuadora.

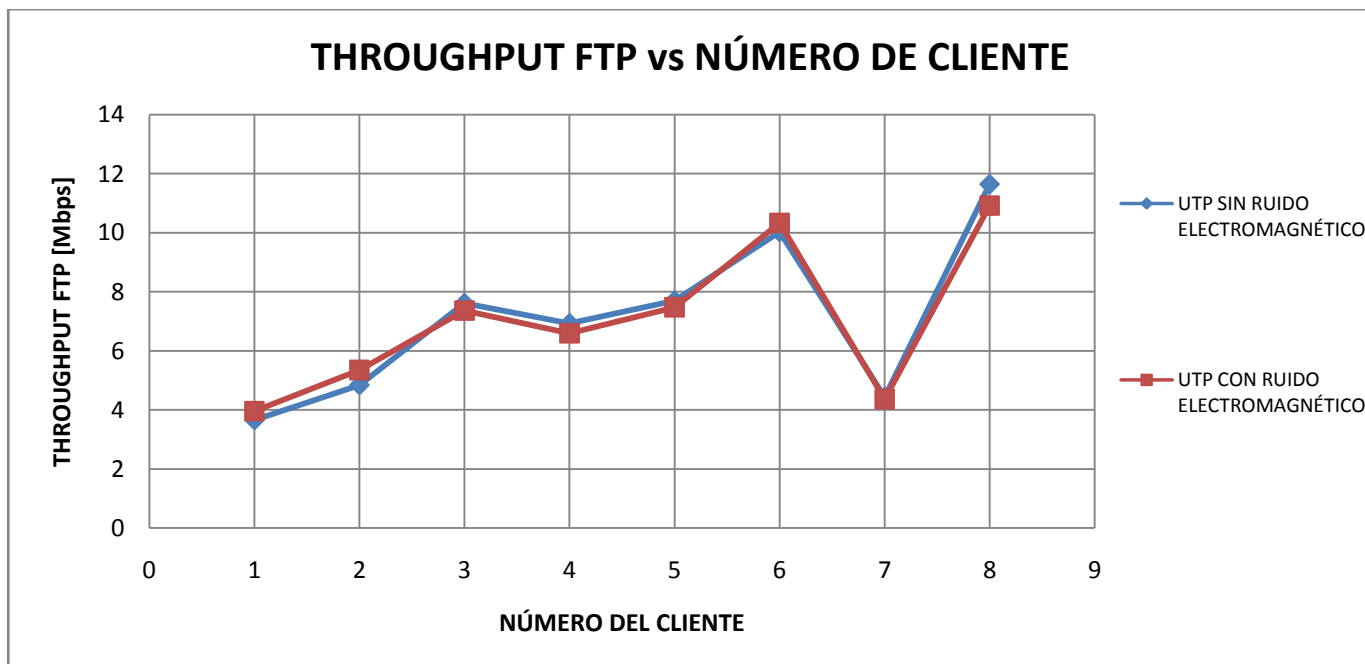


Figura 4.10 Gráfica del throughput registrado por cada cliente para tecnología UTP

En la figura anterior se observa que el throughput no es el mismo para todos los clientes y esto se debe a que cada uno de ellos tiene sus propias características en cuanto a nivel de procesamiento.

#### 4.6.1.2 Resultados obtenidos para la Topología punto a punto

La tabla 4.2 contiene el registro de los valores de las diez pruebas hechas en la topología punto a punto. Esta prueba consistió en descargar el archivo con un mismo cliente en diez ocasiones distintas para los dos escenarios en estudio, es decir, con y sin interferencia electromagnética. La descarga del archivo en esta prueba se realizó con el cliente número 8.

| No. Experimento | PRUEBA SIN RUIDO ELECTROMAGNÉTICO |                   | PRUEBA CON RUIDO ELECTROMAGNÉTICO |                   |
|-----------------|-----------------------------------|-------------------|-----------------------------------|-------------------|
|                 | Tiempo [s]                        | Throughput [Mbps] | Tiempo [s]                        | Throughput [Mbps] |
| 1               | 136.63                            | 24.48888          | 137.47                            | 24.41864          |
| 2               | 138.34                            | 24.18472          | 137.03                            | 24.41608          |
| 3               | 133.84                            | 24.99768          | 136.86                            | 24.60696          |
| 4               | 134.70                            | 24.83824          | 137.45                            | 24.42128          |
| 5               | 137.11                            | 24.39512          | 137.33                            | 24.44344          |
| 6               | 138.75                            | 24.10920          | 138.56                            | 24.12112          |
| 7               | 138.92                            | 24.08392          | 135.24                            | 24.74056          |
| 8               | 136.49                            | 24.51392          | 137.88                            | 24.42680          |
| 9               | 136.11                            | 24.58144          | 137.19                            | 24.46832          |
| 10              | 126.53                            | 29.00648          | 130.23                            | 27.33056          |
| <b>Promedio</b> | <b>135.74</b>                     | <b>24.91996</b>   | <b>136.52</b>                     | <b>24.73937</b>   |

Tabla 4.2 Valores del Throughput y tiempo para tecnología UTP en topología punto a punto.

Si se comparan los campos de tiempo de transmisión y throughput para los ambientes de las tablas 4.1 (cliente 8) y 4.2, se puede notar que el tiempo de transmisión incrementa prácticamente al doble para la topología punto-multipunto con respecto al tiempo empleado para la topología punto a punto. Consecuentemente, se observa que el throughput disminuye a la mitad para la topología punto-multipunto con respecto a la topología punto a punto.

Lo anterior se debe a que cuando se utiliza la topología punto a punto se dispone del ancho de banda del canal en su totalidad y cuando se usa la topología punto-multipunto este ancho de banda se debe compartir con los demás clientes, lo que se refleja en un menor throughput y un mayor tiempo empleado en la transmisión de información.

La gráfica que se muestra en la figura 4.11, representa el comportamiento del throughput en capa de Aplicación para el cliente número 8. Esta gráfica se ha elaborado a partir de los valores de la tabla 4.2 y muestra el valor del throughput para cada una de las veces que se realizó la prueba de transmitir el archivo utilizando la topología punto a punto. Como era de esperarse, la figura 4.11 muestra muy poca variación entre los valores medidos en diferentes ocasiones.

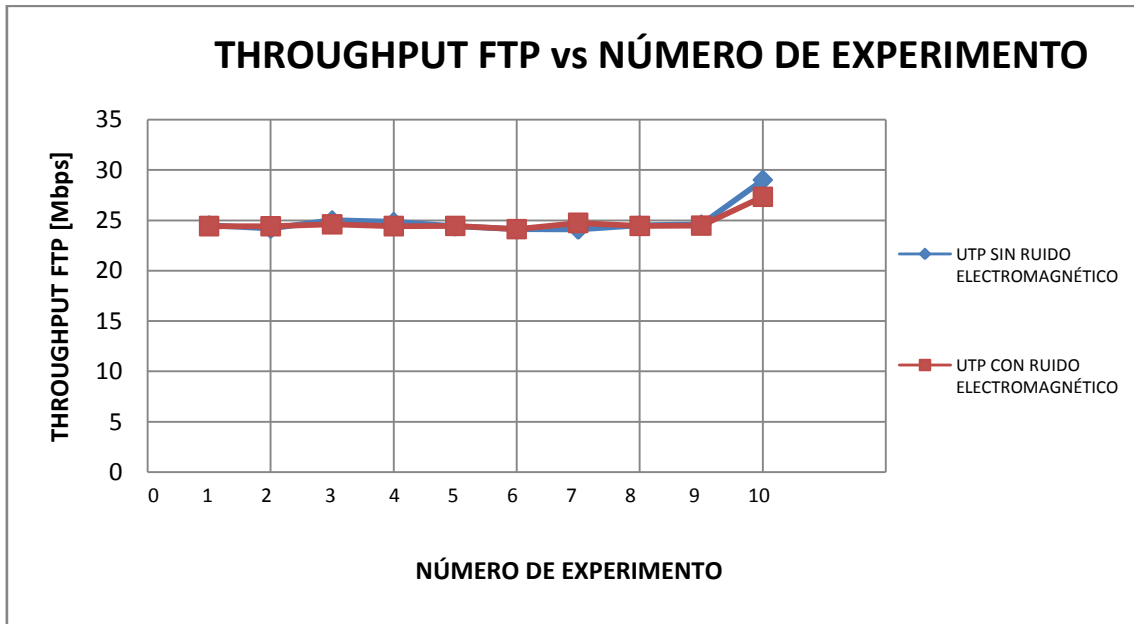


Figura 4.11 Gráfica del comportamiento del throughput contra número de medición, para la tecnología UTP

#### 4.6.1.2.1 Análisis de paquetes para la topología punto a punto UTP con ruido electromagnético

La figura 4.12 muestra los paquetes capturados con el software Wireshark en el escenario que contempla ruido electromagnético causado por el motor de la licuadora, el cual se accionó en el segundo 60 y se desactivó en el segundo 120. Esta gráfica exhibe que en los intervalos de tiempo en los cuales se accionó la licuadora, no existe afectación alguna en la transmisión de paquetes puesto que no se observa pérdida de ellos. Lo anterior confirma que la tecnología UTP no se ve afectada por la presencia del ruido electromagnético ocasionado por la licuadora. En la gráfica también se puede observar que en los primeros segundos se lleva a cabo la convergencia de la red. Este tiempo es utilizado para que el switch aprenda las direcciones MAC de cada uno de los clientes que tiene conectados en cada uno de sus puertos y se sincroniza con el switch vecino.

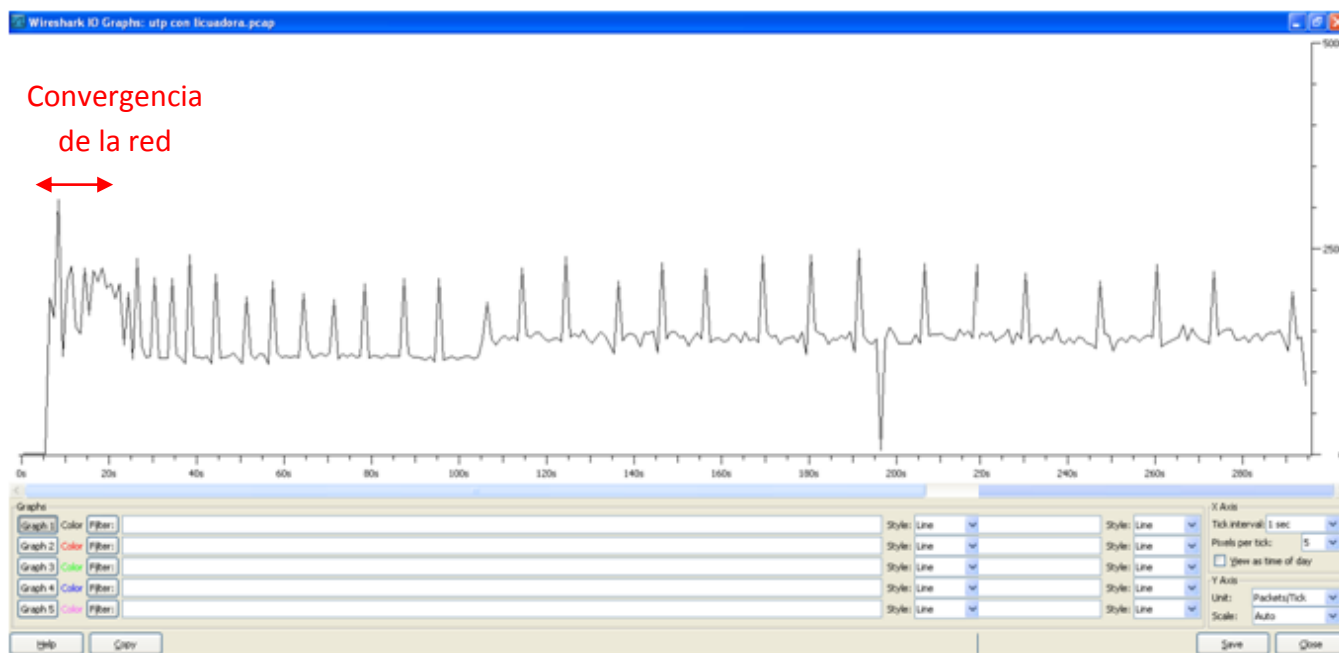


Figura 4.12 Gráfica del flujo de paquetes para la prueba UTP con ruido electromagnético

Haciendo un análisis extendido sobre todos y cada uno de los paquetes capturados, se encontró que en toda la transferencia del archivo se utilizaron en promedio 438958 paquetes y que sólo se perdieron 374 paquetes. Esto significa que sólo se perdieron el 0.0852 % de paquetes durante la transferencia total del archivo.

Es importante destacar que los paquetes perdidos no corresponden a ninguno de los intervalos de tiempo en los cuales se accionó el motor de la licuadora, por lo que su pérdida no es debida a interferencia electromagnética. Por el contrario, se piensa que esta pérdida de paquetes se atribuye a la imposibilidad de recibirlos por parte del cliente (computadora) debido a una congestión o falta de procesamiento en ese momento.

#### 4.6.1.2.2 Análisis de paquetes para la topología punto a punto UTP sin ruido electromagnético

Ahora bien, en la figura 4.13 se observa la gráfica de flujo de paquetes para la tecnología UTP sin ruido electromagnético. En los primeros segundos de la grafica se tiene la convergencia de la red, tal como ocurre en el caso ya presentado. Durante este tiempo el Switch aprende las direcciones MAC de cada uno de los clientes que tiene conectados en cada uno de sus puertos y se sincroniza con el Switch vecino.



Convergencia  
de la red

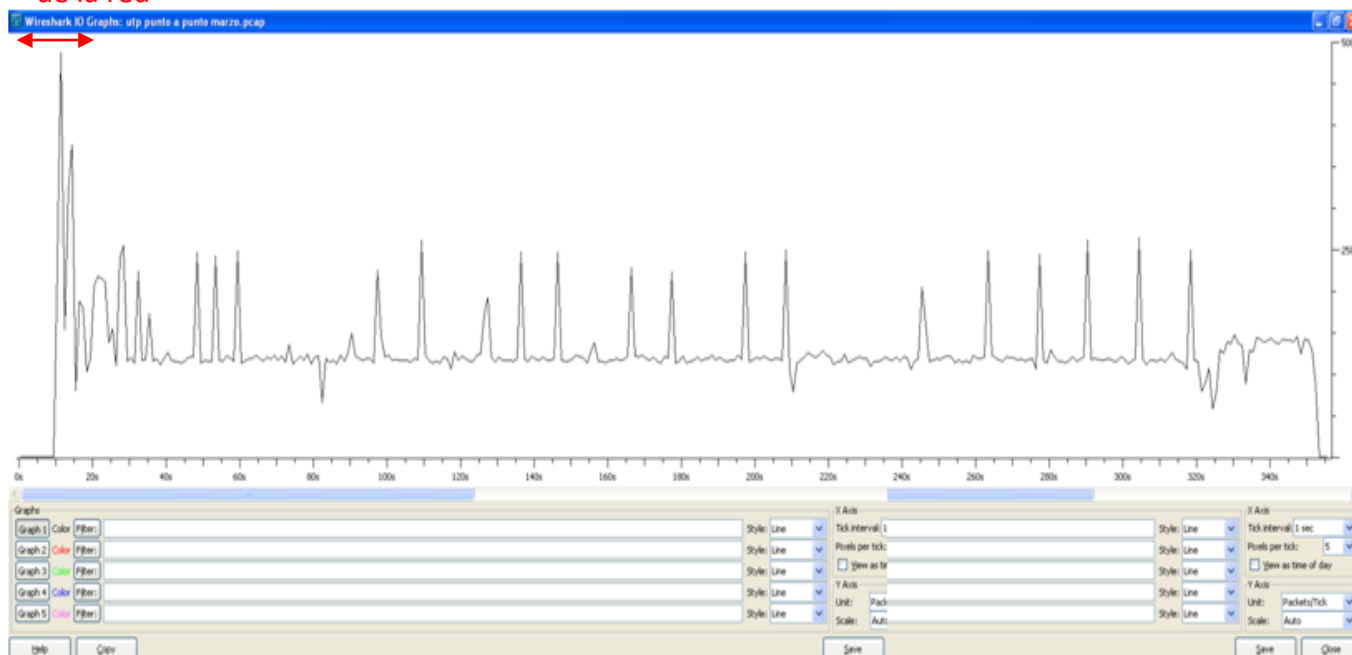


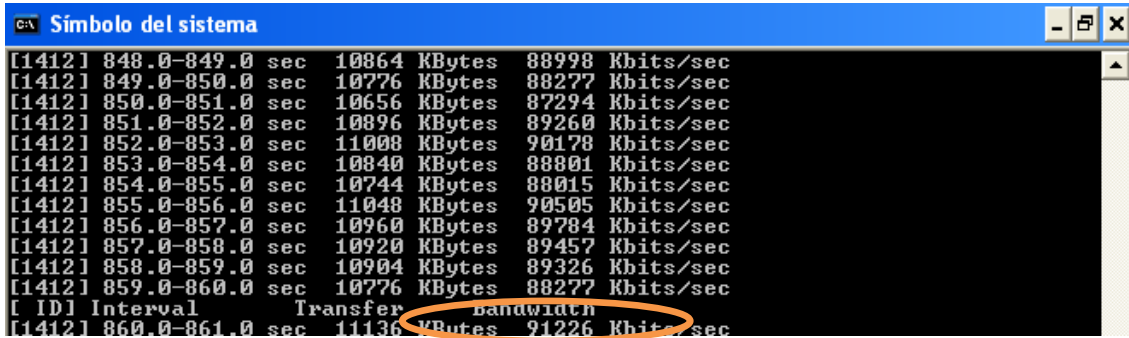
Figura 4.13 Gráfica del flujo de paquetes para la prueba UTP sin ruido electromagnético

La gráfica de la figura 4.13 muestra un comportamiento similar a la gráfica mostrada en la figura 4.12, en la que se contempla ruido electromagnético. Igualmente, haciendo un análisis extendido de paquetes sobre la prueba UTP sin ruido electromagnético, se encontró que sólo se perdieron 214 paquetes de un total de 438958 paquetes transmitidos en promedio, representado un 0.0487% de paquetes perdidos. Este análisis confirma que la presencia del ruido electromagnético no representa un problema con respecto al uso de la tecnología de trasmisión cuyo medio es UTP.

## 4.6.2 FIBRA ÓPTICA

El máximo throughput que se puede obtener en capa Física para la tecnología Fibra Óptica es de 100 Mbps, ya que éste es el ancho de banda especificado en el estándar IEEE 802.3u(FastEthernet).

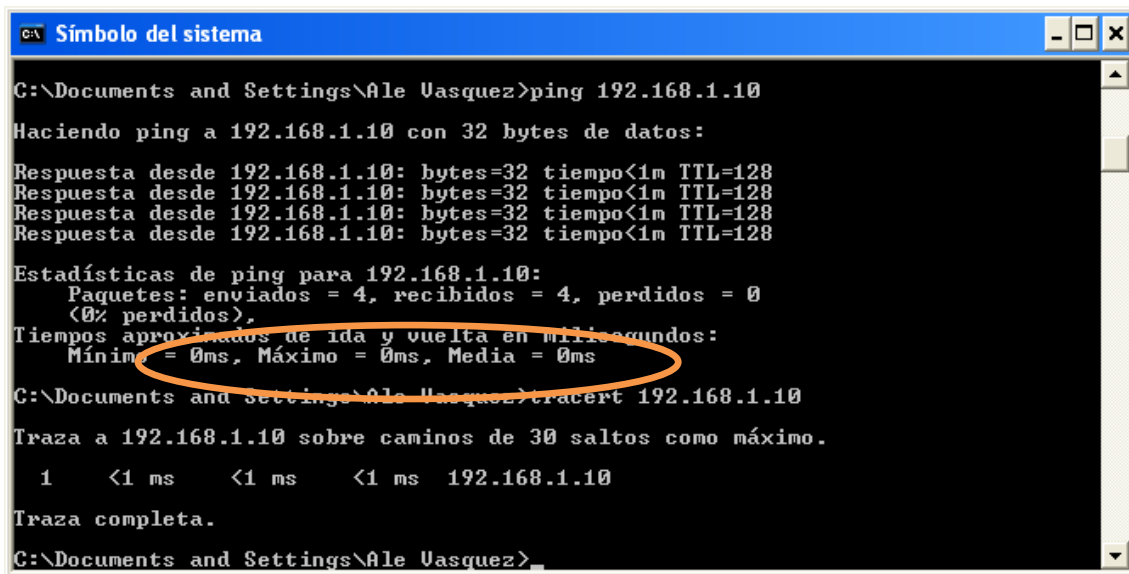
Para saber cuál era el throughput en capa Física que realmente se obtuvo, se utilizó el software Iperf. La figura 4.14 muestra el throughput en esta capa; esta medición indica que el throughput en capa Física es de 91.226 Mbps y resulta ser muy cercano a los 100 Mbps especificados en el estándar.



| Interval               | Transfer     | bandwidth       |
|------------------------|--------------|-----------------|
| [1412] 848.0-849.0 sec | 10864 KBytes | 88998 Kbits/sec |
| [1412] 849.0-850.0 sec | 10776 KBytes | 88277 Kbits/sec |
| [1412] 850.0-851.0 sec | 10656 KBytes | 87294 Kbits/sec |
| [1412] 851.0-852.0 sec | 10896 KBytes | 89260 Kbits/sec |
| [1412] 852.0-853.0 sec | 11008 KBytes | 90178 Kbits/sec |
| [1412] 853.0-854.0 sec | 10840 KBytes | 88801 Kbits/sec |
| [1412] 854.0-855.0 sec | 10744 KBytes | 88015 Kbits/sec |
| [1412] 855.0-856.0 sec | 11048 KBytes | 90505 Kbits/sec |
| [1412] 856.0-857.0 sec | 10960 KBytes | 89784 Kbits/sec |
| [1412] 857.0-858.0 sec | 10920 KBytes | 89457 Kbits/sec |
| [1412] 858.0-859.0 sec | 10904 KBytes | 89326 Kbits/sec |
| [1412] 859.0-860.0 sec | 10776 KBytes | 88277 Kbits/sec |
| [1412] 860.0-861.0 sec | 11136 KBytes | 91226 Kbits/sec |

Figura 4.14 Throughput en capa física para la tecnología Fibra Óptica

Para obtener los parámetros de latencia y RTT en la tecnología de Fibra Óptica, se utilizó el comando *ping* entre un cliente y el servidor. La figura 4.15 muestra que el valor de dichos parámetros son menores a 0[ms] pero con la ayuda del software Wireshark, se capturaron los paquetes de datos de un ping enviado del cliente al servidor obteniendo los parámetros de latencia y RTT, estos valores son 1.32 [μs] y 2.64[μs] respectivamente.



```
C:\Documents and Settings\Ale Uasquez>ping 192.168.1.10
Haciendo ping a 192.168.1.10 con 32 bytes de datos:
Respuesta desde 192.168.1.10: bytes=32 tiempo<1m TTL=128
Respuesta desde 192.168.1.10: bytes=32 tiempo<1m TTL=128
Respuesta desde 192.168.1.10: bytes=32 tiempo<1m TTL=128
Respuesta desde 192.168.1.10: bytes=32 tiempo<1m TTL=128

Estadísticas de ping para 192.168.1.10:
    Paquetes: enviados = 4, recibidos = 4, perdidos = 0
    (0% perdidos),
    Tiempos aproximados de ida y vuelta en milisegundos:
        Mínimo = 0ms, Máximo = 0ms, Media = 0ms

C:\Documents and Settings\Ale Uasquez>tracert 192.168.1.10
Traza a 192.168.1.10 sobre caminos de 30 saltos como máximo.
 1  <1 ms  <1 ms  <1 ms  192.168.1.10
Traza completa.
C:\Documents and Settings\Ale Uasquez>
```

Figura 4.15 Parámetros de latencia y RTT para la tecnología Fibra Óptica

### 4.6.2.1 Resultados obtenidos para la Topología punto-multipunto

La tabla 4.3 muestra el tiempo empleado en la transmisión total del archivo y el throughput en capa de Aplicación que registra cada uno de los 8 clientes que forman parte de la topología punto-multipunto usando la tecnología Fibra Óptica. Esta misma tabla contiene los valores para cada cliente en los dos escenarios en estudio, es decir, con y sin interferencia electromagnética.

| No. Cliente     | PRUEBA SIN RUIDO ELECTROMAGNÉTICO |                   | PRUEBA CON RUIDO ELECTROMAGNÉTICO |                   |
|-----------------|-----------------------------------|-------------------|-----------------------------------|-------------------|
|                 | Tiempo [s]                        | Throughput [Mbps] | Tiempo [s]                        | Throughput [Mbps] |
| 1               | 670.89                            | 4.98704           | 643.97                            | 5.19560           |
| 2               | 584.51                            | 5.72400           | 597.39                            | 5.60064           |
| 3               | 465.89                            | 7.18144           | 476.55                            | 7.02088           |
| 4               | 492.27                            | 6.79664           | 510.99                            | 6.54768           |
| 5               | 459.33                            | 7.28408           | 460.19                            | 7.27048           |
| 6               | 353.63                            | 9.46136           | 366.26                            | 9.13488           |
| 7               | 750.07                            | 4.46064           | 792.38                            | 4.22240           |
| 8               | 264.23                            | 12.66224          | 297.03                            | 11.26408          |
| <b>Promedio</b> | <b>505.10</b>                     | <b>7.319680</b>   | <b>518.09</b>                     | <b>7.03208</b>    |

Tabla 4.3 Valores del throughput y tiempo para la tecnología de Fibra Óptica

Con los valores de la tabla anterior se elaboró la gráfica de la figura 4.16, la cual muestra que el comportamiento del throughput en capa de Aplicación no es afectado por el ruido electromagnético del motor de la licuadora, ya que tiene prácticamente el mismo comportamiento con y sin presencia de esta interferencia electromagnética. En consecuencia, podemos decir que la tecnología de Fibra Óptica no se ve afectada por la presencia del ruido electromagnético.

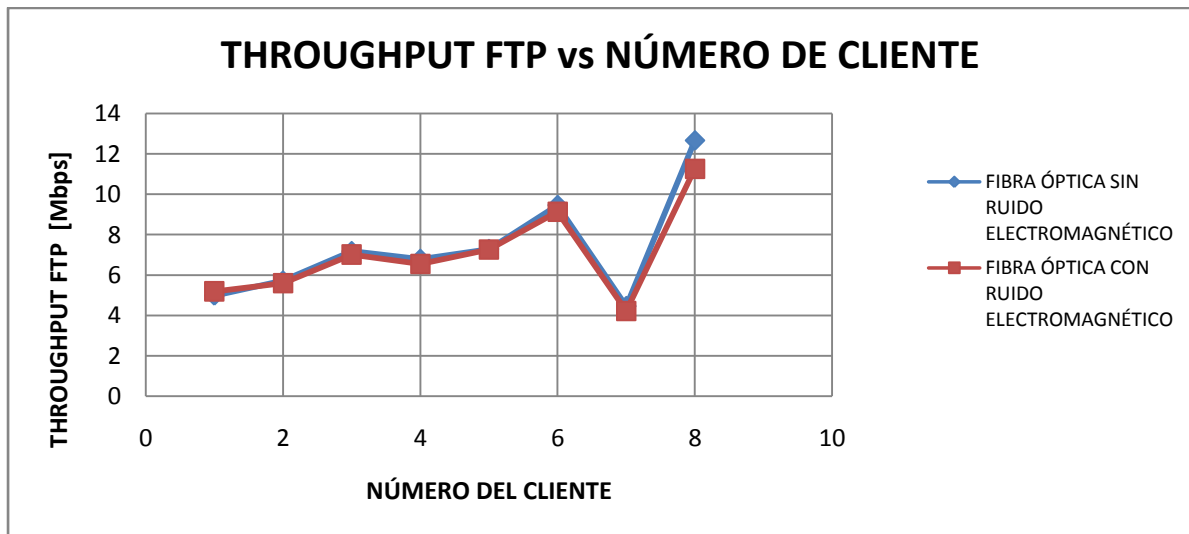


Figura 4.16 Gráfica del comportamiento del throughput contra número de cliente, para la prueba de Fibra Óptica.

Asimismo, la figura 4.16 exhibe por una parte que el tráfico de los 8 clientes no logra saturar el canal y por otra parte, muestra que el throughput es distinto para cada uno de los clientes involucrados en la prueba. Lo último se debe a que, como ya se mencionó, las características propias de cada cliente son diferentes en cada uno de ellos, principalmente en cuanto a capacidad de procesamiento.

### 4.6.2.2 Resultados obtenidos para la Topología punto a punto

La tabla 4.4 muestra los valores del tiempo involucrado en la transmisión del paquete y el throughput de capa de Aplicación para la topología punto a punto que está compuesta por el cliente número 8 y el servidor FTP, usando a su vez la tecnología Fibra Óptica. La tabla muestra los valores de ambos parámetros en los dos escenarios en estudio, en otras palabras, en los escenarios con y sin interferencia electromagnética.

| No. Experimento | PRUEBA SIN RUIDO ELECTROMAGNÉTICO |                   | PRUEBA CON RUIDO ELECTROMAGNÉTICO |                   |
|-----------------|-----------------------------------|-------------------|-----------------------------------|-------------------|
|                 | Tiempo [s]                        | Throughput [Mbps] | Tiempo [s]                        | Throughput [Mbps] |
| 1               | 116.53                            | 29.59048          | 123.38                            | 28.71880          |
| 2               | 133.72                            | 25.02920          | 130.88                            | 27.26872          |
| 3               | 126.38                            | 29.11504          | 129.44                            | 28.00872          |
| 4               | 132.09                            | 25.03104          | 130.78                            | 25.58288          |
| 5               | 133.49                            | 25.06488          | 131.42                            | 25.45832          |
| 6               | 135.66                            | 24.66376          | 134.66                            | 24.84688          |
| 7               | 131.84                            | 25.37688          | 132.81                            | 25.19192          |
| 8               | 132.27                            | 25.29608          | 132.94                            | 25.16816          |
| 9               | 133.41                            | 25.07968          | 132.42                            | 25.26608          |
| 10              | 136.92                            | 24.60096          | 132.31                            | 25.28712          |
| <b>Promedio</b> | <b>131.23</b>                     | <b>25.88480</b>   | <b>131.10</b>                     | <b>26.07976</b>   |

Tabla 4.4 Valores del throughput y tiempo para tecnología de Fibra Óptica.

A fin de observar de forma gráfica el comportamiento del throughput de la prueba anterior, la figura 4.17 representa cada uno de los valores registrados en el comportamiento del throughput en capa de aplicación. En esta figura se puede observar que la medición del throughput es prácticamente constante, es decir, que el experimento es repetible, y que las curvas que representan a la Fibra Óptica con y sin ruido electromagnético no varían entre sí; en consecuencia, esto reafirma lo susodicho en referencia a que la Fibra Óptica es inmune a interferencias electromagnéticas externas.

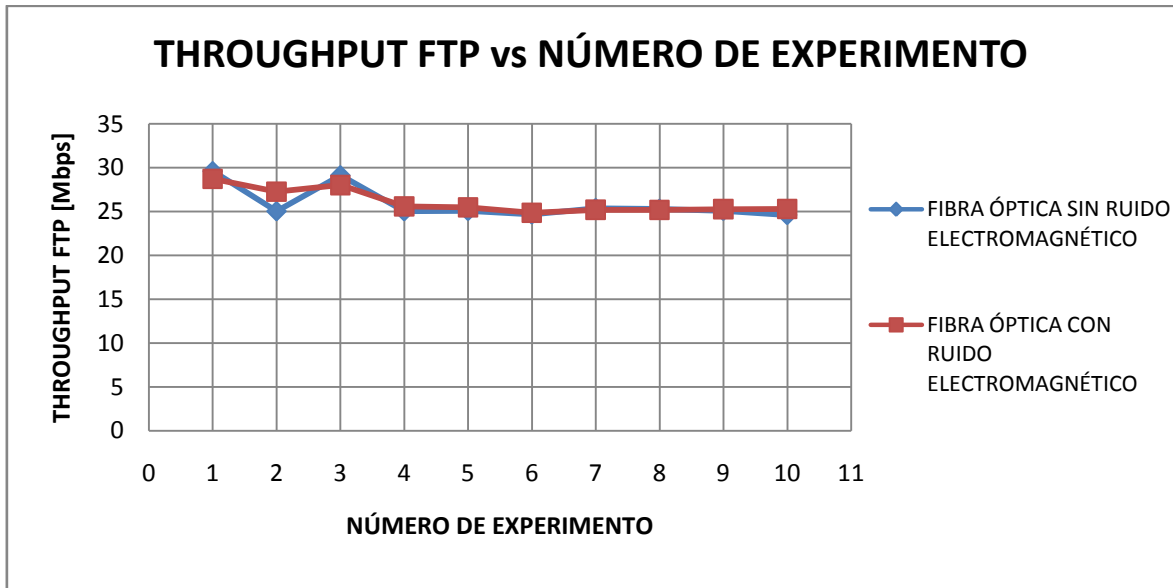


Figura 4.17 Gráfica del comportamiento del throughput contra número de medición, para la tecnología Fibra Óptica

A modo de comparar el tiempo empleado en la transmisión del archivo y el throughput en ambas topologías y en los ambientes con y sin ruido electromagnético utilizando la tecnología Fibra Óptica, la tabla 4.5 muestra tal comparación basándose en los valores obtenidos por el cliente número 8. En esta tabla es posible observar que el throughput disminuye aproximadamente a la mitad en la topología punto a punto con respecto a la topología punto-multipunto; esto se debe principalmente a que cuando se utiliza la topología punto a punto se dispone de todo el ancho de banda del canal y cuando se usa la topología punto-multipunto este ancho de banda se debe compartir entre los usuarios. Por tal razón, cuando se utiliza la topología punto-multipunto se tiene un menor throughput y un mayor tiempo empleado en la transmisión de información que cuando se usa la topología punto a punto.

|                            | PRUEBA SIN RUIDO ELECTROMAGNÉTICO |                  | PRUEBA CON RUIDO ELECTROMAGNÉTICO |                  |
|----------------------------|-----------------------------------|------------------|-----------------------------------|------------------|
|                            | Tiempo[s]                         | Throughput[Mbps] | Tiempo[s]                         | Throughput[Mbps] |
| Ciente 8                   |                                   |                  |                                   |                  |
| Topología punto multipunto | 264.23                            | 12.66224         | 297.03                            | 11.26408         |
| Topología punto a punto    | 131.23                            | 25.88480         | 131.10                            | 26.07976         |

Tabla 4.5 Valores de tiempo y throughput del cliente número 8

### 4.6.2.2.1 Análisis de paquetes para la topología punto a punto Fibra Óptica con ruido electromagnético

La figura 4.18 muestra el flujo de paquetes que se obtuvo en tiempo real con el software Wireshark. En esta figura se puede observar que el flujo de paquetes es constante tanto en el intervalo de tiempo en el que se enciende el motor de la licuadora, como en el intervalo de tiempo en el que permanece apagado. En consecuencia, la gráfica muestra que el flujo de paquetes no se ve afectado por el ruido electromagnético causado por el motor de la licuadora.

Es posible observar en la misma figura que los primeros segundos son utilizados para la convergencia de la red. Durante este tiempo el Switch aprende las direcciones MAC de cada uno de los clientes que tiene conectados en cada uno de sus puertos y se sincroniza con el Switch vecino.

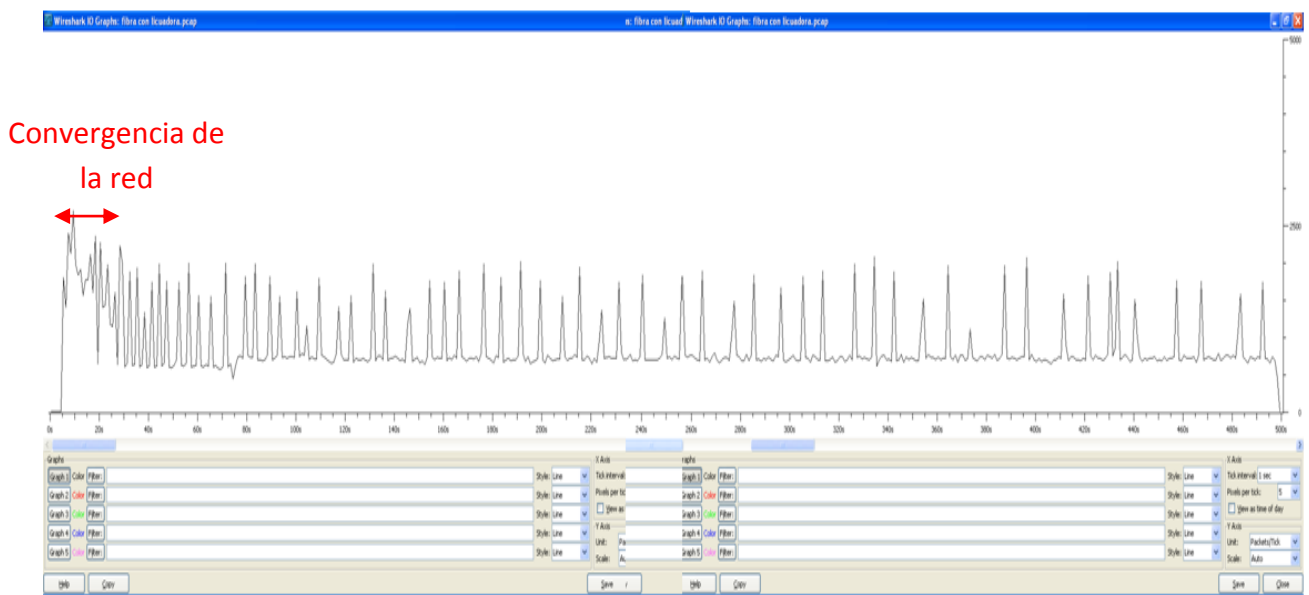


Figura 4.18 Gráfica del flujo de paquetes para la prueba de Fibra Óptica con ruido electromagnético

Analizando todos los paquetes capturados con este software, se encontró que, utilizando la tecnología de Fibra Óptica, se perdieron un total de 135 paquetes de un total de 438958 paquetes transmitidos. En otras palabras, la cantidad de paquetes perdidos representa el 0.0307 % del total de paquetes enviados.

### 4.6.2.2 Análisis de paquetes para la topología punto a punto Fibra Óptica sin ruido electromagnético

Ahora bien, en la figura 4.19 se muestra la gráfica de flujo de paquetes para la prueba de Fibra Óptica sin ruido electromagnético. Se puede observar que esta gráfica tiene un comportamiento constante, aunque también se percibe que los primeros segundos son empleados para la convergencia de la red.

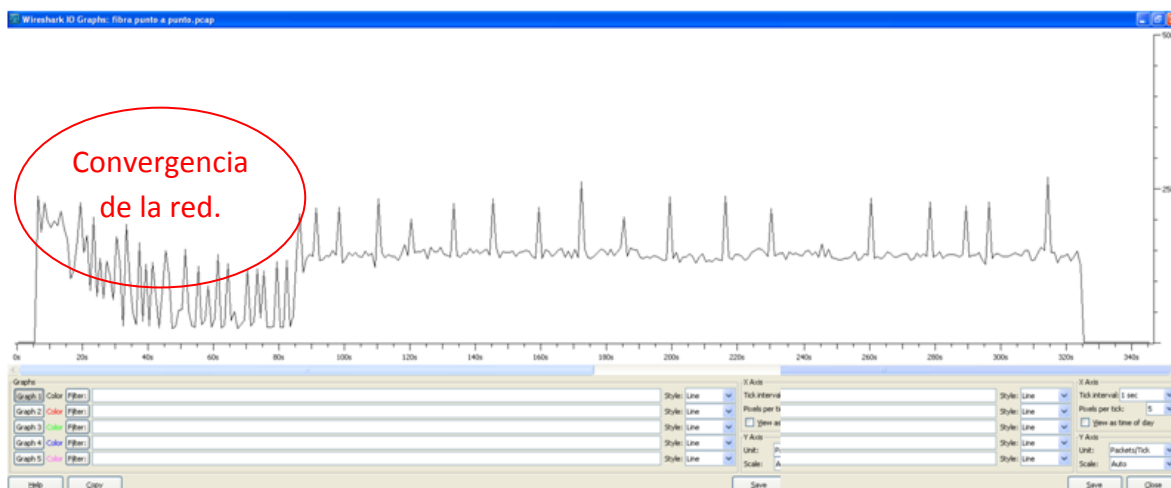


Figura 4.19 Gráfica del flujo de paquetes para la prueba de Fibra Óptica sin ruido electromagnético

Al realizar un conteo de los paquetes capturados, se encontró que de los 438958 paquetes transmitidos se perdieron 102 paquetes, lo que representa un 0.0232 % de paquetes perdidos durante la transmisión del archivo. Lo anterior permite confirmar que la Fibra Óptica es inmune al ruido electromagnético.

### 4.6.3 PLC

Para la tecnología PLC el estándar utilizado fue Home Plug, el cual especifica un flujo de datos de 45 Mbps; 27 Mbps en bajada o downlinky 18 Mbps en subida o uplink, por lo que tomaremos como throughput máximo de capa Física 27Mbps.

Similarmente a como se hizo con las otras tecnologías, para saber la velocidad de transmisión real en capa Física, se hizo uso del software Iperf. La figura 4.20 muestra tal velocidad y resulta ser de 26.083 Mbps, la cual es muy cercana a la especificada en el estándar de 27 Mbps.

| [ ID ] | Interval        | Transfer    | Bandwidth       |
|--------|-----------------|-------------|-----------------|
| [1412] | 849.0-850.0 sec | 2992 KBytes | 24510 Kbits/sec |
| [1412] | 850.0-851.0 sec | 1928 KBytes | 15794 Kbits/sec |
| [1412] | 851.0-852.0 sec | 1968 KBytes | 16122 Kbits/sec |
| [1412] | 852.0-853.0 sec | 1904 KBytes | 15598 Kbits/sec |
| [1412] | 853.0-854.0 sec | 1944 KBytes | 15925 Kbits/sec |
| [1412] | 854.0-855.0 sec | 2272 KBytes | 18612 Kbits/sec |
| [1412] | 855.0-856.0 sec | 1992 KBytes | 16318 Kbits/sec |
| [1412] | 856.0-857.0 sec | 3136 KBytes | 25690 Kbits/sec |
| [1412] | 857.0-858.0 sec | 3200 KBytes | 26214 Kbits/sec |
| [1412] | 858.0-859.0 sec | 3224 KBytes | 26411 Kbits/sec |
| [1412] | 859.0-860.0 sec | 3232 KBytes | 26477 Kbits/sec |
| [1412] | 860.0-861.0 sec | 2072 KBytes | 16974 Kbits/sec |
| [1412] | 861.0-862.0 sec | 1880 KBytes | 15401 Kbits/sec |
| [1412] | 862.0-863.0 sec | 1928 KBytes | 15794 Kbits/sec |
| [1412] | 863.0-864.0 sec | 1944 KBytes | 15925 Kbits/sec |
| [1412] | 864.0-865.0 sec | 2704 KBytes | 22151 Kbits/sec |
| [1412] | 865.0-866.0 sec | 3160 KBytes | 25887 Kbits/sec |
| [1412] | 866.0-867.0 sec | 3176 KBytes | 26018 Kbits/sec |
| [1412] | 867.0-868.0 sec | 3112 KBytes | 25494 Kbits/sec |
| [1412] | 868.0-869.0 sec | 3144 KBytes | 25756 Kbits/sec |
| [1412] | 869.0-870.0 sec | 3128 KBytes | 25625 Kbits/sec |
| [1412] | 870.0-871.0 sec | 3120 KBytes | 25559 Kbits/sec |
| [1412] | 871.0-872.0 sec | 3144 KBytes | 25756 Kbits/sec |
| [1412] | 872.0-873.0 sec | 2544 KBytes | 20840 Kbits/sec |
| [1412] | 873.0-874.0 sec | 1968 KBytes | 16122 Kbits/sec |
| [1412] | 874.0-875.0 sec | 1968 KBytes | 16122 Kbits/sec |
| [1412] | 875.0-876.0 sec | 1936 KBytes | 15860 Kbits/sec |
| [1412] | 876.0-877.0 sec | 2928 KBytes | 23986 Kbits/sec |
| [1412] | 877.0-878.0 sec | 3120 KBytes | 25559 Kbits/sec |
| [1412] | 878.0-879.0 sec | 2920 KBytes | 23921 Kbits/sec |
| [1412] | 879.0-880.0 sec | 3104 KBytes | 25428 Kbits/sec |
| [1412] | 880.0-881.0 sec | 3184 KBytes | 26083 Kbits/sec |

Figura 4.20 Throughput en capa física para la tecnología PLC

Para obtener los parámetros de latencia y RTT para la tecnología PLC se utilizó el comando ping entre un cliente y el servidor. En la figura 4.21 se observa que el valor de dichos parámetros son 1[ms] y 2[ms] respectivamente.

```

C:\Documents and Settings\Ale Vasquez>ping 192.168.1.10
Haciendo ping a 192.168.1.10 con 32 bytes de datos:

Respuesta desde 192.168.1.10: bytes=32 tiempo=4ms TTL=128
Respuesta desde 192.168.1.10: bytes=32 tiempo=2ms TTL=128
Respuesta desde 192.168.1.10: bytes=32 tiempo=2ms TTL=128
Respuesta desde 192.168.1.10: bytes=32 tiempo=2ms TTL=128

Estadísticas de ping para 192.168.1.10:
    Paquetes: enviados = 4, recibidos = 4, perdidos = 0
    (0% perdidos),
    Tiempos aproximados de ida y vuelta en milisegundos:
        Mínimo = 2ms, Máximo = 4ms, Media = 2ms
    
```

Figura 4.21 Parámetros de latencia y RTT para la tecnología PLC.



### 4.6.3.1 Resultados obtenidos para la Topología punto-multipunto

Los resultados obtenidos del tiempo total de la transmisión del archivo y el throughput en capa de Aplicación para la topología punto-multipunto que consta de 8 clientes y 1 servidor, se muestran en la tabla 4.6. Dichos valores son registrados por cada uno de los clientes en los dos escenarios en estudio, es decir, con y sin interferencia electromagnética.

Además, se realizó una prueba alterna. Esta prueba consistió en agregar un filtro supresor de ruido al motor de la licuadora en el escenario que contemplaba ruido electromagnético, los resultados se muestran adjuntos en la tabla 4.6. Cabe aclarar que el filtro es suministrado por el fabricante de equipos PLC, como ya se mencionó en el capítulo anterior.

| No. Cliente     | PRUEBA SIN RUIDO ELECTROMAGNÉTICO |                   | PRUEBA CON RUIDO ELECTROMAGNÉTICO |                   | PRUEBA CON RUIDO ELECTROMAGNÉTICO Y CON FILTRO |                   |
|-----------------|-----------------------------------|-------------------|-----------------------------------|-------------------|--|-------------------|
|                 | Tiempo [s]                        | Throughput [Mbps] | Tiempo [s]                        | Throughput [Mbps] | Tiempo [s]                                     | Throughput [Mbps] |
| 1               | 648.91                            | 5.15600           | 820.91                            | 4.07576           | 603.33   | 5.20352           |
| 2               | 638.89                            | 5.23688           | 816.52                            | 4.09760           | 640.31   | 5.22528           |
| 3               | 681.36                            | 4.91040           | 859.84                            | 3.89120           | 675.17   | 4.95544           |
| 4               | 647.32                            | 5.16864           | 822.75                            | 4.06656           | 647.43   | 5.16776           |
| 5               | 650.76                            | 5.14080           | 821.53                            | 4.07264           | 647.14   | 5.17008           |
| 6               | 648.48                            | 5.15936           | 815.50                            | 4.10272           | 643.58   | 5.19872           |
| 7               | 648.29                            | 5.16088           | 826.38                            | 4.04872           | 645.20   | 5.18560           |
| 8               | 648.72                            | 5.15752           | 814.80                            | 4.10632           | 644.22   | 5.19352           |
| <b>Promedio</b> | <b>651.59</b>                     | <b>5.13631</b>    | <b>824.77</b>                     | <b>4.05769</b>    | <b>643.29</b>                                  | <b>5.16249</b>    |

Tabla 4.6 Valores del throughput y tiempo para la tecnología PLC

En la figura 4.22 se presentala gráfica que representa los valores de la tabla 4.6,la cual muestra que, a diferencia de los casos anteriores, la tecnología PLC sí se ve afectada por el ruido electromagnético causado por el motor de la licuadora, dado que la curva que representa el throughput con ruido electromagnético disminuye en aproximadamente 1 Mbps con respecto a la curva del throughput sin ruido electromagnético.

Es importante notar que las curvas que representan tanto el throughput sin ruido electromagnético como el throughput con ruido electromagnético y filtro supresor de ruido muestran tener el mismo comportamiento. En otras palabras, los efectos causados por el ruido electromagnético causado por el motor de la licuadora desaparecen al utilizar el filtro supresor de ruido. Como resultado de lo analizado podemos afirmar que la tecnología PLC es afectada por la presencia del ruido electromagnético y esto se soluciona al colocar el filtro supresor de ruido proporcionado por el fabricante.

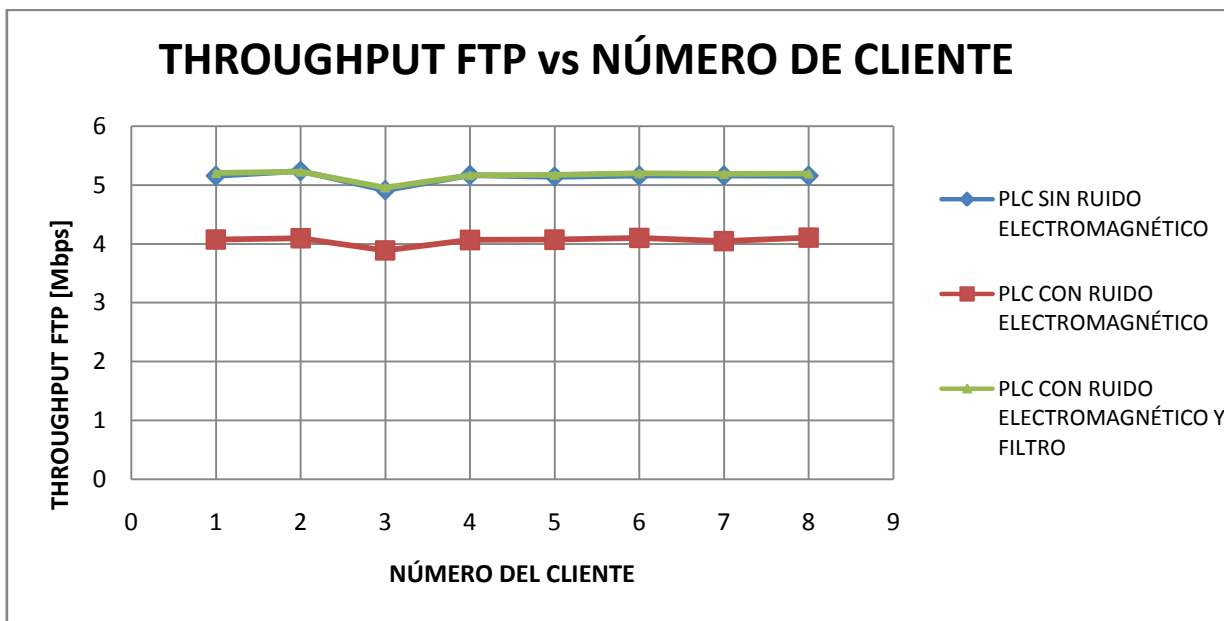


Figura 4.22 Gráfica del comportamiento del throughput contra número de cliente, para la prueba de PLC.

El comportamiento de las curvas de throughput de la figura 4.22 expresa que las características propias de cada una de las computadoras-clientes como son memoria y capacidad de procesamiento no son importantes cuando hacen uso de la tecnología PLC, esto bien puede deberse al hecho de que el throughput del PLC es menor que el de las otras tecnologías, actuando como un ecualizador de desempeño al reducir el mismo para las computadoras con mejores características internas. Además, en la figura 4.22 se puede observar que a pesar de que los 8 clientes recibieron tráfico simultáneamente, el tráfico no fue suficiente para saturar el canal.

#### 4.6.3.2 Resultados obtenidos para la Topología punto a punto

La tabla 4.4 presenta los valores obtenidos del tiempo total de transmisión del archivo y throughput para la topología punto a punto que está compuesta por el cliente número 8 y el servidor. Esta tabla contiene los valores para los dos escenarios en estudio: prueba con y sin ruido electromagnético, pero además, contiene los valores de la prueba complementaria para esta tecnología en la que se colocó un filtro supresor para disminuir el ruido causado por el motor de la licuadora.

**IMPLEMENTACIÓN, ANÁLISIS Y COMPARACIÓN EXPERIMENTAL DEL DESEMPEÑO DE REDES DE FIBRA ÓPTICA, PAR TRENZADO Y PLC.**

| No. experimento | PRUEBA SIN RUIDO ELECTROMAGNÉTICO |                   | PRUEBA CON RUIDO ELECTROMAGNÉTICO |                   | PRUEBA CON RUIDO ELECTROMAGNÉTICO Y CON FILTRO |                   |
|-----------------|-----------------------------------|-------------------|-----------------------------------|-------------------|--|-------------------|
|                 | Tiempo [s]                        | Throughput [Mbps] | Tiempo [s]                        | Throughput [Mbps] | Tiempo [s]                                     | Throughput [Mbps] |
| 1               | 628.80                            | 5.32096           | 829.25                            | 4.03472           | 649.44   | 5.15184           |
| 2               | 638.05                            | 5.24376           | 829.23                            | 4.03480           | 638.26   | 5.24200           |
| 3               | 628.13                            | 5.32664           | 830.86                            | 4.03976           | 617.86   | 5.41512           |
| 4               | 620.44                            | 5.39264           | 828.99                            | 4.03600           | 638.08   | 5.24352           |
| 5               | 621.95                            | 5.37952           | 831.88                            | 4.02248           | 630.42   | 5.30720           |
| 6               | 627.02                            | 5.33608           | 833.89                            | 4.01224           | 633.81   | 5.27880           |
| 7               | 621.58                            | 5.38064           | 831.11                            | 4.02568           | 643.00   | 5.20336           |
| 8               | 622.74                            | 5.37272           | 837.62                            | 3.99424           | 646.28   | 5.17696           |
| 9               | 617.38                            | 5.41936           | 849.80                            | 3.93712           | 623.69   | 5.36448           |
| 10              | 617.75                            | 5.41608           | 858.67                            | 3.89648           | 633.05   | 5.28520           |
| <b>Promedio</b> | <b>624.38</b>                     | <b>5.35884</b>    | <b>836.13</b>                     | <b>4.00335</b>    | <b>635.38</b>                                  | <b>5.26684</b>    |

Tabla 4.7 Valores del throughput y tiempo para tecnología PLC y topología punto a punto.

En la tabla 4.5 se tiene la comparación del tiempo de transmisión y el throughput en ambas topologías para el cliente 8. En esta tabla se puede observar que el cliente muestra el mismo comportamiento independientemente del tipo de topología que se trate, es decir, su tiempo y throughput son iguales en la topología punto a punto y en la topología punto-multipunto. Esto se debe, suponemos, a la manera en que opera el sistema PLC, creando sub-canales OFDM con un ancho de banda asignado; Esta observación beneficia en el caso de escalar la red a una más grande con más usuarios, ya que el ancho de banda para cada usuario será siempre el mismo. Por el contrario, este tipo de tecnología no es recomendable para redes pequeñas con pocos clientes, porque el ancho de banda asignado a cada cliente siempre será el mismo, limitandola posibilidad de ocupar todo el ancho de banda del canal.

Asimismo, la tabla 4.5 muestra nuevamente que el ruido electromagnético afecta a la tecnología PLC, sin embargo, esto se resuelve utilizando un filtro supresor de ruido ya que el tiempo y throughput de las columnas “prueba sin ruido electromagnético” y “prueba con ruido electromagnético y filtro” son casi los mismos.

| Cliente 8                  | PRUEBASIN RUIDO ELECTROMAGNÉTICO |                   | PRUEBA CON RUIDO ELECTROMAGNÉTICO |                   | PRUEBA CON RUIDO ELECTROMAGNÉTICO Y FILTRO |                   |
|----------------------------|----------------------------------|-------------------|-----------------------------------|-------------------|--|-------------------|
|                            | Tiempo[s]                        | Throughput [Mbps] | Tiempo[s]                         | Throughput [Mbps] | Tiempo[s]                                  | Throughput [Mbps] |
| Topología punto multipunto | 648.72                           | 5.15752           | 814.80                            | 4.10632           | 644.22                                     | 5.19352           |
| Topología punto a punto    | 624.38                           | 5.35884           | 836.13                            | 4.00335           | 635.38                                     | 5.26684           |

Tabla 4.8 Valores de tiempo y throughput del cliente número 8

Para observar de manera gráfica los efectos positivos que causa el filtro supresor de ruido en la tecnología PLC, se creó un gráfico con los valores de la tabla 4.4, el cual se muestra en la figura 4.23. En esta figura se puede notar que la curva que representa a la tecnología PLC sin ruido electromagnético es muy semejante a la curva que

representa a la tecnología PLC con ruido electromagnético y el filtro supresor de ruido, por lo tanto, el filtro está funcionando adecuadamente minimizando los efectos del ruido que causa el motor de la licuadora. Por otro lado, la curva que representa a la tecnología PLC con ruido electromagnético muestra que su throughput disminuye en un 25 % con respecto a la curva que representa a la tecnología PLC sin ruido electromagnético.

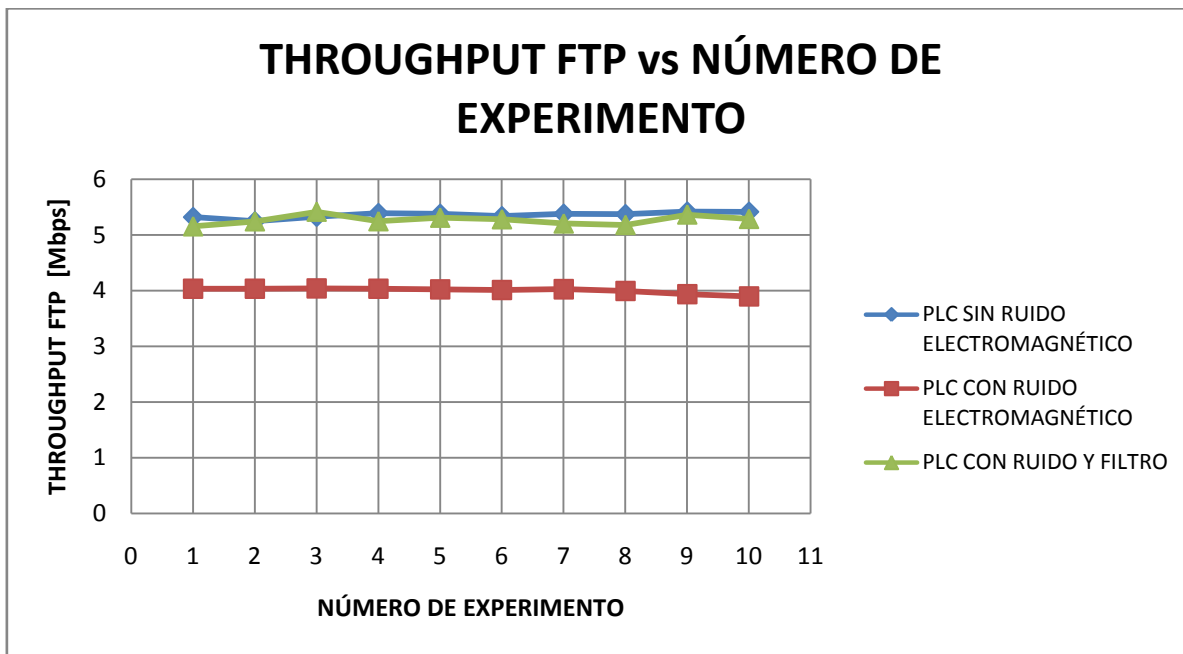


Figura 4.23 Gráfica del comportamiento del throughput contra número de experimento, para la prueba de PLC.

### 4.6.3.3 Análisis de paquetes para la topología punto a punto prueba PLC con ruido electromagnético

La figura 4.24 representa el flujo de paquetes en tiempo real que se realizó gracias a la captura de paquetes hecha con el software Wireshark. En esta figura se muestra que cuando se acciona el motor de la licuadora en el segundo 300 y se desactiva en el segundo 360, el flujo de paquetes se ve afectado por el ruido electromagnético y esto ocasiona que exista una pérdida excesiva de paquetes durante los 60 segundos en los cuales permanece encendido el motor de la licuadora. Este mismo comportamiento se observa en el segundo 660 cuando se vuelve a accionar el motor de la licuadora y permanece encendido durante 60 segundos. Lo anterior confirma que, efectivamente, es el ruido electromagnético producido por el motor, el que reduce el throughput del sistema de transmisión.

También es posible observar en la misma figura que los primeros segundos son empleados para la convergencia de la red.



Figura 4.24 Gráfica del flujo de paquetes para la prueba de PLC con ruido electromagnético.

Realizando un análisis sobre los paquetes capturados, se encontró que para esta prueba, en la que se utiliza la tecnología PLC con ruido electromagnético, se perdieron un total de 804 paquetes de un total de 438958 paquetes transmitidos. Lo anterior indica que los paquetes perdidos representan el 0.1831% del total de paquetes transmitidos, porcentaje que podría incrementarse aumentando los periodos durante los cuales el ruido electromagnético se aplica.

#### **4.6.3.4 Análisis de paquetes para la topología punto a punto prueba PLC sin ruido electromagnético**

Por otro lado, la figura 4.25 muestra el flujo de paquetes para el caso en que se hace uso de la tecnología PLC en un escenario sin ruido electromagnético. En esta figura es posible observar que se tiene un flujo de paquetes constante y que la pérdida de paquetes es bastante menor con respecto a la prueba de PLC con ruido electromagnético. Cabe resaltar que los primeros segundos son utilizados para la convergencia de la red. Durante este tiempo el Switch aprende las direcciones MAC de cada uno de los clientes que tiene conectados en cada uno de sus puertos y se sincroniza con el Switch vecino.

En el escenario en que se hace uso de la tecnología PLC sin ruido electromagnético, sólo se pierden 190 paquetes durante la transmisión total del archivo, lo que representa 0.0432% del total de los paquetes transmitidos.

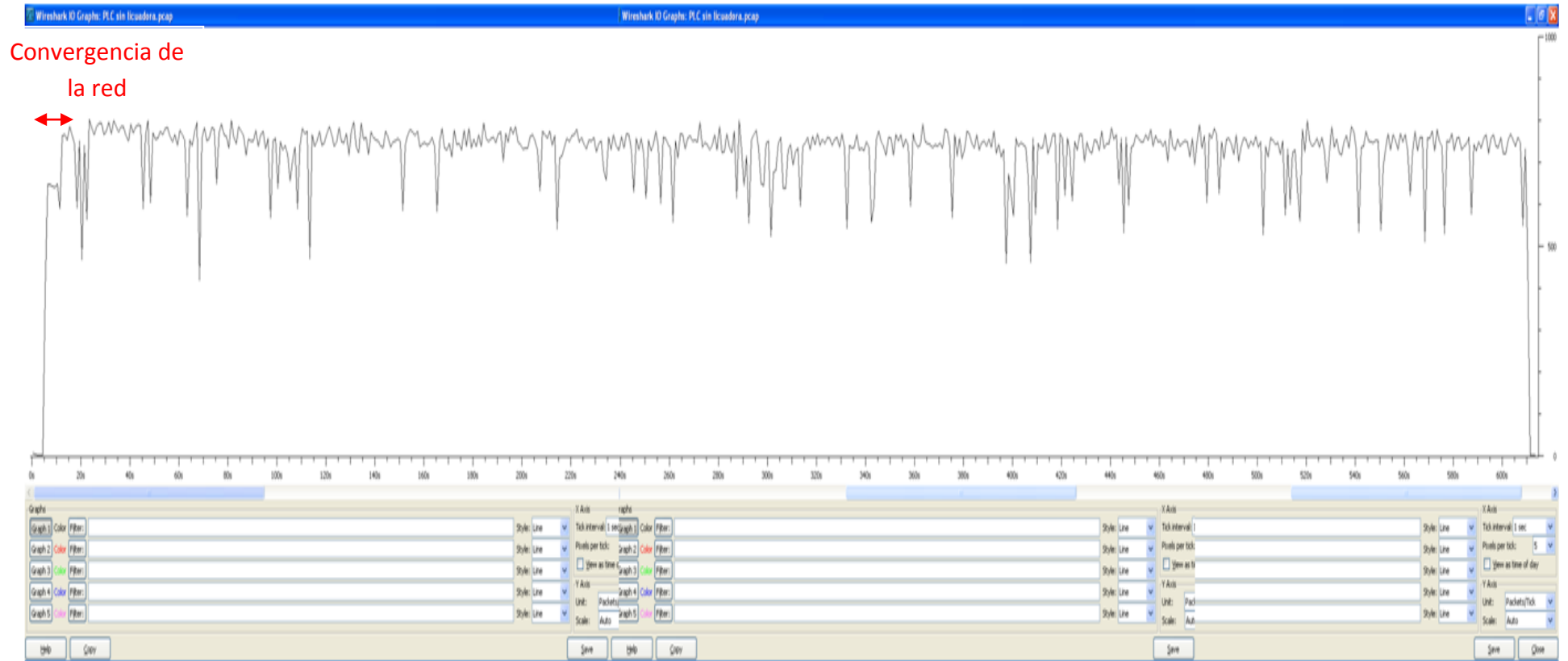


Figura 4.25 Gráfica del flujo de paquetes para la prueba PLC sin ruido electromagnético

### **4.6.3.5 Análisis de paquetes para la topología punto a punto prueba PLC con ruido electromagnético y filtro supresor de ruido**

Ahora bien, la figura 4.26 muestra el flujo de paquetes para el caso en que se realizó la prueba haciendo uso de la tecnología PLC con ruido electromagnético y con filtro supresor de ruido. Se observa en dicha grafica que los primeros 20 segundos se utilizan para la convergencia de la red.

El motor de la licuadora se activó en dos ocasiones consecutivas, en la figura 4.26 se puede observar que dicho motor se activó en los segundos 300 y 660 manteniéndolo activo durante 60 segundos. En estos periodos de tiempo se muestra que a pesar de que se está utilizando el filtro supresor de ruido, existe una pérdida de 299 paquetes de un total de 438958 paquetes transmitidos, lo que representa un 0.0681 % de paquetes perdidos.

La pérdida de paquetes cuando se utiliza el filtro supresor de ruido es 2.7 veces menor que cuando no se utiliza. Entonces podemos concluir que el filtro ayuda en gran medida a mitigar los efectos del ruido electromagnético y así éste no sea tan dañino para la tecnología PLC.



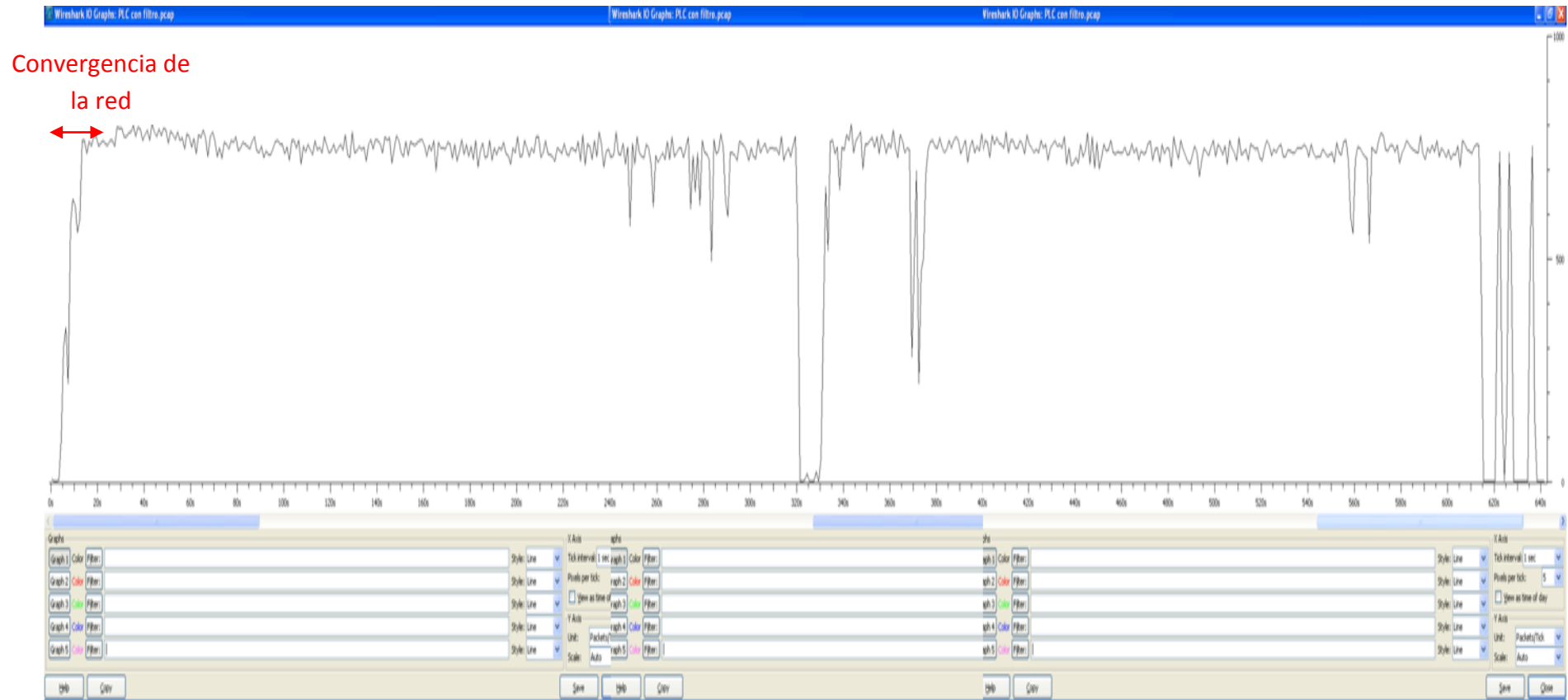


Figura 4.26 Gráfica del flujo de paquetes para la prueba PLC con ruido electromagnético y filtro supresor de ruido.

## 4.7 Comparación del desempeño entre las diferentes tecnologías de transmisión

### 4.7.1 Topología punto a punto

La figura 4.26 muestra de manera conjunta, para facilitar la comparación del throughput obtenido en capa de aplicación para las tres tecnologías utilizando la topología punto a punto y el cliente al que se le ha asignado el número 8.

Las gráficas muestran, como ya se mencionó, que no existe variación entre cada una de las mediciones cuando se utiliza la tecnología de transmisión PLC, mientras que para las otras dos tecnologías de transmisión se observan algunas discrepancias para algunas de las mediciones. Sin embargo, lo que es especialmente interesante es confirmar que para las tecnologías de UTP y Fibra Óptica el ruido electromagnético producido en este caso por un motor de licuadora, no tiene influencia en el desempeño de los enlaces, mientras que en el caso de la tecnología PLC la influencia es muy notable.

Otro aspecto a destacar de estas curvas, son los valores de throughput que presentan las tres tecnologías. Mientras que el desempeño de la Fibra Óptica y el UTP es muy similar, el desempeño en cuanto a este parámetro del PLC es muy inferior. Esto se observa cuantitativamente de una manera sencilla mediante la figura 4.27, en donde se muestra el promedio de throughput en capa de Aplicación de las tecnologías estudiadas, es decir el promedio de las curvas mostradas en la figura 4.26. Mientras que la Fibra Óptica y el UTP tiene un throughput promedio de alrededor de 25 Mbps, el valor de este parámetro para la tecnología PLC es de prácticamente la quinta parte, es decir de alrededor de 5 Mbps. Más aún, en presencia de ruido electromagnético, el valor de este parámetro se reduce a 4 Mbps. De este análisis no es difícil deducir, que en términos de throughput, las tecnologías más convenientes son la Fibra Óptica y el UTP.

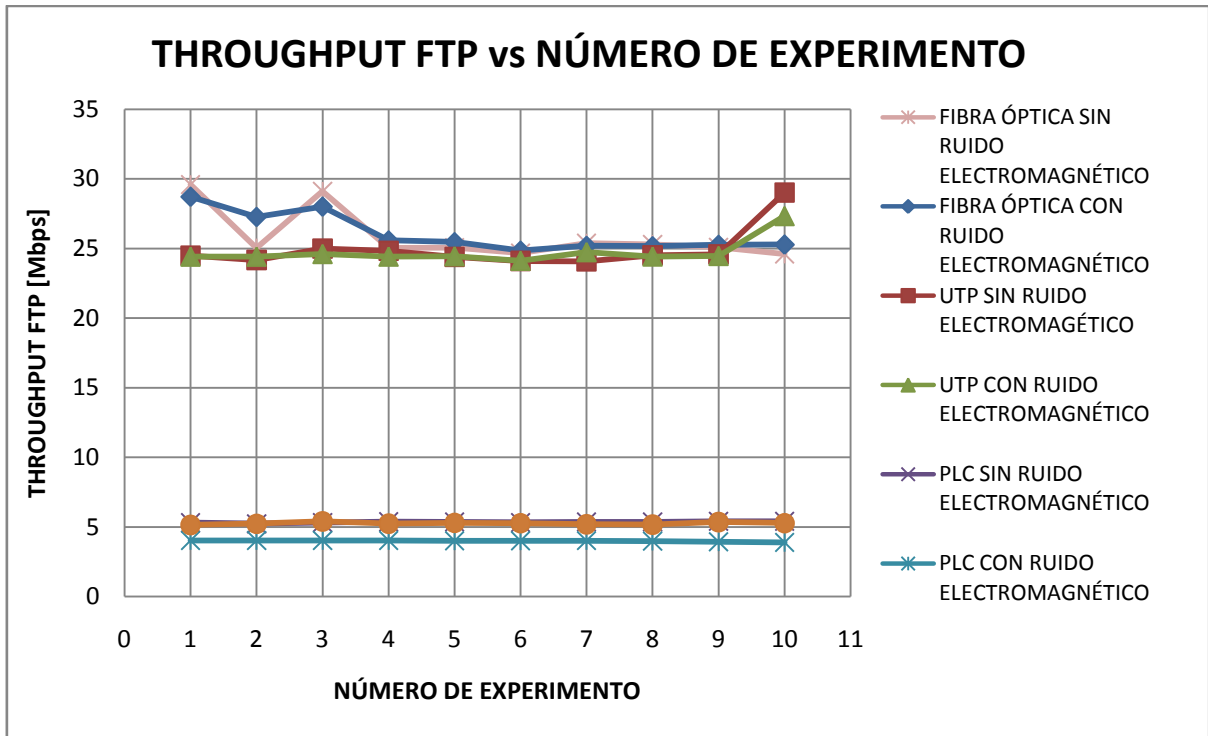


Figura 4.27 Comparación del comportamiento de las tres tecnologías

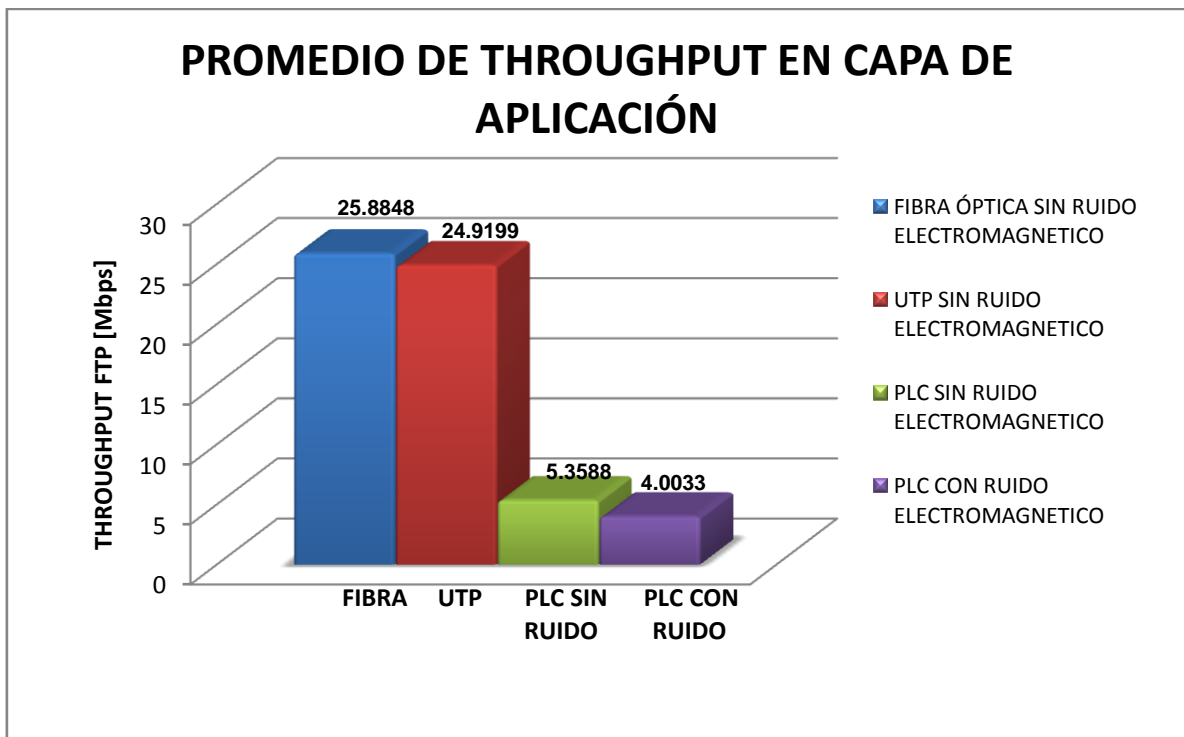


Figura 4.28 Comparación del throughput FTP de las tres tecnologías

Para extender este análisis se presenta la tabla 4.6, donde se observa, además del parámetro ya comentado, la latencia, el porcentaje y número de paquetes perdidos en presencia de ruido, así como la longitud del medio. De la tabla cabe destacar el hecho de que aunque el cable UTP y la Fibra Óptica tienen un desempeño similar en términos de throughput, la Fibra Óptica tiene una longitud cinco veces mayor que la del cable UTP. Además, la latencia mostrada por el cable UTP es mayor que la que presenta la Fibra Óptica. En este punto cabe mencionar que experimentos llevados a cabo en un cable UTP de 300 [m] dieron resultados de transmisión nulos, lo que indica que la longitud del cable UTP está limitada. Esto pone de manifiesto la superioridad del uso de la Fibra Óptica como medio de transmisión.

En el caso del PLC, aunque el alcance es el mismo que el del cable UTP, la latencia es considerablemente mayor, y su throughput considerablemente menor, lo que hace al PLC una tecnología de dimensión más modesta. Otra desventaja de la tecnología PLC es que se ve afectada por el ruido (como ya se ha mencionado). Esto se confirma en la tabla 4.6 al observar que, en presencia de ruido electromagnético en similares condiciones, la Fibra Óptica es el medio de transmisión que menos paquetes pierde, mientras que el PLC es el que más paquetes pierde. Esto último se remedia con el uso del filtro, reduciendo el número de paquetes perdidos de 804 a 299.

| Tecnología   | Latencia        | Throughput en capa de Aplicación[Mbps] | Porcentaje de paquetes perdidos con ruido EM | Paquetes perdidos con ruido | Longitud del cable |
|--------------|-----------------|--|--|-----------------------------|--------------------|
| Fibra Óptica | 1.32 [ $\mu$ s] | 25.8848                                | 0.0307%                                      | 135                         | 500 [m]            |
| UTP          | 2.31 [ $\mu$ s] | 24.9199                                | 0.0852%                                      | 374                         | 100 [m]            |
| PLC          | 1 [ms]          | 5.3588                                 | 0.1831%                                      | 804                         | 100 [m]            |
| PLC c/filtro | 1 [ms]          | 5.2668                                 | 0.0681%                                      | 299                         | 100 [m]            |

Tabla 4.9 Resumen de los datos obtenidos para las tres tecnologías

## 4.7.2 Topología punto-multipunto

La figura 4.25 muestra la comparación del comportamiento de las tres tecnologías de transmisión en estudio usando la topología punto-multipunto. En ella se observa que para el caso de las tecnologías UTP y Fibra Óptica, el throughput es muy similar analizando cliente por cliente, lo que permite afirmar que las diferencias en términos de este parámetro de desempeño obedecen más a las características de procesamiento del cliente, que propiamente a la tecnología de transmisión. Mientras existen equipos, cuyo throughput es de alrededor de 12 Mbps, existen otros en que este parámetro se reduce a menos de 4 Mbps. Estos valores, contrastan con los promedios de throughput que se presentan en la tabla 4.6 para Fibra Óptica y UTP.

Como ya fue mencionado, la diferencia se debe a que en la topología punto-multipunto el ancho de banda disponible en el medio y los switches debe ser compartido por los ocho usuarios, situación que no se presenta en la topología punto a punto.

Por otro lado, la figura 4.25 muestra que todos los clientes que utilizaron la tecnología PLC tienen un valor muy parecido de throughput y que para esta tecnología no importa las características de hardware, memoria o capacidad de procesamiento de los usuarios, ya que tanto el cliente con las mejores características como el cliente con las peores características muestran throughputs similares. Como ya se explicó, este comportamiento se debe a que el throughput permitido en la tecnología PLC está limitado, por lo que, hasta alcanzar un cierto número de usuarios, un incremento y/o decremento de usuarios no se ve reflejado en un aumento o disminución del throughput en capa de Aplicación. Por la misma razón, los valores promedio de throughput que se miden en el caso de las topologías punto-multipunto y punto a punto son muy similares para esta tecnología de transmisión.

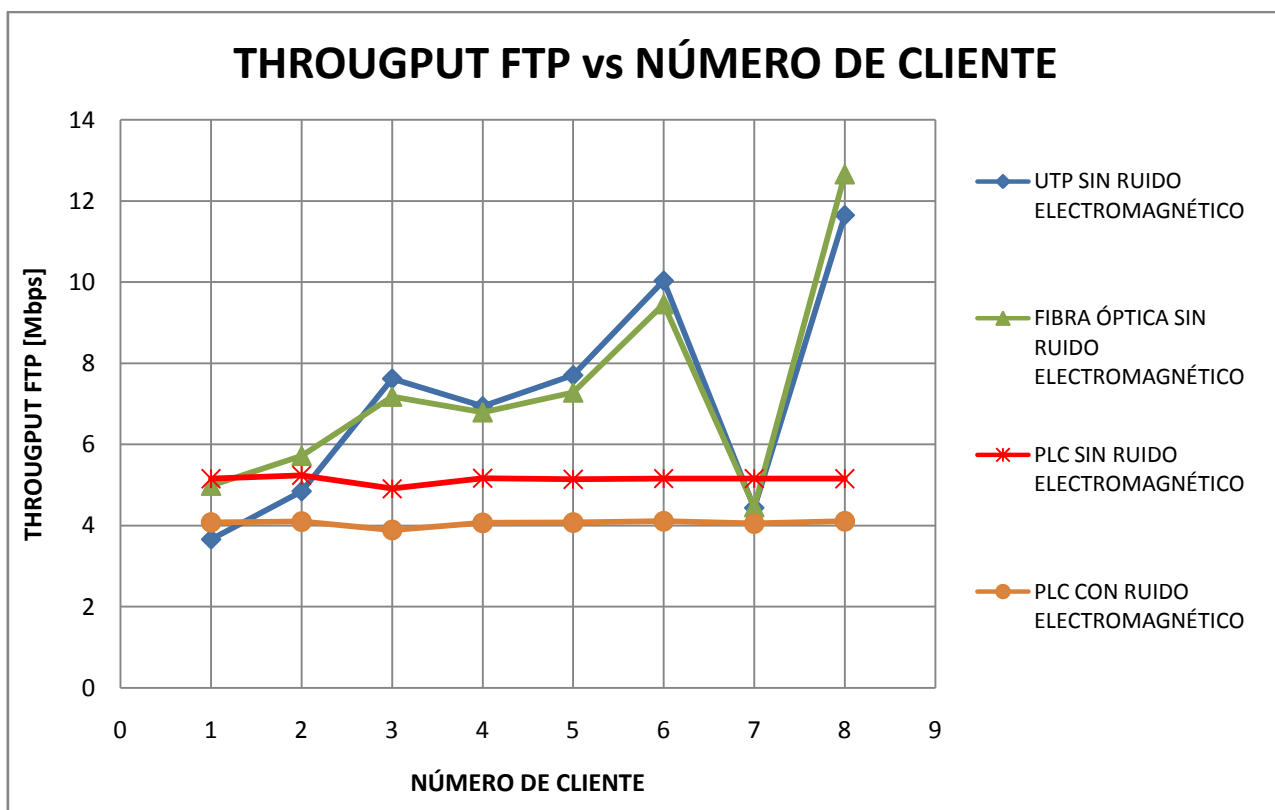


Figura 4.29 Comparación del comportamiento de las tres tecnologías

# CAPÍTULO 5

## CONCLUSIONES

### 5.1 Conclusiones

A continuación se presentan las conclusiones obtenidas del presente trabajo de tesis. Ellas están basadas en los experimentos presentados en los capítulos anteriores, llevados a cabo tomando en cuenta los modelos estudiados, desarrollados e implementados que permiten comparar el desempeño de los diferentes medios de transmisión: UTP, PLC y Fibra Óptica. Asimismo, se incluye un análisis que permite determinar el efecto del fenómeno ruido electromagnético en redes alámbricas para estas tres tecnologías.

1. El throughput que presentan las tecnologías de transmisión de Fibra Óptica y UTP son muy similares, mientras que el que presenta la tecnología PLC es inferior. Para el caso particular estudiado llegó a ser la quinta parte. Se deduce

que en términos de throughput, las tecnologías más convenientes para ser utilizadas son la Fibra Óptica y el UTP.

2. Aun cuando el cable UTP y la Fibra Óptica tienen un desempeño similar en términos de throughput, la Fibra Óptica tiene una longitud cinco veces mayor que la del cable UTP. De hecho, se prevé que resultados similares se obtendrían con Fibras Ópticas de longitudes de hasta 10 km, ya que los transceptores utilizados tienen un alcance nominal correspondiente. Por lo anterior, en términos de alcance, la Fibra Óptica es muy superior al cable UTP.
3. La latencia es otro factor importante a considerar, ya que es determinante para ciertas aplicaciones. Al respecto, la Fibra Óptica es la mejor alternativa, mientras que el PLC muestra una latencia comparativamente alta.
4. Con base en el estudio realizado, se encontró que el ruido electromagnético generado por el motor de la licuadora solo afecta a la tecnología PLC, ya que únicamente en esta tecnología el *throughput* disminuye a causa de este fenómeno. Los efectos del ruido electromagnético se pueden eliminar colocando un filtro supresor de ruido, el cual descarta el ruido generado por el motor de la licuadora y sólo deja pasar la señal con la información deseada.
5. Las características de transmisión en un mismo medio, se ven determinadas en buena medida por los equipos utilizados, en particular la capacidad de procesamiento de las computadoras utilizadas. También reviste importancia el número de equipos conectados a la red, ya que conforme este número aumenta, el ancho de banda debe ser compartido por más usuarios, implicando una posible reducción en el throughput de cada usuario. Esta situación es difícil de observar en la tecnología PLC porque el throughput permitido en esta tecnología está limitado.

Con base en las conclusiones anteriores, es posible afirmar que de las tres tecnologías de transmisión analizadas la que presenta mejor desempeño general si combinamos características como throughput, latencia, alcance e inmunidad al ruido electromagnético, es la Fibra Óptica, seguido de los cables UTP. La tecnología PLC es la que peor desempeño presenta. Sin embargo, al considerar otras características como son costo o facilidad de instalación, especialmente si el alcance máximo entre los equipos es como máximo 100 [m], el cable UTP se presenta como una buena alternativa. En ese mismo sentido, la tecnología PLC es muy atractiva, ya que permite utilizar el tendido de cableado eléctrico como medio de transmisión, lo que simplifica enormemente la instalación de una red. De lo anterior se deduce que la Fibra Óptica es útil para redes más complejas, con varios usuarios y alcances considerables que requieren disponer de un ancho de banda significativo. Si algunas de estas características se relajan, la opción es UTP. Por el contrario, para la instalación de redes personales en una casa u oficina, el uso de tecnología PLC se ve favorecido por su simplicidad y costo.

# Referencias

- [1] **An Integrated Network Management System for Multi-Vendor Power Line Communication Networks**, Chang-Keun Park, Joon-Myung Kang, Mi-Jung, and James Won-Ki Hong, Dept. of Computer Science and Engineering, POSTECH, Pohang, KORE. Yong-hun Lim, and Moon-suk Choi Korea Electric Power Research Institute (KEPRI), Daejeon, KOREA. IEEE International Conference on Information Networking (ICOIN 2008).
- [2] **Performance of PLC Transmission under Unfavorable Conditions** Haruo Okuda, Member IEEE, Ryoichi Shibata and Takahiro Kitamura Shonan Institute of Technology, Fujisawa, Japan, The 13th IEEE International Symposium on Consumer Electronics (ISCE2009).
- [3] **Reliability Evaluation of Survivable Fiber Optic Networks**, Yi Kai Su, Zheng Li and Ming Chun Li student member IEEE, Department of Electronic Engineering Beijing Univ. Of Aeronautics and Astronautics Beijing 100083 P.R.China
- [4] <http://www.cfetelecom.com.mx/telecom/Pages/CFETelecomW.aspx>
- [5] **Theoretical and Available Transmission Capacity of UTP**, Anton Umek, Member, IEEE
- [6] Tomasi Wayne. **Sistemas de Comunicaciones Electrónicas**, Pearson Educación, México 2003
- [7] <http://www.comoves.unam.mx/articulos/fibraoptica.html>
- [8] <http://www.rcnradio.com/noticias/gobierno-presenta-licitacion-para-construir-red-de-fibra-optica/17-05-11#ixzz1NQtvxYGx>
- [9] Despliegue de la red FTTH de Orange, J. Gómez, 24 de mayo del 2011. Grupo ADSL ZONE
- [10] Cuatro empresas aspiran a poner en marcha la Fibra Óptica al hogar, HOY. es, Mérida 25/Mayo/2011.
- [11] Amplía Telmex red de Fibra Óptica para acelerar internet, la crónica (negocios) Cecilia Higuera y Agencias 20/Mayo/2011.
- [12] CiberP@ís CONSUMO. El contador doméstico inteligente se implantará en cinco años. LLUÍS ALONSO - Barcelona - 05/05/2011
- [13] [http://www.ure.es/plcure/plc/pdf/restricciones\\_en\\_japon.pdf](http://www.ure.es/plcure/plc/pdf/restricciones_en_japon.pdf)
- [14] <http://www.qc.ee.es.osaka-u.ac.jp/~kitagawa/plc/plc-jpn.html>, Prof. Masahiro Kitagawa, Ph.D., Escuela de Graduados en Ciencias de la Ingeniería, la Universidad de Osaka 1-3 Machikaneyama-cho, Toyonaka, Osaka, Japón 560-8531
- [15] <http://www.ure.es/>
- [16] Haild Hrasnica; Abdelfatteh Haidine; Ralph Lehnert, **Broadband Power Line Communications, Network Design**, Editorial Wiley 2004
- [17] Cisco Systems, Inc, **Guía del primer año CCNA° 1 y 2** Tercera edición, Academia de Networking de Cisco System.
- [18] <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.652/es>
- [19] <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.655/es>
- [20] [http://www.homeplug.org/tech/homeplug\\_gp](http://www.homeplug.org/tech/homeplug_gp)



# Apéndice A

Especificaciones técnicas del equipo utilizado.

| Cliente         | Marca y Modelo                 | Tipo de tarjeta                             | Procesador                                 | Memoria RAM | S.O.                    |
|-----------------|--------------------------------|---|--|-------------|-------------------------|
| 3               | Mini Laptop Dell Inspiron 1012 | Realtek PCIe FE Family Controller           | Intel® Atom (TM) CPU N450 @ 1.66 GHz       | 0.99 GB     | Windows XP Home Edition |
| 4               | Mini Laptop Dell Inspiron 1012 | Realtek PCIe FE Family Controller           | Intel® Atom (TM) CPU N450 @ 1.66 GHz       | 0.99 GB     | Windows XP Home Edition |
| 5               | Mini Laptop HP 110-3000        | Realtek PCIe FE Family Controller           | Intel® Atom (TM) CPU N450 @ 1.66 GHz       | 1 GB        | Windows 7 Starter       |
| 6               | HP Pavilion dv4 Notebook PC    | Realtek PCIe FE Family Controller           | Celeron (®) Dual Core CPU T3100 @ 1.90 GHz | 2 GB        | Windows 7 Home Premium  |
| 7               | HP Pavilion dv2625la Notebook  | Marvell Yukon 88E8039 PCIe FE Controller    | Intel® Core (TM) Duo CPU T5250 @ 1.5 GHz   | 1.99 GB     | Windows XP Profesional  |
| 8               | Mini Laptop HP 110-1117        | Atheros AR8132 PCIe FE Controller           | Intel® Atom (TM) CPU N270 @ 1.60 GHz       | 0.99 GB     | Windows XP Profesional  |
| 9               | Acer Aspire 2930               | Realtek PCIe GBE Family Controller          | Intel® Core (TM) Duo CPU T5800 @ 2 GHz     | 4 GB        | Windows Vista           |
| 10              | PC de escritorio armada        | Realtek RTL8168D (P) 8111D (P) PCIe GBE NIC | Intel® Core (TM) 2 Duo CPU E8400 @ 3 GHz   | 2.96 GB     | Windows XP Profesional  |
| <b>SERVIDOR</b> | HP compaq nc6220               | Broadcom NetXtreme Gigabit Ethernet         | Intel® Pentium®M processor @ 1.60 GHz      | 0.99 GB     | Windows XP Profesional  |

**IMPLEMENTACIÓN, ANÁLISIS Y COMPARACIÓN EXPERIMENTAL DEL DESEMPEÑO DE REDES DE FIBRA ÓPTICA, PAR TRENZADO Y PLC.**

---

| Switch | Marca y modelo          | Descripción  |
|--------|-------------------------|--|
| 1      | TL-SL2210WEB<br>TP LINK | Cuenta con 8 puertos RJ45 UTP/STP a 10/100Mbps y 1 a 10/100/1000Mbps y 1 ranura de expansión SF, administrado por WEB. |
| 2      | TL-SG2216WEB<br>TP LINK | Cuenta con 16 puertos RJ45 UTP/STP a 10/100/1000Mbps y 2 ranura de expansión SF, administrado por WEB.                 |



| SFP | Marca y modelo    | Descripción   |
|-----|-------------------|---|
| 2   | TL-SM321B TP LINK | Soporta tecnología bidireccional WDM, estándar 1000Base- BX, transmisión por una sola hebra de fibra, con una longitud de onda distinta en cada dirección. Longitud del cable de Fibra Óptica de 10 km. |



| PLC | Marca y modelo                                    | Descripción   |
|-----|---|---|
| 2   | Corinex AV200<br>Powerline Ethernet<br>Wall Mount | Velocidad de transmisión de hasta 200 Mbps, interface de 10/100BaseT Fast Ethernet, Powerline, rango de alcance 2 – 34 MHz y un consumo de energía de 5W. |

