

---

# *Simulador y analizador de la degradación del servicio de ADSL sobre la red de telefonía.*

---

Maldonado Cabrera, Enzo Sebastián  
Zingale, Guillermo Daniel

Directora: Mag. Mónica Liberatori  
Codirector: Dr. Gustavo Javier Meschino

**Ingeniería Electrónica**  
**Facultad de Ingeniería – UNMDP**  
**2019**

---

## Resumen

---

En este trabajo, se realiza un análisis y simulación de una red de acceso ADSL sobre un par trenzado de cobre, propio de las líneas telefónicas, para facilitar el análisis del comportamiento de dichos bucles a los diferentes cambios de calibre de cable, largos de línea y condiciones de funcionamiento, teniendo en cuenta las diferentes fuentes de ruido e interferencias que pueden afectarla.

Inicialmente, se analiza y explica la red de acceso completa, exponiendo todos los elementos que la componen, desde la Oficina Central hasta el domicilio del cliente. Se aborda el análisis desde el comportamiento del lazo como medio de transmisión con parámetros distribuidos y cómo los mismos afectan la respuesta en frecuencia del enlace.

Luego se analizan las diferentes versiones de la familia xDSL sobre el par telefónico y, más específicamente, el servicio de ADSL en sus diversas versiones ADSL, ADSL2 y ADSL2+. También se explican los diferentes tipos de ruido e interferencia que afectan su funcionamiento para luego poder incorporarlos en el modelo final.

En la simulación, se realiza la conformación completa de la señal a transmitir, incluyendo la generación de Código de Redundancia Cíclica (CRC, *Cyclic Redundancy Check*), Entremezclado (*Scrambler*), Mecanismo de Corrección de Errores (FEC, *Forward Error Correction*), Entrelazado (*Interleaved*) y, por último, la Modulación por Tono Discreto (DMT, *Discreet Multitone Modulation*).

Para conformar la respuesta del canal, se tuvo en cuenta la Recomendación UIT-T G.996.1 que describe los procedimientos de prueba relativos a la Línea de Abonado Digital (DSL, *Digital Line Subscriber*).

Por medio de este análisis, se puede entender y simular el comportamiento del servicio de la Línea de Abonado Digital Asimétrica (ADSL, *Asymmetric Digital Subscriber Line*) y comprender cómo y en qué medida el servicio se ve afectado por las señales interferentes.

---

## Nomenclatura

---

- HDSL / HDSL2 - *High-bit-rate* DSL. HDSL opera a 1,544 Mbps que es la velocidad del primer nivel de la jerarquía digital sincrónica T1 en los Estados Unidos, y a 2,048 Mbps que es la velocidad de operación en el resto del mundo. El sistema HDSL original a 1,544 Mbps utilizaba dos pares de cobre y se extendía hasta 4.5 km HDSL de 2,048 Mbps en cambio necesitaba 3 pares de hilos para la misma distancia.
- SDSL - *Symmetric (o single pair)* DSL. Utiliza sólo un par de hilos, pero tiene su tope de distancia en 3 km en sus especificaciones de diseño. Las velocidades son las mismas de HDSL llegando a 768 kbps por par de hilos. La necesidad de soportar velocidades simétricas es el factor limitante en cuanto a la distancia.
- ADSL - *Asymmetric* DSL. Aprovecha la naturaleza asimétrica de muchos de los servicios de banda ancha y a la vez amplía las distancias a la que puede operar el sistema hasta los 5,5 km en su versión ADSL2+.
- RADSL – *Rate Adaptive* DSL. Al utilizar modulación DMT (ADSL también la utiliza) el sistema puede adaptarse a cambios en las condiciones de la línea y ajustar las velocidades por separado para maximizar el rendimiento de cada línea individualmente.
- CDSL - *Consumer* DSL. Con este esquema no hay que lidiar con dispositivos tales como filtros de tipo divisores (*splitters*) ni su cableado. La función de estos filtros es la de permitir la utilización de teléfonos y faxes al mismo tiempo. Estos filtros son necesarios para el correcto funcionamiento de ADSL y RADSL.
- IDSL - ISDN DSL (DSL de la Red Digital de Servicios Integrados, RDSI). Esta variante toma el acceso básico (BRI, *Basic Rate Interface*) de la RDSI, compuesto por los canales 2B+D, que opera a 144 kbps (2 canales de portadora o canales B de 64 kbps cada uno y un canal de datos o canal D a 16 kbps), y lo desvía del conmutador de voz de la Red de Telefonía Conmutada (RTC) para dirigirlos

desde allí a los equipos xDSL IDSL también funciona sobre un par de hilos y alcanza una distancia de 5,5 km.

- VDSL – DSL de Alta - Muy Alta Velocidad (*Very High-Speed DSL*). Este esquema alcanza las mayores velocidades posibles, pero con un alcance sólo entre 300 y 1300 metros sobre un par trenzado de cobre. El sistema VDSL espera encontrar una red de fibra en ese punto, y también tiene proyectado transportar celdas Modo de Transferencia Asíncrono (ATM, *Asynchronous Transfer Mode*).
- FTTH – Fibra a la casa (*Fiber To The Home*). Es una tecnología de la familia FTTx consistente en el despliegue de fibra óptica y sistemas de distribución ópticos hasta el domicilio del usuario para el transporte de servicios Triple Play (Internet, telefonía IP y televisión).
- FTTN – Fibra al Nodo (*Fiber To The Node*). La fibra no llega hasta el domicilio del usuario final, sino hasta un punto de la red de acceso, generalmente un armario o caja terminal, llegando al domicilio por medio de una red de cobre.
- POTS - (*Plain Old Telephone Service*) Se trata del “servicio telefónico ordinario” conocido también como “servicio telefónico tradicional” o “telefonía básica”.
- ATU-R - ADSL *Terminal Unit-Remote*. Corresponde al módem en el domicilio del cliente.
- ATU-C - ADSL *Terminal Unit-Central*. Corresponde al DSLAM ubicado en la Central Telefónica.

## Contenido

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>RED DE TELEFONÍA CONMUTADA.....</b>	<b>11</b>
2.1	DESCRIPCIÓN .....	11
2.2	BUCLE DE ABONADO .....	12
2.3	CENTRAL TELEFÓNICA.....	13
2.3.1	<i>Función de Control.....</i>	15
2.3.2	<i>Función de señalización con los terminales de los clientes.....</i>	15
2.3.3	<i>Función de señalización entre centrales.....</i>	15
2.3.4	<i>Función de sincronización.....</i>	15
2.3.5	<i>Función de explotación.....</i>	15
2.4	REPARTIDOR GENERAL.....	16
2.4.1	<i>Canalizaciones y cámaras de registro.....</i>	17
2.4.2	<i>Túnel de cables.....</i>	18
2.5	PLANTA EXTERNA.....	19
2.5.1	<i>Ramales Subterráneos y Cables.....</i>	19
2.5.2	<i>Armarios de Distribución y Ramales Aéreos.....</i>	25
2.5.3	<i>Cajas de Distribución.....</i>	26
<b>3</b>	<b>SERVICIO ADSL.....</b>	<b>27</b>
3.1	DESCRIPCIÓN.....	27
3.2	FAMILIAS XDSL.....	30
3.3	LIMITACIONES EN EL SERVICIO DE ADSL.....	34
<b>4</b>	<b>FUNCIONAMIENTO DE ADSL.....</b>	<b>40</b>
4.1	ESTRUCTURA DE UN SISTEMA ADSL.....	40
4.2	TÉCNICAS USADAS EN EL SERVICIO DE ADSL.....	41
4.2.1	<i>Características de tecnologías ADSL.....</i>	47
4.3	ESTRUCTURA DE LA TRAMA.....	50
<b>5</b>	<b>SIMULACIÓN DEL ENLACE COMPLETO DE ADSL.....</b>	<b>52</b>
5.1	INTRODUCCIÓN.....	52
5.2	TRANSMISOR DE DATOS.....	53
5.2.1	<i>Generador de señal.....</i>	53
5.2.2	<i>Multiplexado de datos.....</i>	54
5.2.3	<i>Generador de CRC.....</i>	55
5.2.4	<i>Scrambler y FEC.....</i>	55
5.2.5	<i>Interleaved.....</i>	57
5.2.6	<i>Modulador DMT.....</i>	58
5.2.7	<i>Modulación QAM.....</i>	60
5.3	MEDIO DE TRANSMISIÓN.....	61
5.3.1	<i>Parámetros primarios.....</i>	61
5.3.2	<i>Parámetros secundarios.....</i>	67
5.3.3	<i>Resumen parámetros distribuidos.....</i>	73
5.3.4	<i>Función de transferencia.....</i>	73
5.3.5	<i>Generación de ruidos e interferencias.....</i>	78
5.4	RECEPTOR DE DATOS.....	85
5.4.1	<i>Ecualización de canal.....</i>	85
5.4.2	<i>Demodulador.....</i>	86
5.4.3	<i>Multiplexado de datos.....</i>	87
5.4.4	<i>Desentrelazado y demora.....</i>	87
5.4.5	<i>Scrambler y FEC.....</i>	88
5.4.6	<i>Detector de síndrome CRC.....</i>	88

5.5	VALIDACIÓN DE DATOS.....	89
5.5.1	<i>Cálculo de Relación de Error.....</i>	89
5.5.2	<i>Cálculo de Velocidad real y Eficiencia.....</i>	90
5.6	ENTORNO GRÁFICO.....	91
5.6.1	<i>Panel de Variables.....</i>	92
5.6.2	<i>Área Gráfica.....</i>	94
5.6.3	<i>Área de resultados.....</i>	94
<b>6</b>	<b>MEDICIONES REALIZADAS.....</b>	<b>96</b>
6.1	INSTRUMENTAL UTILIZADO.....	96
6.1.1	<i>Método de medición.....</i>	97
6.1.2	<i>Mediciones obtenidas modo módem.....</i>	97
<b>7</b>	<b>PLAN DE PRUEBA.....</b>	<b>102</b>
7.1	COMPORTAMIENTO EN FRECUENCIA.....	102
7.2	SIMULACIÓN DE PARÁMETROS DE TRANSMISIÓN.....	103
<b>8</b>	<b>DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....</b>	<b>106</b>
<b>9</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>110</b>
<b>10</b>	<b>ANEXOS.....</b>	<b>111</b>
10.1	ANEXO I – ESPECIFICACIÓN DE REQUISITOS.....	111
10.1.1	<i>Historial de versiones.....</i>	111
10.1.2	<i>Introducción.....</i>	111
10.1.3	<i>Propósito.....</i>	111
10.1.4	<i>Ámbito del sistema.....</i>	112
10.1.5	<i>Definiciones, Acrónimos y Abreviaturas.....</i>	112
10.1.6	<i>Referencias.....</i>	112
10.1.7	<i>Visión General del documento.....</i>	112
10.1.8	<i>Descripción General.....</i>	113
10.2	ANEXO II- REQUERIMIENTOS DE USUARIO.....	115
10.2.1	<i>Requisitos funcionales.....</i>	115
10.2.2	<i>Requisitos de rendimiento.....</i>	118
10.2.3	<i>Restricciones de diseño.....</i>	118
10.2.4	<i>Atributos del sistema.....</i>	119
10.2.5	<i>Lista de tareas.....</i>	119
10.3	ANEXO III - ESPECIFICACIÓN FUNCIONAL.....	121
10.3.1	<i>Historial de versiones.....</i>	121
10.3.2	<i>Especificaciones funcionales.....</i>	121
10.3.3	<i>Requerimiento de interfaz.....</i>	124
10.3.4	<i>Requerimiento No Funcional.....</i>	126
10.4	.....	126
10.5	PLAN DE PRUEBAS.....	127
<b>11</b>	<b>APÉNDICE – CÓDIGOS FUENTE.....</b>	<b>130</b>
11.1	CANAL.M.....	130
11.2	CONDUCTANCIA.M.....	130
11.3	RESISTENCIA.M.....	131
11.4	INDUCTANCIA.M.....	132

## Índice de figuras

Figura 1-1-Separación de canales ADSL.....	9
Figura 2-1-Diafonía entre pares.....	12
Figura 2-2-Cable multipar.....	13
Figura 2-3-Enlaces de la red.....	14
Figura 2-4-Bastidor de bajada lado central.....	16
Figura 2-5-Horizontal.....	17
Figura 2-6-Vertical.....	17
Figura 2-7-Tunel de cables.....	18
Figura 2-8-Empalme.....	19
Figura 2-9-Distribución planta externa.....	19
Figura 2-10-Canalización subterránea.....	20
Figura 2-11-Cámara de registro.....	20
Figura 2-12-Cable tipo PAL.....	21
Figura 2-13-Circuito equivalente par telefónico.....	22
Figura 2-14-Capacitancia mutua.....	24
Figura 2-15-Armario de distribución (Pedestal).....	25
Figura 2-16-Ramal aéreo auto suspendido.....	26
Figura 2-17-Caja de distribución.....	26
Figura 2-18-Cables de acometida.....	27
Figura 3-1-Separación de bandas.....	28
Figura 3-2-Eschema de la red de distribución.....	30
Figura 3-3-Multiplexor.....	30
Figura 3-4-Fenómeno de atenuación.....	34
Figura 3-5-Atenuación en función de la frecuencia.....	35
Figura 3-6-Desadaptación por puente.....	36
Figura 3-7-Utilización de diferentes calibres.....	37
Figura 3-8-Distribución de ruido.....	37
Figura 3-9-Fuente de ruido impulsivo.....	39
Figura 4-1-Estructura sistema ADSL.....	40
Figura 4-2-Splitter.....	41
Figura 4-3-Separación de canales.....	42
Figura 4-4-Constelación 16QAM.....	43
Figura 4-5-Division del espectro en DMT.....	44
Figura 4-6-Sub-portadoras.....	45
Figura 4-7-Distribucion de bits.....	46
Figura 4-8-Adaptación de canales ADSL.....	47
Figura 4-9-Sistemas ADSL.....	47
Figura 4-10- Velocidades de Tecnologías ADSL.....	49
Figura 4-11-Bit swapping.....	50
Figura 4-12-Conformación supertrama.....	51
Figura 5-1- Bloques simulados del enlace ADSL.....	52
Figura 5-2 Generador de Bernoulli.....	53
Figura 5-3-Multiplexado de datos.....	54
Figura 5-4-Generador de CRC.....	55
Figura 5-5-Diagrama scrambler.....	56
Figura 5-6- Configuración de scrambler.....	56
Figura 5-7-Codigo Reed Solomon.....	57
Figura 5-8-Entrelazador.....	58
Figura 5-9 -Distribución de bits 14Mb.....	59

Figura 5-10 Constelación 4QAM (izq.) y 16QAM (der.) .....	60
Figura 5-11-Generación de señal.....	61
Figura 5-12-Coeficientes para el cálculo de R, L y G. ....	62
Figura 5-13-Resistencia vs Frecuencia. ....	64
Figura 5-14- Inductancia vs frecuencia.....	66
Figura 5-15-Variación de impedancia vs frecuencia.....	68
Figura 5-16-Variación de Z <sub>0</sub> vs Frecuencia.....	68
Figura 5-17- Atenuación vs frecuencia (l=1000 m).....	70
Figura 5-18- Atenuación vs frecuencia (l=3000 m).....	70
Figura 5-19- Velocidad de propagación vs frecuencia.....	72
Figura 5-20- Línea de parámetros distribuidos. ....	73
Figura 5-21-Linea de transmisión con generador ideal de largo x=l. ....	76
Figura 5-22-Linea de transmisión con generador real de largo x=l. ....	76
Figura 5-23-Función Transferencia. ....	77
Figura 5-24-Ruido impulsivo. ....	79
Figura 5-25-Ruido AM en el tiempo.....	81
Figura 5-26-Ruido AM en el espectro.....	82
Figura 5-27-Ecualizador. ....	86
Figura 5-28-Demodulador DMT.....	86
Figura 5-29-Multiplexado de datos. ....	87
Figura 5-30-Deinterleaver. ....	88
Figura 5-31-Descrambler y FEC.....	88
Figura 5-32-Detector síndrome CRC.....	89
Figura 5-33-Calculo de relación de error. ....	90
Figura 5-34-Calculo de velocidad y eficiencia. ....	91
Figura 5-35-Entorno gráfico. ....	92
Figura 5-36 Velocidades disponibles.....	92
Figura 6-1-Equipo EXFO Max Tester 630. ....	96
Figura 6-2 -Medicion ADSL.....	98
Figura 6-3- Detalle de parámetros.....	99
Figura 6-4-Estadísticas de xDSL.....	100
Figura 6-5-(a) Relación Señal/ruido (b) Bit por tono (c) Piso de ruido. ....	101
Figura 7-1-Validación margen de ruido. ....	103
Figura 7-2 Atenuación medida y simulada. ....	104
Figura 7-3 Velocidad máxima alcanzable.....	105
Figura 8-1 Tasa de mejora. ....	107
Figura 8-2-Análisis de conjunto.....	108
Figura 10-1 Propuesta de interfaz de usuario.....	125

## *Índice de tablas*

Tabla 1-Resistencia de circulación según calibre.....	22
Tabla 2-Parámetros para cables tipo seco según calibre. ....	23
Tabla 3-Parámetros para cables tipo polietileno según calibre.....	23
Tabla 4-Símbolos quat. ....	31
Tabla 5-Tecnologías DSL.....	33
Tabla 6-Codificación. ....	43
Tabla 7-Impedancia característica. ....	68
Tabla 8-Ruido impulsivo.....	80

## Introducción

---

El contexto de las telecomunicaciones de los últimos años se vio envuelto en una creciente necesidad de velocidad sobre los diferentes medios de transmisión debido a los requerimientos de los usuarios y a las nuevas tecnologías. Servicios para transporte de voz, transmisión de datos, video a demanda, aplicaciones multimedia interactiva, tales como compras online, teletrabajo, capacitación a distancia y juegos en red, entre otros, requirieron el desarrollo de nuevas técnicas y tecnologías que les brinden la factibilidad necesaria.

En su momento, este desarrollo se implementó de modo de aprovechar al máximo las inversiones hechas en las redes de cobre ya desplegadas durante décadas para el servicio de telefonía básica (POTS), servicio que llega a gran parte de la población y cuyo ancho de banda no estaba totalmente aprovechado.

Por otra parte, el reemplazo de dicha red o la transición a otros medios de acceso, tales como FTTH o FTTN, no es posible en su totalidad o se tornan inviables a corto plazo.

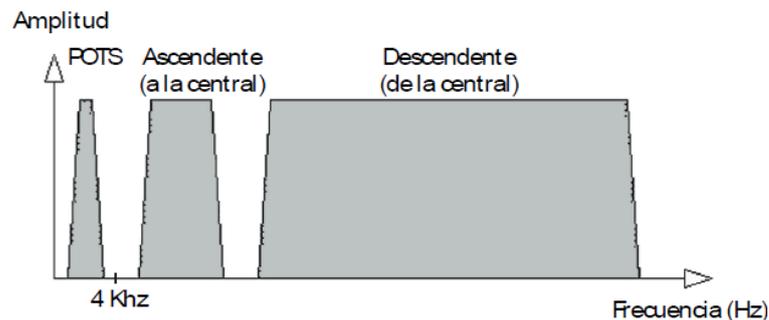
En este contexto surgió la tecnología ADSL con el propósito de cubrir estas nuevas necesidades de los clientes, abaratando los costos de implementación y superando las limitaciones descriptas. Su desarrollo fue y sigue siendo un reto por la limitación del ancho de banda del medio de transmisión, interferencias electromagnéticas a las que se ve expuesta la red, así como las diferentes clases de ruido que la afectan.

La tecnología ADSL es un tipo servicio basado en un esquema de comunicaciones que permite establecer dos canales entre un equipo en casa del cliente (módem, modulador-demodulador) y un equipo multiplexor del lado de la central de telefonía (DSLAM, *Digital Subscriber Line Access Multiplexer*). La particularidad de este servicio es que trabaja en una banda de frecuencia separada de la banda voz, permitiendo que ambos servicios, voz y datos, coexistan, pudiéndose brindar al mismo tiempo. A su vez, el canal de datos se divide en dos canales, uno de SUBIDA y otro de BAJADA de datos, con velocidades diferentes (MÁX. 1 Mbps y MÁX. 25 Mbps respectivamente), de ahí el nombre de asimétrico.

Para lograr las velocidades mencionadas el servicio trabaja en un rango de frecuencias que se extiende desde 25 kHz hasta 2.2 MHz.

El canal de alta velocidad transmite datos desde la central hasta el abonado (descendente o *downstream*). El otro canal, mucho más lento, transporta datos en dirección contraria (ascendente o *upstream*). Tanto el canal de alta velocidad descendente como el de menor velocidad ascendente, transportan información digital. La transmisión sobre ambos canales se realiza de manera simultánea, sin que haya solapamiento entre ellos, ni con el servicio telefónico existente para voz, sobre el par de cobre.

Así, el servicio ADSL presenta la importante ventaja de permitir el multiplexado por división en frecuencia (FDM, *Frequency Division Multiplexing*) de la información digital en la parte superior del espectro del canal convencional de voz analógica como se muestra en la Fig. 1.1.



**Figura 1-1-Separación de canales ADSL.**  
Fuente: Telefónica S.A. (2012). [Gráfico]. "ADSL avanzado Tomo I".

La calidad del servicio se ve afectada por una serie de factores tales como la atenuación del canal, los ruidos e interferencias, las reflexiones, tomas en puente o "dobles", etc. La atenuación del medio depende del calibre del cable, largo del mismo y varía con la frecuencia de la señal transmitida. La señal sufre distintas pérdidas según su frecuencia, por lo que un pulso transmitido desde la Central llega al otro extremo con una amplitud mucho menor.

El canal se encuentra contaminado por ruido de naturaleza aleatoria que se puede modelar como Ruido Blanco Gaussiano Aditivo (AWGN, *Additive White Gaussian Noise*) de nivel constante con componentes en todo el espectro, lo cual se

traduce en un Espectro de Densidad de Potencia (PSD, *Power Spectral Density*) plano.

Las interferencias que sufre el canal sobre las redes de acceso son interferencias de radiofrecuencia (RFI, *Radio Frequency Interference*) que pueden ser transmisiones de onda larga (LW, *Long Wave*), onda media (MW, *Medium Wave*) y amplitud modulada (AM, *Amplitude Modulation*).

Por otra parte, también puede presentarse ruido impulsivo, caracterizado por grandes amplitudes por sobre el nivel medio de la señal y una separación importante entre impulsos en comparación con la duración de los mismos. Estos, se pueden deber a fenómenos de naturaleza impulsiva tales como la caída de rayos o la presencia cercana de motores a inducción.

A su vez, las reflexiones pueden presentarse por cambio en el diámetro del cable ya que un bucle de abonado puede estar construido con cables de diferente calibre, uno más delgado cerca de la central y otro más grueso cerca de la instalación del abonado. Esta disparidad origina reflexión y afecta el desempeño de los módem. Las tomas en puente también pueden provocar reflexiones. Estas, se tratan de derivaciones de los pares telefónicos que se presentan generalmente en más de una caja terminal, con el fin de flexibilizar la red.

El propósito de este trabajo es mantener la calidad del servicio. Con este objetivo, se realiza un análisis de todos los factores que afectan el servicio de ADSL, con el fin de determinar las principales causas de la degradación y contar con una herramienta de diagnóstico para realizar tareas de mantenimiento preventivo en la planta externa. Para ello se propone la realización de un simulador de la transmisión ADSL, que permita mejorar las decisiones de gestión del área comercial y del sector técnico. Este permitirá cambiar las condiciones de transmisión y evaluar cómo se comportaría el enlace ante cambios de velocidad de transmisión, ingreso de interferencias, desacoples, etc.

---

## 2 Red de Telefonía Conmutada

---

### 2.1 Descripción

---

Para realizar el análisis del comportamiento del sistema y emprender el desarrollo de soluciones para los problemas que lo afectan, se trabajó con una muestra de clientes de la Empresa según la topología que ocupaban en la red, es decir, se los distinguió por su pertenencia a la red flexible o rígida, teniendo en consideración el largo del bucle de abonado y la velocidad contratada; en este punto se analizó una muestra de clientes con una velocidad de 3.5 a 14 Mbps.

La red rígida se caracteriza por llevar directamente el cable primario hacia la zona que se desea cubrir con la red, llegando hasta las diferentes cajas terminales. Por el contrario, las redes flexibles poseen elementos de red intermedios llamados armarios, a los que llega un cable primario (pueden ser más en algunos casos) y se deriva en diferentes cables secundarios alimentando las diferentes cajas terminales ubicadas en los postes.

Cabe destacar que se define como bucle de abonado al par telefónico que recorre la distancia entre la Central de Telefonía local y el domicilio del cliente.

Para emular la línea ideal, se tomaron como parámetros el largo del bucle y la velocidad contratada para verificar cuales serían los valores ideales de funcionamiento.

Por otra parte, se realizaron mediciones diarias de Relación Señal a Ruido (SNR, *Signal-to-Noise Ratio*) y factor de atenuación en los canales de subida y de bajada, los cuales se ven afectados por diferentes señales de ruidos e interferencias antes mencionados, que contribuyen a la degradación del canal.

Luego se comparó el comportamiento real representado por las mediciones mencionadas con respecto al ideal simulado. Se verificó la evolución de los parámetros medidos de la línea del cliente pudiéndose fijar criterios para determinar la necesidad de mantenimiento preventivo.

Antes de exponer el desarrollo del trabajo realizado, describiremos la red de comunicaciones sobre la cual se pretende trabajar.

## 2.2 Bucle de Abonado

El bucle de abonado es la red que interconecta la Central Telefónica con el domicilio del cliente. Es la única instalación necesaria por parte de las empresas prestadoras para brindar servicio de datos y servicio de voz desde el punto de vista del medio de transmisión, sin tener en cuenta los equipos adicionales (*módems, DSLAM, splitters, etc.*). Dicho bucle es la razón principal de la distorsión por atenuación y por fase.

El bucle de abonado, también conocido como lazo local, es una línea metálica de transmisión. Se trata de un par de cobre formado por dos conductores aislados y trenzados. Los pares de conductores se trenzan entre sí, y los pares adyacentes de hilos dentro de una unidad se trenzan con distintos pasos o longitudes de trenzado. El objetivo del uso de la técnica de trenzado es reducir los efectos perjudiciales del acoplamiento inductivo entre pares; así se alivia el problema de la diafonía, el cual consiste en el acoplamiento electromagnético entre dos pares adyacentes que hace que parte de la señal transmitida por uno de ellos se induzca en el otro tanto hacia el transmisor (NEXT – *Near End Crosstalk*) como hacia el receptor (FEXT – *Far End Crosstalk*), como se puede ver en la Fig. 2.1.

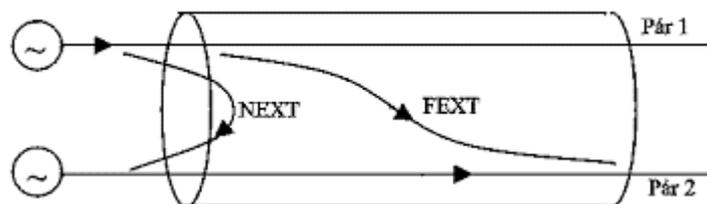


Figura 2-1-Diafonía entre pares.

Fuente: Starr T. (2002). DSL Advances [Figura]. Recuperado de <https://flylib.com/books/en/3.206.1.79/1/>

Las unidades se unen entre sí en núcleos y se colocan dentro de una vaina plástica conocida como cable multipar, ilustrado en la Fig. 2.2. Dependiendo del material aislante que se use, el cable multipar puede contener hasta 1200 pares de conductores.



**Figura 2-2-Cable multipar.**

Fuente: Dueñas Fernandez J. L. (2014). [Figura]. Recuperado de <http://modulotelefonía.blogspot.com/2014/01/>

Las características de transmisión de un par de cable dependen del diámetro del conductor, su espaciado, la constante dieléctrica del aislante y la conductividad del alambre. Esas propiedades físicas determinan la inductancia, resistencia, capacitancia y conductancia de la línea. De este modo, las características eléctricas de un cable se distribuyen uniformemente por su longitud, pudiéndose estudiar su comportamiento por medio de un modelo conocido como modelo de parámetros distribuidos, cuyo detalle se analiza más adelante.

La cantidad de atenuación y el retardo de fase que sufre una señal al propagarse por una línea es función no sólo de las características eléctricas del par, sino también de la frecuencia de la señal. En cualquier caso, el cable actúa como filtro pasabajos para la señal.

### **2.3 Central telefónica**

---

La primera comunicación telefónica en la Argentina tuvo lugar en Buenos Aires, en el año 1878, tratándose de un experimento público, desarrollado por dos ingenieros argentinos. Ya a principios de 1881, mediante decretos firmados por el presidente Argentino Roca, se les otorgó el permiso oficial a tres empresas para que brindaran el servicio. Los terminales de voz se conectaban entre sí a través de una

conmutación manual, por medio de operadores humanos. Con el tiempo, el sistema de conmutación evolucionó incorporando el uso de lámparas de vacío que accionaban relays mecánicos para poder desviar y conmutar las llamadas. La conmutación automática comenzó a regir en 1913, en la ciudad de Córdoba y 1915, en la ciudad de Rosario, solo para llamadas urbanas.

En la década de los 70, con el avance de la electrónica, se impulsa la industria de la telefonía. En pocos años el parque de centrales queda obsoleto ante una tecnología de menor costo y mayor eficiencia energética con la aparición de circuitos integrados, y una mejora continua en los diseños.

A partir del año 1990, junto con la privatización de la empresa ENTEL comienza el proceso de digitalización de la red finalizando en el año 1998.

Actualmente los clientes se conectan a sistemas de conmutación llamados nodos o centrales, que se encuentran unidas entre sí por conexiones permanentes, conocidas como enlaces. Como se muestra en la Fig. 2.3, las centrales telefónicas se conectan entre sí por medio de enlaces, que en este caso son de fibra óptica.

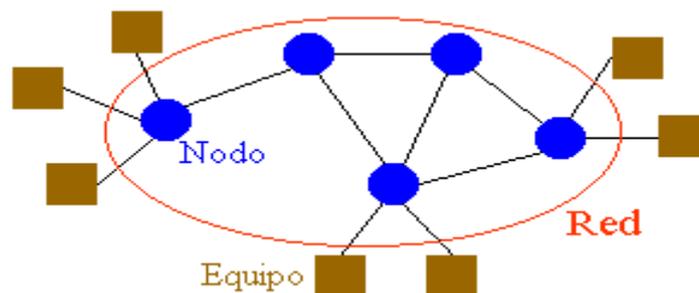


Figura 2-3-Enlaces de la red.  
Fuente: Telefónica S.A. [2012]. Red de conmutación. [Figura]. Manual Telefonía Básica.

A través de las centrales de conmutación es posible suministrar vías de comunicación entre todos los clientes de una determinada central con otros clientes de otra central, a través de los enlaces que las unen.

Los sistemas de conmutación cumplen varias funciones: de control, de señalización con los terminales de los clientes, de señalización entre centrales, de sincronización y de explotación. A continuación, se explican la finalidad de cada una.

### 2.3.1 Función de Control.

---

Como su nombre lo indica, se encarga de controlar los sistemas que establecen y liberan las conexiones. Los elementos de procesamiento reciben la información de las diferentes fuentes, por ejemplo, petición de tono, marcado y finalizar. Con dicha información controlan la red de conmutación, fundamentalmente estableciendo los enlaces y liberándolos al concluir las comunicaciones.

### 2.3.2 Función de señalización con los terminales de los clientes.

---

Se trata de intercambiar un conjunto de señales con el fin de establecer un diálogo con el terminal del cliente. Esto permite detectar que un cliente desea establecer una llamada, avisarle que tiene una llamada entrante, indicarle que puede marcar, informar al terminal llamado los datos del llamante cuando se ofrece el servicio de identificación de llamado (*caller id*), etc.

### 2.3.3 Función de señalización entre centrales.

---

Se establece de modo tal que dos o más centrales de conmutación cooperen en el establecimiento de una comunicación entre dos o más terminales conectados en centrales diferentes.

### 2.3.4 Función de sincronización.

---

Las centrales digitales requieren estar sincronizadas entre sí, es decir, que todas las centrales de la red deben trabajar con una señal de reloj idéntica. Para lograrlo, las centrales digitales utilizan relojes internos y referencias externas.

### 2.3.5 Función de explotación.

---

Los sistemas de conmutación deben soportar las funciones de operación, conservación, administración y tarifación, de tal modo que permitan una explotación racional y económica de la red. En este sentido, fundamentalmente se requiere alta confiabilidad y automatización.

## 2.4 Repartidor General.

Los cables provenientes de los equipos de conmutación llegan al Repartidor General, conocido como MDF (*Main Distribution Frame*) a bloques de conexión llamados bloques horizontales a través de bastidores como se ve en la Fig. 2.4. Cada cliente tiene asignada una coordenada (numérica o alfa-numérica) que le asigna una posición en la regleta. La regleta es el punto de interconexión (borneras) entre el DSLAM y la planta externa. En este punto termina la central y comienza la red de distribución que sale hacia los clientes.



Figura 2-4-Bastidor de bajada lado central.  
Fuente propia.

Estos cables en el lado del horizontal (lado de la central) se conectan con el lado vertical a través de puentes o “cruzadas”, que consisten en unir una posición de una regleta horizontal con una regleta del lado vertical por medio de cables conductores. El lado horizontal y vertical se puede ver en las Fig. 2.5 y Fig. 2.6 respectivamente.

En el lado vertical se disponen las regletas donde empiezan los cables multipares que luego de salir de la central, hasta las cámaras por el túnel de cables, se van distribuyendo en la planta externa hasta los armarios y cajas terminales.



Figura 2-5-Horizontal.  
Fuente propia.



Figura 2-6-Vertical.  
Fuente propia.

#### 2.4.1 Canalizaciones y cámaras de registro.

Los cables individuales que llegan de los clientes hasta la central se agrupan en centenas, para luego volver a agruparse en el túnel de cables, generalmente ubicado en el Repartidor General. Así se conforma el denominado cable primario.

#### 2.4.2 Túnel de cables.

Generalmente el túnel de cable se halla ubicado en el sótano de la central o en la planta baja como se puede ver en la Fig. 2.7, debajo del repartidor general. En las centrales de baja capacidad se encuentra al costado del repartidor. Consta de soportes diseñados de tal forma que permiten el acceso a todos los cables y empalmes para su colocación y mantenimiento. El cable primario recibe en el túnel de cables la inyección de un flujo de aire seco a presión (presurización), con diversos objetivos, por ejemplo, evitar el ingreso de agua a los cables en caso de presentar éstos una avería en su cubierta.



**Figura 2-7-Túnel de cables.**  
Fuente propia.

El cable sale de la central telefónica por medio de ductos, dependiendo de la zona que se desea alimentar, el cable se distribuye de manera subterránea desde unos pocos metros hasta varios kilómetros. Durante el trayecto, hay cámaras de registro separadas aproximadamente cada 200 metros que posibilitan la localización y reparación de averías. La primera cámara está ubicada en la salida de la oficina central, donde fluyen todos los cables que dependen de esa central. A partir de allí, los cables toman distintos recorridos abarcando toda el área de alimentación de la central. Por otra parte, la distribución puede ser también aérea.

Como los cables pueden tener derivaciones o simplemente prolongar su longitud para lograr mayor distancia de cobertura, es necesario realizar un empalme como se muestra en la Fig. 2.8.

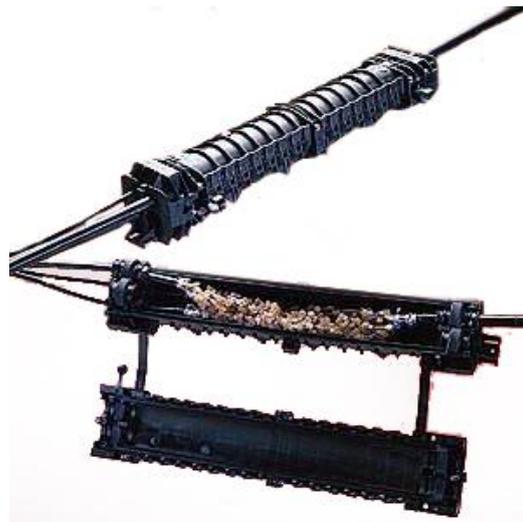


Figura 2-8-Empalme.

Fuente: Kross-Kontakt. T2C. [Figura]. Recuperado de <http://kross-kontakt.ru/proizvoditeli/te-connectivity>

La finalización del recorrido de este tipo de cables (alimentación) tiene lugar en los armarios de interconexión o en cajas terminales, dependiendo esto del tipo de red de que se trate (rígida o flexible).

## 2.5 Planta externa.

### 2.5.1 Ramales Subterráneos y Cables.

Varios elementos conforman la planta externa, distinguiéndose entre ramales subterráneos y cables aéreos, como se muestra en la Fig. 2.9.

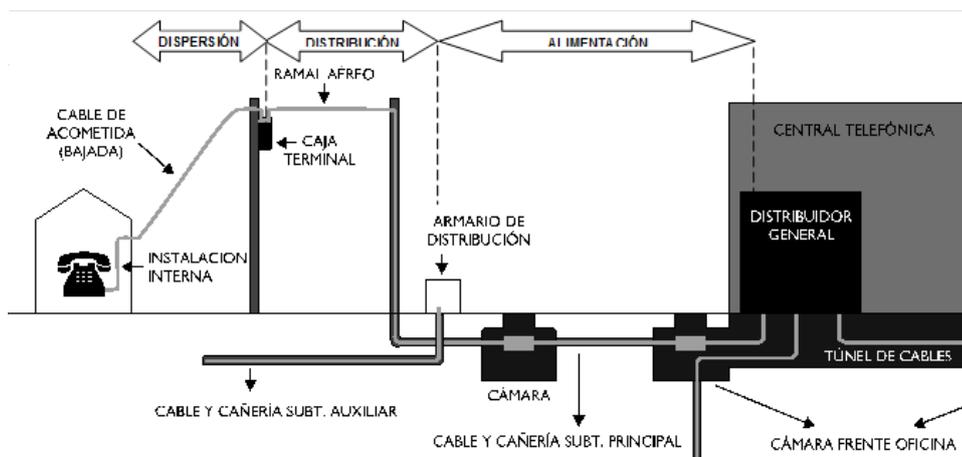


Figura 2-9-Distribución planta externa.

Fuente: TelefónicaS.A. [2012]. Red telefónica. [Figura]. Manual Telefonía Básica (parte 1).

Los ramales subterráneos principales son los que transportan los cables de gran capacidad desde la central hasta el comienzo de la red de distribución, llegando a los armarios. Son muy utilizados en las áreas urbanas, porque permiten tender nuevos cables e incluso retirar cables viejos sin necesidad de realizar costosas obras de excavación y reconstrucción de veredas y calles debido a la canalización de los mismos por medio de tuberías y cámaras de registro.

La canalización propiamente dicha, se construye disponiendo una serie de tubos, generalmente de plástico, y rellenando todo el espacio entre ellos con hormigón. Por dentro de dichos tubos van los cables multipares. En las Fig. 2.10 y Fig. 2.11 se puede observar la canalización y las cámaras subterráneas de registro respectivamente que se utilizan para alojar los empalmes necesarios, disponer de puntos de ramificación de la red y tener un punto de acceso para pruebas y conservación.



Figura 2-10-Canalización subterránea. Figura 2-11-Cámara de registro.

Fuente Figura 2.10: CORIEM Corporación Ingeniería Electromecánica Industrial. [2011]. Canalización. [Foto]. Recuperado de <http://www.coriem.com/index.php?page=237>. Fuente Figura 2.11: Telefónica S.A. [2012]. [Figura]. Manual Telefonía Básica (parte 1).

A su vez, los cables subterráneos que provienen del túnel, a través de las cámaras son distribuidos en los ramales aéreos o de manzana, en la llamada red de distribución.

Toda línea telefónica del bucle de abonado está constituida por un circuito de dos cables o hilos "A" y "B" al que se denomina par, que une el aparato telefónico del cliente con la central. En la Fig. 2.12 se ve como los cables de varios abonados

se agrupan de a 2 o de a 4 y se aíslan entre sí por una envoltura de papel o plástico. Los cables individuales tienen, a su vez, una cubierta de plomo o plástico.

La capacidad de pares que encierra cada cable varía según las aplicaciones. En el tendido aéreo cada uno contiene de 6 a 400 pares, y en el subterráneo, de 400 a 3.000 pares.

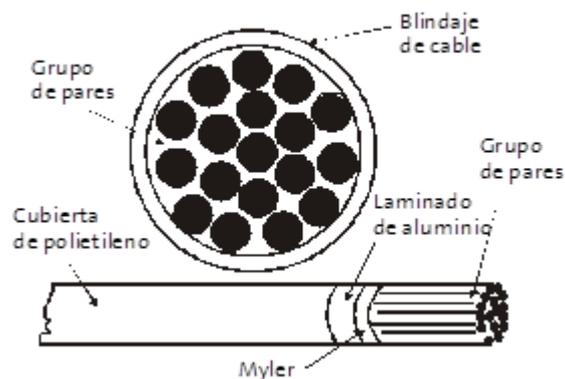


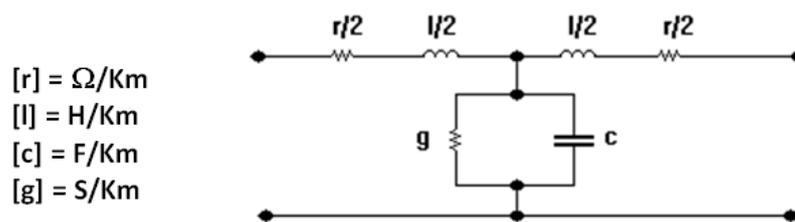
Figura 2-12-Cable tipo PAL.

Fuente: Telefónica S.A. [2012]. [Figura]. Manual Telefonía Básica (parte 1).

Los parámetros primarios del cable se relacionan con las características eléctricas de una línea de transmisión metálica. También dependen de sus características constructivas en cuanto a los materiales utilizados y al calibre. Su comportamiento es variable según la frecuencia de las señales que viajan en la línea.

Los parámetros eléctricos pueden clasificarse en longitudinales y transversales. Los parámetros longitudinales son la resistencia de bucle por unidad de longitud ( $R$ ) y la inductancia por unidad de longitud ( $L$ ). Los parámetros transversales comprenden la capacitancia mutua por unidad de longitud ( $C$ ) y la conductancia mutua por unidad de longitud ( $G$ ).

Cuando la línea es homogénea, se puede considerar que está formada por dos conductores, a lo largo de los cuales están uniformemente distribuidos los parámetros primarios. Se trata del modelo de parámetros distribuidos mencionados previamente. De esta forma se puede generar un circuito eléctrico equivalente como se presenta en la Fig. 2.13, que representa las características propias del par telefónico.



$$\begin{aligned} [r] &= \Omega/\text{Km} \\ [l] &= \text{H}/\text{Km} \\ [c] &= \text{F}/\text{Km} \\ [g] &= \text{S}/\text{Km} \end{aligned}$$

Figura 2-13-Circuito equivalente por telefónico.

Fuente: Telefónica S.A. [2012]. Modelo de parámetros distribuidos. [Figura]. Manual Telefonía Básica (parte 2).

Los cables telefónicos más utilizados tienen un diámetro de entre 0,40 mm y 0,50 mm, aunque en determinados sectores podemos encontrar cables de 0,65 mm y 0,90 mm. La resistencia por unidad de longitud, expresada en ohms por kilómetro, para los diámetros mencionados se presenta en la siguiente Tabla 1.

Calibre	$\Omega/\text{Km}$
0,40 mm	143 $\Omega/\text{km}$
0,50 mm	91,4 $\Omega/\text{km}$
0,65 mm	54,5 $\Omega/\text{km}$

Tabla 1-Resistencia de circulación según calibre.

Fuente propia.

Los valores mostrados corresponden a valores sobre cables de cobre a 20° C de temperatura. Es oportuno aclarar que estos valores de resistencia varían con la temperatura. Teniendo en cuenta estos factores, la fórmula utilizada para obtener la resistencia específica es:

$$R = \frac{\rho L}{S} \quad [R] = \Omega \quad (1)$$

donde  $\rho$  representa la resistividad de los materiales que, en el caso del cobre estándar recocido a 20° C es  $\rho = 0.017241 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ .  $L$  es la longitud del alambre (expresada en metros).  $S$  es la sección del alambre expresada en milímetros cuadrados.

Existe otro parámetro, denominado *resistencia de aislación*, que es la resistencia que ofrece el dieléctrico al pasaje de una corriente eléctrica entre un conductor y otro. La resistencia de aislación puede ser medida entre el conductor "A" y el conductor "B", o entre el conductor "A" o "B" y tierra. De acuerdo a las normas

establecidas, se requiere una resistencia de aislación  $> 20.000 \text{ M}\Omega/\text{km}$  para cables de tipo seco con aislación de polietileno. Esta medida rige para la aceptación de cables sin carga. En la Tabla 2 se reflejan los valores de resistencia de aislación, de acuerdo con la sección o calibre del alambre, y la capacidad requerida por las empresas prestadoras para cables de tipo seco con aislación de polietileno en sus conductores.

Calibre	Resistencia de aislación	Capacidad
0,40 mm	$> 20.000 \text{ M}\Omega/\text{km}$	$50 \pm 2 \text{ nF}/\text{km}$
0,50 mm	$> 20.000 \text{ M}\Omega/\text{km}$	$50 \pm 2 \text{ nF}/\text{km}$
0,65 mm	$> 20.000 \text{ M}\Omega/\text{km}$	$50 \pm 2 \text{ nF}/\text{km}$
0,90 mm	$> 20.000 \text{ M}\Omega/\text{km}$	$50 \pm 2 \text{ nF}/\text{km}$

Tabla 2-Parámetros para cables tipo seco según calibre.  
Fuente propia.

En la Tabla 3 se presentan los valores de resistencia de aislación y capacidad correspondientes a cables de tipo relleno con aislación de polietileno en sus conductores:

Calibre	Resistencia de Aislación	Capacidad
0,40 mm	$> 16.000 \text{ M}\Omega/\text{km}$	$50 \pm 2 \text{ nF}/\text{km}$
0,50 mm	$> 16.000 \text{ M}\Omega/\text{km}$	$50 \pm 2 \text{ nF}/\text{km}$
0,65 mm	$> 16.000 \text{ M}\Omega/\text{km}$	$50 \pm 2 \text{ nF}/\text{km}$
0,90 mm	$> 16.000 \text{ M}\Omega/\text{km}$	$50 \pm 2 \text{ nF}/\text{km}$

Tabla 3-Parámetros para cables tipo polietileno según calibre.  
Fuente propia.

La conductancia  $G$  de un material es la recíproca de la resistencia y se mide en unidades Mho, también conocida como Siemens. Los cables telefónicos tienen una conductancia entre hilos de  $2 \mu\text{S}/\text{Km}$  aproximadamente a 10 kHz por norma UIT-T 996.1 y es variable con la frecuencia.

Se denomina capacitancia a la capacidad o propiedad de un conductor de adquirir carga eléctrica cuando es sometido a un potencial eléctrico con respecto a

otro en estado neutro. Queda definida por la carga que adquiere por cada unidad de potencial.

En un cable de pares simétricos, formado por dos conductores similares en longitud y resistencia que se disponen en forma paralela, la capacitancia total entre conductores se define como "capacitancia mutua", la cual tiene en cuenta la capacidad entre pares y entre pares y tierra, como indica la Fig. 2.14. La capacidad mutua depende de varios factores, tales como las características geométricas del conjunto, sus características dieléctricas, la temperatura y la humedad. El valor determinado para la capacitancia mutua es de  $52 \pm 2 \text{ nF/km}$  según la norma UIT-T 996.1. En este ejemplo,  $C_{ab}$  representa la capacidad entre los dos conductores,  $C_{ao}$  y  $C_{bo}$  representan la capacidad entre el conductor "A" o "B" y la pantalla o tierra respectivamente.

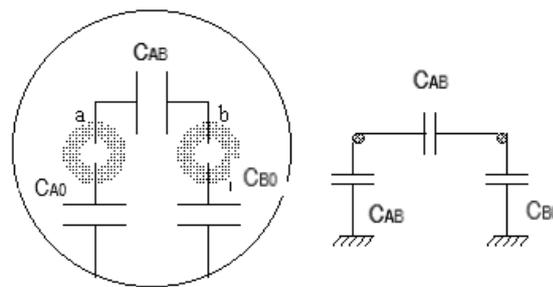


Figura 2-14-Capacitancia mutua.

Fuente: Telefónica de Argentina S.A. [2012]. [Figura]. Manual Telefonía Básica (parte 2).

Para esta disposición y teniendo en cuenta las capacidades mencionadas, se puede obtener una expresión de capacidad mutua, tal como se presenta en la siguiente fórmula:

$$C_M = C_{AB} + \frac{C_{AO} \times C_{BO}}{C_{AO} + C_{BO}} \quad (2)$$

Reemplazando por valores de referencia indicados y medidos bajo prueba en la norma UIT-T 996.1 obtenemos:

$$C_M = 11 \text{ nF} + \frac{80 \text{ nF} \times 80 \text{ nF}}{80 \text{ nF} + 80 \text{ nF}} = 51 \text{ nF} \quad (3)$$

valor que es válido para todo el rango de frecuencias de interés.

Por otra parte, el parámetro de inductancia representa la característica de una bobina, que hace que esta se oponga a las variaciones de corriente. Su valor depende de la cantidad de vueltas o espiras de alambre, la longitud de la bobina, el

diámetro del tubo sobre el cual se ha devanado el alambre y el núcleo de la bobina. Su valor se mide en unidades de *Henry* y se puede calcular como:

$$L = \frac{\phi}{i} \quad [L]=\text{Henry} \quad (4)$$

En el caso del circuito serie presentado, la inductancia que presenta un cable de pares simétricos es  $\approx 0.7$  mH/km, medido en la banda de las frecuencias de voz y donde dicho valor es el tabulado en la norma de referencia UIT-T 996.1.

### 2.5.2 Armarios de Distribución y Ramales Aéreos.

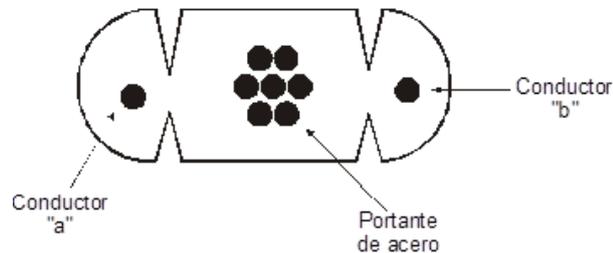
Los armarios de distribución, ubicados en la calle, permiten dividir la red en dos secciones bien definidas: la PRIMARIA y la SECUNDARIA.

La sección PRIMARIA es el conjunto de cables alimentadores que van desde el repartidor general de la central hasta el armario de distribución, como se ve en Fig. 2.15. La sección SECUNDARIA se extiende desde el armario de distribución hasta el terminal del cliente.



**Figura 2-15-Armario de distribución (Pedestal).**  
Fuente: Telefónica S.A. [2012]. [Figura]. Manual Telefonía Básica (parte 1).

Los ramales aéreos como se muestra en la Fig. 2.16, son los encargados de distribuir los pares en cajas terminales a lo largo de todo el ramal. Están compuestos por postes, riendas, cables, empalmes, cajas terminales y protecciones.



**Figura 2-16-Ramal aéreo auto suspendido.**

Fuente: Telefónica S.A. [2012]. Alambre de acometida. [Figura]. Manual Telefonía Básica (parte 1).

Los cables aéreos, por su parte, se cuelgan en los postes. Para sujetar el cable se utiliza un cable de suspensión de acero, al cual se fija el cable telefónico. Actualmente el cable aéreo más utilizado es el denominado auto suspendido. Este cable posee un tipo de cubierta especial, denominada de “sección en forma de 8”. El cable telefónico y el cable de acero necesario para su soporte van juntos en una misma cubierta.

### 2.5.3 Cajas de Distribución.

Las cajas terminales, también conocidas como cajas de distribución como se ve en la Fig. 2.17, están ubicadas en los postes o en las terrazas de los edificios, en puntos cercanos a los domicilios de los clientes del servicio telefónico. Hasta ellas llegan los cables de distribución que provienen del repartidor general.



**Figura 2-17-Caja de distribución.**

Fuente: Telefónica S.A. [2012]. [Figura]. Manual Telefonía Básica (parte 1).

Para dar servicio a un cliente hay que acudir al punto de distribución más próximo, generalmente a unas decenas de metros de distancia, conectar un par de conductores y llevarlos hasta la casa del cliente. Estos cables denominados cables de acometida como se muestra en la Fig. 2.18, están compuestos por dos conductores de acero aislados entre sí, resistentes a la tracción mecánica. Tienen por misión conectar la caja terminal con el punto de ingreso al domicilio del cliente.



Figura 2-18-Cables de acometida.

Fuente: Telefónica de Argentina S.A. [2012]. [Figura]. Manual Telefonía Básica (parte 1).

---

## 3 Servicio ADSL.

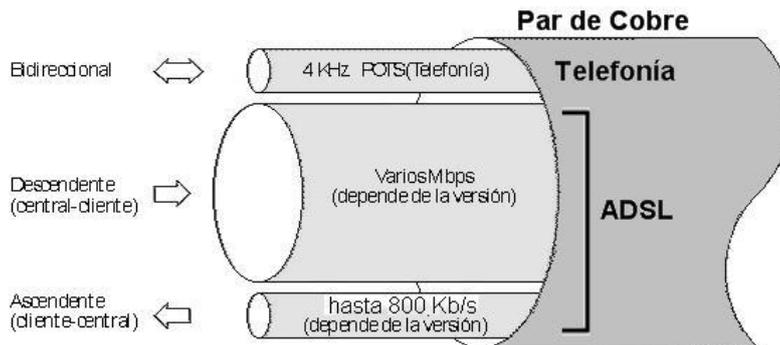
---

### 3.1 Descripción.

---

La sigla ADSL se refiere a la Línea Digital Asimétrica del Abonado. (*Asymmetrical Digital Subscriber Line*).

A diferencia de la tecnología antecesora, conocida como de “Banda Angosta”, en la cual la información del cliente era transportada dentro del canal telefónico en la banda de frecuencia inferior a 4 kHz, la tecnología de ADSL aprovecha gran parte del espectro libre que se encuentra dentro del par de cobre y por sobre el canal telefónico de voz, generando dos nuevos canales de datos de alta velocidad. La aplicación de diversas técnicas proporciona a ADSL un nivel de rendimiento que se acerca al límite teórico de la información que puede enviarse sobre un ancho de banda dado. Como se puede ver en la Fig. 3.1 el total del cable se divide en diferentes bandas dependiendo del tipo de dato.



**Figura 3-1-Separación de bandas.**

**Fuente: Telefónica de Argentina S.A. [2012]. Par de cobre. [Gráfico]. ADSL avanzado (parte 1).**

El canal descendente, es el canal con más ancho de banda. Es de alta velocidad porque fue diseñado pensando que la mayoría de los servicios residenciales de alta velocidad son asimétricos, es decir, es mayor la cantidad de datos que el usuario común baja de la red que la que él inyecta. Por el contrario, otros usuarios utilizan servicios simétricos y por ello necesitan instalaciones coaxiales o de fibra a fin de conseguir la transferencia bidireccional de los datos a alta velocidad.

La tecnología ADSL ha sido diseñada pensando principalmente en el mercado residencial, de ahí su servicio asimétrico. Una de las cuestiones más interesantes de este servicio es que se despliega sin presentar injerencia alguna en el servicio POTS ya instalado en la línea. En la práctica, esto permite al usuario poder realizar llamadas de teléfono mientras transfiere datos a través de su equipo ADSL.

El concepto ADSL fue propuesto por los investigadores de los laboratorios AT&T Bell y de la Universidad de Stanford. Desde entonces, ha ido evolucionando desde simulaciones de ordenador y prototipos de laboratorio hasta la producción de sistemas estándares que pronto aparecerían en su forma integrada.

Su principio es muy sencillo, transmitiendo datos sobre un canal de alta velocidad desde la central hasta el abonado (descendente) y generando otro canal, mucho más lento, para la transmisión de datos en dirección contraria (ascendente).

Tanto el canal de alta velocidad descendente como el de menor velocidad ascendente transportan información digital. El sistema presenta la importante ventaja de permitir la multiplexación de la información digital en la parte superior del espectro del canal convencional de voz analógica. Esto es porque el par de telefonía presenta un ancho de banda utilizable bastante superior al ancho de banda de la voz

considerando las distancias sobre las que típicamente se despliega el bucle de abonado.

La capacidad de los canales descendentes y ascendentes se encuentra en el orden de varios *Mbps* y de varios *kbps*, respectivamente. Es interesante destacar que, conforme se incrementa la distancia, disminuye la capacidad máxima que puede prestar.

Por ejemplo, si se considera un sistema ADSL que trabaje a 2 *Mbps* en el sentido descendente, se espera que la mayoría de los abonados estén dentro de ese rango del servicio. En cambio, un sistema que trabaje a una velocidad de 6 *Mbps* o superior, tendrá un rango mucho más reducido y, por lo tanto, una menor penetración en la red. Esto se debe a que el transmisor de retorno o canal ascendente trabaja a una frecuencia menor que el de la dirección contraria y los niveles de diafonía en el lado del abonado son bajos comparados con los de los sistemas simétricos. La ausencia de diafonía y las menores pérdidas (atenuación) en el par de cobre permiten mayores distancias de transmisión.

Resulta imprescindible la separación de los servicios en ambos extremos, permitiendo el tratamiento selectivo de las señales y evitando los ruidos e interferencias causados por el servicio de ADSL, sobre el servicio preexistente de POTS.

A los efectos de brindar el servicio, ADSL utiliza un par de módems de alta velocidad, uno en la central ATU-C (*ADSL Terminal Unit-Central*) que se conecta a una red digital de alta velocidad y, a través de ella, al proveedor de servicios de datos, y otro en la instalación del abonado ATU-R (*ADSL Terminal Unit-Remote*), conectado a uno o varios módulos de servicio. Un Módulo de Servicio SM (*Service Module*) es un dispositivo del usuario final, por ejemplo, una computadora personal. Un esquema general de lo descrito puede verse en la Fig. 3.2.

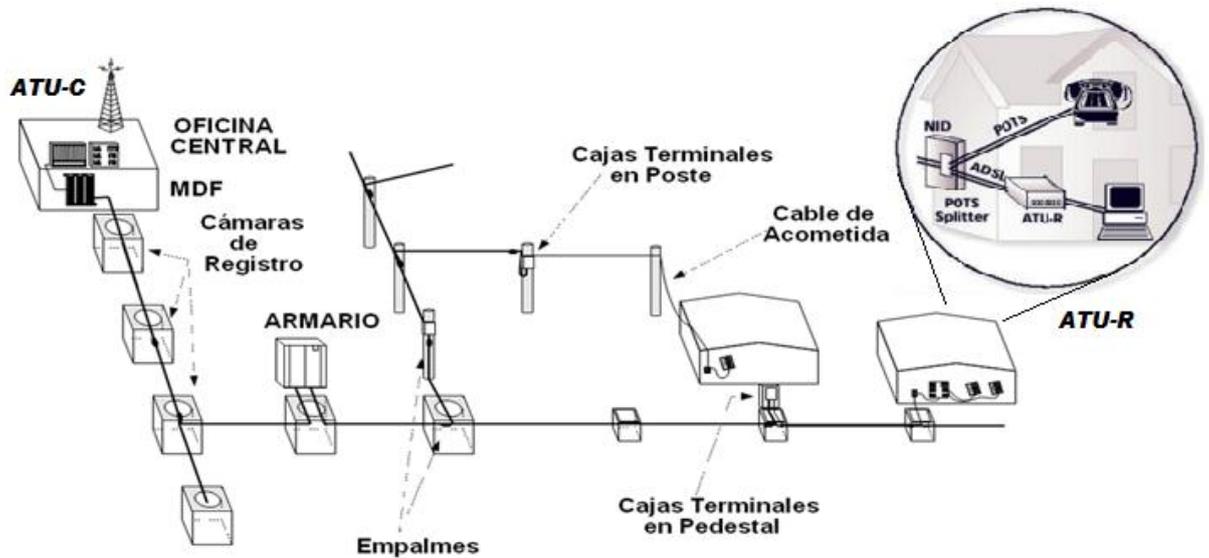


Figura 3-2-Esquema de la red de distribución.

Fuente: /ingenia-t.blogspot [2011]. [Figura]Recuperado: <http://ingenia-t.blogspot.com/2011/>.

El Multiplexor de la línea de abonado DSLAM (*Digital Subscriber Line Access Multiplexer*), es un equipo en la central que agrupa gran número de placas, cada una de las cuales consta de varios módems ATU-C. Esquemáticamente, se puede describir como se indica en la Fig. 3.3.

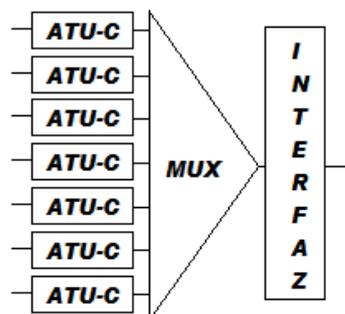


Figura 3-3-Multiplexor.  
Fuente propia.

## 3.2 Familias XDSL.

HDSL/HDSL2 (*High Bit Rate Digital Subscriber line*) fue la primera tecnología xDSL desarrollada para transmisión de datos de alta velocidad en modo full dúplex, para las jerarquías T1 y E1 sobre pares de cobre. Este tipo de tecnología DSL

simétrica es capaz de alcanzar hasta 2 *Mbps* sobre dos pares full dúplex con canceladores de eco en una distancia de 3.5 *km* sin repetidores, debido a que realiza correcciones en la señal transmitida. Existe una variación de esta tecnología, llamada SHDSL, que permite ser utilizada sobre un solo par de cobre.

Utiliza una modulación 2B1Q, que es una modulación PAM, modulación por amplitud de pulsos, de 4 niveles, sin redundancia donde cada par de bits es convertido a un símbolo cuaternario llamado “quat” como se muestra en la tabla 4. SHDSL utiliza modulación TC-PAM.

Dígitos binarios	Símbolo cuaternario
00	-3
01	-1
10	+1
11	+3

Tabla 4-Símbolos quat.  
Fuente propia.

SDSL (*Single Line Digital Subscriber Line*) es una versión reducida de HDSL que permite que opere bajo una sola línea de cobre trenzado ofreciendo el acceso a la telefonía tradicional y a la transmisión de datos, pero de forma simétrica dado que brinda la misma velocidad de *upstream* y de *downstream* y a menor velocidad que ADSL, porque la velocidad de trama es la correspondiente a T1 (1,5 *Mbps*) o E1 (2 *Mbps*). Si bien es una tecnología que se adapta bien a las necesidades de clientes residenciales, se prefieren tecnologías asimétricas como ADSL por permitir mayor velocidad y por no tener tanta limitación en el largo de lazo (hasta 3200 metros). La modulación utilizada es 2B1Q o CAP.

ADSL es la tecnología más popular de la familia xDSL y se caracteriza por velocidades de subida y bajada asimétricas: entre 256 *kbps* y 8 *Mbps* de bajada y entre 64 *kbps* y 1.5 *Mbps* en subida. La modulación puede ser DMT o CAP y será explicada ampliamente en el próximo capítulo.

RADSL es prácticamente igual a ADSL salvo que puede adaptarse a variaciones en la longitud de línea, el diámetro del cable, las condiciones eléctricas de la línea y las condiciones ambientales. Todos estos parámetros varían de un lazo

a otro, aunque están administrados por la misma central. Para solucionar este tipo de diferencias se hace una adaptación de la velocidad mediante tests de realización automática en la fase de inicialización sobre los pares telefónicos, antes de comenzar la transmisión. La modulación utilizada es DMT.

CDSL (*Consumer DSL*) es una versión del servicio *Digital Subscriber Line* (DSL), de marca registrada por *Rockwell Corporation*. Es más lenta que ADSL. Llega hasta 1 Mbps de descarga y tiene la ventaja de que no hay que poner un divisor (*splitter*) del lado del usuario.

IDSL (*Integrated services Digital Subscriber Line*) es una red de servicios integrados (RDSI) basada en DSL y puede soportar velocidades hasta 144 kbps. La modulación utilizada es 2B1Q.

VDSL (*Very High Speed DSL*) es una tecnología diseñada para lograr la máxima velocidad a costa de sacrificar la distancia, que queda limitada a alrededor de 1 km. Alcanza velocidades entre 13 Mbps para distancia máxima de 1200 m y 52 Mbps para distancia máxima de 300 m en bajada y entre 1,5 Mbps y 6 Mbps en subida. La modulación utilizada es DMT o CAP.

En la Tabla 5 se presenta un resumen de las tecnologías descriptas. El orden con que se ubicó cada una de ellas es cronológico, relacionándose con su orden de aparición en el mercado. La Tabla pretende presentar, de manera resumida, una comparación de las diferentes tecnologías DSL.

NOMBRE	SIGNIFICADO	VELOCIDAD	MODO	COMENTARIO
HDSL/HDSL2	DSL de alta velocidad	1,544 Mbps	Simétrico	Utilizaba 2 pares de hilos. HDSL2 utiliza un par de hilos
		2,048 Mbps	Simétrico	
SDSL	DSL de par único	768Kbps	Simétrico	Utiliza un par de hilos
ADSL	DSL asimétrico	De 1,5 Mbps a 8 Mbps	Sentido Downstream (Descendente)	Utiliza un par de hilos.
		De 16 Kbps a 640 Kbps	Sentido Upstream (ascendente)	Máxima longitud de bucle: 5,5 Kms.
RADSL	DSL de velocidad adaptable	De 1,5 Mbps a 8 Mbps	Sentido Downstream (Descendente)	Utiliza un par de hilos, pero puede adaptar la velocidad de datos a las condiciones de la línea.
		De 16 Kbps a 640 Kbps	Sentido Upstream (ascendente)	
CDSL	DSL de consumidor	Hasta 1Mbps	Downstream	Utiliza un par de hilos, pero necesita equipos remotos en casa.
		De 16 a 128 Kbps	Upstream	
IDSL	IDSL de RDSI	Igual que el interfaz básico (BRI) de RDSI	Simétrico	Utiliza un par de hilos, denominado "Bri sin conmutador"
VDSL	DSL de muy alta velocidad	De 13 a 52 Mbps	Downstream	De 300 a 1300m de longitud máxima de bucle. Para funcionar necesita una red de fibra y ATM.
		De 1,5 a 6 Mbps	Upstream	

**Tabla 5-Tecnologías DSL.**

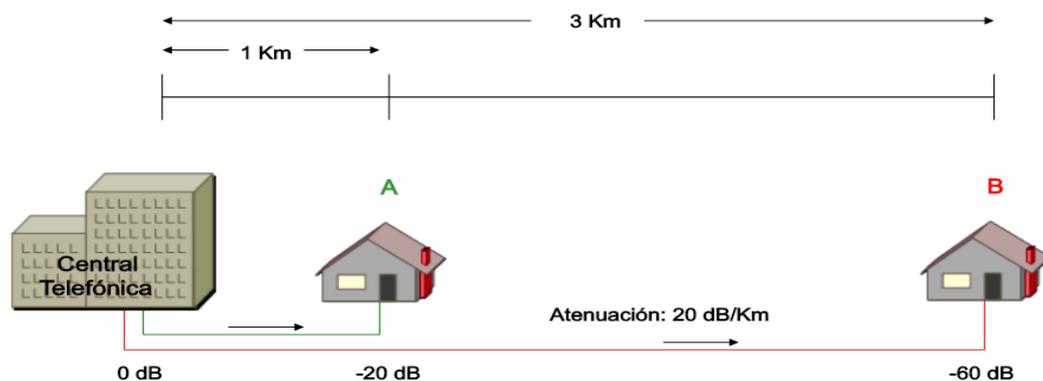
**Fuente: Telefónica S.A. [2012]. [Tabla]. ADSL avanzado (parte 1).**

### 3.3 Limitaciones en el servicio de ADSL.

Con respecto al par de cobre, las principales causas de las limitaciones se relacionan con la atenuación por distancia y las reflexiones por cambios de diámetro del cable o presencia de tomas en puente.

La transmisión se ve afectada por ruido blanco gaussiano AWGN (*Additive white Gaussian noise*), y también por la presencia de interferencias de Radio Frecuencia RFI (*Radio Frequency Interference*) y Ruido impulsivo.

En la Fig. 3.4 se observa de forma simplificada el fenómeno de la atenuación sufrida por un pulso transmitido sobre un par trenzado que se recibe en el otro extremo con un nivel de amplitud mucho más bajo.



**Figura 3-4-Fenómeno de atenuación.**  
Fuente: Universidad de Valencia. [2001] Banda ancha 2da Parte.  
Recuperado: <https://slideplayer.es/slide/106640/>.

A su vez, como la atenuación del medio es función de la frecuencia de la señal transmitida por el mismo, vemos cómo la señal sufre distintas pérdidas según su frecuencia. La regla práctica es que a mayor frecuencia de la señal, mayores serán las pérdidas en la misma. El efecto puede observarse en la Fig. 3.5, donde se grafica la atenuación, medida en dB en función de la frecuencia, destacando las distintas bandas de transmisión de ADSL y tomando como parámetro la longitud de un cable de diámetro prefijado.

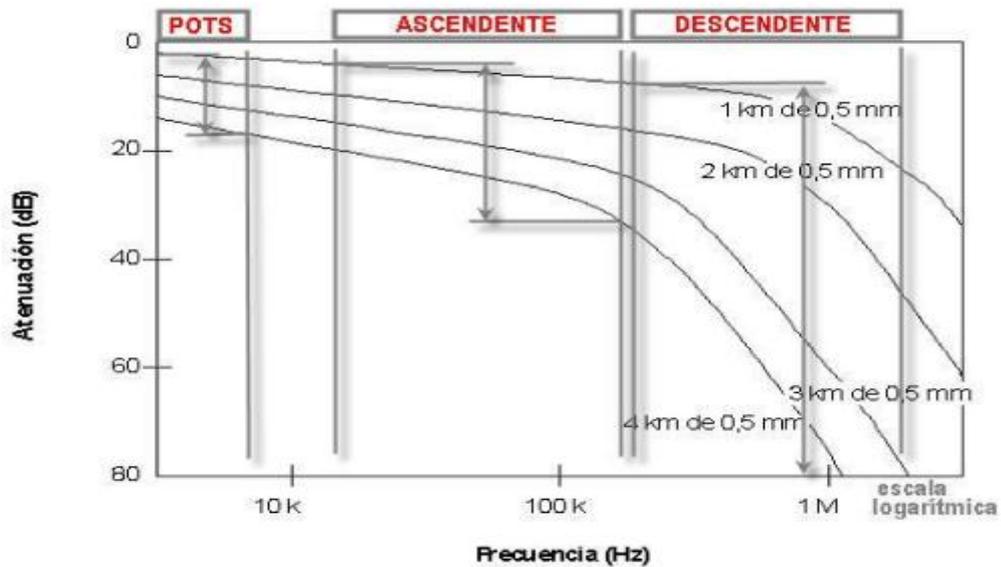


Figura 3-5-Atenuación en función de la frecuencia.  
Fuente: Telefónica de [2012]. Atenuación vs frecuencia. [Gráfico]. ADSL avanzado (parte 1).

Así, por ejemplo, un cable de cobre de 3 km y 0,5 mm de diámetro tiene una pérdida de aproximadamente 60 dB a 1 MHz. Esto significa que la potencia de la señal se reduce en un factor de 1000000. Dicho efecto es sumamente nocivo para las señales de banda ancha, dado que las mismas presentan gran dispersión en la frecuencia y la señal recibida presenta una gran disparidad entre ambos extremos, transmisor y receptor.

A modo de comparación, se cita la atenuación en una fibra óptica de 1,55  $\mu\text{m}$  es de 0,2 dB/km la cual es independiente de la frecuencia. Una atenuación de 60 dB se correspondería con un enlace óptico cuya longitud es de 300 km.

En general, el problema de la atenuación puede solucionarse, en parte, incrementando la potencia de transmisión. Sin embargo, hay que tomar en consideración la legislación sobre EMF (*Electromagnetic Field*) que dice que los sistemas de transmisión ADSL no deberán interferir con las transmisiones de radio, imponiendo límites al fijar el máximo nivel de potencia de la señal ADSL.

Por otra parte, el módem debe ser capaz de acoplarse tanto a líneas cortas con unos pocos dBs de atenuación, como así también a líneas de gran longitud, con atenuaciones del orden de los 55 dB, ya que de antemano no se sabe a qué tipo de línea va a conectarse.

Dado que el tendido del bucle de abonado suele hacerse antes de conocer las necesidades y requerimientos del mismo, los cables de distribución normalmente están pensados para dar servicio en todos los lugares donde pudiera haber clientes potenciales. Resulta una práctica común conectar un par trenzado desde un cable de alimentación a otro para aumentar la probabilidad de dar servicio a los clientes. Los cables de distribución no utilizados son conocidos como “tomas en puente” o dobles.

La Fig. 3.6 muestra que las tomas en puente, al generar una desadaptación, crean pulsos de eco, afectando la respuesta a la frecuencia del cable y originando distorsión de los pulsos.

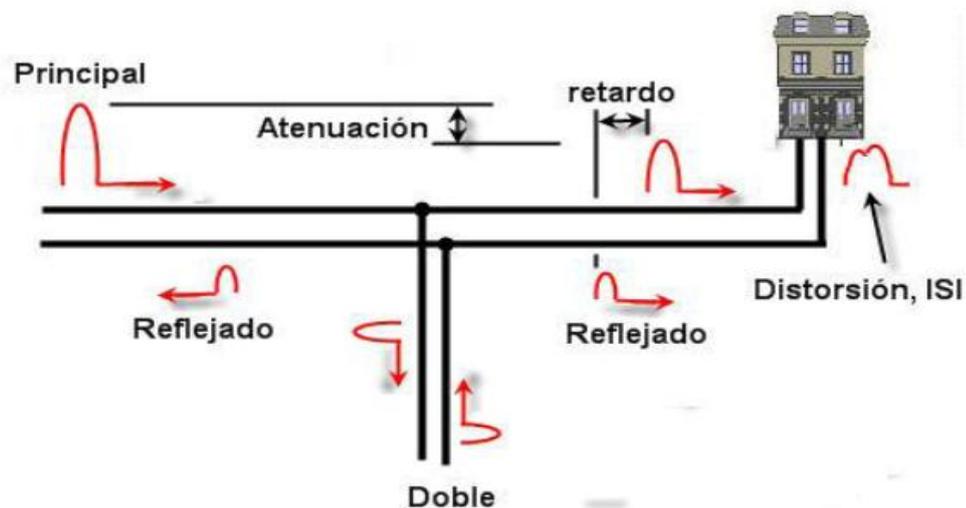
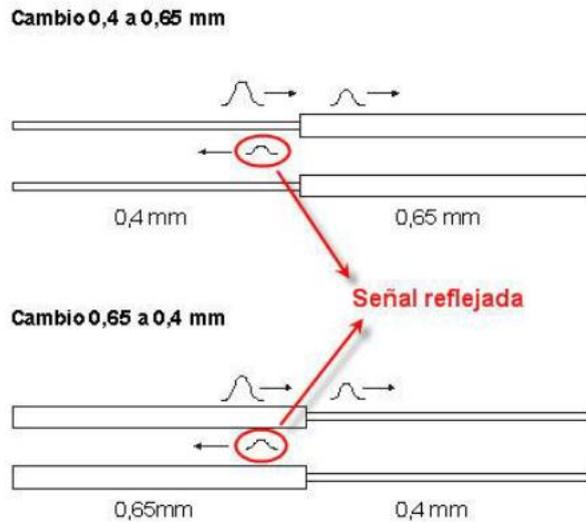


Figura 3-6-Desadaptación por puente.  
Fuente: Telefónica S.A. [2012]. Tomas en puente. [Gráfico]. ADSL avanzado (parte 1).

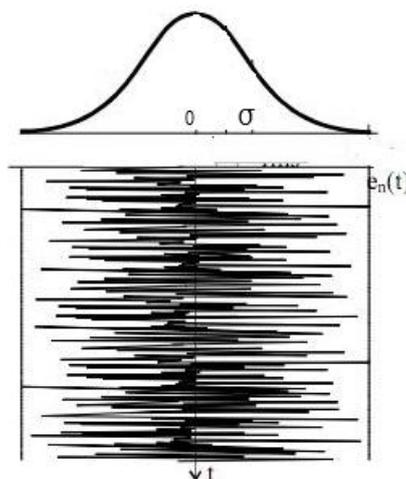
También, tal como se presenta en la Fig. 3.7, un bucle de abonado puede estar construido con cables de diferente tamaño: uno más delgado cerca de la central y otro más grueso cerca de la instalación del abonado. Esta disparidad también origina reflexión, afectando el desempeño de los módems.



**Figura 3-7-Utilización de diferentes calibres.**  
Fuente: Telefónica S.A. [2012]. Reflexión. [Gráfico]. ADSL avanzado (parte 1).

En cuanto a las fuentes de ruido, el ruido blanco es un ruido de naturaleza aleatoria, con espectro de densidad de potencia constante; tal espectro tiene todas las componentes de frecuencia en igual proporción.

El ruido que contamina la señal a transmitir, normalmente tiene un efecto aditivo, en el sentido que el ruido se suma a la señal en varios puntos del canal entre la fuente y el destino y ambos no están correlacionados. Además, presenta distribución gaussiana con media cero y dispersión  $\sigma$ , como se muestra en la Fig. 3.8.



**Figura 3-8-Distribución de ruido.**  
Fuente propia.

El punto más vulnerable en un sistema de transmisión es en la entrada del receptor donde el nivel de señal tiene su valor más débil.

Se produce por muchas y diversas causas y su eliminación es prácticamente imposible. Una de las fuentes principales de ruido blanco es el que se produce debido a la agitación rápida y aleatoria de los electrones dentro de un conductor, llamado ruido térmico. Como se indica en la Ec.(5), este ruido es proporcional a la temperatura absoluta. El movimiento de los electrones es totalmente aleatorio y en todas las direcciones y a pesar de que la tensión promedio es cero (0 Volt), ese movimiento produce una componente de alterna.

Por este motivo, aunque se pudieran eliminar todas las fuentes de ruido e interferencias, seguiría habiendo un ruido de fondo que limitaría el rendimiento del sistema.

Se puede expresar la potencia de ruido a través de la Ec.(5) como se muestra a continuación:

$$N = kTB \quad (5)$$

donde:

$N$  = Potencia de ruido (W),

$T$  = Temperatura (K),

$B$  = Ancho de banda (Hertz),

$k$  = Constante de proporcionalidad de Boltzmann ( $1,38 \times 10^{-23} J/K$ ).

Por otro lado, las redes de acceso están expuestas a un amplio abanico de interferencias, que van desde Interferencias de Radio Frecuencia (RFI), hasta transmisiones en onda larga (LW), onda media (MW) y amplitud modulada (AM).

Si bien los pares de las redes de acceso suelen estar bien balanceados y presentar buena inmunidad a la RFI, existen configuraciones como tomas en puentes o hilos con mala aislación que pueden introducir de forma muy común este tipo de ruido al sistema.

Finalmente, las fuentes de ruido impulsivo también afectan el servicio. El ruido impulsivo se caracteriza en el tiempo por presentar grandes amplitudes por sobre el nivel medio de señal y por una separación importante entre impulsos en comparación con la duración del mismo. Algunas de las fuentes más comunes de ruido impulsivo son las ráfagas aleatorias de gran amplitud causadas principalmente por transitorios en la central de conmutación, los pulsos de marcado y la corriente de

llamada de POTS (*Plain Old Telephone Service*), conocido también como Servicio Telefónico Tradicional o Telefonía Básica. Por fuera de la red, también se pueden presentar fenómenos de naturaleza impulsiva tales como la caída de rayos o la presencia cercana de motores a inducción u otras fuentes de campos electromagnéticos, como se indica en la Fig. 3.9.

Debido a que el ruido impulsivo consiste en ráfagas repentinas de pulsos de forma irregular, que por lo general duran entre algunos microsegundos y una fracción de milisegundos, el espectro del ruido impulsivo se asocia a un amplio rango de frecuencias.

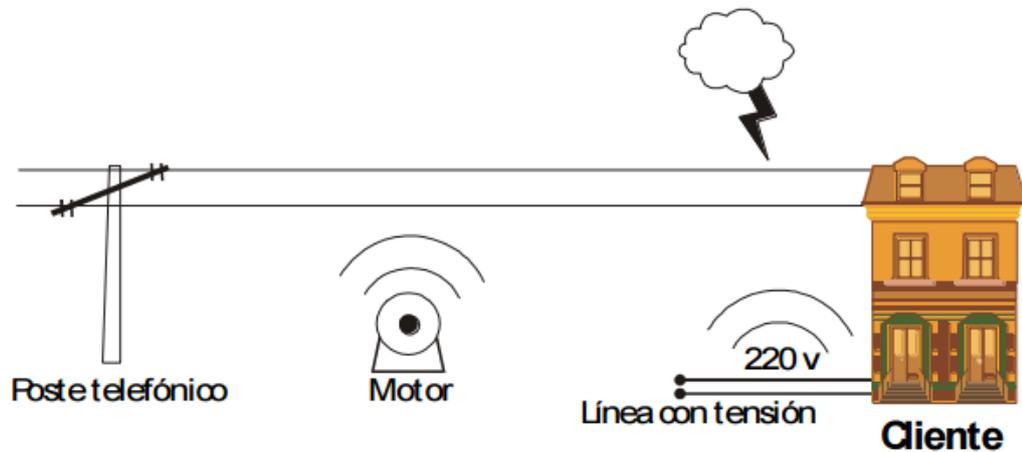


Figura 3-9-Fuente de ruido impulsivo.  
Fuente: Telefónica S.A. [2012]. Ruido Impulsivo. [Gráfico]. ADSL avanzado (parte 1).

## 4 Funcionamiento de ADSL.

### 4.1 Estructura de un sistema ADSL.

En la Fig. 4.1 se muestra la estructura de un sistema ADSL. Está compuesta de dos módems, uno ubicado en el domicilio del usuario ATU-R (*Terminal Unit-Remote*) y otro situado en el lado de la central que se denomina ATU-C (*Terminal Unit-Central*). El DSLAM (*Digital Subscriber Line Access Multiplexer*) es un equipo que agrupa un gran número de placas electrónicas, cada una de las cuales consta de varios módems ATU-C.

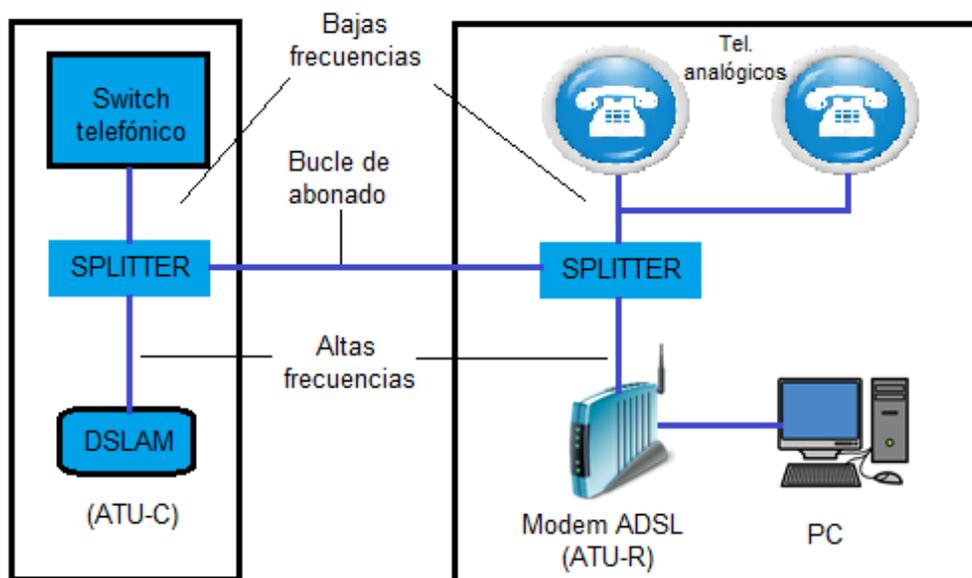


Figura 4-1-Estructura sistema ADSL.  
Fuente propia.

Debido a que la línea de cobre fue diseñada para transmitir señales de voz, es necesario dividir los datos de las señales utilizadas para telefonía. Para realizarlo se utilizan dispositivos llamados divisores o *splitters*. Un *splitter* es un conjunto de dos filtros, uno pasa-alto y otro pasa-bajo. El objetivo de cada uno de ellos es separar las señales transmitidas por el bucle de abonado, es decir, separar las señales de alta frecuencia correspondientes a ADSL de las de baja frecuencia (telefonía). Dicho funcionamiento, puede verse representado en la Fig. 4.2.

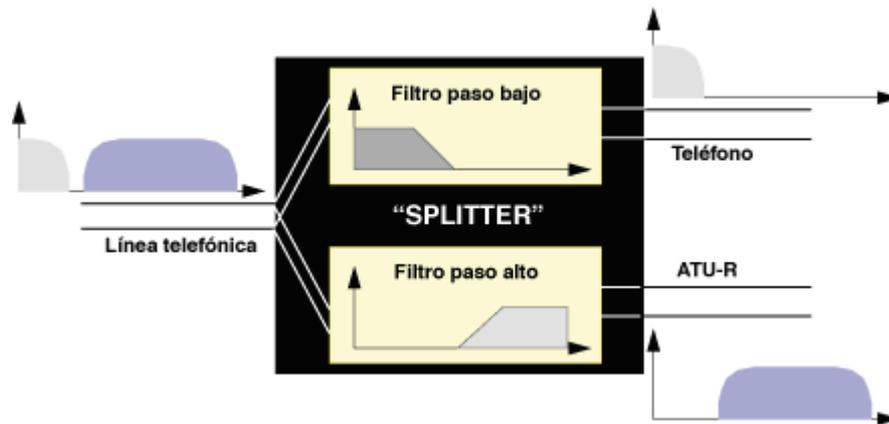


Figura 4-2-Splitter.

Fuente: Funcionamiento del splitter. [Figura]. Recuperado de <http://www.asic.upv.es/sta/Manuales/MADSL/MADSLComoFunciona.htm>

La ventaja de tener separadas las dos señales, es decir, la voz de los datos, es que el teléfono está siempre disponible y no se ocupa mientras se están transmitiendo los datos. La conexión a la red de datos es permanente (“*always on*”) mientras la PC esté encendida.

## 4.2 Técnicas usadas en el servicio de ADSL.

A continuación, se analiza de qué manera ADSL soluciona las limitaciones que hemos expuesto en el apartado previo.

La Multiplexación por División de Frecuencia FDM (*Frequency Division Multiplexing*) se usa para separar los tres canales de transmisión. En la parte más baja, la banda que va de 0 – 4kHz se destina para el canal de voz. El canal ascendente de baja velocidad ocupa el rango de frecuencias inmediatamente superior al ocupado por el canal de voz y ocupa el rango de frecuencias que va de 25,875 kHz hasta los 140 kHz . Por su parte, el canal descendente de alta velocidad ocupa la parte superior de la banda, que llega hasta 1,1 MHz para ADSL2 o hasta 2,2 MHz en ADSL2+. Esta separación se puede ver en la Fig. 4.3.

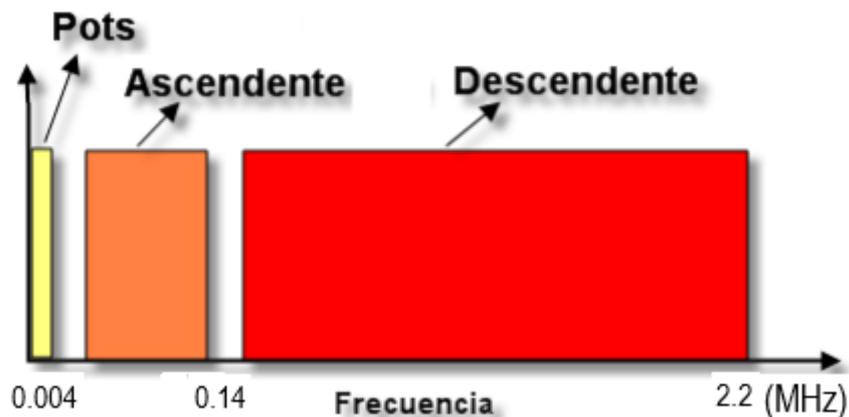


Figura 4-3-Separación de canales.

Fuente: Telefónica S.A. [2012]. Multiplexación por división de frecuencia. [Gráfico]. ADSL avanzado (parte 1).

Las modulaciones empleadas sobre el par de cobre generalmente pueden ser de dos tipos. La modulación original se denominaba CAP (*Carrierless Amplitude Phase*). Luego los sistemas comenzaron a usar DMT (*Discrete Multitone*). Ambos tipos se basan en la Modulación de Amplitud en Cuadratura QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*); esta última es la que se utiliza en Argentina y es la que se adoptó por la mayoría de los organismos de estandarización.

CAP es un tipo de QAM y hace uso de tres parámetros para generar valores. Estos parámetros son amplitud, fase y frecuencia. Generalmente, una de estas dimensiones (frecuencia) se mantiene en un valor constante mientras la amplitud y la fase se modulan.

En este tipo de sistema de modulación se generan dos señales separadas, una onda senoidal y una onda cosenoidal, más una señal portadora de referencia. Ambas ondas, normalmente están desfasadas dentro de la misma frecuencia  $90^\circ$  o  $180^\circ$ , o también, a cualquier otra relación de fase. Cada onda puede también tener múltiples amplitudes. Por lo tanto, sería posible que cada onda seno / coseno esté en una de cuatro posiciones de fase diferentes y cada onda tenga una de dos amplitudes diferentes. Estas cuatro posiciones de fase, dos amplitudes (seno) multiplicadas por dos amplitudes (coseno) da la posibilidad de generar 16 niveles posibles. Estos niveles definen un espacio de señal, también llamado constelación, que es una representación en el plano complejo en términos de amplitud y fase de

los símbolos posibles en una modulación digital, tal como muestra la Fig.4.4 y de acuerdo a la Tabla 6.

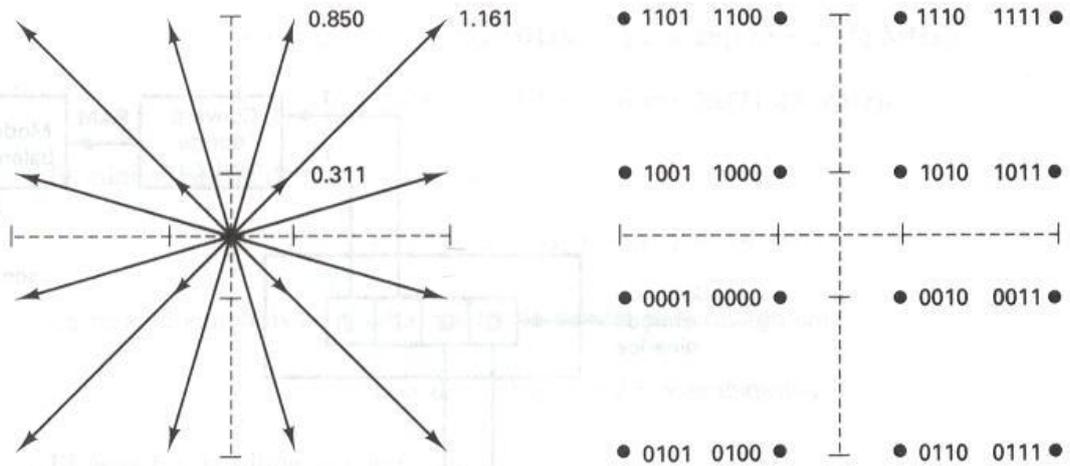


Figura 4-4-Constelación 16QAM.

Fuente: [8]. Tomasi W. (2003). *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas (Cuarta Edición)*. México: Prentice Hall International, Inc.

Entrada binaria				Salida de 16-QAM	
Q	Q'	I	I'		
0	0	0	0	0.311 V	-135°
0	0	0	1	0.850 V	-165°
0	0	1	0	0.311 V	-45°
0	0	1	1	0.850 V	-15°
0	1	0	0	0.850 V	-105°
0	1	0	1	1.161 V	-135°
0	1	1	0	0.850 V	-75°
0	1	1	1	1.161 V	-45°
1	0	0	0	0.311 V	135°
1	0	0	1	0.850 V	175°
1	0	1	0	0.311 V	45°
1	0	1	1	0.850 V	15°
1	1	0	0	0.850 V	105°
1	1	0	1	1.161 V	135°
1	1	1	0	0.850 V	75°
1	1	1	1	1.161 V	45°

Tabla 6-Codificación.

Fuente: Tomasi W. (2003). *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas (Cuarta Edición)*. México: Prentice Hall International, Inc.

Los valores indicados anteriormente son a modo de ejemplo para explicar el sistema de codificación y no necesariamente los utilizados en la práctica.

También es posible generar una QAM 16 manteniendo el desplazamiento de fase seno / coseno fijo (digamos a la separación "normal" de 90°) y que cada onda

seno / coseno tenga uno de cuatro valores. Así, con cuatro amplitudes posibles (seno) por cuatro amplitudes (coseno), se tiene una vez más dieciséis valores posibles para cada ciclo de onda.

La Modulación de Amplitud / Fase sin portadora es una variante de QAM que no tiene una onda portadora específica configurada para la comparación de línea de base. A veces se denomina "portadora suprimida".

Este tipo de modulación fue ampliamente utilizada en los comienzos de ADSL, pero nunca se estandarizó. En consecuencia, presenta el problema que no existe interoperabilidad posible entre el hardware de los distintos fabricantes. Por otra parte, DMT demostró tener mejor rendimiento.

La modulación DMT divide el espectro de frecuencias disponibles en 256 subcanales (512 sub-canales en ADSL2+) que se corresponden a igual número de subportadoras, cada una modulada en QAM por una parte del flujo total de datos que se va a transmitir. Este efecto se puede apreciar en la Fig. 4.5, donde las subportadoras indicadas en color blanco corresponden al *upstream* y las subportadoras en amarillo corresponden al *downstream*.

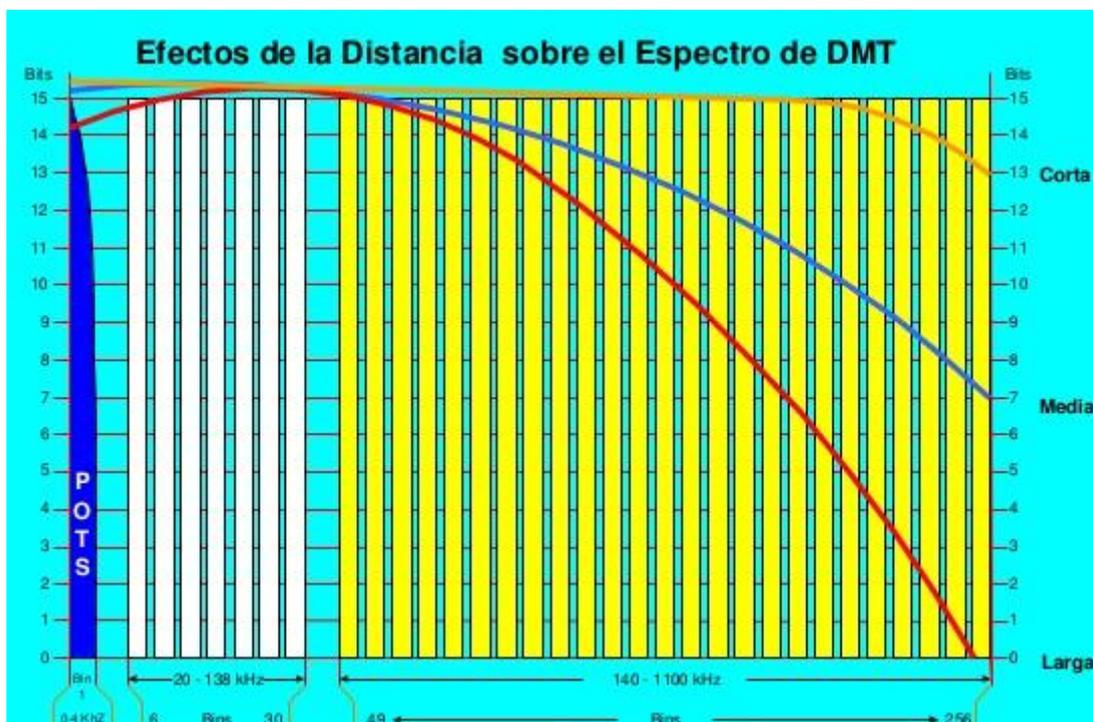


Figura 4-5-Division del espectro en DMT.

Fuente: Rodríguez P. [2013]. Efectos de la distancia. [Figura]. Recuperado de <https://es.slideshare.net/tifon84/presentacion-curso-redes-de-acceso-xdsl-16980260>

Como se puede ver en la Fig. 4.6, estas sub-portadoras están separadas entre sí  $4,3125\text{ kHz}$ , y el ancho de banda de cada subportadora es de  $4025\text{ Hz}$ .

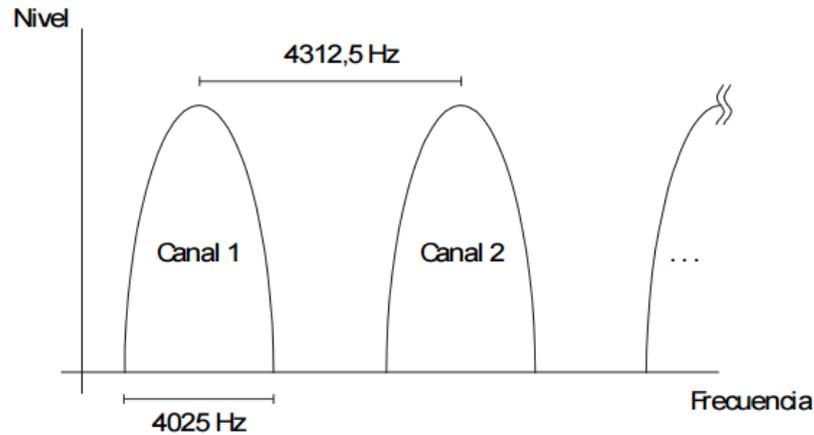


Figura 4-6-Sub-portadoras.

Fuente: Telefónica S.A. [2012]. Multitonos discretos (a). [Gráfico]. ADSL avanzado (parte 1).

En función de la capacidad de cada sub-canal para transmitir, los datos se dividen en distintos números de bits y se distribuyen entre los mismos. El criterio para el reparto del flujo de datos entre sub-portadoras es función de la estimación de la SNR en la banda de frecuencia de cada una de ellas. Cuanto mayor es la SNR, más caudal de datos podrá transmitirse por cada sub-portadora.

La estimación de la relación se hace cuando se establece la conexión entre el módem del cliente y el DSLAM de la Central. Dicha estimación se realiza considerando la recepción de una secuencia de entrenamiento.

La técnica de modulación es la misma tanto del lado de la Central ATU-C como del lado del abonado ATU-R, con la diferencia que del lado del abonado el número de sub-portadoras es de sólo 32 como máximo.

Para mejorar el problema del ruido, se transmiten más datos en las frecuencias bajas y menos en las altas, debido al efecto de atenuación con el aumento de la distancia y la frecuencia mostrado anteriormente, produciéndose un efecto en la disminución de los bits transmitidos en algunas sub-portadoras como muestra la Fig. 4.7.

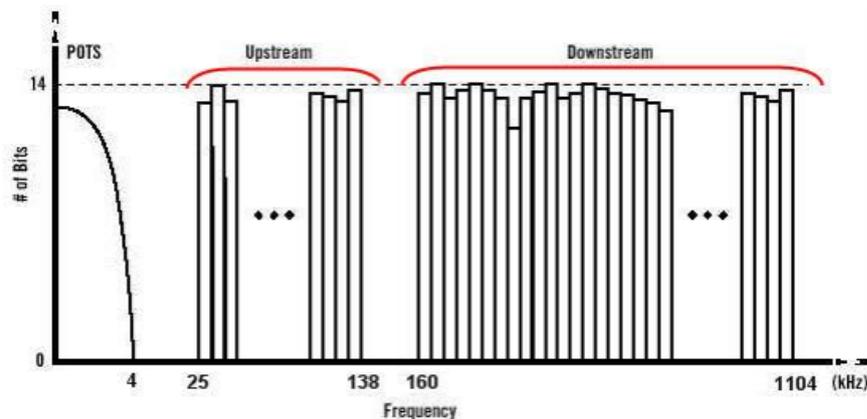


Figura 4-7-Distribucion de bits.

Fuente: Telefónica S.A. [2012]. [Gráfico]. ADSL avanzado (parte 1).

Con respecto a las características de la línea, lo ideal sería poder adaptar el módem a las mismas. Con este propósito, durante el proceso de encendido y luego del chequeo interno, además de estimar la SNR, se mide la atenuación.

En definitiva, estas mediciones se realizan para estimar con la mayor exactitud el estado real del par del cliente en el instante previo a la conexión. Así el sistema puede no sólo adaptarse a la situación real de ruido presente en el par, sino también a través de la curva de atenuación, compensar o minimizar los fenómenos adversos presentes en la planta externa.

El esquema de adaptación que propone ADSL se puede observar en detalle en la Fig. 4.8. Las sub-portadoras moduladas se ven afectadas por la respuesta en frecuencia del par telefónico, por lo que dichas sub-portadoras se atenúan en la misma medida.

Cuando el canal se ve afectado por ruidos e interferencias, las sub-portadoras ven afectada su SNR por lo que el sistema, en forma dinámica, procede a realizar una redistribución de bits de las portadoras afectadas a portadoras con mejor posibilidad de transmisión (mejor SNR).

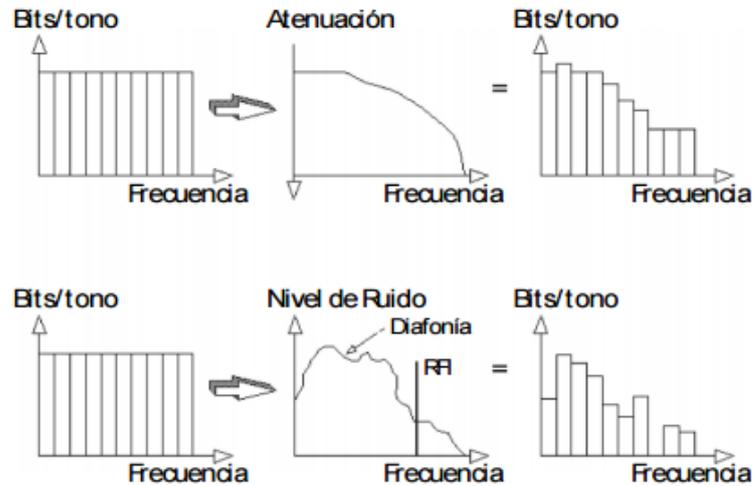


Figura 4-8-Adaptación de canales ADSL.

Fuente: Telefónica S.A. [2012]. Adaptación de la transmisión. [Gráfico]. ADSL avanzado (parte 1).

En ADSL2 y ADSL2+ las señales se modulan de modo de aumentar la capacidad del ADSL convencional que alcanzaba los 8 *Mbps*, llegando con estas técnicas a 12 *Mbps* y 24 *Mbps* respectivamente para abonados cercanos a la central. Estas mejoras son alcanzadas para ADSL2+ mediante la ampliación del ancho de banda a utilizar, proporcionando un mayor flujo de datos como se muestra en la Fig. 4.9.

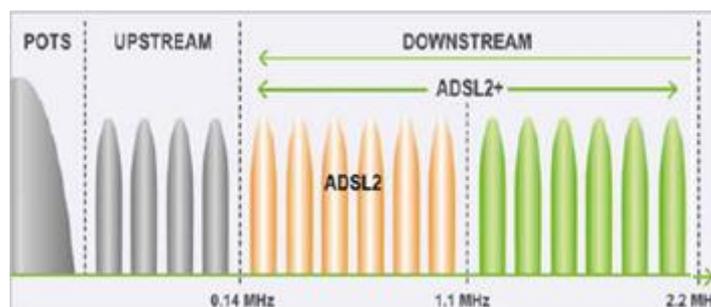


Figura 4-9-Sistemas ADSL.

Fuente: Crespo A. [2011]. Espectro xDSL. [Gráfico]. Recuperado de <https://www.redeszone.net/2011/08/02/factores-que-condicionan-la-conexion-xdsl/>

#### 4.2.1 Características de tecnologías ADSL.

La tecnología ADSL, surge según la Recomendación G992.1. Dicha tecnología soporta un flujo de datos que van desde los 6,144 Mbit/s en sentido descendente y 640 kbit/s en sentido ascendente como valores mínimos. Para la

transmisión de datos dispone de dos caminos alternativos en la conformación de la trama, uno de baja latencia y sin intercalado (proceso que se detalla más adelante) y otro con intercalado de bits que proporciona menor tasa de error y mayor latencia.

Si bien ADSL2 utiliza el mismo ancho de banda del espectro que su antecesor, incorpora un incremento de la capacidad de transmisión introduciendo codificación de Trellis (TCM) de 16 estados y la reducción del encabezado de la trama mediante un encabezado programable que varía entre 4 kbps y 32 kbps por trama. En TCM se combinan la codificación y la modulación para reducir la probabilidad de error y mejorar el funcionamiento. Esta codificación permite la presencia de transiciones de estado de señal, y aquellas transiciones que no sigan esa pauta se interpreta en el receptor como errores de transmisión [14] [8].

Por último, una ventaja adicional del sistema ADSL2 es un control de potencia que permite el ahorro energético a diferencia de ADSL que opera siempre a la misma potencia sin importar el volumen de tráfico cursado. Como resumen de esta tecnología, la ganancia de capacidad viene dada gracias a la codificación de Trellis que aporta una ganancia de aproximadamente 3dB, y además una reducción del encabezado que permite mayor capacidad de transmisión de datos en relación a ADSL de encabezado con longitud fija.

Para el caso de la tecnología ADSL2+, se duplica su capacidad de transmisión mediante la ampliación de la banda espectral hasta un máximo de 2,2 MHz lo que permite duplicar el número máximo de sub-portadoras en sentido descendente de 256 a 512 y por lo tanto duplicar la capacidad alcanzando los 24 Mbps.

Los equipos ATU-R y ATU-C pueden funcionar en cualquiera de las tres tecnologías. Durante la inicialización de la comunicación se define el modo de funcionamiento de los equipos terminales.

Un aspecto importante a tener en cuenta es la distancia existente entre el cliente y la central. Para poder alcanzar las mejores prestaciones de las tecnologías es necesario que la distancia sea menor que 1,5 km. A partir de los 2,5 km, las tecnologías no presentaran diferencias significativas tal como se muestra en la Fig. 4.10.

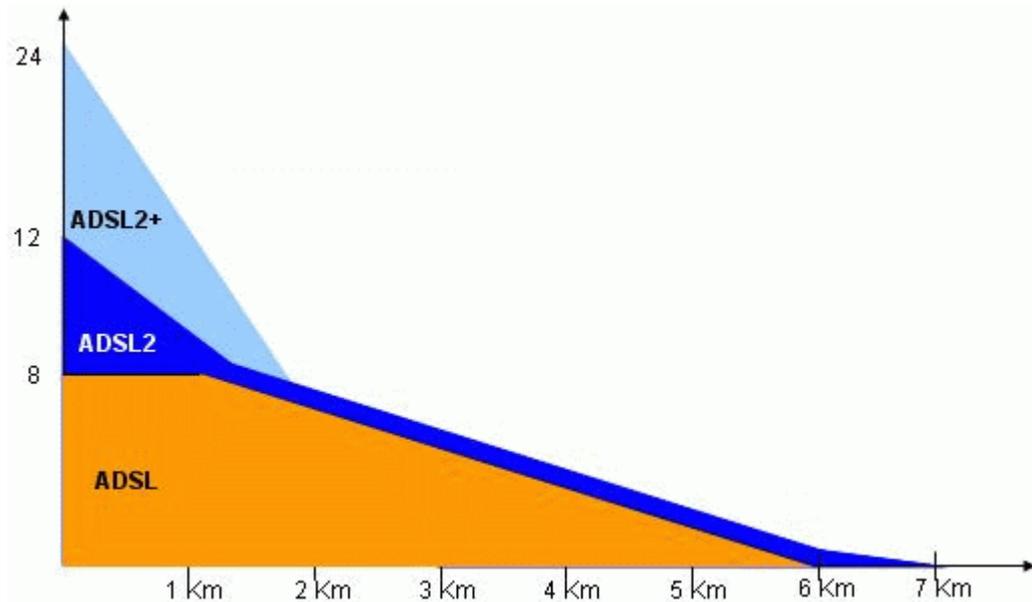


Figura 4-10- Velocidades de Tecnologías ADSL.

Fuente: Torriero G. [2007]. ADSL2/ADSL2+ Faster & Further than classic ADSL.  
<https://www.gaspartorriero.it/2007/08/adsl-velocita-e-distanza-dalla-centrale/>.

Además, ADSL utiliza una técnica conocida como *bit swapping* para mejorar la estabilidad del enlace ante pequeñas variaciones que se presentan en algunos de los canales.

Una vez establecido el enlace y cuanto más tiempo haya pasado desde dicho establecimiento, mayor es la posibilidad de que la SNR cambie, ya sea por la aparición de mayor ruido sobre una de las frecuencias sub-portadoras o aumento en la atenuación de una sub-portadora en particular.

Ambas condiciones hacen que la SNR baje y, por ende, las velocidades preestablecidas pueden no ser las correctas, lo cual derivaría en un marcado aumento de la tasa de error.

Al detectarse variaciones en la señal transmitida, la técnica de *bit swapping* se pone en marcha y la misma consiste en trasladar parte de los bits que eran asignados a una portadora en particular, que ahora presenta problemas en el enlace, para que estos sean transportados por las portadoras adyacentes. De esta manera, se logra reducir la carga en bits de la portadora afectada manteniendo intacta la velocidad del enlace y subsanando de esta manera la disminución, temporal o permanente, en la SNR de un determinado canal. En la Fig. 4.11, se

puede observar un ejemplo de cómo se afectan las sub-portadoras en la presencia de ruido por el método de *bit swapping*.

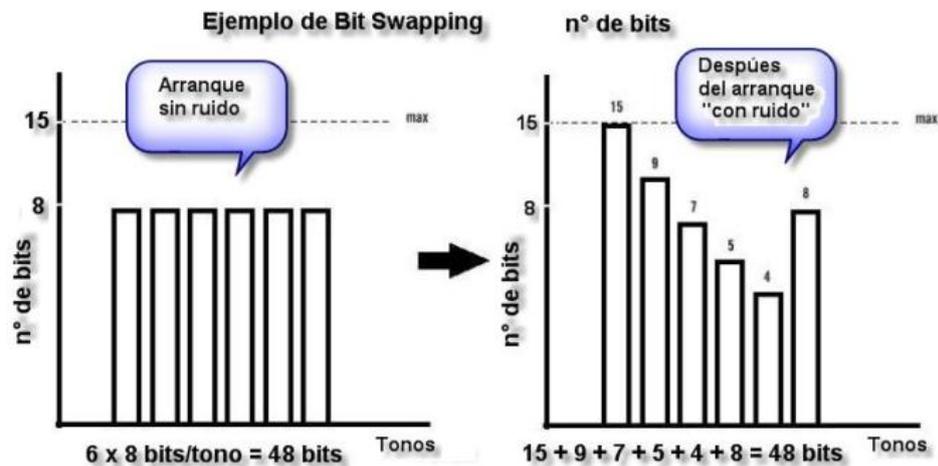


Figura 4-11-Bit swapping.  
Fuente: Telefónica de Argentina S.A. [2012]. [Gráfico]. ADSL avanzado (parte 1).

### 4.3 Estructura de la trama.

La tecnología ADSL utiliza la estructura de supertrama, como se puede ver en la Fig. 4.12, cada una de ellas compuesta por 68 tramas de datos (numeradas de 0 a 67, moduladas y codificadas en símbolos DMT) y una trama adicional para sincronismo de símbolo. Desde el punto de vista de datos de usuario y a nivel de bit, la velocidad de símbolo DMT es 4000 baudios, es decir, un símbolo cada 250 picosegundos. Para permitir insertar el símbolo de sincronización la velocidad real es de  $\frac{69}{68} \times 4000$  *baudios*.

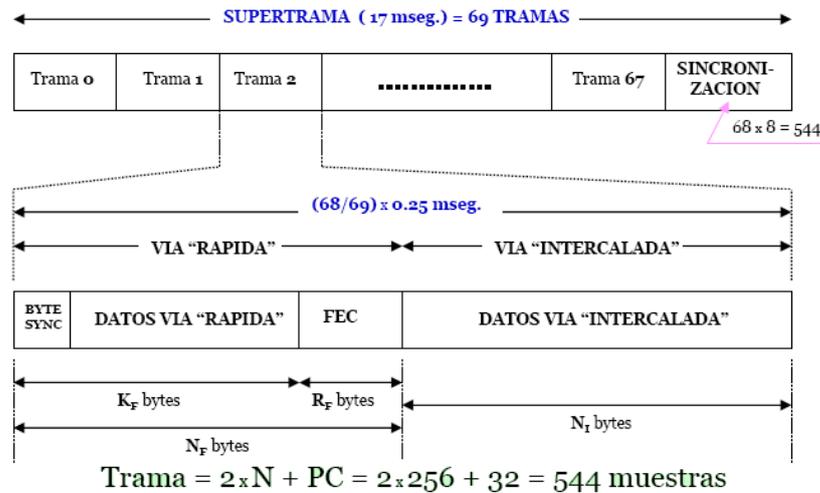


Figura 4-12-Conformación supertrama.

Fuente: Telefónica de España. [2008]. Trama y supertrama ADSL. [Gráfico]. . ADSL Instalación, configuración y mantenimiento.

Cada supertrama podrá verse afectada por uno de dos tipos posibles de procesamiento. Una técnica de mayor velocidad denominada "FAST" y otra conocida como "INTERLEAVED" que consiste en un entremezclado de bit para evitar errores en ráfaga. Por lo tanto, los bits pueden estar ordenados en el *buffer FAST* o en el *buffer INTERLEAVED*, a su vez, en estos dos tipos de Buffer existe una serie de bits con funcionalidades especiales, como son los que seguidamente se indican. En la trama cero en el *buffer FAST* los bits del primer byte se usan para comprobaciones de CRC. En las tramas 1, 34 y 35 en el *buffer FAST* los bits del primer byte se denominan indicadores de bit y se usan para operaciones OAM (Operación Administración y Mantenimiento). En las tramas 2 a 33 y 36 a 37 en el *buffer FAST* los bits del primer byte se usan para funciones de sincronizado de canales (STM) y para mensajes EOC.

Análogamente en la trama cero en el *buffer INTERLEAVED* los bits del primer byte se usan para CRC. En las tramas 1 a 67 del *buffer INTERLEAVED* los bits del primer byte se usan para funciones de sincronizado de canales. La duración de la supertrama es de 17 ms, es decir, 68 tramas a 250 ps, donde 67 tramas son destinadas a datos y una a sincronismo. Debido a la flexibilidad que presenta ADSL, la longitud de las supertrama varía desde 67 bytes a 65283 bytes teórico, como se indica en la Ec.(6).

$$\left( 512 \text{ portadoras} \times 15 \text{ bits/portadoras} \times \frac{4000 \text{ 1/seg}}{\frac{\text{bits}}{\text{bytes}} \rightarrow 58.82 \text{ supertramas/seg}} \right) = 65283 \text{ bytes} \quad (6)$$

## 5 Simulación del Enlace Completo de ADSL.

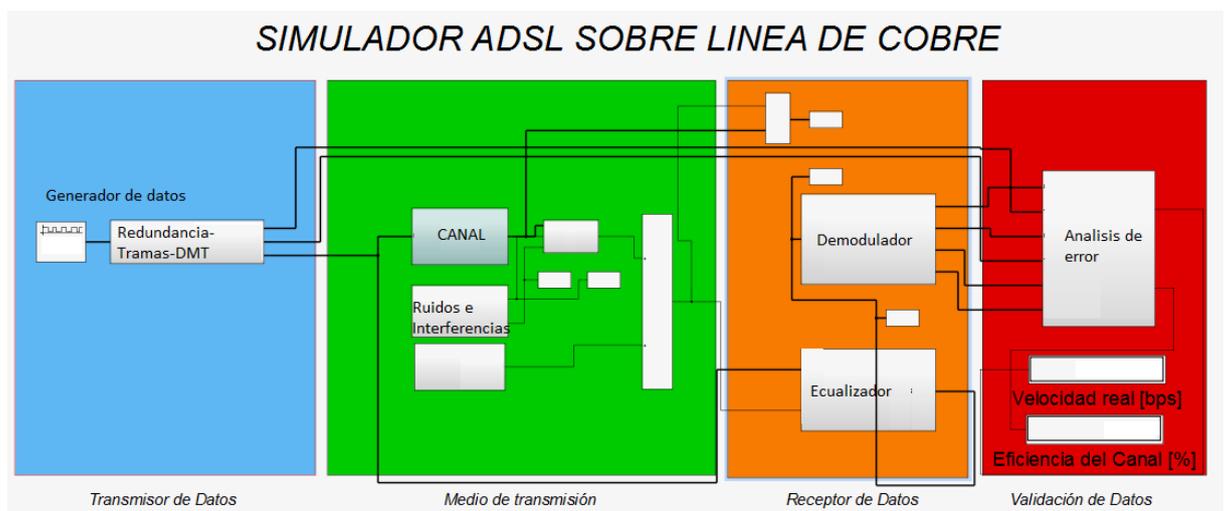
### 5.1 Introducción.

En este proyecto se desarrolló la simulación del lazo completo de una red ADSL, mediante las herramientas de MATLAB®, desde la generación de la señal hasta la recepción de la misma.

La especificación de requisitos, requerimientos de usuario y la especificación funcional están descritas en forma detallada en el Anexo I, Anexo II y Anexo III respectivamente, desarrollada según la recomendación IEEE 830.

El propósito de estas especificaciones, es definir los requisitos generales y específicos del sistema simulador de red ADSL, que permita medir el grado de eficiencia del canal de transmisión y cómo se ve afectado el mismo por las diferentes fuentes de ruido e interferencias.

De forma general se pueden apreciar los bloques simulados en la Fig. 5.1. El bloque ha sido separado en cuatro etapas, que son transmisor de datos, medio de transmisión, receptor y validación de datos. En las próximas secciones se explicará cada una de estas etapas y todos los bloques que la componen.



**Figura 5-1- Bloques simulados del enlace ADSL.**  
Fuente propia.

## 5.2 Transmisor de datos.

En este apartado se presentan todos los módulos que se utilizaron para la generación de datos a transmitir, más los bloques que permiten sumar redundancia a las tramas en el afán de posibilitar la detección y corrección de errores. Este conjunto de datos luego es reordenado en tramas para posteriormente ser modulados en QAM y formar la señal ADSL a transmitir.

### 5.2.1 Generador de señal.

Los datos a transmitir son creados por un generador de señal binario aleatorio que utiliza una distribución de Bernoulli. La distribución de Bernoulli produce 0's con una probabilidad  $p$  y 1's con una probabilidad de  $(1 - p)$ . Esta distribución tiene un valor medio igual a  $(1 - p)$  y varianza igual  $p(1 - p)$ .

El generador Bernoulli ubicado dentro de las herramientas propias del Simulink de MATLAB®, en este se programa la generación de "0" y "1" con igual probabilidad, es decir,  $p=0,5$ . Además, se debe inicializar con una "semilla" la cual, es un valor de inicio para generar una secuencia aleatoria. La transmisión de datos se realiza en forma de trama. Por lo tanto, se debe configurar el generador para ese caso particular, emitiendo tramas de "a" bits (el valor de "a" se ajustará dependiendo de la velocidad deseada), y a una velocidad de 4000 tramas por segundo, esto se muestra en la Fig. 5.2.

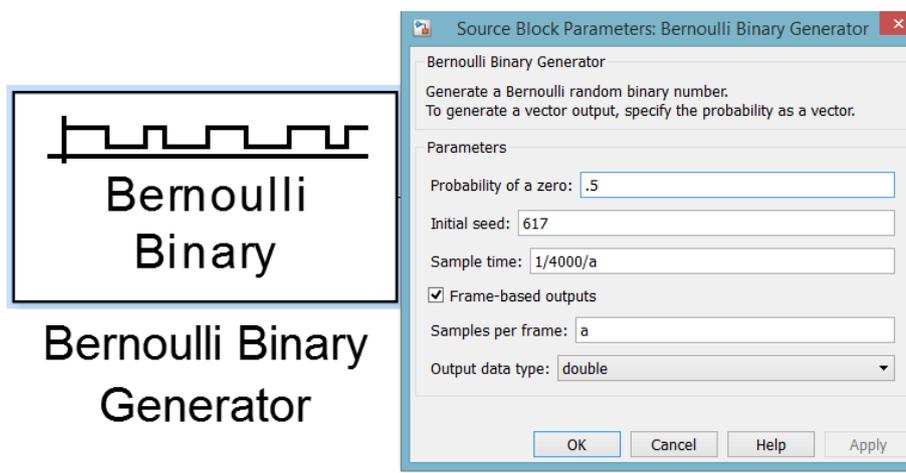


Figura 5-2 Generador de Bernoulli.  
Fuente propia.

### 5.2.2 Multiplexado de datos.

En ADSL, como se explicó anteriormente en la sección 4.3, distinguen dos diferentes subcanales por donde se transmiten los datos (*FAST* e *INTERLEAVED*). En el primero de ellos, los bytes recibidos se transmiten en el mismo orden en el que llegan, con lo cual se garantiza que el retardo que sufren es el mínimo posible. En cambio, en el segundo, los bytes se reordenan generando un entrelazado. De esta manera se consigue una mayor inmunidad a errores en ráfaga, es decir, que los errores en ráfaga afectan a porciones pequeñas de datos separadas entre sí, en lugar de a series largas de datos, pero, como es sabido, todo proceso de datos suma una latencia adicional a la transmisión.

Los datos, se van multiplexando dependiendo de los requerimientos de la aplicación que necesite de su uso, por ejemplo, una comunicación de voz digital sería enviada en modo *FAST* debido a que es sensible al retardo y no tanto a los errores. Para el caso del modo *INTERLEAVED* un ejemplo clásico es la transmisión de datos, que no son sensibles a los retardos, pero si a los errores.

Para implementarlo en la simulación, se divide a la señal generada en dos caminos de igual cantidad de datos, el primero para ser transmitidos en forma directa y el segundo entrelazado. La división se realiza separando el vector de datos en dos, uno entre **1 y  $a/2$**  y el segundo entre  **$a/2+1$  y  $a$**  como se muestra en la Fig. 5.3.

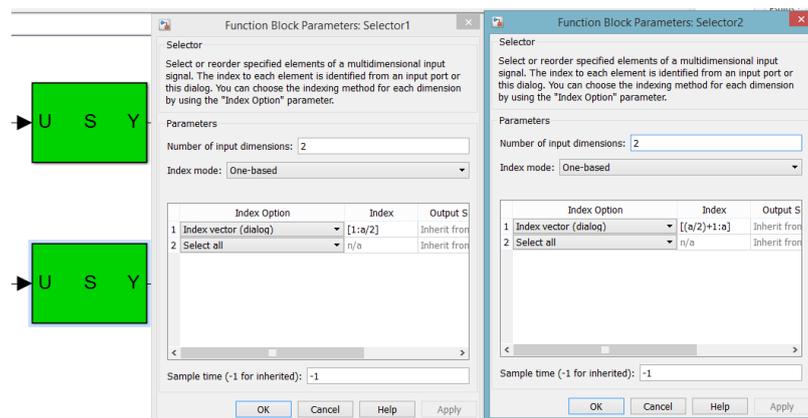


Figura 5-3-Multiplexado de datos.  
Fuente propia.

### 5.2.3 Generador de CRC.

El código de redundancia cíclica (CRC) es una secuencia corta que es evaluada para cada supertrama. Se trata de un código muy utilizado en las redes de datos para detectar errores.

El código introduce datos adicionales que transportan un valor de verificación basado en el residuo de una división de polinomios. En el sistema ADSL es utilizado un polinomio de grado ocho  $G(x) = 1 + x^2 + x^3 + x^4 + x^8$ . Esto significa que 8 bits son agregados en cada una de las supertramas. Estos bits son usados en el receptor para decidir si la transmisión es correcta o no. El CRC, solo puede detectar errores, pero no tiene la posibilidad de corregir los mismos.

Se transmiten dos códigos CRC, una para el camino rápido y otro para el camino con entrelazado. La implementación se lleva a cabo mediante el generador de código CRC de las herramientas de MATLAB<sup>®</sup> donde se le configura en forma de vector los coeficientes del polinomio generador como se muestra en la Fig. 5.4.

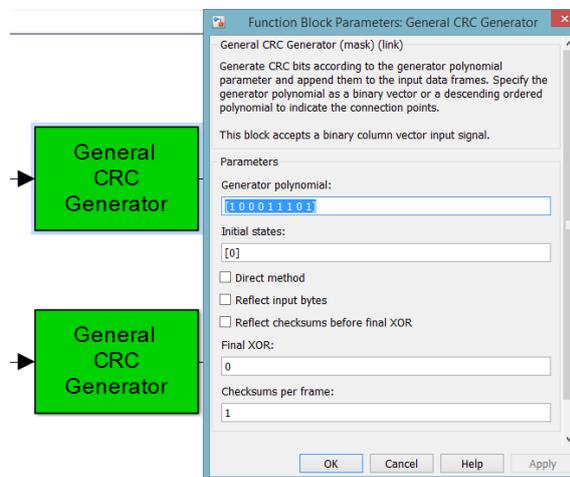


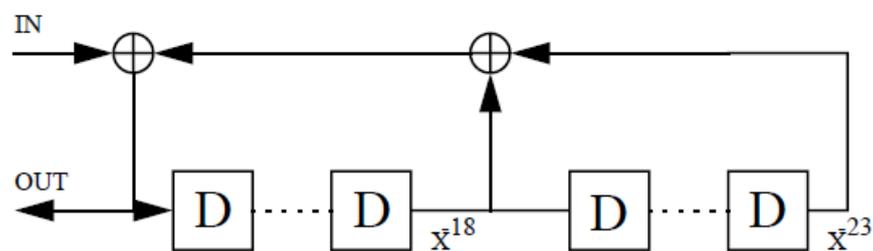
Figura 5-4-Generador de CRC.  
Fuente propia.

### 5.2.4 Scrambler y FEC.

Uno de los problemas más importantes que tienen los sistemas de comunicación digitales es la aparición de largas cadenas de 1's ó 0's ya que las mismas pueden generar pérdidas de sincronismo entre las entidades que se están

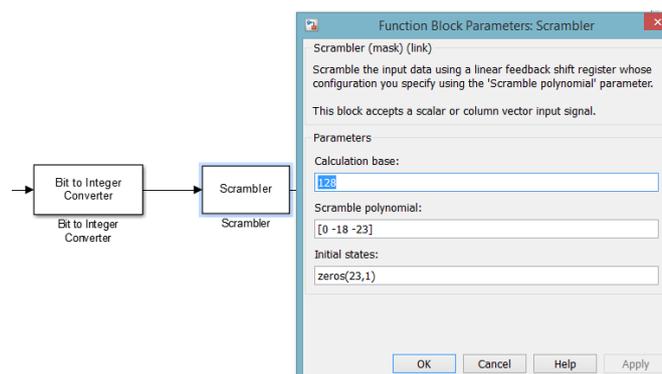
comunicando. Una forma de evitar la aparición de estas cadenas es mezclar los bits a transmitir por medio de un *scrambler*.

Otro motivo para usar este tipo de conformación aleatoria de la señal es asegurar que la información transmitida sea más inmune al ruido, ya que se produce una expansión del espectro de la señal. El *scrambler* se forma como un registro de desplazamiento el cual genera la salida como una combinación lineal de acuerdo a un polinomio generador, que en este caso es  $y = x(n) + x(n - 18) + x(n - 23)$  tal como se muestra en la Fig. 5.5.



**Figura 5-5-Diagrama scrambler.**  
Fuente: ADSL Toolbox for MATLAB [2001] [Figura]. Scrambler.

Luego, se reagrupan los datos en palabras de M bits, para luego ser ingresados en el scrambler. Dicho valor, junto al polinomio scrambler debe ser configurado en el cuadro de parámetros de dicho bloque como se muestra en la Fig. 5.6.



**Figura 5-6- Configuración de scrambler.**  
Fuente propia.

La corrección de errores hacia adelante FEC, utiliza código *Reed-Solomon* (RS). Se trata de un código bloque para la corrección de errores, donde se van procesando los distintos bloques de datos y se agrega redundancia para obtener un bloque de datos codificado. Este tipo de código es utilizado en varios sistemas

digitales tales como dispositivos de almacenamiento, comunicaciones inalámbricas y móviles, comunicaciones satelitales, televisión digital y XDSL.

El código RS es un subconjunto de los códigos BCH (*Bose Chaudhuri Hocquenqhem*), códigos cíclicos que presentan en sus parámetros (n,k,t) una relación entre los símbolos de datos (k), del código total (n) y del número máximo de errores por ser corregidos (t), y son de bloques lineales. Este código se especifica como RS(n,k) con símbolos de s bits. Lo anterior significa que el codificador toma k símbolos de los s bits y añade símbolos de paridad para hacer una palabra de código de n símbolos. Existen n-k símbolos de paridad de s bits cada uno. Un decodificador puede corregir hasta t símbolos que contienen errores en una palabra de código, donde  $2t = n - k$  (López, 2005 [13]). Se configura dicho bloque de código Reed Solomon con N y K (estos valores se ajustan según la velocidad elegida) como se muestra en la Fig. 5.7.

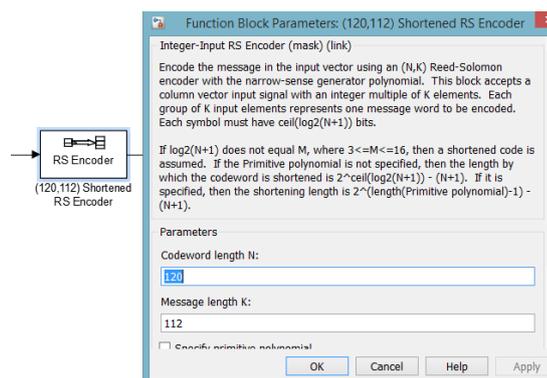
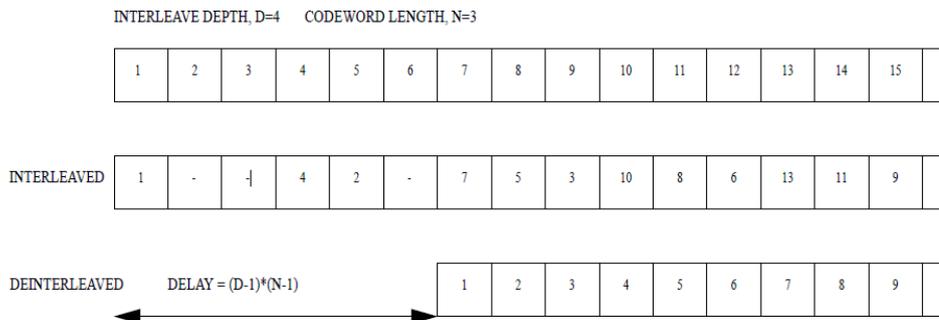


Figura 5-7-Código Reed Solomon.  
Fuente propia.

### 5.2.5 Interleaved.

El sistema de *INTERLEAVED*, como se comentó anteriormente, se trata del entrelazado de los datos, con el fin de eliminar ráfagas de errores. El entrelazador tiene dos parámetros principales, el primero de ellos es la profundidad del entrelazado D y el segundo es el número de bytes por palabra de código N. D es siempre potencia de 2 y se decide durante la inicialización. Un ejemplo con N=3 y D=4 puede verse en la Fig. 5.8. Cada uno de los N bytes (B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>, B<sub>3</sub>...) se retarda en una cantidad que varía linealmente con el índice de bytes. Más precisamente, el byte B<sub>i</sub> es demorado por  $(D - 1) \times (i - 1)$  bytes en el entrelazado. Con esta simple regla

los octetos de salida siempre ocupan espacios distintos cuando N es impar. Cuando N es par, se añadirá un byte ficticio al principio. El byte ficticio se elimina posteriormente de la salida del desentrelazador.



**Figura 5-8-Entrelazador.**  
Fuente: ADSL Toolbox for MATLAB [2001] [Figura]. Interleaver.

### 5.2.6 Modulador DMT.

Como se explicó anteriormente, éste bloque realiza los procesos de distribución de bits, conformación de sub-portadoras y posterior modulación QAM. Lo más importante es conocer la cantidad de bits que se le asignarán a cada una de las sub-portadoras. Esto dependerá principalmente de la SNR presente en cada una de ellas al momento de la inicialización de la conexión.

La distribución de bits dentro de cada sub-portadora, queda determinada por el límite de Shannon, que establece que el límite para la capacidad de una transmisión en un sistema de comunicación compuesto por un emisor, un receptor, un canal de transmisión y una fuente de ruido estará dado por la siguiente ecuación:

$$C = B \times \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right) \quad (7)$$

donde, C es la velocidad máxima en bits por segundos (bps), B es el ancho de banda en Hz y S/N es la relación señal a ruido en ese sub-canal.

Por lo tanto, para cualquier sistema de transmisión con un determinado ancho de banda y con una relación dada de señal a ruido, queda limitada la velocidad

máxima en bits por segundo que se puede obtener, sea cual sea la técnica de transmisión que se emplee.

Por ejemplo, si tomamos una sub-portadora cualesquiera, donde  $B = 4025 \text{ Hz}$  y consideramos 32 dB de relación señal a ruido:

$$C = 4025 \text{ Hz} \times \log_2 \left( 1 + \frac{1584,89}{1} \right) \quad (8a)$$

$$C = 4025 \text{ Hz} \times \left( \frac{\log(1585,89)}{\log(2)} \right) \quad (8b)$$

$$C = 42790 \text{ bps} \quad (8c)$$

Esta distribución se realiza de manera dinámica durante la transmisión, en cambio, para la simulación se tomaron las distribuciones de acuerdo con el estado de la transmisión en su inicio. La asignación de bits, se realiza desde las portadoras más bajas, que son aquellas menos afectadas por el ruido y la atenuación del medio, hacia las portadoras más altas. En la Fig. 5.9 se muestra la distribución adoptada para una velocidad de 14Mb, la cual se puede observar dentro del entorno grafico del programa.

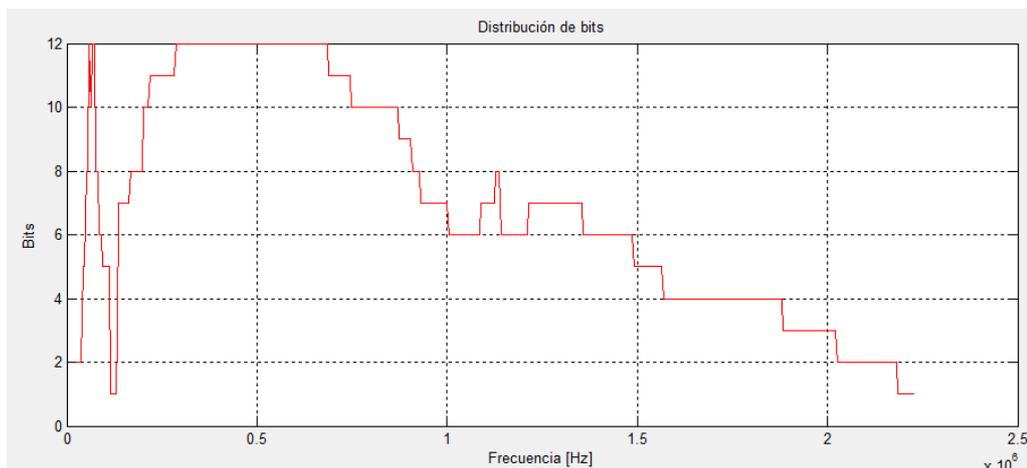
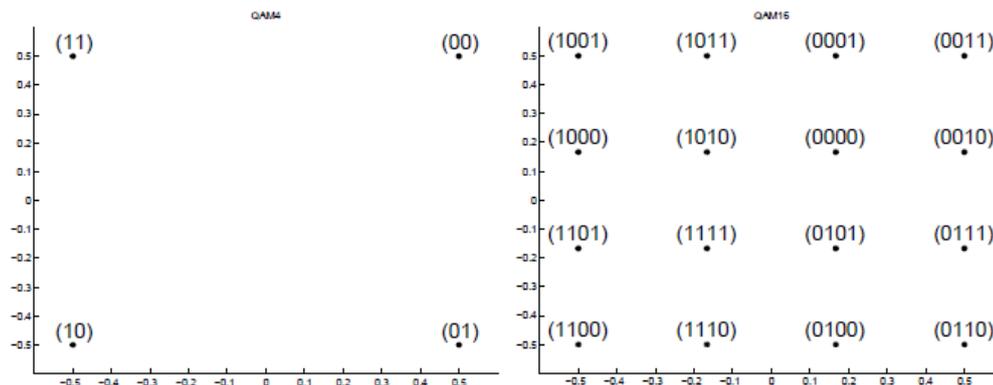


Figura 5-9 -Distribución de bits 14Mb.  
Fuente propia.

### 5.2.7 Modulación QAM.

De forma independiente, cada una de las sub-portadoras tendrá una constelación asociada dependiendo de la cantidad de bits que le haya sido asignada en la etapa anterior. Así, las portadoras con menor carga de bits, 2 bits, tendrá asociada una constelación de 4 puntos posibles y aquellas otras de mayor carga tendrán una constelación de mayor tamaño. Independientemente de la cantidad de bits asignados a cada portadora, cada una de ellas transmitirá, siempre, a la misma velocidad, que es igual a 4000 símbolos por segundo.

Como ejemplo se pueden ver en la Fig. 5.10 las constelaciones correspondientes a sub-portadoras de 2 bits y de 4 bits respectivamente.



**Figura 5-10 Constelación 4QAM (izq.) y 16QAM (der.).**  
Fuente: [8].Tomasi W. [2003]. *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas (Cuarta Edición)*. México: Prentice Hall International, Inc.

Todos los procesos descritos anteriormente, como el multiplexado de datos el bloque CRC, el *scrambler* y el *interleaver* se ven interrelacionados en la Fig. 5.11.

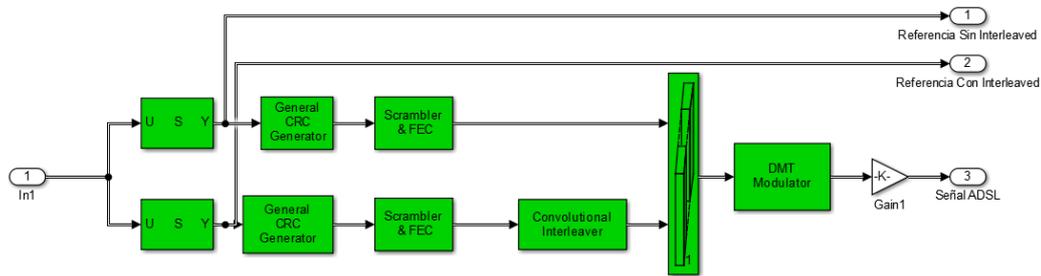


Figura 5-11-Generación de señal.  
Fuente propia.

### 5.3 Medio de transmisión.

En esta sección se explica la simulación del medio de transmisión y todas las señales interferentes que lo afectan. Para ello se consideran distintos calibres de cables y largo de línea seleccionables desde la interfaz del simulador.

#### 5.3.1 Parámetros primarios.

Como se ha explicado anteriormente, en una línea de transmisión los parámetros característicos están distribuidos a lo largo de todo el lazo, por lo que no se los puede considerar concentrados en un punto a menos que la longitud del lazo a analizar sea mucho menor que la longitud de onda de la señal transmitida.

Por tal motivo, la simulación de este medio de transmisión particular, debe enfocarse en la forma en que dichos parámetros están distribuidos a lo largo del bucle y en cómo se comportan los mismos en el rango de frecuencia de trabajo.

Las propiedades eléctricas, tales como la conductividad de los cables y la constante dieléctrica del aislamiento, y las propiedades físicas, tales como el diámetro del alambre y distancia entre conductores, determinan las constantes eléctricas primarias longitudinales, resistencia ( $R$ ) e inductancia ( $L$ ), y las transversales, capacitancia ( $C$ ) y conductancia ( $G$ ).

A partir de estos parámetros primarios se obtienen los parámetros secundarios, que caracterizan el comportamiento de la línea desde el punto de vista de la transmisión propiamente dicha. Estos parámetros son la impedancia

característica ( $Z_0$ ), la constante de propagación ( $\gamma$ ), la constante de atenuación ( $\alpha$ ), la constante de fase ( $\beta$ ) y velocidad de propagación ( $V_p$ ).

La Recomendación G996 – 1 plantea un modelo matemático que permite el cálculo de las constantes de línea primaria  $R$ ,  $L$ ,  $C$  y  $G$  para el rango de frecuencias de trabajo.

La variación de  $R$ ,  $L$  y  $G$  por unidad de longitud y en función de la frecuencia puede ser calculada exactamente con las ecuaciones que se presentan en las siguientes secciones. Por otra parte, los coeficientes para el cálculo de  $R$ ,  $L$  y  $G$  se indican en la Fig. 5.12.

Coeficiente	Papel				Poliétileno				
	0,4 mm	0,5 mm	0,65 mm	0,9 mm	0,32 mm	0,4 mm	0,5 mm	0,65 mm	0,9 mm
$r(m)$	$0,2 \times 10^{-3}$	$0,25 \times 10^{-3}$	$0,325 \times 10^{-3}$	$0,45 \times 10^{-3}$	$0,16 \times 10^{-3}$	$0,2 \times 10^{-3}$	$0,25 \times 10^{-3}$	$0,325 \times 10^{-3}$	$0,45 \times 10^{-3}$
$c_0 (m)$	$0,09 \times 10^{-3}$	$0,11 \times 10^{-3}$	$0,17 \times 10^{-3}$	$0,24 \times 10^{-3}$	$0,05 \times 10^{-3}$	$0,13 \times 10^{-3}$	$0,15 \times 10^{-3}$	$0,20 \times 10^{-3}$	$0,27 \times 10^{-3}$
$\mu_r$	1								
$\mu_0(H/m)$	$4\pi \times 10^{-7}$								
$\sigma (mho/m)$	$5,8 \times 10^{-7}$								
$\tan \delta$	$2,5 \times 10^{-2}$				$4,0 \times 10^{-4}$	$5,0 \times 10^{-4}$			

**Figura 5-12-Coeficientes para el cálculo de R, L y G.**  
Fuente: Recomendación UIT G-996-1 [2003].

Las ecuaciones que se presentan en el apartado siguiente dan el valor de  $R$  en ohm/m,  $L$  en H/m,  $G$  en mho/m,  $C$  en F/m y  $f$  en Hz utilizando los valores de los coeficientes mostrados en el cuadro. Obsérvese que la capacitancia  $C$  se supone constante en función de la frecuencia ( $C = 50$  pF/m).

Las constantes de línea primaria ( $R$ ,  $L$ ,  $G$  y  $C$ ) son calculadas según el tipo de cable que corresponda con la línea. Cabe aclarar que pueden existir diversas combinaciones de tipo y calibre de cable, si bien no es lo técnicamente recomendable debido a las reflexiones de la señal que provoca esta desadaptación del medio, muchas veces y por cuestiones meramente económicas, se combinan diferentes calibres de conductores. Los valores obtenidos de las ecuaciones son:  $R$  en ohmios/km,  $L$  en  $\mu H/km$ ,  $G$  en  $\mu mho/km$ ,  $C$  en nF/km,  $f$  en kHz, y a una temperatura de  $20^\circ C$ .

### 5.3.1.1 Resistencia.

La resistencia de bucle está dada por la suma de la resistencia de los conductores del par telefónico. La misma, está distribuida uniformemente a lo largo de los conductores y su variación con la frecuencia es compleja debido al efecto pelicular ( $R_i$ ), efecto de proximidad ( $R_n$ ) y las corrientes parásitas en el aislante del cable y los pares contiguos ( $R_{ns}$ ). De esta forma queda determinada la resistencia total del par telefónico como sigue:

$$R = 2(R_i + R_n + R_{ns}) \left[ \frac{\text{ohm}}{m} \right] \quad (9)$$

siendo:

$$R_i = \frac{1}{\pi r^2 \sigma} f_i^{(R)} = \frac{1}{\pi r^2 \sigma} \text{Re} \left[ \frac{1+j}{2\delta} r \frac{J_0\left(\frac{1+j}{\delta} r\right)}{J_1\left(\frac{1+j}{\delta} r\right)} \right] \quad (10)$$

$$R_n = \frac{1}{\pi d^2 \sigma} f_n^{(R)} = \frac{1}{\pi d^2 \sigma} \text{Re} \left[ -\frac{1+j}{2\delta} r \frac{J_1\left(\frac{1+j}{\delta} r\right)}{J_0\left(\frac{1+j}{\delta} r\right)} \right] \quad (11)$$

$$R_{ns} = \frac{1}{\pi d^2 \sigma} 4f_n^{(R)} = \frac{1}{\pi d^2 \sigma} \text{Re} \left[ -\frac{1+j}{2\delta} r \frac{J_1\left(\frac{1+j}{\delta} r\right)}{J_0\left(\frac{1+j}{\delta} r\right)} \right] \quad (12)$$

donde:

$\omega = 2\pi f$  frecuencia angular.

$r(m)$  radio del conductor.

$\sigma \left( \frac{S}{m} \right)$  Conductividad del cobre.

$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \sigma \mu_r \mu_0}}$  profundidad para efecto pelicular.

$d(m) = 2\sqrt{2}(r + c_0)$  distancia entre centros de conductores de un par.

$c_0(m)$  grosor del aislante de un hilo.

$\mu_r$  permeabilidad relativa del cobre.

$\mu_0$  permeabilidad del vacio.

$k$  constante del dieléctrico.

$\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$  permitividad del vacio.

$D(m)$  diámetro del conductor.

$J_i$  Coeficientes de Bessel.

A modo de ejemplo en la Fig. 5-13 se grafica mediante la simulación, cómo varía la resistencia en función de la frecuencia en un conductor de 0,5 mm.

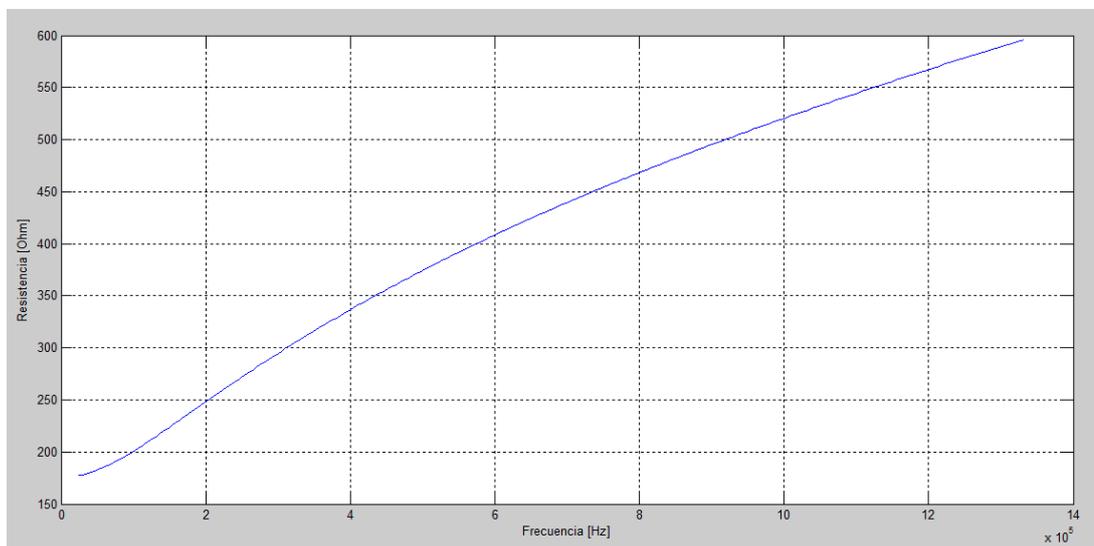


Figura 5-13-Resistencia vs Frecuencia.  
Fuente propia.

### 5.3.1.2 Inductancia.

Al circular la corriente eléctrica por los conductores del par telefónico, genera en él un flujo electromagnético que induce una corriente que se opone a la circulación de la misma. Esta fuerza de oposición es la inductancia distribuida  $L$ .

$$L = 2(La + Li + Ln + Lns) \left[ \frac{H}{m} \right] \quad (13)$$

donde:

$$La = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left( \frac{d}{r} \right) \quad (14)$$

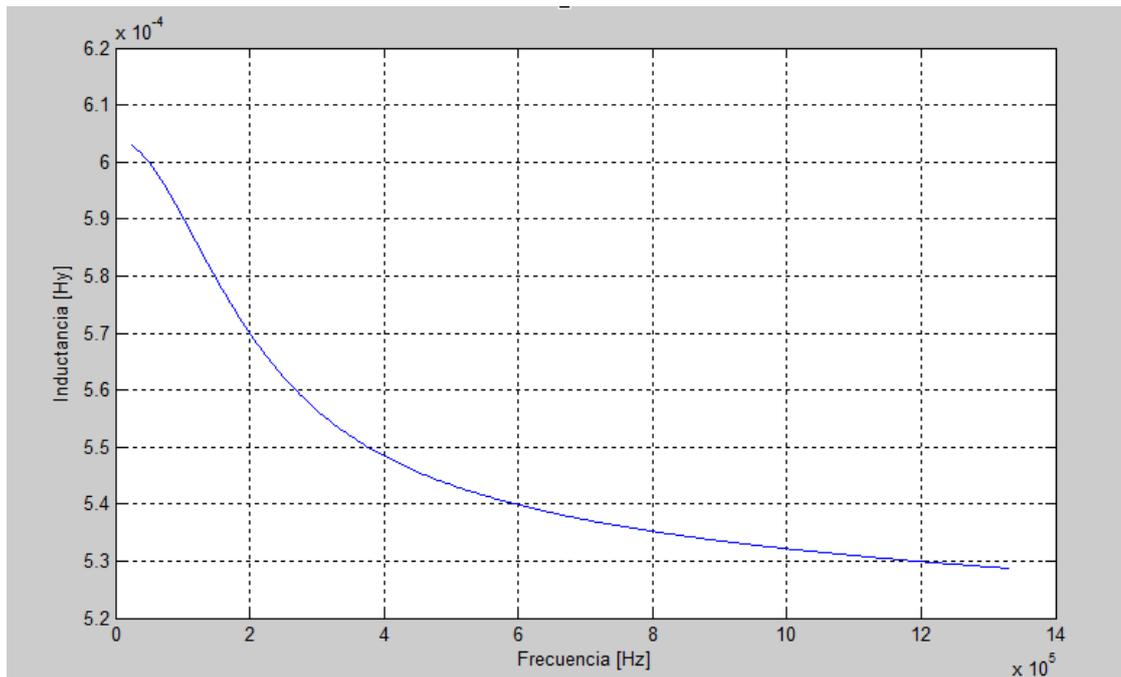
$$L_{ns} = -\frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{r}{d}\right)^2 4f_n^{(L)} = -\frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{r}{d}\right)^2 4\text{Re}\left[-\frac{J_2\left(\frac{1+j}{\delta}r\right)}{J_0\left(\frac{1+j}{\delta}r\right)}\right] \quad (15)$$

$$L_i = \frac{\mu_0\mu_r}{2\pi} f_i^{(L)} = \frac{\mu}{2\pi} \text{Re}\left[-\frac{\delta}{(1+j)r} \frac{J_0\left(\frac{1+j}{\delta}r\right)}{J_1\left(\frac{1+j}{\delta}r\right)}\right] \quad (16)$$

$$L_{ns} = -\frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{r}{d}\right)^2 4f_n^{(L)} = -\frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{r}{d}\right)^2 4\text{Re}\left[-\frac{J_2\left(\frac{1+j}{\delta}r\right)}{J_0\left(\frac{1+j}{\delta}r\right)}\right] \quad (17)$$

Como se ve, la inductancia propia de la línea  $L_a$  está determinada por el diámetro del alambre y la separación entre los conductores, es decir, la inductancia aumenta con el diámetro del alambre y disminuye con la separación de los alambres. La inductancia  $L_i$ , representa el efecto pelicular respecto a la variación de la frecuencia;  $L_n$  tiene en cuenta el efecto de proximidad. El efecto de la inductancia por las corrientes parásitas en el aislante y los pares adyacentes quedan representados con  $L_{ns}$ .

Si se considera un cable de calibre  $0,5 \text{ mm}$ , a partir de la simulación se puede obtener un gráfico de la variación de la inductancia en función de la frecuencia como se muestra en la Fig. 5.14.



**Figura 5-14- Inductancia vs frecuencia.**  
Fuente propia.

### 5.3.1.3 Conductancia.

Debido a la imperfección de los dieléctricos utilizados en los pares telefónicos, se presenta una corriente de fuga que da lugar a la conductancia  $G$  entre las líneas, lo que genera pérdidas a lo largo del bucle. La conductancia se calcula de forma inversa a la resistencia y queda definida de la siguiente forma:

$$G = \omega C \tan \delta \quad \left[ \frac{S}{m} \right] \quad (18)$$

### 5.3.1.4 Capacitancia.

Los conductores están separados por un material dieléctrico, de modo que también existe una capacitancia distribuida  $C$  a lo largo del conductor. La capacitancia de la línea es independiente de la frecuencia, por tal motivo no hay variaciones dentro o fuera del rango de trabajo. El valor de esta puede calcularse con la siguiente expresión:

$$C = \frac{\pi k \epsilon_0}{\cosh^{-1} \left( \frac{d}{D} \right)} \quad (19)$$

El valor típico de capacidad distribuida es de  $C = 50 \cdot 10^{-12}$  [F/m].

### 5.3.2 Parámetros secundarios.

---

Como se dijo anteriormente, los parámetros secundarios caracterizan al canal desde el punto de vista de la transmisión y se definen en función de los parámetros primarios de la línea y por tal motivo, su variación en frecuencia dependerá de la variación de estos.

#### 5.3.2.1 Impedancia característica ( $Z_0$ ).

---

Para que haya una transferencia máxima de energía de la fuente a la carga, es decir, que no haya energía reflejada, una línea de transmisión debe terminar en una carga puramente resistiva, e igual a la impedancia característica de ella.

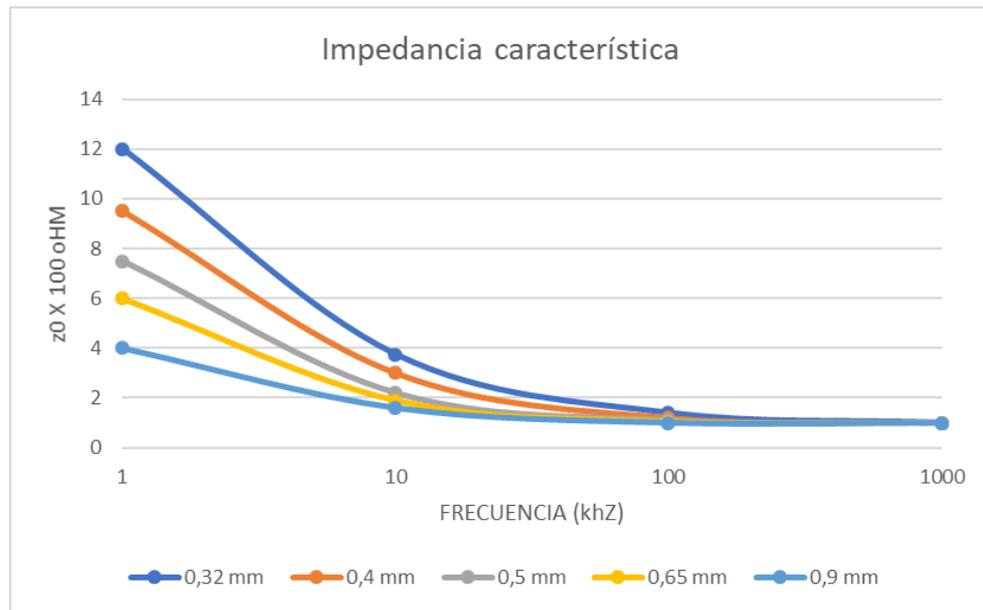
Esa impedancia característica se define como la impedancia vista hacia una línea de longitud infinita, o la impedancia vista hacia una línea de longitud finita que termina en una carga puramente resistiva igual a la impedancia característica de la línea.

Se puede demostrar, que:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j \omega L}{G + j \omega C}} \quad (20)$$

En los rangos medios de frecuencia, la variación de la misma provoca cambios en los valores de la resistencia y de la inductancia y, por consiguiente, la variación de  $Z_0$ .

La impedancia característica varía también con el calibre del cable como se muestra en la Fig. 5.15. En la tabla 7 se muestran los valores típicos de impedancia característica para los distintos tipos de transmisión.

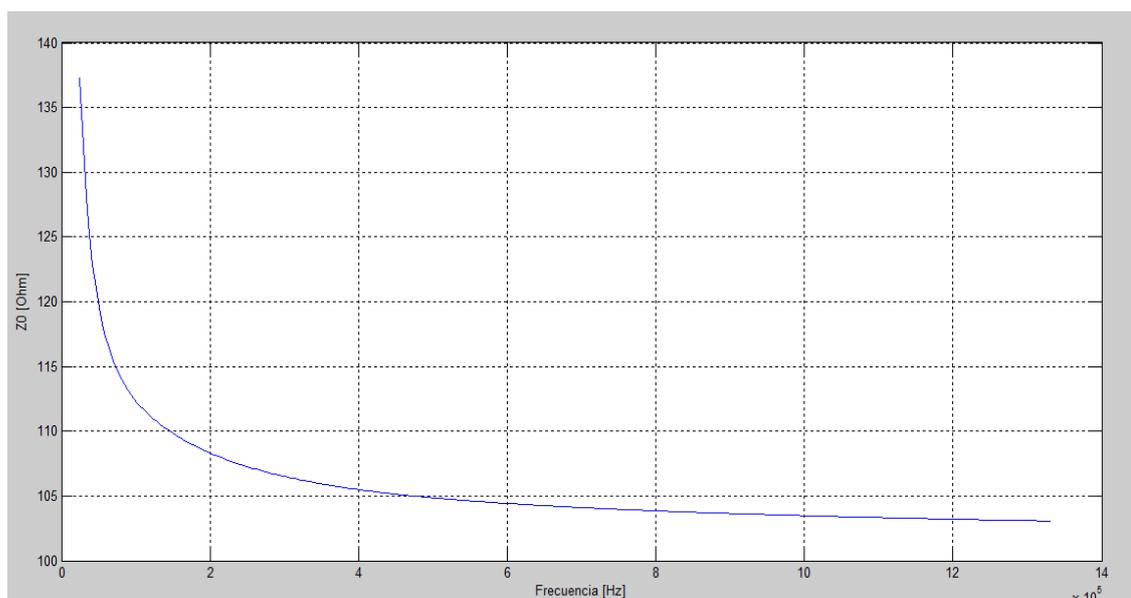


**Figura 5-15-Variación de impedancia vs frecuencia.**  
Fuente propia.

ADSL	100 ohm
HDSL	135 ohm
ISDN	150 ohm
Sistema telefónico tradicional	600 ohm

**Tabla 7-Impedancia característica.**  
Fuente propia.

De la simulación se obtiene la respuesta mostrada en la Fig. 5.16 para un conductor de 0,5 mm de diámetro:



**Figura 5-16-Variación de Z0 vs Frecuencia.**  
Fuente propia.

### 5.3.2.2 Constante de propagación.

---

La constante de propagación compleja de la línea de transmisión puede ser calculada a partir de los parámetros primarios de la misma y en función de los coeficientes de atenuación ( $\alpha$ ) y de fase ( $\beta$ ). Por lo tanto, se define a la constante de propagación según:

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad (21)$$

La ecuación anterior también puede escribirse como sigue:

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (22)$$

donde,  $\alpha$  es la constante de atenuación de la línea, expresada en neper/metro, y  $\beta$  es la constante de fase en rad/m.

### 5.3.2.3 Constante de atenuación.

---

La constante  $\alpha$  expresa la atenuación o pérdida de transmisión de la línea. Estas son debidas a diferentes causas, siendo una de las principales la disipación de potencia al exterior de la línea provocada por la heterogeneidad de las líneas telefónicas (diferentes calibres, derivaciones, puentes, secciones húmedas, etc.). Dicha constante se incrementa con el aumento de la frecuencia. De esta forma se puede escribir:

$$\alpha = \text{Re}(\gamma) \left[ \frac{\text{Np}}{\text{m}} \right] \quad (23)$$

La atenuación es una de las variables que más afecta a la línea de transmisión, por lo tanto, es de gran interés evaluar su comportamiento en el rango del espectro correspondiente al sistema bajo análisis.

En las Fig. 5.17 y 5.18 se muestran los resultados obtenidos para un conductor de 0,5 mm para longitudes de 1000 m y 3000 m respectivamente.

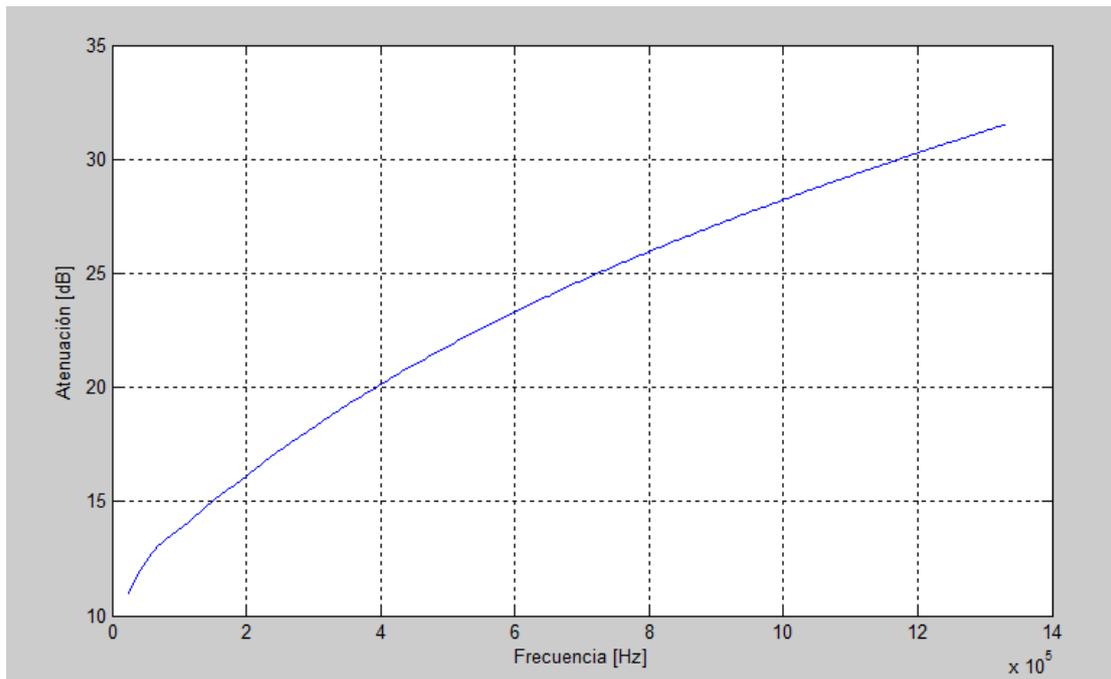


Figura 5-17- Atenuación vs frecuencia (l=1000 m).  
Fuente propia.

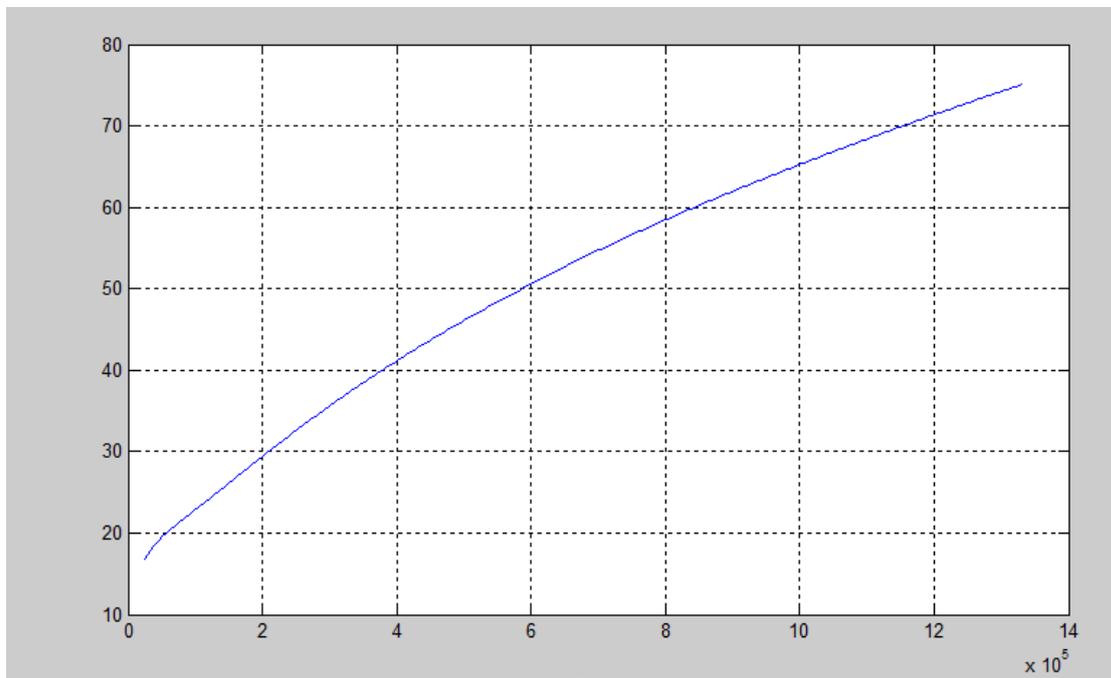


Figura 5-18- Atenuación vs frecuencia (l=3000 m).  
Fuente propia.

#### 5.3.2.4 Constante de fase.

---

La constante de fase ( $\beta$ ), expresa el desplazamiento de fase por unidad de longitud de una línea de transmisión. Generalmente es expresada en radianes por metro. Dicha constante queda definida como:

$$\beta = \text{Im}(\gamma) \left[ \frac{\text{Rad}}{\text{m}} \right] \quad (24)$$

#### 5.3.2.5 Velocidad de propagación.

---

Las ondas electromagnéticas viajan a la velocidad de la luz cuando se propagan en el vacío y casi a la velocidad de la luz cuando lo hacen a través del aire. Sin embargo, en las líneas de transmisión metálicas, donde el conductor suele ser de cobre, y en los materiales dieléctricos, la velocidad dependerá mucho del tipo de cable empleado, y la onda se propagará a una velocidad mucho menor a la antedicha.

La constante de velocidad (llamada a veces factor de velocidad) se define como la relación entre la velocidad real de propagación a través de determinado medio y la velocidad a través del vacío.

La velocidad a la que viaja una onda electromagnética por una línea de transmisión depende de la constante dieléctrica del material aislante que separa a los dos conductores. La constante dieléctrica depende del material que se use. Los inductores almacenan energía magnética, y los capacitores almacenan energía eléctrica. Como es sabido, se necesita un tiempo finito para que un inductor o un capacitor tome o ceda energía y, por consiguiente, la velocidad de propagación de la onda dependerá de la inductancia y capacitancia de la línea de transmisión. De acuerdo con esto y sabiendo que toda onda se desplaza a una longitud de onda por ciclo, y que en un segundo hay una cantidad de ciclos determinados por la frecuencia  $f$  de la señal, se obtiene:

$$V_p = \lambda f = \frac{2\pi f}{\beta} = \frac{\omega}{\beta} \left[ \frac{\text{km}}{\text{s}} \right] \quad (25)$$

Esta velocidad de propagación de fase, es la velocidad a la que se moverá una onda senoidal pura; una onda no senoidal repetitiva, es una suma de ondas senoidales de diferentes frecuencias y cada una de las cuales se propaga con una velocidad diferente.

Tal como se explicó anteriormente se simuló el caso particular tomando un conductor de 0,5 mm, dando la respuesta mostrada en la Fig. 5.19.

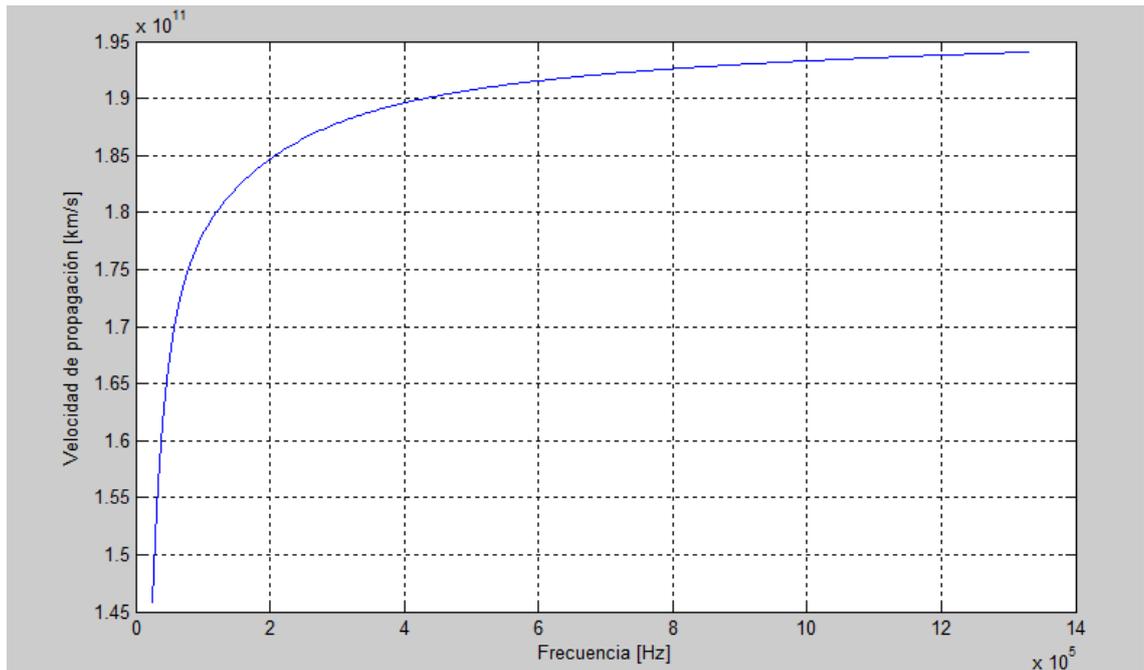


Figura 5-19- Velocidad de propagación vs frecuencia.  
Fuente propia.

Para saber a qué velocidad se propaga el conjunto de ondas senoidales, es decir, la señal completa, se define la **velocidad de grupo (Vg)** y para que todas estas señales lleguen al destino al mismo tiempo, se requiere que  $\beta$  varíe linealmente con la frecuencia, o sea que  $\omega/\beta$  sea constante para todas las frecuencias. Esta es la velocidad a la que se moverá la envolvente de la onda resultante para las señales moduladas.

El inverso de la velocidad de grupo por la longitud de la línea determina el retardo, el cual tiene gran influencia en la interferencia intersimbólica (ISI), provocando que las diferentes componentes espectrales se propaguen a velocidades diferentes, dando una dispersión en el tiempo de los pulsos transmitidos.

### 5.3.3 Resumen parámetros distribuidos.

A modo de síntesis, y para poder llevar a la práctica la implementación de estos parámetros mencionados anteriormente, se realizó el cálculo matemático de cada una de las funciones enumeradas en el apartado 5.3, con el fin de calcular los valores de los mismos para los diferentes puntos del espectro utilizado por el sistema y con las variables de calibre y longitud propias de la línea. Estas ecuaciones fueron programadas como funciones de MATLAB, las cuales son llamadas por el programa principal cada vez que el cálculo es requerido. El código se puede ver en el Apéndice 11.1, 11.2, 11.3 y 11.4.

### 5.3.4 Función de transferencia.

Para realizar la simulación como se aclaró anteriormente, se calcula una función transferencia que corresponde a una línea de transmisión abierta de dos conductores paralelos, con parámetros  $R$ ,  $L$ ,  $C$  y  $G$  distribuidos, que se puede suponer sobre un segmento infinitesimal, de manera que los mismos puedan considerarse concentrados en la forma que se muestra en la Fig. 5.20.

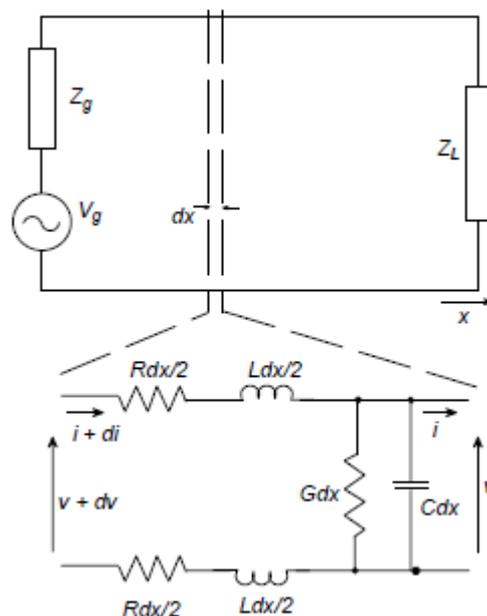


Figura 5-20- Línea de parámetros distribuidos.

Fuente: [8]. Tomasi W. [2003]. Sistemas de Comunicaciones Electrónicas (Cuarta Edición). México: Prentice Hall International, Inc.

El valor total de la resistencia en este elemento infinitesimal es  $Rdx$  ya que la resistencia por unidad de longitud  $R$  la cual está distribuida uniformemente a lo largo de las dos ramas del elemento infinitesimal de longitud  $dx$ . Es indistinto considerarla en las dos ramas o concentrada en una sola. Lo mismo sucede con la inductancia distribuida, cuyo valor en este segmento es  $Ldx$ .

En cambio, la capacidad y la conductancia en paralelo están concentradas en un solo elemento.

El voltaje y la corriente a la entrada del segmento infinitesimal son  $V + dv$  e  $i + di$  respectivamente y a la salida  $V$  e  $i$ . La caída de tensión en el segmento  $dx$  es  $dv$  y la corriente  $di$  circula a través de la conductancia y la capacidad en paralelo.

Si se aplican las leyes de Kirchoff al modelo de parámetros distribuidos y se suponen variaciones senoidales de la tensión y la corriente (ahora supuesto con parámetros concentrados), se obtiene:

$$dV = i(R + j\omega L)dx \quad (26)$$

$$di = V(G + j\omega C)dx \quad (27)$$

$$\frac{dV}{dx} = (R + j\omega L)i = Zi \quad (28)$$

$$\frac{di}{dx} = (G + j\omega C)V = YV \quad (29)$$

donde  $Z = R + j\omega L$  es la impedancia en serie e  $Y = G + j\omega C$  es la admitancia en paralelo, ambas por unidad de longitud.

Haciendo la segunda derivada a las ecuaciones anteriores:

$$\frac{d^2V}{dx^2} = ZYV \quad (30)$$

$$\frac{d^2i}{dx^2} = ZYi \quad (31)$$

La solución general para las Ec.(30) y Ec.(31) se pueden expresar como:

$$V(x) = V^+e^{-\gamma x} + V^-e^{\gamma x} \quad (32)$$

$$I(x) = I^+e^{-\gamma x} + I^-e^{\gamma x} \quad (33)$$

donde  $\gamma = \sqrt{ZY} = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} = \alpha + j\beta$  es la constante de propagación ya definida en los apartados previos en la Ec.(21) y Ec.(22).

Las Ec.(32) y Ec.(33) son las soluciones de la ecuación de onda para la tensión y la corriente en la línea respectivamente. Si se analiza un poco más dichas ecuaciones, se puede ver que la Ec.(32) representa la onda de tensión vista desde el extremo del generador, y con la ayuda de la Ec.(22) se puede reescribir como:

$$V(x) = V^+ e^{-\alpha x} e^{-j\beta x} + V^- e^{\alpha x} e^{j\beta x} \quad (34)$$

que expresada en función del tiempo queda:

$$V(x) = V^+ e^{-\alpha x} e^{-j(\omega t - \beta x)} + V^- e^{\alpha x} e^{j(\omega t + \beta x)} \quad (35)$$

Análogamente, para la corriente se llega a:

$$I(x) = I^+ e^{-\alpha x} e^{-j(\omega t - \beta x)} + I^- e^{\alpha x} e^{j(\omega t + \beta x)} \quad (36)$$

El primer término de la Ec.(35) representa una tensión de valor  $V^+$  que viaja del generador hacia la carga y decrece exponencialmente a lo largo de la línea conforme a  $e^{-\alpha x}$  (onda incidente). En cambio, el segundo término representa una onda de tensión que viaja en dirección opuesta a la anterior, es decir, desde la carga hacia el generador y cuya amplitud es  $V^-$  (onda reflejada); tiene amplitud creciente vista desde el generador.

Por lo tanto, la distribución de tensión a lo largo de la línea está dada por la suma de las ondas incidente y reflejada, lo que da lugar a una onda estacionaria a lo largo de la misma.

Si la impedancia de carga es igual al complejo conjugado de la impedancia característica de la línea, toda la energía se transmite a la carga, en otro caso, una parte de la energía de la onda incidente se refleja y vuelve al generador.

Se supone una línea de transmisión de longitud  $l$  y terminada en una impedancia  $Zl$  en  $x = l$ . Además, se aplica un generador ideal en el extremo considerado  $x = 0$ , por lo tanto, el modelo queda como el mostrado en la Fig. 5.21.

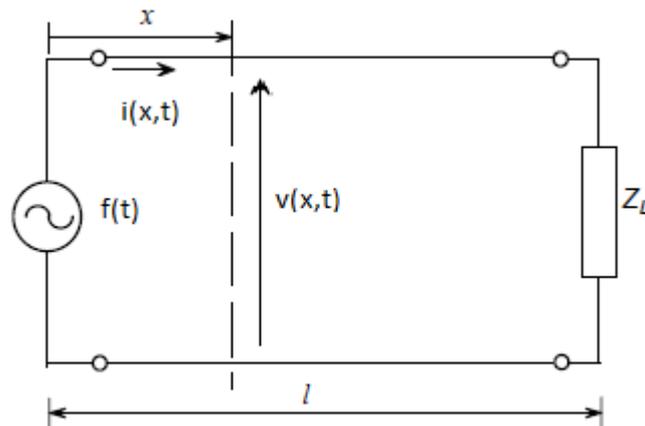


Figura 5-21-Línea de transmisión con generador ideal de largo  $x=l$ .  
Fuente propia.

Por lo tanto, planteando la Ec.(32) en los puntos  $x$  y  $l$  de la línea y utilizando Ec.(21) se obtiene la siguiente expresión para la función transferencia de la línea:

$$Hv(x) = \frac{e^{-\gamma(x-l)} + \rho e^{\gamma(x-l)}}{e^{\gamma l} + \rho e^{-\gamma l}} \quad (37)$$

donde  $\rho = \frac{Z_l - Z_0}{Z_l + Z_0}$  es el coeficiente de reflexión.

Ahora si se considera el mismo circuito, pero con un generador real de impedancia interna  $Z_g$ , se obtiene un modelo como se muestra en la Fig. 5.22.

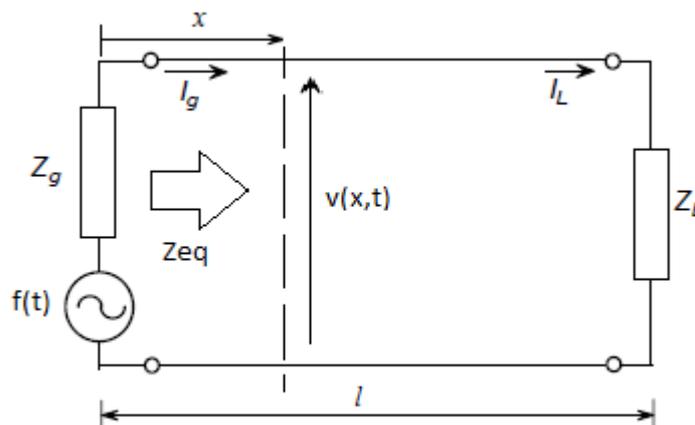


Figura 5-22-Línea de transmisión con generador real de largo  $x=l$ .  
Fuente propia.

En este modelo se puede sustituir la línea de transmisión por una impedancia equivalente  $Z_{eq}$  que queda determinada como:

$$Z(x) = \frac{V(x)}{I(x)} = Z_0 \left[ \frac{e^{-\gamma(x-l)} + \rho e^{\gamma(x-l)}}{e^{-\gamma(x-l)} - \rho e^{\gamma(x-l)}} \right] \quad (38)$$

De esta manera se definen dos coeficientes de reflexión:

$$\rho_L = \frac{Z_l - Z_0}{Z_l + Z_0} \quad \text{Coeficiente de reflexión en la carga} \quad (39)$$

$$\rho_g = \frac{Z_g - Z_0}{Z_g + Z_0} \quad \text{Coeficiente de reflexión en el generador} \quad (40)$$

En el circuito anterior se puede observar que la tensión de entrada se ve atenuada por un factor igual a  $\frac{Z_g}{Z_g + Z_{eq}}$  y por lo tanto la función de transferencia  $H'_v$  será de la misma forma que Ec.(37) pero atenuada por dicho factor. Por lo tanto, la función transferencia de la línea de transmisión con fuente no ideal queda:

$$H'_{v} = \frac{Z_0}{Z_0 + Z_g} \left[ \frac{(1 + \rho_L)e^{-\gamma l}}{1 - \rho_L \rho_g e^{-2\gamma l}} \right] \quad (41)$$

Mediante la implementación de todas las ecuaciones descritas anteriormente sobre el entorno MATLAB<sup>®</sup> se puede emular un modelo matemático de la respuesta en frecuencia del medio de transmisión, el cual se denomina  $H(f)$ . Como se dijo anteriormente, dicho modelo tiene una respuesta del tipo pasa bajo, la cual va a afectar a cada una de las portadoras en su amplitud y fase. Por lo tanto, la señal generada en el dominio de la frecuencia es afectada por la respuesta del canal calculado. De este modo, se obtiene la señal afectada por las distorsiones del mismo tal como se muestra en la Fig. 5.23.

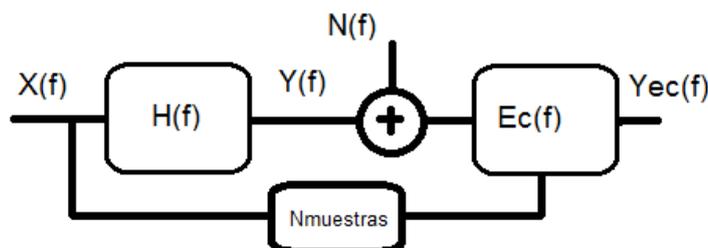


Figura 5-23-Función Transferencia.  
Fuente propia.

Como se puede observar la señal  $Y(f)$  ya distorsionada por el canal será igual a:

$$Y(f) = X(f) \times H(f) \quad (42)$$

Esta señal obtenida luego será afectada por ruidos propios del sistema y posteriormente ecualizada con el fin de disminuir las distorsiones provocados por el canal, pero ambos puntos serán explicados con detalle en los siguientes apartados.

### 5.3.5 Generación de ruidos e interferencias.

---

Para simular las condiciones de funcionamiento típicas se contemplaron cuatro señales aditivas a la señal útil transmitida. La suma de estas señales interferentes se realizó en el dominio del tiempo en el punto de ingreso al receptor. Esto es debido a que si bien el ruido es capturado a lo largo de toda la línea, este punto, es el más vulnerable del sistema de transmisión, donde, el valor de la señal es el más débil.

Para realizarlo, se calcula la antitransformada de la señal transmitida, al dominio del tiempo, para luego sumarle las señales interferentes ya calculadas, y volver al dominio de la frecuencia mediante la transformada de *Laplace*.

#### 5.3.5.1 Ruido blanco (AWGN)

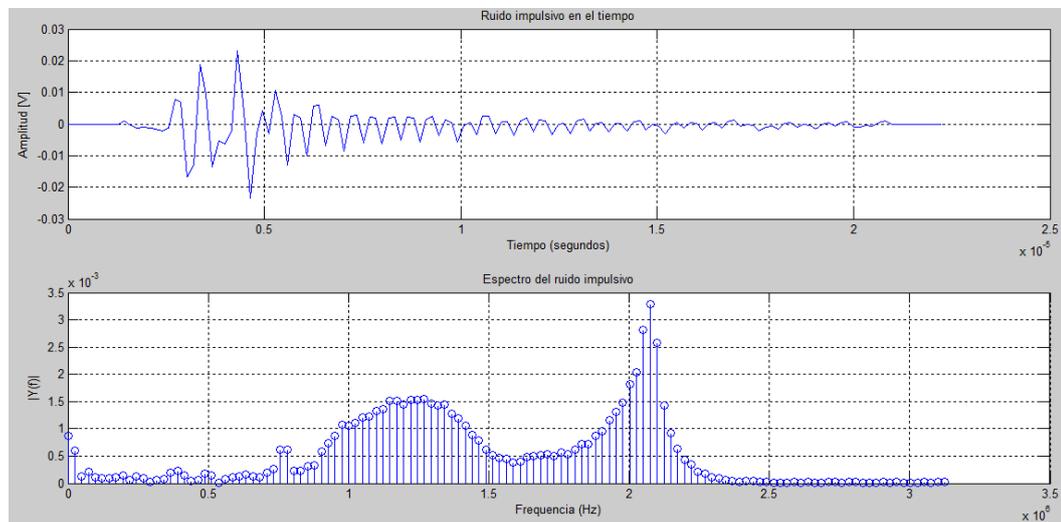
---

Los medios de transmisión de líneas cableadas que operan a una temperatura superior al cero absoluto ( $-273,15^{\circ}\text{C}$ ) presentan agitación térmica de los electrones, lo que genera ruido térmico permanente en dicho canal; por tal motivo se genera una fuente de ruido blanco que se suma a la salida del canal e interfiere con la señal útil transmitida.

La potencia de ruido se define respecto a la potencia de la señal transmitida, por medio de la SNR. Este valor se introduce por el operador desde la ventana de interfaz del simulador. Los valores de funcionamiento normal están entre 25-30 dB, siendo el límite operativo entre 8-10 dB dependiendo del ancho de banda, largo y estado de la línea.

### 5.3.5.2 Ruido Impulsivo

La segunda fuente de ruido, presente dentro de la simulación, es el ruido impulsivo, muy frecuente debido a las diversas fuentes que lo pueden generar. Para la simulación, se utilizó el indicado en la recomendación G.996.1. Esta recomendación prevé tablas de valores, con un formato típico de ruido impulsivo, con el fin de realizar pruebas estandarizadas en diferentes medios de líneas digitales. Con estos valores, se obtuvo la respuesta temporal y espectral mostrada en la Fig. 5.24.



**Figura 5-24-Ruido impulsivo.  
Fuente propia.**

La tabla 8 contiene la amplitud de la forma de onda de ruido impulsivo en milivoltios a intervalos de 160 nanosegundos, según lo que describe la citada recomendación.

Intervalo #	Amplitud mV	Intervalo #	Amplitud mV	Intervalo #	Amplitud mV
1	0,0000	51	-6,3934	101	0,1598
2	0,0000	52	1,7582	102	-1,7582
3	0,0000	53	2,2377	103	0,1598
4	0,0000	54	-4,9549	104	0,4795
5	0,0000	55	2,2377	105	-1,2787
6	0,0000	56	1,7582	106	0,7992
7	0,0000	57	-5,5943	107	1,2787
8	0,0000	58	1,4385	108	-0,7992
9	0,0000	59	2,3975	109	0,0000
10	0,9590	60	-3,6762	110	-0,3197
11	-0,4795	61	1,4385	111	-2,2377
12	-1,2787	62	0,4795	112	-1,1188
13	-1,1188	63	-5,7541	113	-0,7992
14	-1,4385	64	-0,4795	114	-1,5984
15	-1,5984	65	0,3197	115	0,1598
16	-2,2377	66	-3,3566	116	0,4795
17	-1,4385	67	2,3975	117	-0,9590
18	7,6721	68	2,3975	118	0,0000
19	6,7131	69	-3,1967	119	-0,3197
20	-16,6229	70	0,7992	120	-1,5984
21	-12,9467	71	0,6393	121	0,0000
22	18,7008	72	-3,5164	122	0,4795
23	9,5902	73	1,1188	123	-0,7992
24	-13,5861	74	1,7582	124	0,4795
25	-5,2746	75	-2,3975	125	0,7992
26	-6,3934	76	1,2787	126	-0,9590
27	-1,9180	77	0,9590	127	-0,9590
28	23,0164	78	-3,3566	128	-0,4795
29	3,9959	79	0,0000	129	-0,6393
30	-23,4959	80	0,1598	130	0,4795
31	-3,1967	81	-3,0369	131	1,1188
32	4,3156	82	1,1188	132	0,0000
33	-3,0369	83	1,5984	133	0,0000
34	10,7090	84	-2,0779	134	0,0000
35	2,2377	85	0,1598	135	0,0000
36	-12,9467	86	0,3197	136	0,0000
37	3,1967	87	-2,5574	137	0,0000
38	1,9180	88	0,1598	138	0,0000
39	-9,9098	89	0,1598	139	0,0000
40	5,5943	90	-2,0779	140	0,0000
41	5,9139	91	0,6393		
42	-6,7131	92	0,9590		
43	2,3975	93	-1,7582		
44	1,2787	94	-0,1598		
45	-8,4713	95	-0,6393		
46	2,5574	96	-3,0369		
47	2,8771	97	-0,3197		
48	-6,0738	98	0,4795		
49	2,2377	99	-1,4385		
50	1,7582	100	0,4795		

**Tabla 8-Ruido impulsivo.**  
Fuente: recomendación UIT- G996.1 [2003]

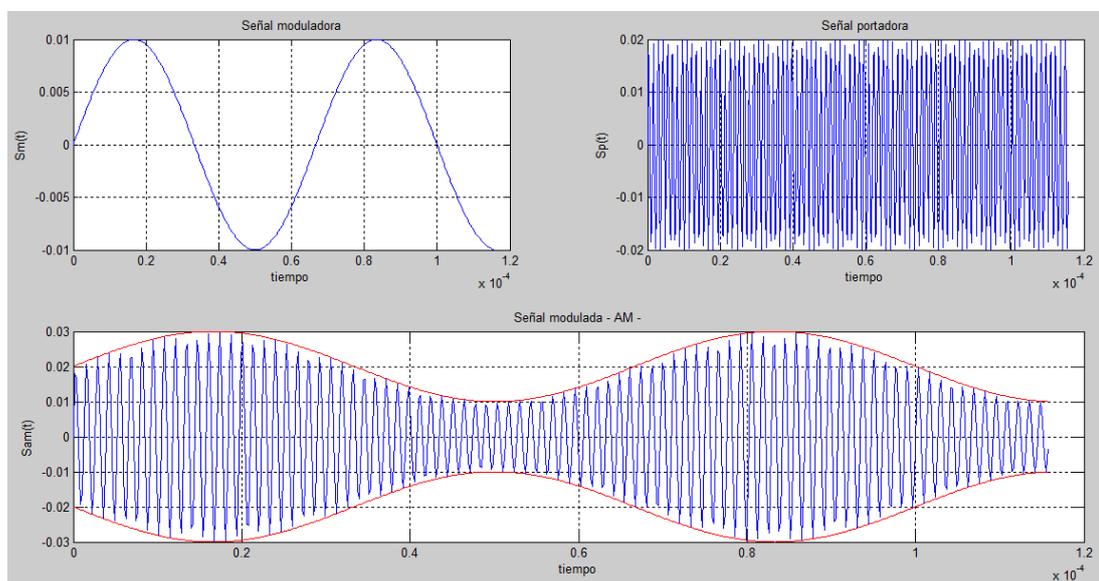
El ruido impulsivo, al ser una señal de corta duración y aparición aleatoria, se incorpora en tres instantes durante el período de simulación, lo que se realiza por medio de un generador de pulsos que habilita e inhabilita su ingreso al receptor.

Cabe aclarar que la aparición de dicho ruido es demorada para que la misma no interfiera en la etapa de negociación donde se realiza la aproximación del canal para efectuar la ecualización.

### 5.3.5.3 Ruido AM.

La última fuente generada no se trata de un ruido sino de una señal interferente, producto de una transmisión comercial de amplitud modulada. Este ruido, a diferencia del ruido impulsivo, se produce de forma permanente y es generalmente captado por el canal cuando existen problemas de aislación en la línea o desbalances de los pares, actuando dicho desbalance como “antena”.

La señal considerada se trata de una frecuencia portadora de  $760\text{ kHz}$  modulada por un único tono de  $15\text{ kHz}$  y un índice de modulación de  $m = 0,5$ . En las Fig. 5.25 y Fig. 5.26 se muestra el gráfico de la señal interferente en el tiempo y en el espectro de frecuencia respectivamente.



**Figura 5-25-Ruido AM en el tiempo.  
Fuente propia.**

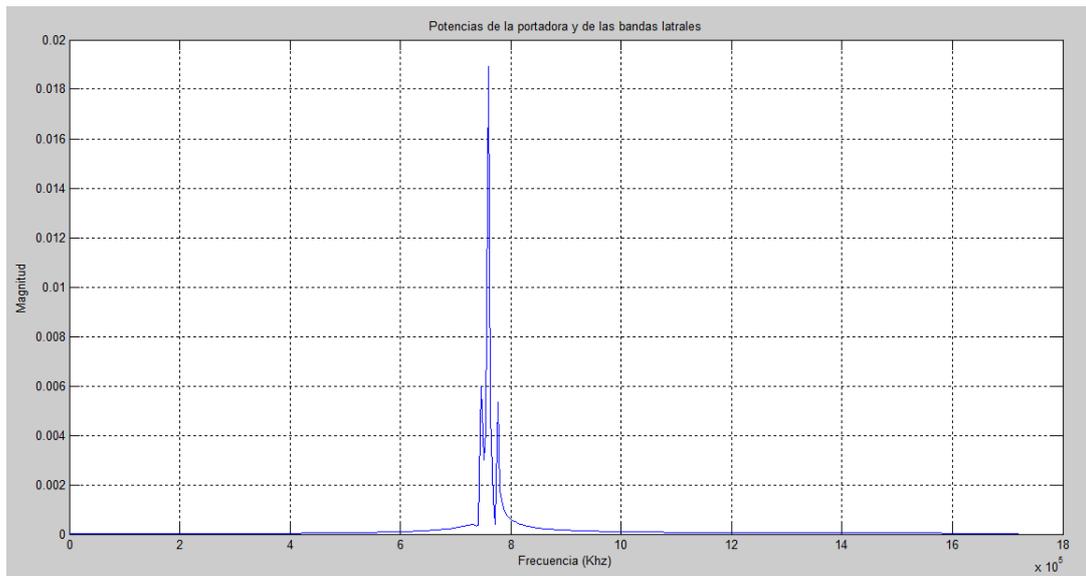


Figura 5-26-Ruido AM en el espectro.  
Fuente propia.

#### 5.3.5.4 NEXT y FEXT hacia el destino

Según indica la recomendación UIT-T 996.1 [3] se simula la presencia de señales inducidas por los pares vecinos desde el extremo cercano (NEXT) y desde el extremo lejano (FEXT) del origen hacia el destino, es decir, desde el DSLAM hasta el módem del cliente sobre la banda de bajada de datos.

La PSD que perturba el medio de transmisión, se puede expresar como:

$$PSD_{Disturber} = K_{G.992.1} \times \frac{2}{f_0} \times \frac{\left[ \text{sen} \left( \frac{\pi f}{f_0} \right) \right]^2}{\left( \frac{\pi f}{f_0} \right)^2} \times |LPF(f)|^2 \times |HPF(f)|^2, \quad (0 < f < \infty) \quad (43)$$

donde:  $f_0 = 4,418 \times 10^6$  Hz,  $K_{G.992.1} = 0,1104$  W

Esta ecuación da la PSD unilateral, donde el término  $K_{G.992.1}$  es la potencia transmitida total en Watts desde el transmisor hacia el destino. La función sinc es la representación en frecuencia de la señal de muestreo a una frecuencia igual a  $f_0$ , la que luego es afectada por los filtros de conformación que son los siguientes:

$$|LPF(f)|^2 = \frac{f_h^\alpha}{f^{\alpha+} f_h^\alpha}, \quad f_h = 2,208 \times 10^6 \text{ Hz}, \quad \alpha = \frac{36}{10 \log(2)} = 11,96 \quad (44)$$

Es un filtro pasabajos con frecuencia de 3 dB en 2208 kHz y decremento de 36 dB/octava con el efecto de limitar en banda la señal transmitida.

Por otra parte, se puede establecer:

$$|HPF(f)|^2 = \frac{f^\alpha + f_l^\alpha}{f^\alpha + f_h^\alpha}, \quad f_l = 4000 \text{ Hz}, \quad f_h = 25875 \text{ Hz}, \quad \alpha = \frac{57,5}{10 \log \frac{f_h}{f_l}} = 7,09 \quad (45)$$

Es un filtro pasa alto con frecuencia de 3 dB en 4 y 25,875 KHz y atenuación de 57,5 dB en la banda de voz que separa el sistema ADSL (internet) del de POTS (voz).

#### 5.3.5.4.1 FEXT hacia el destino.

El modelo de atenuación de FEXT según UIT-996.1 [3] es de características similares a la citada en Ec.(43), pero en este caso por ser de extremo lejano se tiene en cuenta la atenuación producida por el propio canal, por lo tanto:

$$|H_{FEXT}(f)|^2 = |H_{CHANNEL}(f)|^2 \times k \times l \times f^2 \times p \quad (46)$$

donde:

$|H_{FEXT}(f)|^2$  es la función transferencia del canal.

$k$  es la constante de acoplamiento y es  $8 \times 10^{-20} \times \left(\frac{n}{49}\right)^{0,6}$  para  $n < 50$

$l$  es la longitud del trayecto de acoplamiento en metros.

$f$  frecuencia en Hz.

$n$  es la cantidad de perturbadores.

$p$  es una constante de conversión de metros a pies, igual a 3,28 pies/m

Por lo tanto, la PSD de ruido de FEXT es:

$$PSD_{FEXT} = PSD_{Disturber} \times |H_{FEXT}(f)|^2 \quad (47)$$

#### 5.3.5.4.2 NEXT hacia el destino.

La PSD de NEXT, según UIT-996.1 [3] se define como:

$$PSD_{NEXT} = PSD_{Disturber} \times \left(x_n \cdot f^{3/2}\right) \quad \text{para } 0 \leq f < \infty, n < 50 \quad (48)$$

donde:  $x_n = 8,818 \times 10^{-14} \times \left(\frac{n}{49}\right)^{0,6}$

Si bien este tipo de interferencia es el de mayor potencia, debido a que no es atenuado por el canal por producirse en extremo cercano, también es el más fácil de

evitar, mediante un sistema que transmite y recibe datos sobre diferentes bandas, como es el caso de ADSL. Por ejemplo, dados dos clientes con pares adyacentes, lo transmitido por el cliente "A" en sentido upstream no puede acoplarse sobre el downstream del cliente "B", debido a que está sobre una banda diferente. Solo podrá acoplarse en sentido upstream, pero sobre el extremo lejano (FEXT).

### 5.3.5.5 NEXT y FEXT hacia el origen.

En este caso, la interferencia se produce sobre el canal correspondiente a la subida de datos, es decir, sobre la parte baja del espectro de ADSL.

La señal transmitida desde el módem de un cliente interfiere sobre la misma banda de un cliente adyacente según se indica en las siguientes ecuaciones.

La densidad espectral de potencia para los perturbadores es:

$$PSD_{Disturber} = K_{G.992.1} \times \frac{2}{f_0} \times \frac{\left[ \text{sen} \left( \frac{\pi f}{f_0} \right) \right]^2}{\left( \frac{\pi f}{f_0} \right)^2} \times |LPF(f)|^2 \times |HPF(f)|^2, (0 < f < \infty) \quad (49)$$

donde:  $f_0 = 276 \times 10^3$  Hz,  $K_{G.992.1} = 0,02185$  W

Esta ecuación indica la PSD unilateral, donde  $K_{G.992.1}$  es la potencia transmitida total en Watts para el transmisor hacia el origen antes de los filtros de conformación y  $f_0$  es la frecuencia de muestreo.

Además:

$$|LPF(f)|^2 = \frac{f_h^\alpha}{f^\alpha + f_h^\alpha}, \quad f_h = 138 \times 10^3 \text{ Hz}, \quad \alpha = \frac{24}{10 \log(181,125/138)} = 20,32 \quad (50)$$

Es un filtro pasabajos con punto de 3 dB en 138 kHz y atenuación de 24 dB en 181,125 kHz.

Por otra parte, se tiene:

$$|HPF(f)|^2 = \frac{f^\alpha + f_l^\alpha}{f^\alpha + f_h^\alpha}, \quad f_l = 4000 \text{ Hz}, \quad f_h = 25875 \text{ Hz}, \quad \alpha = \frac{59,5}{10 \log \frac{f_h}{f_l}} = 7,34 \quad (51)$$

que es un filtro pasa altos con frecuencia de 3 dB en 4 y 25,875 KHz con una atenuación de 59,5 dB en la banda vocal.

#### 5.3.5.5.1 FEXT hacia el origen.

Nuevamente, el modelo de atenuación de FEXT hacia el origen se define en forma idéntica que en la Ec.(46), por lo tanto, la PSD de ruido de FEXT, usando Ec.(49) queda en una forma idéntica a Ec.(47):

$$PSD_{FEXT} = PSD_{Disturber} \times |H_{FEXT}(f)|^2 \quad (52)$$

#### 5.3.5.5.2 NEXT hacia el origen.

Del mismo modo que el NEXT hacia el destino, este efecto es reducido por el sistema de transmisión separado en banda.

### 5.4 Receptor de datos.

---

En este espacio se implementan todos los sistemas necesarios para la recepción adecuada y decodificación de la señal recibida. Dicho proceso consta de la ecualización del canal, demodulación y decodificación de los datos.

#### 5.4.1 Ecualización de canal.

---

Este proceso tiene como fin calcular una aproximación del canal utilizando las primeras 40 tramas transmitidas, dadas por conocidas del lado del receptor en el inicio de la transmisión dentro de un período conocido como “negociación” entre el DSLAM y el módem. La aproximación se alcanza al comparar estas tramas conocidas con aquellas que fueron recibidas y afectadas por el canal en cuestión. Estas muestras son ingresadas a un registro desplazamiento que las almacena para luego calcular la distorsión ingresada por el canal en cada una de ellas. Una vez transcurrido este periodo de negociación, el ecualizador queda definido y es utilizado para todo el periodo de simulación. Este proceso puede verse implementado en la Fig. 5.27.

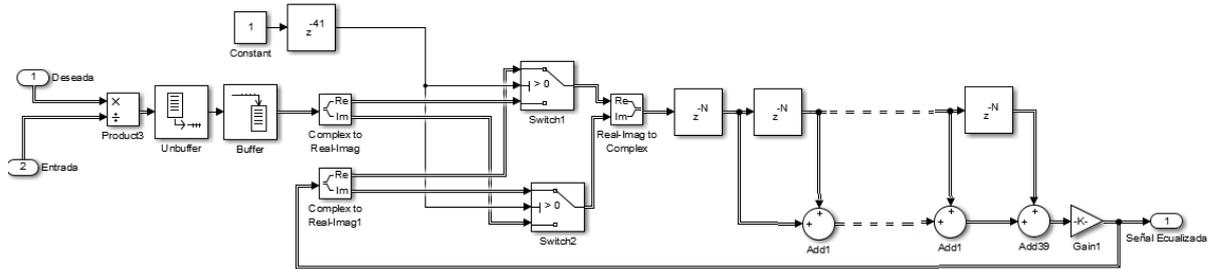


Figura 5-27-Ecuadorador.  
Fuente propia.

#### 5.4.2 Demodulador.

Una vez recibida la señal y ecualizada para disminuir los defectos provocados por el canal, se procede a reconstruir los datos enviados. Esto se realiza mediante un bloque demodulador DMT. Este bloque se compone de 512 demoduladores para cada una de las portadoras. A partir de este bloque se deja de tener una señal analógica para pasar a una señal digital, es decir, bits, los cuales serán concatenados y reordenados en tramas para obtener los datos tal cual fueron transmitidos. En la Fig. 5.28 se muestra cómo queda formada esta etapa.

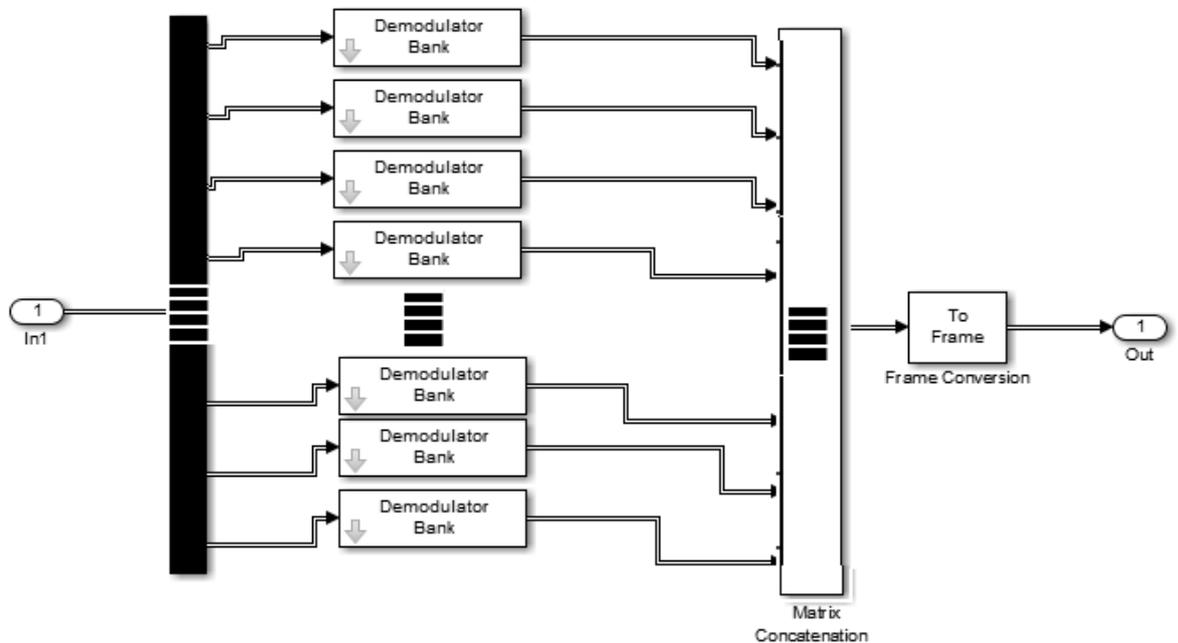
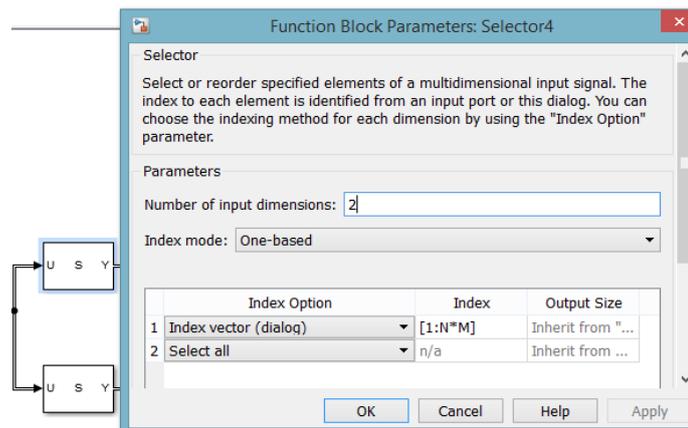


Figura 5-28-Demodulador DMT.  
Fuente propia.

### 5.4.3 Multiplexado de datos

Como se explicó anteriormente en la conformación de la señal los datos se dividen en dos caminos, el *fast* y el *interleaved*. Esto mismo se debe realizar en el lado receptor para obtener los datos tal cual fueron transmitidos por lo tanto se realiza un multiplexado para separar estas dos ramas de igual cantidades de datos.

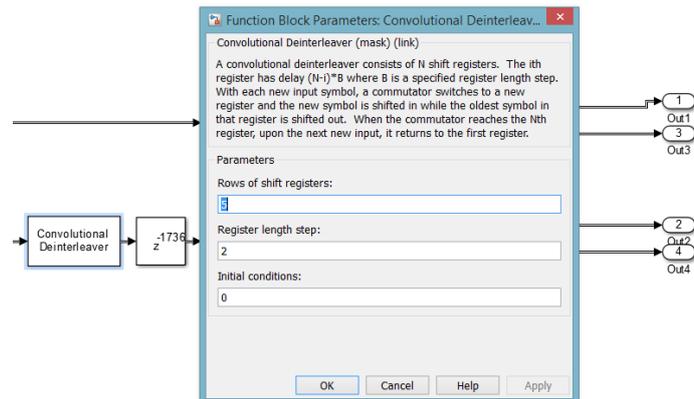
Estos bloques se muestran en la Fig. 5.29.



**Figura 5-29-Multiplexado de datos.**  
Fuente propia.

### 5.4.4 Desentrelazado y demora.

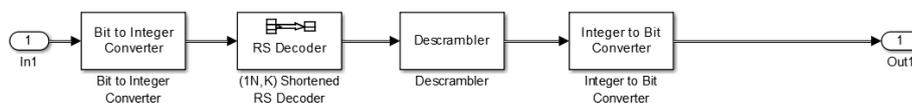
En esta etapa se procede a reordenar los datos que fueron transmitidos por el camino con *interleaved*. El proceso consta en realizar el almacenamiento de los datos recibidos para luego reubicar en el lugar correspondiente cada uno de los datos. Este proceso conlleva un cierto tiempo de latencia extra a la de transmisión, por lo cual se agrega un bloque que representa tal situación. En el bloque desentrelazado se mantienen los mismos parámetros que los utilizados en la etapa de transmisión. Esto se puede observar junto al bloque de demora mencionado en la Fig. 5.30.



**Figura 5-30-Deinterleaver.**  
Fuente propia.

#### 5.4.5 Scrambler y FEC.

Esta etapa es la encargada de realizar todos los controles y correcciones de errores gracias a los bits de redundancia que fueron agregados. El funcionamiento de cada uno de los bloques realiza el proceso inverso al expuesto en el sistema de conformación de señal. En la Fig. 5.31 se puede ver conformada esta última etapa.



**Figura 5-31-Descrambler y FEC.**  
Fuente propia.

#### 5.4.6 Detector de síndrome CRC.

En esta última etapa del receptor se controlan los errores de bits y tramas mediante el código CRC generado en el transmisor. A partir de este bloque se puede visualizar aquellos bits y tramas que han superado la transmisión con éxito al no haber sido perturbados por las acciones del medio o por haber podido ser recuperados gracias al robusto sistema de protección de errores. En la Fig. 5.32 se muestra este último bloque.

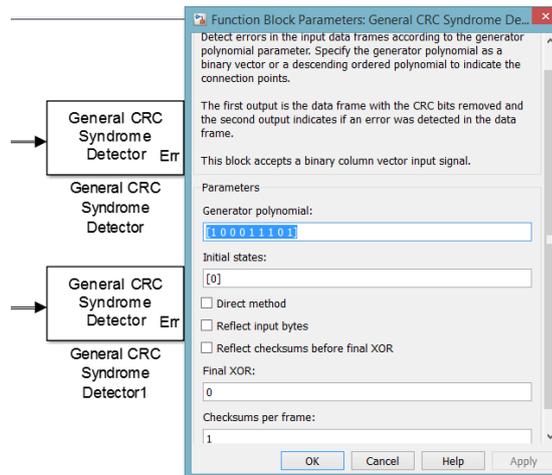


Figura 5-32-Detector síndrome CRC.  
Fuente propia.

## 5.5 Validación de datos.

Para evaluar el rendimiento de la línea en las condiciones establecidas, se cuantifican los errores producto de los ruidos interferentes ya descritos, los cuales producen una degradación de la transmisión sumado a las propias pérdidas del canal.

Como variable de cuantificación del estado del par telefónico analizado, se utiliza el porcentaje de datos libre de errores con respecto al total. Tomando el cociente entre el número de tramas bien recibidas y el total de las mismas como la eficiencia del canal en estudio, se puede cuantificar el correcto funcionamiento del canal.

### 5.5.1 Cálculo de Relación de Error.

Este bloque es utilizado para determinar la relación de datos con error que llegan al receptor. Mediante la información obtenida desde el bloque CRC se puede calcular tanto la relación de error de bits como la relación de error de tramas. En el caso de la simulación se calculan ambos valores, pero se cuantifica el rendimiento del canal con aquel obtenido desde los errores en tramas, ya que un error aquí, obliga al receptor a solicitar una retransmisión de las tramas perdidas, disminuyendo con esto la velocidad neta del canal. Los bloques descritos se concatenan como se muestra en la Fig. 5.33.

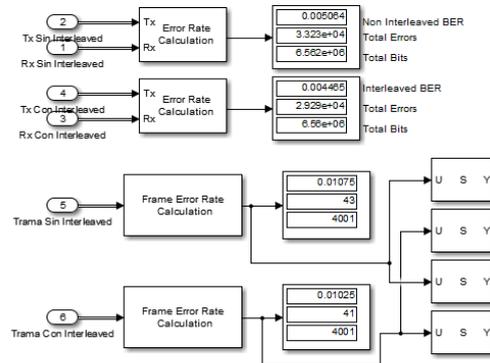


Figura 5-33-Calculo de relación de error.  
Fuente propia.

### 5.5.2 Cálculo de Velocidad real y Eficiencia.

Para terminar con la validación de datos se realizan los cálculos de velocidad real transmitida, es decir, solo aquellos datos que llegan libres de errores o fue posible su corrección. Este valor se separa en aquella porción destinada a subida de datos y descarga de datos y es mostrada en el panel principal, lo que permite ver un valor cierto de la capacidad del canal.

En segundo lugar, se realiza un cálculo de eficiencia, siendo esta calculada como se indica en la Ec.(53). Este índice brinda el rendimiento del canal estudiado para las variables que se eligieron en el panel principal. Esta etapa queda como se muestra en la Fig. 5.34.

$$\frac{N^{\circ} \text{ de tramas sin error}}{N^{\circ} \text{ de tramas total}} \times 100\% \quad (53)$$



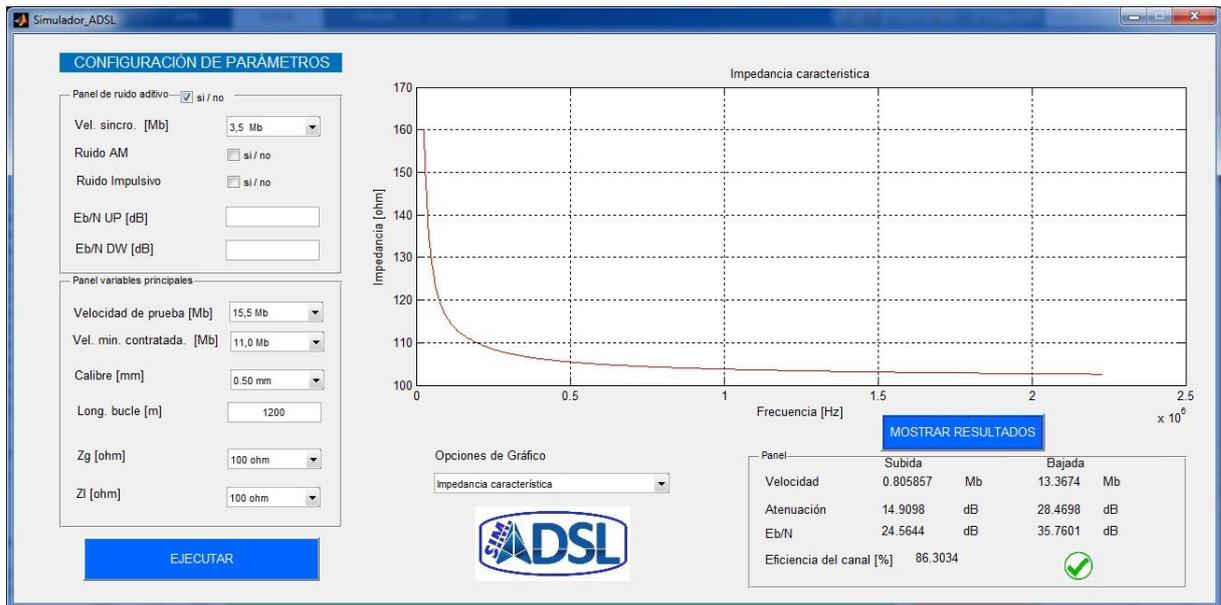


Figura 5-35-Entorno gráfico.  
Fuente propia.

### 5.6.1 Panel de Variables.

Dentro de este entorno se pueden encontrar diferentes acciones a realizar. Desde el panel de variables se selecciona la velocidad de prueba, la cual cubre 15 posibilidades entre 3,5 Mb y 25 Mb como se indica en la Fig. 5.36.

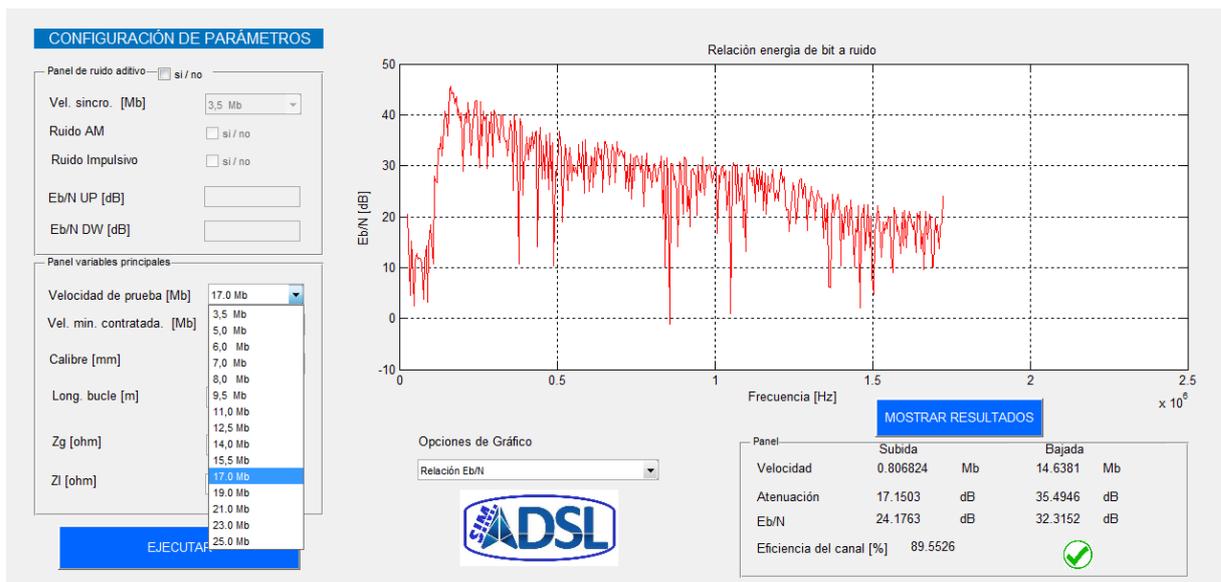


Figura 5-36 Velocidades disponibles.  
Fuente propia.

Vale aclarar que, a mayor velocidad de transmisión, deben corresponder mejores aptitudes del canal, ya que las mismas requieren mayor rendimiento del sistema. Una vez elegido este valor, en segundo lugar, se selecciona la velocidad mínima contratada y el calibre del cable de la línea de transmisión. Los valores comerciales existentes son de 0.32 mm, 0.4 mm, 0.5 mm, 0.65 mm y 0.9 mm. De acuerdo al calibre seleccionado se asignarán los parámetros correspondientes a la línea y se calcula el comportamiento.

En tercer lugar, aparecen los ruidos, aquí se selecciona si en el canal existe presencia de ruido, que puede ser tanto Ruido AM como Ruido Impulsivo. Estos ruidos no tienen parámetros de configuración, ya que los mismos no son cuantificables en forma remota, solo se detecta su existencia o no. El ruido estará presente si una tilde aparece dentro del “check box”, y por el contrario, si este aparece vacío, no se le sumará ruido a la señal transmitida.

Además de los dos ruidos mencionados anteriormente, también se encuentra la adición de ruido blanco, existente en toda transmisión. Al estar presente en toda transmisión ya no existe un “check box” que indique presencia o no, sino un cuadro de texto en el cual se introduce la relación energía de bit a ruido ( $E_b/N$ ) expresado en dB con la que se desea realizar la simulación. A partir de este valor, el simulador elevará el piso de ruido con el fin de emular dicha circunstancia y generar la distribución de bits de acuerdo a la misma.

La interferencia de FEXT se considera siempre presente en el medio con un valor de 10 señales interferentes, debido a que es el número medio de clientes con ADSL activo que comparten una caja de 25 pares.

Siguiendo la línea de variables, luego se encuentra la longitud de lazo. Esto se refiere al largo de la línea desde la central hasta el abonado. Los valores se ingresan en el “edit box” expresado en metros y permite valores desde 100 m a 3000 m. A mayor largo de línea, mayores serán las pérdidas del canal y, por lo tanto, el rendimiento del mismo bajará de forma considerable.

Por último, se encuentran las dos últimas variables a elegir, estas corresponden a las impedancias de generador y de carga. Estos se deben seleccionar desde un desplegable denominado “pop-up-menu”. Estos permiten valores de 25, 50, 100, 150 y 200 ohm. Lo recomendable es trabajar, en lo posible,

con el sistema adaptado para evitar distorsión, aunque la línea presenta una impedancia característica que varía con la frecuencia, estos valores rondan entre 100 y 150 ohm. Una elección de valores desadaptados generara perdidas adicionales en la transmisión.

Una vez que se realiza la configuración de todas las variables necesarias, ya se está en condiciones de “EJECUTAR” el simulador. Esta acción que se realiza desde un comando denominado “pushbutton” colocado debajo del panel de variables, habilitará al programa a abrir y correr el simulador realizado en simulink, para que pueda calcular todos los valores necesarios que componen la transmisión. Este proceso tardará algunos segundos (más precisamente entre 20 y 60 segundos, dependiendo de la capacidad de procesamiento) hasta que se puedan mostrar los resultados.

### 5.6.2 Área Gráfica.

---

En el centro se encuentra un área gráfica donde se pueden visualizar los diferentes comportamientos de los parámetros de la línea. Por debajo del gráfico hay un menú desplegable que permite elegir las diferentes opciones que se pueden ver en el área de gráfico, las cuales son:

- ✓ Atenuación.
- ✓ Distribución de bits.
- ✓ Impedancia característica.
- ✓ Inductancia de línea.
- ✓ Ruido de AM.
- ✓ Ruido impulsivo.
- ✓ Velocidad de propagación.
- ✓ Relación de  $E_b/N$

### 5.6.3 Área de resultados.

---

Una vez finalizada la simulación, se pueden observar los resultados. Esto se realiza presionando “Mostrar Resultados” y aparecerán las velocidades reales alcanzadas, es decir, los datos transmitidos sin error. Los mismos se muestran de forma discriminada entre el canal de subida y al canal de bajada. También, por

debajo de estos datos, se puede ver un porcentaje de eficiencia del canal. Esto permite interpretar en qué porcentaje de aptitud está la línea transmitiendo.

La medición de  $E_b/N$  es un término adecuado para cálculos de sistemas digitales y comparación de funcionamiento, esta es calculada como:

$$\frac{E_b}{N} = \frac{C}{N} \times \frac{B}{fb} \quad (54)$$

donde

$C$  es la potencia de portadora,

$N$  es la potencia de ruido,

$B$  es ancho de banda,

$fb$  es la frecuencia de bits.

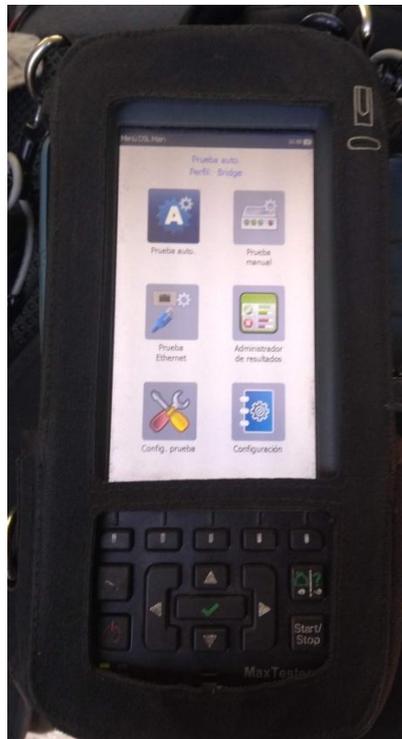
Al transmitir con velocidades diferentes, para las mismas condiciones de potencia de ruido y de señal, dicha relación disminuirá con el incremento de la velocidad (aumenta la frecuencia de bits), lo que provoca una limitación a la velocidad máxima posible según la capacidad de Shannon.

Sobre el mismo panel, aparece una tilde verde o una cruz roja indicando el éxito o fracaso respectivamente de la eficiencia de la transmisión simulada. El éxito está determinado por superar la transmisión de datos en más de un 20% la velocidad mínima contratada, en caso contrario se determina fracaso debido a que la línea es factible de reclamos debido a que su velocidad máxima es muy cercana o por debajo de la velocidad mínima contratada.

## 6 Mediciones realizadas.

### 6.1 Instrumental utilizado.

Con el fin de validar el modelo de simulación propuesto, se realizaron mediciones sobre algunas líneas de referencia, de modo de obtener los parámetros característicos de la conexión de ADSL de las mismas. Dichas mediciones se obtuvieron mediante un equipo que combina los instrumentos de medición más comunes de uso en redes de telecomunicaciones de cobre, para voz y banda ancha. Dicho equipo se denomina EXFO Max Tester 630, el cual se muestra en la Fig. 6.1.



**Figura 6-1-Equipo EXFO Max Tester 630.  
Fuente propia.**

El equipo, además de los parámetros eléctricos básicos de una línea, permite realizar mediciones en líneas XDSL tales como, atenuación, ruido, analizador de espectro, balance resistivo y ruido impulsivo. También cuenta con la opción de almacenar los datos para poder luego descargarlos y mostrarlos sobre una PC.

### 6.1.1 Método de medición.

---

Existen diferentes modalidades de medición con el equipo mencionado, cada una de ellas permite obtener distinta información sobre la línea. Las modalidades posibles son TDR (reflectometría en el dominio del tiempo), Analizador de espectro, Localizador de falla y Modem ADSL2+.

Se obtuvieron mediciones en modo módem de 43 líneas desde diferentes armarios de la red, ya que dicha metodología solo requiere conectar el equipo en un único extremo (extremo cliente). En cambio, las otras metodologías requieren la utilización de más de un instrumento e inhabilitar el servicio por un tiempo más prolongado.

### 6.1.2 Mediciones obtenidas modo módem.

---

El equipo permite conectarse desde el terminal cliente en modo módem y realizar diferentes mediciones de los parámetros de ADSL de la línea. Esta metodología permite medir velocidad de subida y bajada, velocidad máxima alcanzable, el margen de señal a ruido SNR, potencia de señal, presencia de ruido impulsivo, distribución de bits, atenuación, capacidad (relación de velocidad de bits alcanzada respecto a la velocidad de bits máxima alcanzable presentada como un porcentaje) y latencia.

El proceso de medición se realizó de la siguiente manera. Se setea el instrumento para la medición de XDSL en la pantalla principal y se accede a la configuración. Desde aquí se elige el tipo de servicio a probar, en este caso ADSL lo que permite medir sobre líneas con ADSL, ADSL2 y ADSL2+. Mientras se ejecuta la prueba, se muestran dos leds sobre la pantalla que indican el estado de conexión de la línea. Una vez conseguida la prueba, estos dos leds de estado desaparecen y se muestra el ícono de “éxito/fracaso” en la parte superior, mostrando la pantalla de medición de la Fig. 6.2.

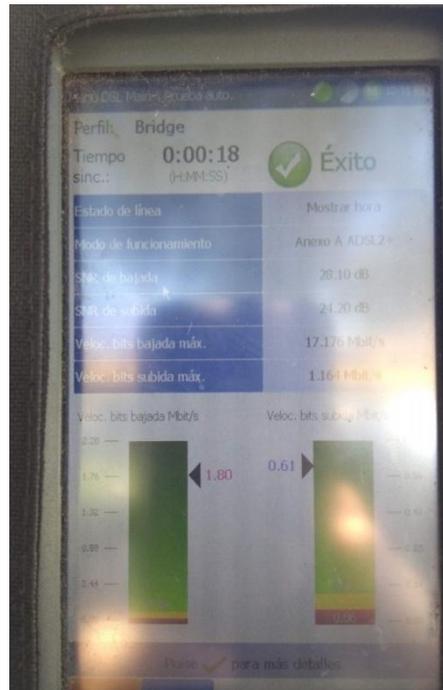


Figura 6-2 -Medicion ADSL.

Fuente propia.

En esta pantalla principal se pueden ver diferentes resultados de la prueba, los mismos se listan a continuación.

- **Perfil:** indica el nombre del perfil con que se ejecuta la prueba, con este nombre se guardarán los datos al ser exportados.
- **Tiempo de sincronismo:** es un temporizador ascendente que empieza a contar solamente cuando el Estado de línea llega a **Mostrar hora** (sincronizado).
- **Estado de línea:** muestra el estado de la línea que se está probando en el tiempo de negociación con el DSLAM.
- **Modo de funcionamiento:** es el modo xDSL de funcionamiento que fue negociado.
- **SNR bajado/subida:** es el valor del margen señal a ruido medido.
- **Velocidad máxima:** muestra la velocidad en bits máxima de bajada y subida alcanzable. Las velocidades reales de bits se muestran de forma gráfica en barras y los valores reales actuales aparecen en cifra sobre el marcador.

Luego de establecido el sincronismo y el resumen de medición, se pueden visualizar los **Detalle de parámetros DSL**, como se ve en la Fig. 6.3.

Parámetro	Bajada	Subida
Veloc. datos real	1.535 Mbit/s	0.445 Mbit/s
SNR	31.60 dB	31.60 dB
Atenuación	27.0 dB	16.5 dB
Capacidad	10.1 %	38.6 %
Veloc. datos máx.	15.168 Mbit/s	1.153 Mbit/s
Potencia de salida	16.40 dBm	12.10 dBm
Latencia	Intercalado	Intercalado
Retraso intercalac.	14 ms	7 ms
INP	18.5	3
Profund. intercalac.	384	8
Intercambio de bits	No activo	Activo
Trellis	Encendido	Encendido
G.INP	No activo	No activo

Figura 6-3- Detalle de parámetros.  
Fuente propia.

En esta pantalla, además de los valores anteriores mostrados en el resumen de prueba se muestran los siguientes datos:

- **Recuento pérdida de sincronismo:** es el número de veces que la unidad perdió la sincronización.
- **Velocidad de datos real:** muestra los valores a la que la unidad está transmitiendo.
- **SNR:** margen de la relación señal a ruido medida en la línea.
- **Atenuación:** es la atenuación de la línea medida durante la etapa de sincronismo.
- **Capacidad:** es la capacidad de la línea como relación de velocidad de bits alcanzada respecto a la velocidad de bits máxima alcanzable, presentada como un porcentaje.
- **Velocidad de datos máxima:** muestra la velocidad máxima alcanzable determinada por el DSLAM.
- **Potencia de salida:** es el nivel de potencia de transmisión actual expresada en dBm.

- **Latencia:** es el tipo de ruta fast/interleaved que fue negociado.
- **Retraso de intercalado:** Expresa el tiempo de demora introducido por el intercalado expresado en milisegundos.

Otra pantalla disponible es la ficha de estadísticas DSL, que permite ver las estadísticas del modo de transferencia y los contadores de error de DSL. Tal como se ve en la Fig. 6.4, se muestra el largo de bucle estimado a partir de la medición de atenuación.

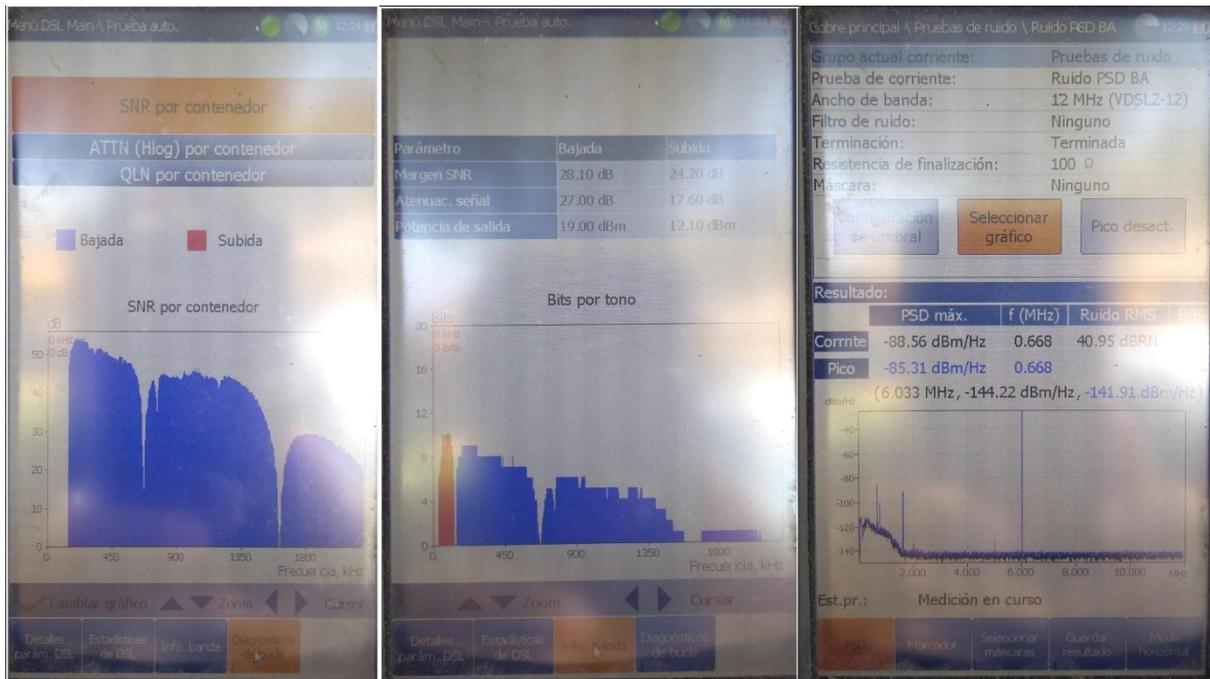
Contadores DSL	Local	Remoto
CRC	0	0
FEC	0	0
Segundos de error	0	0
HEC	0	0
Parámetro	Recibido	Transmitido
Bytes	0	0
Paquetes	0	0
Transporte ADSL	ATM	
Recuento pérdida sinc.	0	
Estado de vector	S/O	
KLO	36.19 dB	
EWL	4.64 kft / 1367 m	
Contador de rendimiento	Local	Remoto
G.INP.RTX_TX	S/O	S/O
G.INP.RTX_C	S/O	S/O
G.INP.RTX_UC	S/O	S/O
Muestras err. vectores env.	S/O	
Muestras err. vectores des.	S/O	

Figura 6-4-Estadísticas de xDSL.  
Fuente propia.

Por último, el instrumento permite ver una pantalla de **Información de banda**, donde se muestra una lista de detalles individuales de los parámetros de subida o bajada. Los parámetros mostrados son los siguientes:

- **Margen SNR:** es el margen de la relación señal/ruido actual medida en todos los subportadores activos.
- **Atenuación de señal:** es la reducción actual de la intensidad de la señal y se mide periódicamente cuando la línea está conectada.
- **Potencia Tx:** es la potencia de transmisión de subida o bajada para la banda seleccionada.

En esta misma pantalla se permite ver en forma gráfica la relación señal/ruido en función de la frecuencia. Por ejemplo, en la Fig. 6.5 se puede ver el producto de la interferencia de ruido AM sobre algunas portadoras. También se observa la distribución de bits adoptada para esa transmisión y el piso de ruido detectado.



(a)

(b)

(c)

Figura 6-5-(a) Relación Señal/ruido (b) Bit por tono (c) Piso de ruido.  
Fuente propia.

---

## 7 Plan de prueba.

---

En este apartado se comparan los valores reales medidos con los simulados, de modo tal de validar los resultados del simulador y evaluar la degradación del canal ante la presencia de ruido e interferencias. Tal como fue mencionado anteriormente, se tomó como marco de referencia lo que indica la Recomendación UIT-T 996.1. Esta etapa de prueba se divide en dos apartados: en primer lugar, se comprueba su comportamiento en el espectro de frecuencia y en segundo lugar se prueban líneas y sus parámetros de transmisión.

### 7.1 Comportamiento en frecuencia.

---

La etapa de prueba del simulador se comienza con un análisis de su respuesta en frecuencia. Para ello se miden diferentes líneas, mediante el uso del EXFO Max Tester 630 en modo analizador de frecuencia y contrastan las mediciones obtenidas con las simuladas.

En una primera prueba se analiza la SNR, producto del ruido blanco y las interferencias provocadas por líneas cercanas. Para ello, se toma lectura de una línea ADSL, de 1369 metros de largo, un calibre de 0,5 mm. Bajo las condiciones detalladas anteriormente se toman los datos mostrados en la Fig. 7.1. En color azul se muestran los datos medidos y en color rojo los datos simulados. Del análisis de la figura, se puede ver que en la línea analizada se evidencia una fuerte presencia de ruido AM sobre la frecuencia 1620 kHz, producida por la emisora "AM 1620", provocando una marcada caída del margen de ruido. Esta señal está contemplada en esta simulación de forma tal de reproducir lo más fielmente la realidad, debido a que es la de mayor potencia. Por otra parte, se evidencia la presencia de dos portadoras interferentes a frecuencia más baja no contempladas en 670 kHz y 760 kHz correspondientes a las emisoras LU9 y LU6 de la ciudad de Mar del Plata respectivamente.

El error absoluto medio, se obtiene de la siguiente forma:

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |(SNR_i - SNR_{s_i})| = 3.42 \text{ dB} \quad (55)$$

donde  $SNR_{si}$  es el valor simulado.

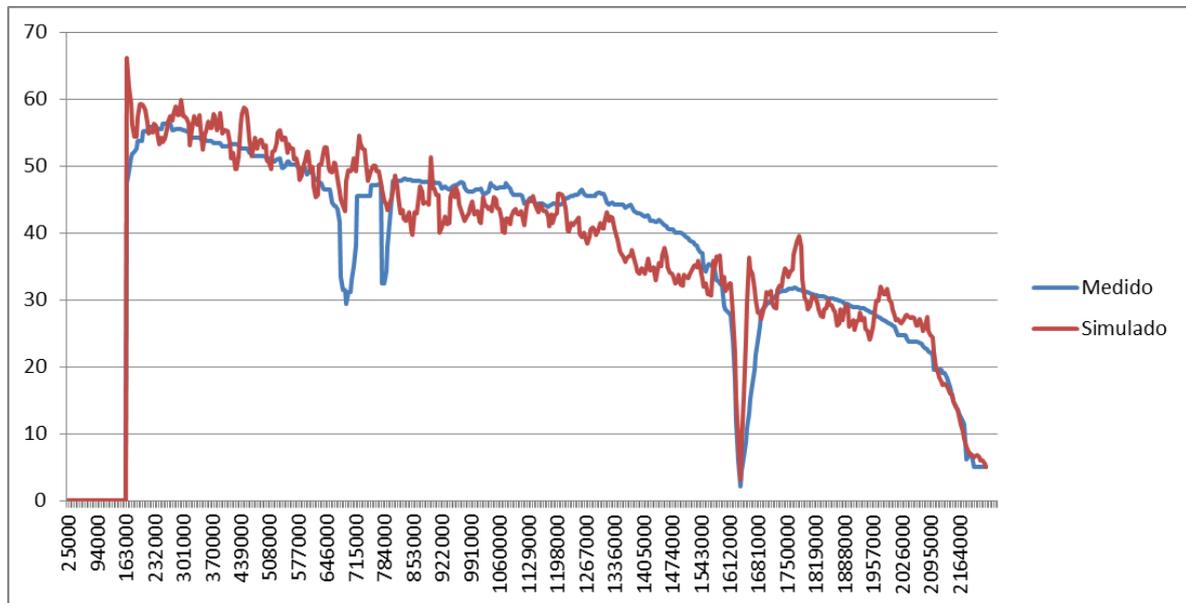


Figura 7-1-Validación margen de ruido.  
Fuente propia.

Este error indica que a pesar de no contemplar la totalidad de las interferencias del medio y dada la naturaleza aleatoria del ruido, el simulador consigue seguir la tendencia principal de la curva real. Este valor obtenido de 3,42 dB de error medio, se traduce a través de la ecuación de Shannon [Ec.(7)] en un valor aproximado de 1,5 bits en la distribución asignada para la simulación, es decir, que la asignación de cada subportadora estará en promedio 1 o 2 bits, en exceso o en defecto, alejada de la real. Valor satisfactorio para los fines prácticos del presente trabajo.

## 7.2 Simulación de parámetros de transmisión.

Se realizaron mediciones en campo en diferentes armarios de la planta y se compararon con los valores obtenidos por medio de las simulaciones.

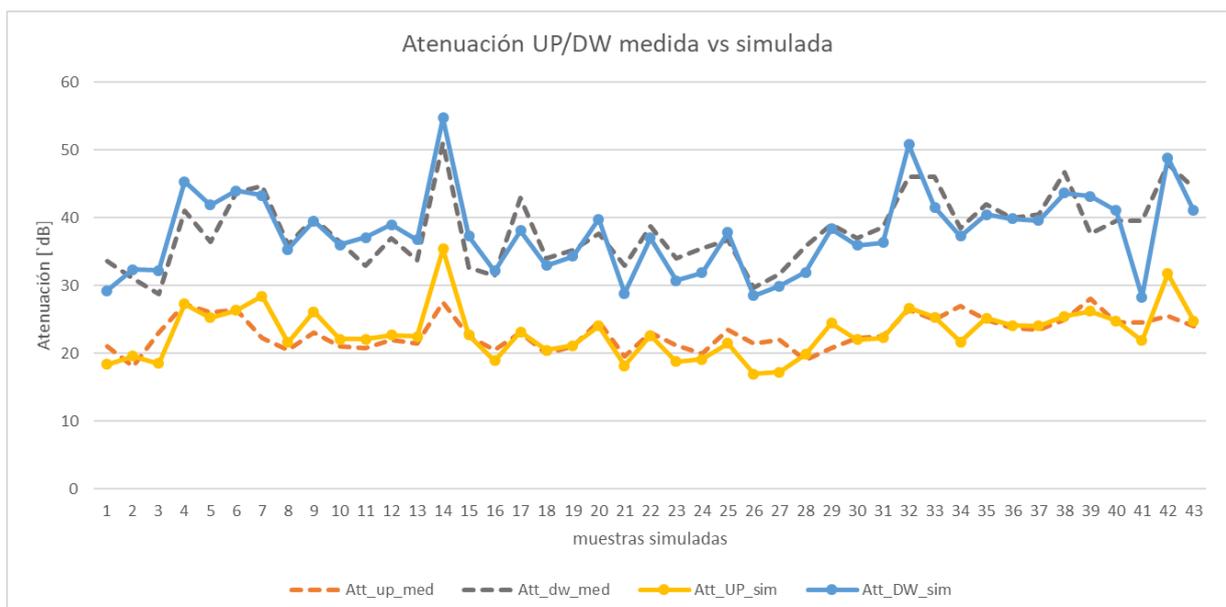
Las simulaciones aportaron valores para las condiciones actuales de funcionamiento tanto como para las condiciones ideales (teóricas) de cada línea simulada.

De las mediciones se obtuvieron los parámetros necesarios que caracterizan el funcionamiento de cada una de las líneas; estos son:

- I. Largo de bucle.
- II. Atenuación.
- III. Velocidad UP/DW de sincronismo.
- IV. Velocidad máxima alcanzable.
- V. SNR.
- VI. Presencia de ruidos interferentes.

En el Anexo 10.6, se muestra la tabla del plan de pruebas realizado. En ella, se encuentran los valores medidos y simulados para cada una de las líneas bajo prueba.

A partir de los datos, se obtiene el siguiente comportamiento del simulador para los valores de atenuación. Como se puede ver en la Fig. 7.2, en el eje de las abscisas están las muestras individuales (las 43 líneas probadas) y en el de las ordenadas las atenuaciones tanto medidas como simuladas mostrándose las primeras en trazo punteado y las segundas en trazo lleno, tanto para el sentido downstream como para el upstream.



**Figura 7-2 Atenuación medida y simulada.**  
Fuente propia.

Se puede observar, que el simulador sigue el comportamiento de las líneas medidas en la mayor parte de los casos logrando un error relativo del 8% en promedio para el Upstream y del 7% para el Downstream.

Haciendo un análisis similar al anterior, se compara el parámetro de velocidad de transmisión Downstream y se traza el gráfico de velocidades máximas alcanzables para cada una de las líneas bajo prueba; como se muestra en la Fig. 7.3 las barras negras corresponden con los valores simulados y las barras naranjas a los medidos.

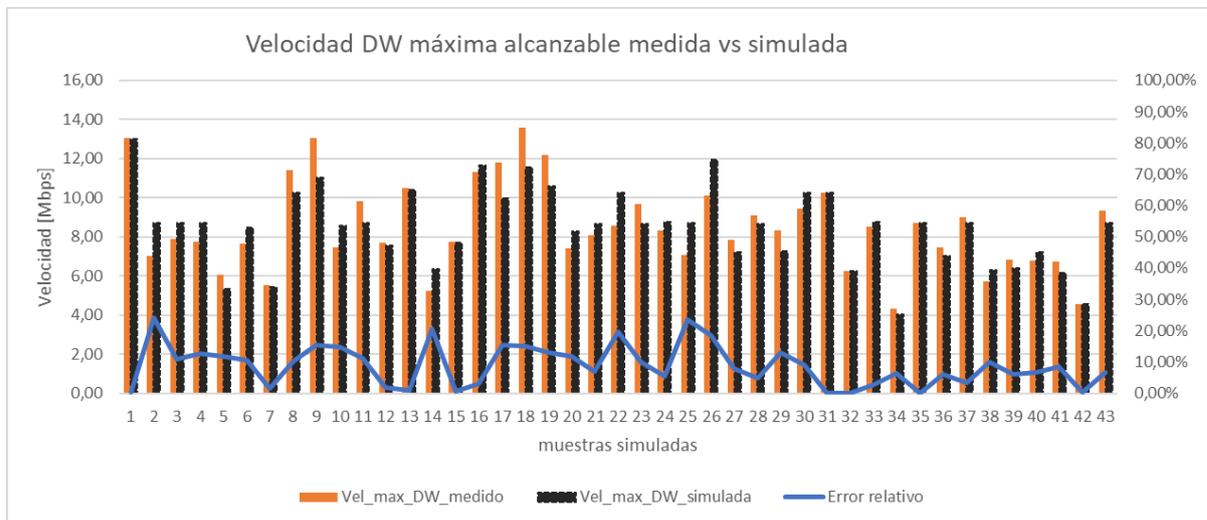


Figura 7-3 Velocidad máxima alcanzable.  
Fuente propia.

Se puede ver que el simulador sigue los valores obtenidos por las mediciones en cada una de las líneas. Sobre el mismo, en línea continua, se muestra el error absoluto medio expresado en porcentaje para este parámetro, el cual se calcula como:

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|(x_i - x_{s_i})|}{x_i} \times 100\% = 8.86\% \quad (56)$$

donde  $x_{s_i}$  es la velocidad simulada.

---

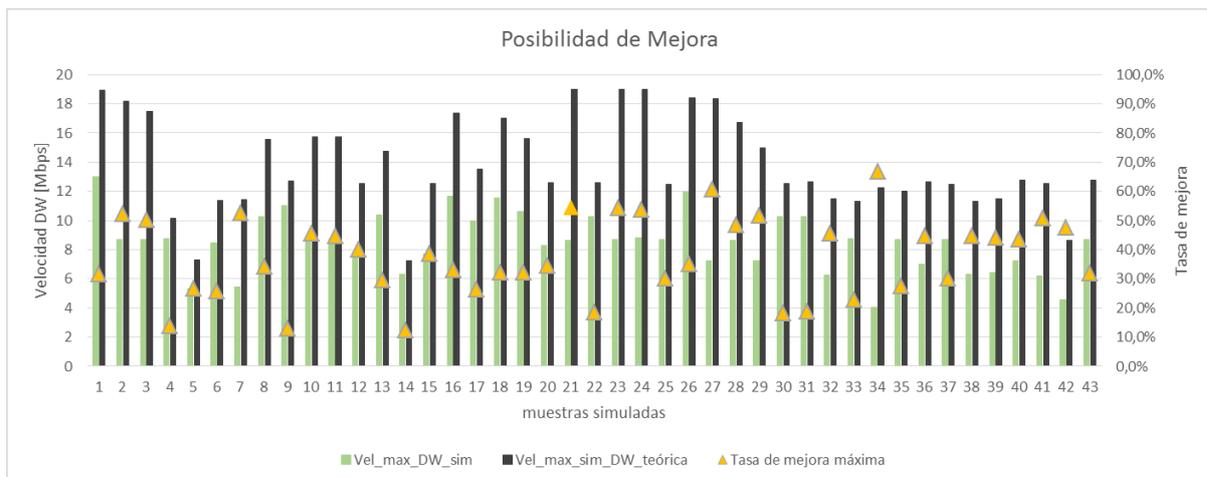
## 8 *Discusión de resultados*

---

Se simularon mediciones realizadas en campo para evaluar el funcionamiento del algoritmo programado. Si bien se simuló un modelo matemático del canal y se lo afectó con las principales fuentes de ruido, quedan por implementar para un mejor ajuste del funcionamiento otras fuentes de ruidos, interferencias y parámetros físicos (empalmes, cambios de calibre) que, si se hacen presentes, afectan el normal funcionamiento del servicio de ADSL.

Comparando los valores de velocidad máxima en condiciones actuales con las condiciones óptimas se puede obtener una tasa de mejora máxima de la línea en forma porcentual. De este modo, comparando las distintas eficiencias conjuntas de las líneas que componen cada elemento de red se puede determinar el nivel de degradación relativo y direccionar el mantenimiento preventivo. En la Fig. 8.1 se puede ver la tasa de mejora mencionada. En la figura se ve, en barras de color verde, la velocidad máxima alcanzable en las condiciones actuales y, en barras negras, se representa la velocidad máxima que permite la línea en condiciones óptimas. Combinando ambos resultados se puede obtener un coeficiente de mejora, calculado en Ec.(56) y mostrado en la figura 8.1 con marcadores de color naranja. A partir de dicho coeficiente, se puede decidir la implementación o no de un servicio de mantenimiento sobre la línea en analizada.

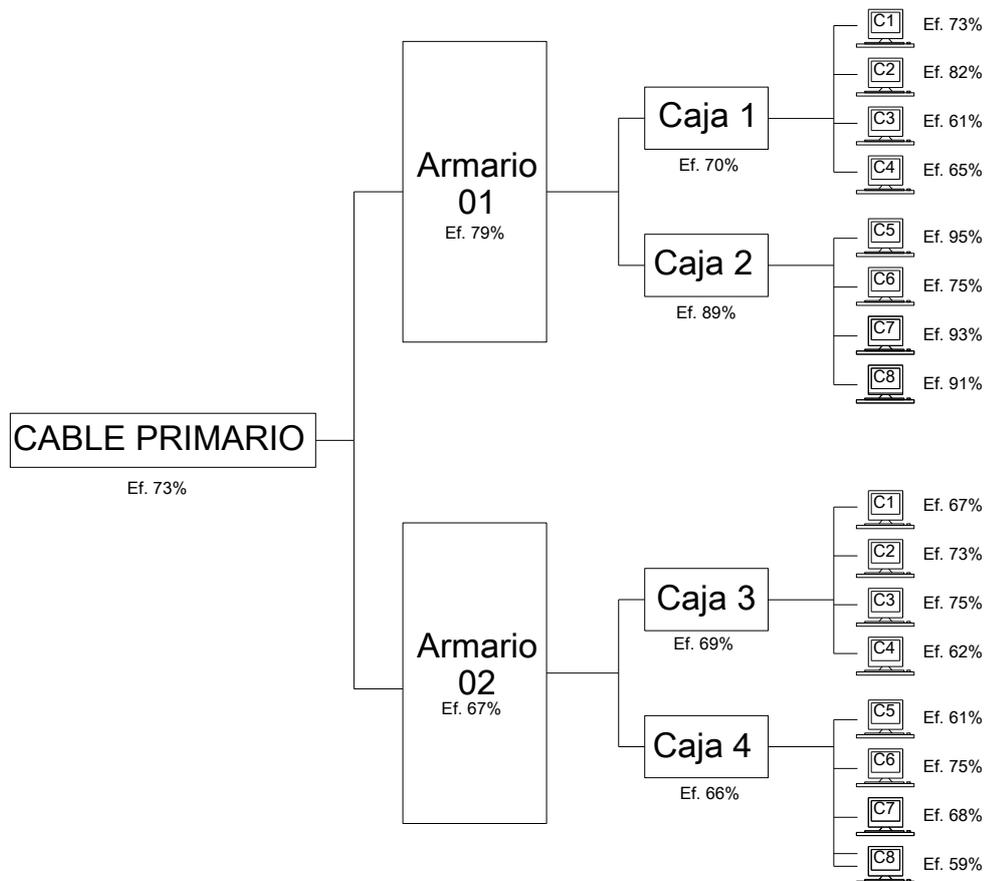
$$Coef.mejora = \frac{(Vel.Op.-Vel.atc.)}{Vel.Op.} \times 100\% \quad (56)$$



**Figura 8-1 Tasa de mejora.**  
Fuente propia.

Luego de obtener las eficiencias de los clientes individuales que compone cada elemento de red, se elabora un mapa de eficiencia conjunta de dichos elementos (cajas, armarios, cables, etc.) de tal manera de poder decidir en qué punto de la red se debe comenzar con el mantenimiento. Por ejemplo, como se muestra en la Fig. 8.2, el cliente de la caja 1 presenta una baja eficiencia en todo su conjunto, por lo que se puede inferir que el elemento a verificar es la caja. En cambio, si bien el cliente C6 perteneciente a la caja 2, también presenta una baja eficiencia, esa baja eficiencia no se evidencia en los demás clientes de la caja, por lo tanto, el elemento a verificar sería el cable de bajada y el domicilio del cliente. Este mismo análisis se puede realizar para cada uno de los elementos de red presentes.

Estos datos cruzados con la demanda de la planta (cantidad de reclamos recibidos en el tiempo) brindarán la información necesaria para poder priorizar los trabajos en la planta externa.



**Figura 8-2-Análisis de conjunto.**  
Fuente propia.

De la comparación entre valores medidos y simulados se evidenciaron algunas diferencias que se atribuyen principalmente a factores no considerados y motivo de futuras ampliaciones, como los desbalances del lazo, tomas en puente que producen reflexiones de la señal y diferencias en las impedancias de carga en el domicilio del cliente. Entre ellas se puede mencionar:

- ✓ Diferencia en atenuación debido a cambios de calibre y empalmes del cableado.
- ✓ Diferencia de velocidad debidas a posibles tomas en puente.
- ✓ Diferencia en la relación señal a ruido, debido a fuentes no consideradas.

Estos factores que afectan el funcionamiento no fueron implementados debido a que no son detectables ni cuantificables de forma remota, y por lo tanto, no se cuenta con parámetros que permitan su modelado. La posibilidad de implementar estos parámetros adicionales en un desarrollo futuro permitiría acercar más el modelo simulado a la situación real de cada línea.

Otro posible trabajo a futuro es la automatización de importación y exportación de mediciones a través de base de datos estructuradas (MySQL, SqlServer, etc.) de tal manera de realizar el análisis en forma periódica y automatizada en el menor tiempo posible.

---

## 9 Conclusiones

---

El objetivo del presente trabajo consistió en realizar una herramienta que permita analizar el estado de líneas de transmisión de ADSL sobre pares de cobre trenzado a partir de algunos parámetros medidos de forma remota, sin la necesidad de interrumpir el servicio ni disponer de técnicos trabajando sobre la planta externa.

Se comenzó realizando una descripción de la estructura de la red y de los elementos que la conforman y luego se hizo una descripción detallada del servicio ADSL y de la conformación de la señal a transmitir.

Por último, se desarrolló una herramienta de diagnóstico, que permite configurar los parámetros reales y evaluar el comportamiento en frecuencia del canal y cuantificar en qué medida cada uno de estos parámetros degrada el funcionamiento óptimo y poder direccionar las tareas de mantenimiento en la planta externa.

De esta forma, se logró implementar un modelo del canal que emula fielmente el comportamiento del mismo para diferentes calibres y largos de cable. Este modelo genera la señal ADSL con todos los códigos de redundancia y modulación con el fin de identificar y cuantificar la cantidad de errores producidos en la transmisión y utilizar dicha medición para evaluar la calidad de la misma.

Se espera que este proyecto sea una contribución a la mejora del servicio brindado, enfocado principalmente en el mantenimiento preventivo de las líneas de transmisión, permitiendo atender las averías antes de que se produzca la falla, colaborando en la toma de decisiones y optimizando los recursos económicos y humanos de mantenimiento de la planta externa.

---

## 10 ANEXOS

---

### 10.1 Anexo I – Especificación de requisitos.

---

#### 10.1.1 Historial de versiones.

---

Versión	Fecha	Descripción
1.0	10/10/2018	Versión original.
1.1	24/10/2018	Corrección de requerimientos. Numeración de páginas. Modificación de funciones.
1.2	31/10/2018	Corrección de requerimientos. Lista de tareas. Diagrama de Gantt. Historial de versiones.

#### 10.1.2 Introducción.

---

Este documento es la Especificación de Requisitos para el Simulador de ADSL desarrollado para evaluar el funcionamiento del servicio brindado a través de par trenzado de cobre telefónico. Esta especificación fue desarrollada según la recomendación IEEE 830.

#### 10.1.3 Propósito.

---

El propósito de esta especificación, es definir los requisitos generales y específicos del sistema simulador de red ADSL. Este, permite medir el grado de eficiencia del canal de transmisión y cómo se ve afectado el mismo, por las diferentes fuentes de ruido e interferencias. El simulador, será utilizado por las prestadoras de servicio, para poder medir la prefactibilidad de brindar el servicio y determinar la necesidad de mantenimiento en partes de la red.

#### 10.1.4 Ámbito del sistema.

**Nombre:** *SimADSL* (Simulador de ADSL)

El simulador permitirá evaluar el funcionamiento completo de un enlace de ADSL por par de cobre trenzado, desde la generación de la señal, la configuración del enlace (largo de bucle, calibre del cable, impedancias) y poder evaluar su funcionamiento mediante un cálculo de eficiencia. Se podrán generar dos tipos de señales interferentes, ruido impulsivo y ruido de AM.

El sistema no tendrá en cuenta otras fuentes de ruido e interferencias más allá de las especificadas, tampoco se considerarán los casos en los que pueda haber cambios de calibre de los cables del enlace.

#### 10.1.5 Definiciones, Acrónimos y Abreviaturas.

**ADSL:** Asymmetric Digital Subscriber Line.

**Caja:** Elemento de red ubicado generalmente en un poste que concentra hasta 25 líneas y desde la cual se conectan los cables de bajada a los domicilios de los clientes.

**Armario:** Elemento de la red que separa la red primaria de la secundaria y le brinda flexibilidad de interconexión.

#### 10.1.6 Referencias.

Standard IEEE 830 – 1998.

Recomendaciones UIT 992-1

Recomendación UIT G996-1

#### 10.1.7 Visión General del documento.

Este documento consta de tres secciones. En la primera sección se realiza una Introducción donde se describen los objetivos y alcances del sistema desarrollado.

En la segunda sección se detallan los antecedentes, las funciones del sistema, las características de los usuarios a los cuales está destinado, las

limitaciones impuestas para el desarrollo y las suposiciones y dependencias hechas en el diseño. Además, se describen las futuras mejoras que se pueden realizar.

En la tercera y última sección se dan los requisitos específicos y de detalle para el desarrollo del sistema y generar las condiciones de prueba, de modo de exigir el modelo para diferentes condiciones y evaluar el correcto desempeño para el cual fue creado.

### 10.1.8 Descripción General.

---

#### 10.1.8.1 *Perspectiva del producto.*

---

El simulador *SimADSL*, es un desarrollo realizado para mejorar las decisiones de gestión del área comercial y del sector técnico. Si bien existen otros softwares similares, este se hizo siguiendo el modelo de la recomendación IEEE G-996-1, y permite cambiar las condiciones de transmisión y evaluar cómo se comportaría el enlace ante cambios de velocidad de transmisión.

#### 10.1.8.2 *Funciones del producto.*

---

El simulador tendrá la posibilidad de evaluar las condiciones reales de funcionamiento de un enlace ADSL brindado por par trenzado de cobre.

Se realiza un análisis y simulación de una red de acceso ADSL sobre un par trenzado de cobre, propio de las líneas telefónicas, para facilitar el análisis del comportamiento de dichos bucles a los diferentes calibre de cable, largos de línea y condiciones de funcionamiento, teniendo en cuenta además las diferentes fuentes de ruido e interferencias que pueden afectarla.

Por medio de este análisis, se puede entender y simular el comportamiento del servicio de la ADSL y comprender cómo y en qué medida el servicio se ve afectado por las señales interferentes. Con la medición de la eficiencia del canal, se podrá tener una cuantificación de la degradación del servicio y de los elementos de la red que lo componen (cables, cajas, armarios) para determinar la necesidad o no

de mantenimiento. Por otra parte, permitirá tener una estimación de la velocidad máxima que se puede comercializar a un cliente determinado.

#### *10.1.8.3 Características de los usuarios.*

---

Los usuarios pueden ser clasificados en dos grupos, por un lado, los usuarios pertenecientes al servicio técnico, que son personal capacitados en el funcionamiento del servicio de ADSL según los requerimientos del puesto y por otro lado, los usuarios del sector comercial, los cuales no requieren capacitación específica y utilizarán el sector destinado a pruebas básicas en el simulador.

#### *10.1.8.4 Restricciones.*

---

Esta subsección describirá las limitaciones impuestas en el desarrollo del sistema:

- El simulador debe correr en sistema operativo Windows 7 o superior, tanto en sistemas 32 como 64 bits.
- La interfaz con el usuario debe ser sencilla, entendiéndose como sencilla que no permita valores fuera de rango, en una sola pantalla y que estén diferenciadas las variables de entrada de las de salida.

#### *10.1.8.5 Suposiciones y dependencias.*

---

El sistema operativo debe ser Windows. Si se cambia se deberá hacer una compilación en lenguaje C para poder adaptarlo a la nueva plataforma.

#### *10.1.8.6 Requisitos futuros.*

---

Como mejora en el funcionamiento, en el futuro se pueden incorporar factores interferentes en la transmisión no contemplados en el diseño inicial, como desbalances del lazo, cambios de calibre del cable, derivaciones en puente y empalmes del cableado.

Por otra parte, se puede generar una interfaz para obtener los datos desde una base de datos, preferentemente SQL Server.

## 10.2 Anexo II- Requerimientos de usuario.

### 10.2.1 Requisitos funcionales.

#### 10.2.1.1 Entrada.

<b>Identificación del Requerimiento:</b>	<b>RF01</b>
<b>Nombre del Requerimiento:</b>	Calibre del cable
<b>Características:</b>	Variable de entrada. El sistema permitirá seleccionar el calibre del cable expresado en milímetros (mm)
<b>Descripción del Requerimiento:</b>	Los calibres disponibles deben ser 0.32 mm, 0.4 mm, 0.5 mm, 0.65 mm y 0.9 mm siguiendo la recomendación IEEE G-996-1
<b>Prioridad del Requerimiento:</b>	Alta

<b>Identificación del Requerimiento:</b>	<b>RF02</b>
<b>Nombre del Requerimiento:</b>	Largo del cable
<b>Características:</b>	Variable de entrada. Se podrá configurar el largo del bucle entre la Central telefónica y el domicilio del cliente. Lo que determina junto con el calibre la atenuación total.
<b>Descripción del Requerimiento:</b>	Se expresará en metros. Limitado a 5000 metros.
<b>Prioridad del Requerimiento:</b>	Alta

<b>Identificación del Requerimiento:</b>	<b>RF03</b>
<b>Nombre del Requerimiento:</b>	Velocidad de prueba
<b>Características:</b>	Parámetro de entrada. Velocidad a la que se desea evaluar la eficiencia de la línea.
<b>Descripción del Requerimiento:</b>	Se podrá seleccionar la velocidad de prueba expresada en Mbps. Las opciones deben ser 3.5 a 25 Mbps.
<b>Prioridad del Requerimiento:</b>	Alta

<b>Identificación del Requerimiento:</b>	<b>RF04</b>
<b>Nombre del Requerimiento:</b>	Presencia de ruido AM
<b>Características:</b>	Parámetro de entrada.
<b>Descripción del Requerimiento:</b>	Selector, que permita ingresar la presencia o ausencia del ruido.
<b>Prioridad del Requerimiento:</b>	Alta

<b>Identificación del Requerimiento:</b>	<b>RF05</b>
<b>Nombre del Requerimiento:</b>	Presencia de ruido Impulsivo
<b>Características:</b>	Parámetro de entrada
<b>Descripción del Requerimiento:</b>	Selector, que permita ingresar la presencia o ausencia del ruido.

<b>Prioridad del Requerimiento:</b>	Alta
-------------------------------------	------

### 10.2.1.2 *Procesamiento.*

<b>Identificación del Requerimiento:</b>	<b>RF06</b>
<b>Nombre del Requerimiento:</b>	Modelización del par trenzado
<b>Características:</b>	Simulación
<b>Descripción del Requerimiento:</b>	Modelado del medio de transmisión según normas IEEE G996-1 para cables AWG26 con aislante de polietileno.
<b>Prioridad del Requerimiento:</b>	Alta

### 10.2.1.3 *Salida.*

<b>Identificación del Requerimiento:</b>	<b>RF07</b>
<b>Nombre del Requerimiento:</b>	Muestra de eficiencia
<b>Características:</b>	Análisis
<b>Descripción del Requerimiento:</b>	Mostrar la eficiencia del proceso de cuantificación.
<b>Prioridad del Requerimiento:</b>	Alta

<b>Identificación del Requerimiento:</b>	<b>RF08</b>
<b>Nombre del Requerimiento:</b>	Muestra de atenuación
<b>Características:</b>	Análisis
<b>Descripción del Requerimiento:</b>	Mostrar la atenuación provocada por el canal
<b>Prioridad del Requerimiento:</b>	Alta

<b>Identificación del Requerimiento:</b>	<b>RF09</b>
<b>Nombre del Requerimiento:</b>	Muestra de relación Eb/N0
<b>Características:</b>	Análisis
<b>Descripción del Requerimiento:</b>	Mostrar la relación de Energía de bit a ruido producto de la trasmisión.
<b>Prioridad del Requerimiento:</b>	Alta

### 10.2.1.4 *Requerimiento de interfaz.*

<b>Identificación del Requerimiento:</b>	<b>RI01</b>
<b>Nombre del Requerimiento:</b>	Carga de variables
<b>Características:</b>	Interfaz software usuario
<b>Descripción del Requerimiento:</b>	Realizar una interfaz gráfica donde el usuario pueda cargar las variables de entrada.
<b>Prioridad del Requerimiento:</b>	Alta

<b>Identificación del Requerimiento:</b>	<b>RI02</b>
<b>Nombre del Requerimiento:</b>	Validación de datos
<b>Características:</b>	Interfaz software usuario
<b>Descripción del Requerimiento:</b>	Crear alertar si los datos cargados exceden los rangos descriptos anteriormente
<b>Prioridad del Requerimiento:</b>	Alta

<b>Identificación del Requerimiento:</b>	<b>RI03</b>
<b>Nombre del Requerimiento:</b>	Visualización de variables de procesamiento
<b>Características:</b>	Interfaz software usuario
<b>Descripción del Requerimiento:</b>	Poder ver mediante gráficos las variables resultantes del procesamiento.
<b>Prioridad del Requerimiento:</b>	Alta

<b>Identificación del Requerimiento:</b>	<b>RI04</b>
<b>Nombre del Requerimiento:</b>	Visualización de resultados
<b>Características:</b>	Interfaz software usuario
<b>Descripción del Requerimiento:</b>	Mediante una tabla ver los resultados de su ejecución
<b>Prioridad del Requerimiento:</b>	Alta

#### 10.2.1.5 *Requerimiento No Funcional.*

<b>Identificación del Requerimiento:</b>	<b>RNF01</b>
<b>Nombre del Requerimiento:</b>	Hardware
<b>Características:</b>	Recursos de memoria y procesador
<b>Descripción del Requerimiento:</b>	El software deberá correr en sistemas Pentium con 4GB de memoria RAM o superiores.
<b>Prioridad del Requerimiento:</b>	Media

<b>Identificación del Requerimiento:</b>	<b>RNF02</b>
<b>Nombre del Requerimiento:</b>	Validación de datos
<b>Características:</b>	Datos de entrada
<b>Descripción del Requerimiento:</b>	Deberá contener un sistema que invalide ingresar datos fuera de rango.
<b>Prioridad del Requerimiento:</b>	Media

<b>Identificación del Requerimiento:</b>	<b>RNF03</b>
--	--------------

<b>Nombre del Requerimiento:</b>	Software
<b>Características:</b>	Sistema operativo
<b>Descripción del Requerimiento:</b>	Compatible con sistema operativo Windows 7 o superior en sus versiones de 32 y 64 bits.
<b>Prioridad del Requerimiento:</b>	Alta

#### 10.2.1.6 Funciones.

El sistema deberá:

- Reproducir las condiciones de funcionamiento de un enlace ADSL a través de un cableado de par de cobre trenzado:
  - En condiciones óptimas del enlace.
  - En presencia de ruido impulsivo.
  - En presencia de ruido de AM.
  - En presencia de ambos tipos de ruido.
- Medir eficiencia del canal para cada condición de transmisión.
- Simular el funcionamiento de la conexión ADSL ante un aumento/disminución de la velocidad de transmisión.
- Dar estimaciones de otros parámetros que afectan la transmisión:
  - Velocidad de propagación.
  - Margen de Eb/N0.
  - Atenuación.
  - Distribución de bits.
  - Impedancia característica.
  - Inductancia de la línea.
  - Resistencia de la línea.
- Dar una estimación de la velocidad máxima para una línea con un largo de cable determinado, con una exactitud menor o igual al 10%.

#### 10.2.2 Requisitos de rendimiento.

Capacidad del software: deberá poder simular líneas individuales y poder ejecutar un análisis del mismo en no más de 5 (cinco) minutos de gestión, mostrando sus resultados en pantalla.

#### 10.2.3 Restricciones de diseño

El software deberá correr sobre sistemas operativos Windows 7 y superiores. Deberá tener una interfaz sencilla como se describe en el punto 10.2.4 y que permitan la operación y análisis tanto de personal técnico como comercial.

#### 10.2.4 Atributos del sistema.

**Disponibilidad:** deberá ser un sistema sin límite de usuarios, que permita su utilización las 24hs del día en tantas terminales como sea necesario.

**Mantenimiento:** se realizará un sistema robusto que no requiera mantenimiento continuo. El mismo deberá permitir actualizaciones, para posibilitar la evolución del sistema a nuevos casos.

#### 10.2.5 Lista de tareas.

Nombre		Fecha Inicio	Fecha de Fin
<b>◆INICIO DEL PROYECTO</b>			
	Búsqueda Información	02/11/2017	16/11/2017
	Presentación desarrollo	17/11/2017	29/12/2017
	Aprobación desarrollo	29/12/2017	05/01/2018
<b>◆Desarrollo del modelo</b>			
	Línea de TX	30/01/2018	12/03/2018
	Simulación de señal	12/03/2018	26/03/2018
	Simulación de transmisor	27/03/2018	10/04/2018
	Simulación de receptor	11/04/2018	03/05/2018
	Control de errores	04/05/2018	10/05/2018
	Ruidos e interferencias	09/05/2018	17/05/2018
	Aprobación del modelo	18/05/2018	19/05/2018
<b>◆Entorno gráfico</b>			
	Desarrollo de entorno	18/05/2018	24/05/2018
	Aprobación E.G.	24/05/2018	25/05/2018
<b>◆Puesta a punto</b>			
	Mediciones de campo	27/06/2018	19/09/2018
	Calibración	20/09/2018	26/09/2018
	Validación de datos	27/09/2018	10/10/2018
	Análisis de resultados	11/10/2018	22/10/2018
	Aprobación de resultados	22/10/2018	25/10/2018
<b>◆Ampliación de plan de pruebas</b>			
	Mediciones de campo	10/11/2018	02/03/2019
	Validación de datos	05/03/2019	20/03/2019
<b>◆Análisis de mejoras</b>			

	Análisis de mejoras	25/03/2019	10/04/2019
	Informe de mejoras	11/04/2019	20/04/2019
◆FINAL DE PROYECTO			

## 10.3 Anexo III - Especificación Funcional.

### 10.3.1 Historial de versiones

Versión	Fecha	Descripción
1.0	31/10/2018	Versión original.

### 10.3.2 Especificaciones funcionales.

#### 10.3.2.1 Entrada.

<b>Identificación del Requerimiento:</b>	<b>EF01</b>
<b>Nombre del Requerimiento:</b>	Calibre del cable.
<b>Características:</b>	Variable de entrada. El sistema permitirá seleccionar el calibre del cable expresado en milímetros (mm)
<b>Descripción del Requerimiento:</b>	El soft permitirá la entrada de los siguientes calibres: 0.32 mm, 0.4 mm, 0.5 mm, 0.65 mm y 0.9 mm siguiendo los modelos matemáticos descriptos en la recomendación IEEE G-996-1
<b>Prioridad del Requerimiento:</b>	Alta

<b>Identificación del Requerimiento:</b>	<b>EF02</b>
<b>Nombre del Requerimiento:</b>	Largo del cable.
<b>Características:</b>	Variable de entrada. Se podrá configurar el largo del bucle entre la Central telefónica y el domicilio del cliente. Lo que determina junto con el calibre la atenuación total.
<b>Descripción del Requerimiento:</b>	Se expresará en metros. Limitado a 5000 metros.
<b>Prioridad del Requerimiento:</b>	Alta

<b>Identificación del Requerimiento:</b>	<b>EF03</b>
<b>Nombre del Requerimiento:</b>	Velocidad de prueba.
<b>Características:</b>	Parámetro de entrada. Velocidad a la que se desea evaluar la eficiencia de la línea.
<b>Descripción del Requerimiento:</b>	Se podrá seleccionar la velocidad de prueba expresada en Mbps. Las opciones deben ser 3.5, 5, 6, 7, 8, 9.5, 11, 12.5 y 14 Mbps.

<b>Prioridad del Requerimiento:</b>	Alta
-------------------------------------	------

<b>Identificación del Requerimiento:</b>	<b>EF04</b>
<b>Nombre del Requerimiento:</b>	Velocidad de sincronismo durante la medición en funcionamiento.
<b>Características:</b>	Como parámetro de entrada, se debe ingresar la velocidad para la cual se hicieron las mediciones.
<b>Descripción del Requerimiento:</b>	Se ingresa el valor de sincronismo de downstream expresado en Mbps. Las opciones deben ser 3.5, a 25Mbps. Cada una de estas velocidades se asocia a una distribución de bits determinada.
<b>Prioridad del Requerimiento:</b>	Alta

<b>Identificación del Requerimiento:</b>	<b>EF05</b>
<b>Nombre del Requerimiento:</b>	Medición de Energía de bit a Ruido (Eb/N0) en la medición.
<b>Características:</b>	Parámetro de entrada. Relación Eb/N0 en las condiciones de sincronismo.
<b>Descripción del Requerimiento:</b>	Serán dos valores expresados en dB correspondientes al downstream y al upstream.
<b>Prioridad del Requerimiento:</b>	Alta

<b>Identificación del Requerimiento:</b>	<b>EF06</b>
<b>Nombre del Requerimiento:</b>	Presencia de ruido AM.
<b>Características:</b>	Parámetro de entrada.
<b>Descripción del Requerimiento:</b>	Selector, que permita ingresar la presencia o ausencia del ruido.
<b>Prioridad del Requerimiento:</b>	Alta

<b>Identificación del Requerimiento:</b>	<b>EF07</b>
<b>Nombre del Requerimiento:</b>	Presencia de ruido Impulsivo.
<b>Características:</b>	Parámetro de entrada
<b>Descripción del Requerimiento:</b>	Selector, que permita ingresar la presencia o ausencia del ruido.
<b>Requerimiento NO funcional:</b>	
<b>Prioridad del Requerimiento:</b>	Alta

<b>Identificación del Requerimiento:</b>	<b>EF08</b>
<b>Nombre del Requerimiento:</b>	Impedancia de carga y generador.
<b>Características:</b>	Parámetro de entrada
<b>Descripción del Requerimiento:</b>	Se podrán configurar los valores normales de impedancia. (25, 50, 150

	y 200 ohm)
<b>Requerimiento NO funcional:</b>	
<b>Prioridad del Requerimiento:</b>	Alta

### 10.3.2.2 *Procesamiento.*

<b>Identificación del Requerimiento:</b>	<b>RF09</b>
<b>Nombre del Requerimiento:</b>	Control de errores de la trama de datos.
<b>Características:</b>	Modelización.
<b>Descripción del Requerimiento:</b>	Realizar todos los códigos de redundancia y corrección de errores.
<b>Requerimiento NO funcional:</b>	
<b>Prioridad del Requerimiento:</b>	Alta

<b>Identificación del Requerimiento:</b>	<b>RF10</b>
<b>Nombre del Requerimiento:</b>	Conformación señal ADSL.
<b>Características:</b>	
<b>Descripción del Requerimiento:</b>	Conformar la señal ADSL para 512 portadoras, con modulación QAM.
<b>Requerimiento NO funcional:</b>	
<b>Prioridad del Requerimiento:</b>	Alta

<b>Identificación del Requerimiento:</b>	<b>RF11</b>
<b>Nombre del Requerimiento:</b>	Modelización del par trenzado.
<b>Características:</b>	Simulación.
<b>Descripción del Requerimiento:</b>	Modelado del medio de transmisión según normas IEEE G996-1 para cables AWG26 con aislante de polietileno.
<b>Requerimiento NO funcional:</b>	
<b>Prioridad del Requerimiento:</b>	Alta

<b>Identificación del Requerimiento:</b>	<b>RF12</b>
<b>Nombre del Requerimiento:</b>	Ecuilizador.
<b>Características:</b>	Modelización.
<b>Descripción del Requerimiento:</b>	Confeccionar un ecualizador capaz de disminuir los efectos producidos por el canal.
<b>Requerimiento NO funcional:</b>	
<b>Prioridad del Requerimiento:</b>	Alta

<b>Identificación del Requerimiento:</b>	<b>RF13</b>
<b>Nombre del Requerimiento:</b>	Cuantificación de la transmisión.
<b>Características:</b>	Simulación
<b>Descripción del Requerimiento:</b>	Poder cuantificar la eficiencia de la

	transmisión
<b>Requerimiento NO funcional:</b>	
<b>Prioridad del Requerimiento:</b>	Alta

### 10.3.2.3 Salida.

<b>Identificación del Requerimiento:</b>	<b>RF14</b>
<b>Nombre del Requerimiento:</b>	Muestra de eficiencia.
<b>Características:</b>	Análisis
<b>Descripción del Requerimiento:</b>	Mostrar la eficiencia del proceso de cuantificación.
<b>Requerimiento NO funcional:</b>	
<b>Prioridad del Requerimiento:</b>	Alta

<b>Identificación del Requerimiento:</b>	<b>RF15</b>
<b>Nombre del Requerimiento:</b>	Muestra de atenuación.
<b>Características:</b>	Análisis
<b>Descripción del Requerimiento:</b>	Mostrar la atenuación provocada por el canal
<b>Requerimiento NO funcional:</b>	
<b>Prioridad del Requerimiento:</b>	Alta
<b>Identificación del Requerimiento:</b>	<b>RF16</b>
<b>Nombre del Requerimiento:</b>	Muestra de relación Eb/N0.
<b>Características:</b>	Análisis
<b>Descripción del Requerimiento:</b>	Mostrar la relación de Energía de bit a ruido producto de la trasmisión.
<b>Requerimiento NO funcional:</b>	
<b>Prioridad del Requerimiento:</b>	Alta

### 10.3.3 Requerimiento de interfaz

<b>Identificación del Requerimiento:</b>	<b>RI01</b>
<b>Nombre del Requerimiento:</b>	Carga de variables.
<b>Características:</b>	Interfaz software usuario.
<b>Descripción del Requerimiento:</b>	Realizar una interfaz gráfica donde el usuario pueda cargar las variables de entrada.
<b>Requerimiento NO funcional:</b>	
<b>Prioridad del Requerimiento:</b>	Alta

<b>Identificación del Requerimiento:</b>	<b>RI02</b>
<b>Nombre del Requerimiento:</b>	Validación de datos.
<b>Características:</b>	Interfaz software usuario.
<b>Descripción del Requerimiento:</b>	Crear alertar si los datos cargados exceden los rangos descriptos

	anteriormente
<b>Requerimiento NO funcional:</b>	
<b>Prioridad del Requerimiento:</b>	Alta

<b>Identificación del Requerimiento:</b>	<b>RI03</b>
<b>Nombre del Requerimiento:</b>	Visualización de variables de procesamiento.
<b>Características:</b>	Interfaz software usuario
<b>Descripción del Requerimiento:</b>	Poder ver mediante gráficos las variables resultantes del procesamiento.
<b>Requerimiento NO funcional:</b>	
<b>Prioridad del Requerimiento:</b>	Alta

<b>Identificación del Requerimiento:</b>	<b>RI04</b>
<b>Nombre del Requerimiento:</b>	Visualización de resultados.
<b>Características:</b>	Interfaz software usuario.
<b>Descripción del Requerimiento:</b>	Mediante una tabla ver los resultados de su ejecución
<b>Requerimiento NO funcional:</b>	
<b>Prioridad del Requerimiento:</b>	Alta

La interfaz de usuario debería verse, en forma esquemática, como se indica en la Fig. 10.1 siguiente:

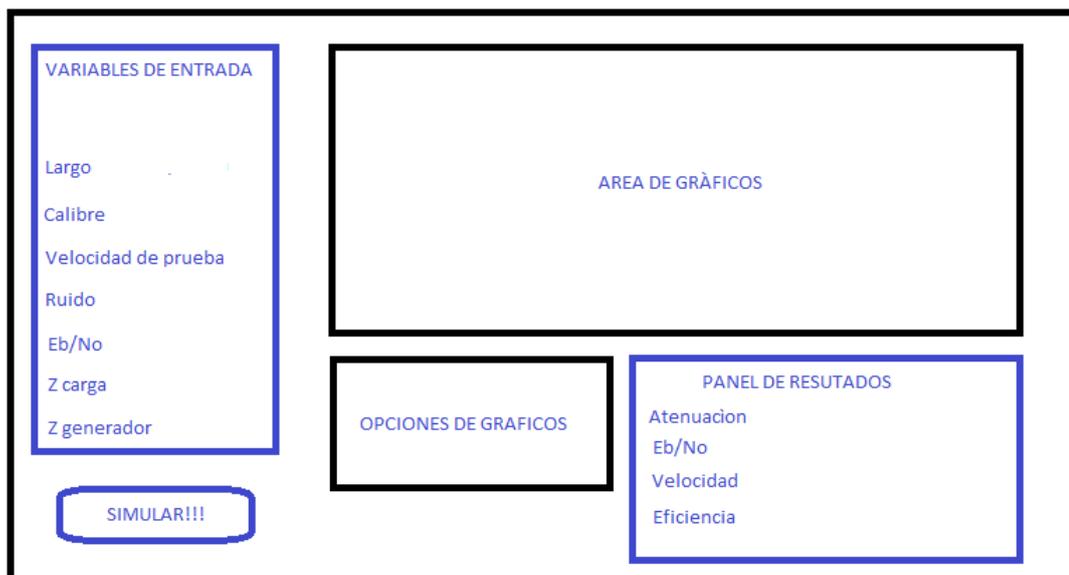


Figura 10-1 Propuesta de interfaz de usuario.  
Fuente propia

### 10.3.4 Requerimiento No Funcional.

---

<b>Identificación del Requerimiento:</b>	<b>RNF01</b>
<b>Nombre del Requerimiento:</b>	Hardware.
<b>Características:</b>	Recursos de memoria y procesador.
<b>Descripción del Requerimiento:</b>	El software deberá correr en sistemas Pentium con 4GB de memoria RAM o superiores.
<b>Prioridad del Requerimiento:</b>	Media

<b>Identificación del Requerimiento:</b>	<b>RNF02</b>
<b>Nombre del Requerimiento:</b>	Validación de datos.
<b>Características:</b>	Datos de entrada.
<b>Descripción del Requerimiento:</b>	Deberá contener un sistema que invalide ingresar datos fuera de rango.
<b>Prioridad del Requerimiento:</b>	Media

<b>Identificación del Requerimiento:</b>	<b>RNF03</b>
<b>Nombre del Requerimiento:</b>	Software.
<b>Características:</b>	Sistema operativo.
<b>Descripción del Requerimiento:</b>	Compatible con sistema operativo Windows 7 o superior en sus versiones de 32 y 64 bits.
<b>Prioridad del Requerimiento:</b>	Alta

## 10.4

---

## 10.5 Plan de pruebas.

Se detallan a continuación las mediciones realizadas en campo:

REAL											
ID	SERVICIO	AM	IMP.	sincro_up	sincro_dw	max_alcanzable	Largo_bucle	Att_up	Att_dw	Margen_up	Margen_dw
1	1.5M_A_3M	0	0	606	3551	13348	1692,75	21	33,6	22	22
2	3.5M_A_6M	0	0	608	6464	7201	1826,34	18	31	18	11
3	3.5M_A_6M	0	0	796	6543	8059	2389,37	23	28,7	16,5	10,7
4	1.5M_A_3M	0	1	607	3552	7939	2824,605	27,2	41	24,7	20,7
5	1.5M_A_3M	0	0	607	3552	6196	2607,75	26	36,5	20	14,5
6	1.5M_A_3M	0	0	606	3551	7850	2752,015	26,5	43,8	16,5	17,6
7	1.5M_A_3M	1	1	607	3551	5653	2196	22,2	44,7	26	12
8	1.5M_A_3M	0	0	605	3552	11705	2130,425	20,5	36	25	18,4
9	3M	0	0	606	3552	13348	1974,875	23	40	18,5	25,2
10	1.5M_A_3M	1	0	608	3552	7648	2182,275	21	36,5	24	18,5
11	3.5M_A_6M	1	0	796	6543	10051	2151,165	20,7	33	15,2	13,7
12	3.5M_A_6M	0	0	608	6464	7860	2232,295	22	37	16	11
13	1.5M_A_3M	0	0	606	3551	10764	2234,125	21,5	33,8	18,5	22,1
14	3.5M_A_6M	0	0	319	3552	5378	2855,715	27,5	51	30	14,8
15	1.5M_A_3M	1	0	607	3552	7933	2272,25	22,5	32,7	25	19
16	1.5M_A_3M	0	0	607	3552	11583	2501	20,5	31,5	20,7	21,5
17	3.5M_A_6M	0	0	605	6543	12057	2330,37	23	43	23,5	23,5
18	1.5M_A_3M	0	0	605	3552	13916	2078,575	20	34	25,5	22,9
19	3.5M_A_6M	0	0	605	3552	12460	2182,275	21	35,3	26	20
20	3.5M_A_6M	1	0	607	5792	7585	2565,66	24,7	37,7	23	14,2
21	3.5M_A_6M	1	0	607	5791	8269	1738,5	19,5	33	23,5	9,5
22	1.5M_A_3M	0	0	607	3552	8770	2389,37	23	38,7	24,5	22,5
23	1.5M_A_3M	1	0	956	6541	9889	1814,75	21,2	34	14	9,7
24	3.5M_A_6M	0	0	956	7095	8532	1860,5	20	35,5	13,2	11,7
25	1.5M_A_3M	0	0	607	3552	7221	3202,5	23,5	36,7	22	14,7
26	3.5M_A_6M	0	0	607	5047	10333	2234,125	21,5	29,7	20,5	18,7
27	3.5M_A_6M	1	0	796	6543	8042	2285,67	22	31,7	13,5	8,5
28	3.5M_A_6M	0	0	601	5047	9298	1974,875	19	35,8	24	12,6
29	3.5M_A_6M	1	0	956	7095	8525	1875,75	20,7	39	12	9,5
30	1.5M_A_3M	0	0	607	3552	9642	2306,41	22,2	37	20	20,2
31	1.5M_A_3M	0	0	436	3552	10488	2337,52	22,5	38,6	24,5	18,5
32	3.5M_A_6M	0	0	605	4303	6412	2752,015	26,5	46	17	4,5
33	3.5M_A_6M	0	0	454	5047	8708	2596,77	25	46	8,5	11,3
34	DESDE_6.5M	1	1	319	4239	4422	3004,25	27	38,5	31,2	6
35	1.5M_A_3M	0	0	605	3552	8924	2596,77	25	42	22	19,2
36	3.5M_A_6M	0	0	607	5789	7658	2424,75	23,7	40	22	9
37	1.5M_A_3M	0	0	605	3552	9224	2441,22	23,5	40,5	22,5	17,9
38	3.5M_A_6M	0	0	607	5792	5850	2596,77	25	46,7	23	8,7
39	DESDE_6.5M	0	0	950	4720	6997	2714,5	28	37,7	9,5	7,5
40	1.5M_A_3M	0	0	605	3552	6924	2544,92	24,5	39,6	24	13,7
41	1.5M_A_3M	1	0	607	3552	6884	3080,5	24,5	39,5	22,5	16,2
42	1.5M_A_3M	1	0	607	3545	4664	2516,25	25,5	48	25,2	9
43	3.5M_A_6M	0	0	606	3551	9552	2546,75	24	44,5	16,5	13,8

SIMULACIÓN MAXIMO REAL								
ID	Calibre	Att_UP	Att_DW	Vel_max_sim_UP	Vel_max_sim_DW	Eb/N0 UP	Eb/N0 DW	Eficiencia
1	0,5	18,39	29,25	0,79	12,98	23,38	25,29	98,50%
2	0,5	19,6	32,39	0,7	8,72	23,16	20,71	98,95%
3	0,65	18,49	32,24	0,69	8,72	19,2	21,04	98,93%
4	0,5	27,26	45,35	0,68	8,73	19,96	24,12	98,92%
5	0,5	25,24	41,92	0,47	5,34	21,37	18,2	99,06%
6	0,5	26,35	43,98	0,67	8,47	17,42	23,26	95,98%
7	0,4	28,43	43,3	0,53	5,44	21,37	24,49	85,21%
8	0,5	21,64	35,31	0,74	10,25	23,91	23,69	98,90%
9	0,4	26,14	39,51	0,69	11,04	19	24,79	93,73%
10	0,5	22,06	36,03	0,69	8,57	23,22	25,97	97,28%
11	0,5	22,06	37,11	0,69	8,72	22,32	24,5	97,52%
12	0,5	22,7	39,01	0,62	7,532	16,12	20,96	85,67%
13	0,5	22,46	36,75	0,72	10,4	20,07	24,34	88,87%
14	0,4	35,39	54,73	0,6	6,33	18,89	22,87	98,95%
15	0,5	22,72	37,27	0,62	7,7	23,16	26,13	87,49%
16	0,65	18,89	32,16	0,72	11,64	21,02	25,47	98,83%
17	0,5	23,18	38,09	0,7	9,97	20,62	24,31	85,35%
18	0,5	20,43	32,96	0,78	11,55	22,37	26,11	98,56%
19	0,5	21,16	34,3	0,78	10,6	21,76	23,86	90,98%
20	0,5	24,06	39,79	0,76	8,28	24,18	47,1	94,93%
21	0,5	18,17	28,84	0,77	8,64	23,75	20,06	98,91%
22	0,5	22,63	37	0,72	10,24	23,42	26,41	98,68%
23	0,5	18,76	30,76	0,72	8,68	20,33	20,13	98,72%
24	0,5	19,1	31,87	0,64	8,78	21,81	22,41	98,92%
25	0,65	21,47	37,86	0,7	8,71	22,54	23,1	98,73%
26	0,65	16,93	28,5	0,79	11,95	22,83	23,4	91,10%
27	0,65	17,22	29,9	0,67	7,23	19,79	21,96	98,94%
28	0,5	19,87	31,98	0,77	8,64	24,06	22,47	98,82%
29	0,4	24,48	38,38	0,61	7,25	17,19	21,83	98,25%
30	0,5	22,04	35,92	0,71	10,27	21,81	25,53	98,81%
31	0,4	22,25	36,32	0,73	10,26	23,91	23,34	98,89%
32	0,5	26,66	50,86	0,67	6,27	21,13	21,13	98,90%
33	0,5	25,34	41,56	0,67	8,74	19,49	23,38	98,87%
34	0,65	21,65	37,27	0,69	4,05	20,27	23,36	94,57%
35	0,5	25,18	40,49	0,69	8,72	20,08	25,19	98,85%
36	0,5	24,09	39,85	0,74	7,02	18,56	20,76	97,12%
37	0,5	24,01	39,62	0,69	8,72	20,77	25	98,86%
38	0,5	25,43	43,69	0,66	6,28	20,11	22,62	98,92%
39	0,5	26,23	43,2	0,54	6,41	15,41	21,16	98,93%
40	0,5	24,78	41,06	0,68	7,22	21,92	24,09	98,86%
41	0,65	21,88	28,29	0,56	6,16	20,2	24,53	70,53%
42	0,4	31,78	48,86	0,48	4,54	19,01	22,82	71,63%
43	0,5	24,78	41,08	0,67	8,7	19,45	23,19	98,48%

SIMULACIÓN MAXIMO TEÓRICO									
ID	Att_UP	Att_DW	Vel_max_UP	Vel_max_DW	Eb/N0 UP	Eb/N0 DW	Eficiencia	CAP.	COEF MEJORA
1	18,61	42,32	0,82	18,94	25,65	30,81	94,06%	27,36%	31,47%
2	19,55	45,49	0,81	18,19	22,808	28,89	90,42%	74,13%	52,06%
3	18,53	43,65	0,82	17,48	20,85	28,84	87,07%	75,03%	50,11%
4	27,24	54,64	0,74	10,12	22,45	27,08	97,86%	40,69%	13,74%
5	25,77	47,06	0,63	7,27	21,23	24,84	98,90%	66,52%	26,55%
6	26,58	56,1	0,77	11,38	21,44	25,42	97,13%	41,92%	25,57%
7	28,74	54,07	0,78	11,44	23,95	27,29	97,70%	65,28%	52,45%
8	21,94	49	0,79	15,58	21,93	28,03	94,97%	34,65%	34,21%
9	26,43	50,54	0,8	12,68	22,89	28,96	96,43%	32,17%	12,93%
10	22,33	50,26	0,8	15,74	21,78	27,44	95,95%	41,45%	45,55%
11	22,1	49,52	0,8	15,72	21,87	27,68	95,81%	75,03%	44,53%
12	22,65	51,11	0,78	12,52	22,79	27,23	95,21%	85,82%	39,84%
13	22,68	51,13	0,84	14,76	23,03	26,7	90,50%	34,14%	29,54%
14	35,74	61,08	0,68	7,22	20,9	24,23	98,87%	56,11%	12,33%
15	23,04	47,75	0,78	12,54	21,84	30,01	95,33%	46,13%	38,60%
16	19,12	45,75	0,79	17,39	23,63	28,88	95,52%	30,52%	33,06%
17	23,42	52,09	0,8	13,52	23,4	26,44	87,25%	65,63%	26,26%
18	20,66	47,9	0,8	17,04	23,44	28,02	93,75%	40,68%	32,22%
19	21,4	48,08	0,8	15,6	22,11	28,4	95,03%	34,62%	32,05%
20	24,14	51,65	0,78	12,62	23,88	27,55	95,89%	33,51%	34,39%
21	18,24	41,8	0,83	18,97	23,78	31,36	94,16%	40,77%	54,45%
22	22,89	47,94	0,79	12,57	21,89	29,86	95,53%	25,41%	18,54%
23	18,78	43,54	0,83	18,97	25,56	30,19	94,19%	57,39%	54,24%
24	19,11	44,59	0,82	18,99	25,68	29,41	94,21%	30,59%	53,77%
25	21,8	49,42	0,75	12,48	23,4	28,31	94,62%	80,81%	30,21%
26	17	41,2	0,78	18,39	23,58	30,72	91,17%	40,78%	35,02%
27	17,24	42,08	0,77	18,37	22,86	29,87	91,07%	42,23%	60,64%
28	19,92	45,28	0,79	16,71	24,02	29,5	91,96%	74,10%	48,29%
29	24,43	50,67	0,87	14,96	23,36	27,47	91,74%	58,41%	51,54%
30	22,27	46,26	0,8	12,54	23,59	30,59	95,39%	97,86%	18,10%
31	22,52	46,9	0,8	12,63	22,9	30,08	96,01%	34,61%	18,76%
32	26,69	56,14	0,75	11,48	21,93	25,39	97,77%	68,63%	45,38%
33	25,47	52,35	0,77	11,31	23,8	27,61	95,57%	57,75%	22,72%
34	21,8	48,22	0,73	12,22	22,71	28,59	92,71%	104,67%	66,86%
35	25,35	55,14	0,81	12	20,1	25,54	91,71%	40,73%	27,33%
36	24,17	51,03	0,78	12,65	23,88	27,98	96,13%	82,46%	44,51%
37	24,3	51,43	0,77	12,47	23,82	27,92	94,75%	40,73%	30,07%
38	25,47	52,37	0,77	11,33	23,8	27,86	96,81%	92,23%	44,57%
39	26,38	55,15	0,76	11,48	22,15	26,67	97,85%	73,63%	44,16%
40	25,09	53,96	0,78	12,74	22,93	26,49	96,73%	49,20%	43,33%
41	22,22	49,43	0,74	12,54	23	28,18	95,05%	57,66%	50,88%
42	32,12	56,3	0,72	8,65	22,2	26,93	98,46%	78,08%	47,51%
43	25,09	53,98	0,78	12,76	22,03	26,56	96,91%	40,82%	31,82%

## 11 Apéndice – Códigos fuente.

### 11.1 Canal.m.

```
function [Hv, Zo, Vp, F, R, L, C, G]=Canal(u, Zg, Zl)
F1=25000;
F2=25000+4312.5*u(3);
R=Resistencia(u);
L=Inductancia(u);
C=Capacitancia(u);
G=Conductancia(u);
F=F1:4312.5:F2;

%Secundarios
Cp=sqrt(((R./u(5))+i*(2*pi.*F.*L./u(5)))*(G+2*pi*i.*F.*C));
Zo=sqrt(((R./u(5))+i*(2*pi.*F.*L./u(5)))/(G+2*pi*i.*F.*C));
Vp=2*pi.*F./imag(Cp);
Rol=(Zl-Zo)/(Zl+Zo);
Rog=(Zg-Zo)/(Zg+Zo);
Hv=(Zo/(Zo+Zg))*((1+Rol).*exp(-Cp.*u(5)))/(1-Rol.*Rog.*exp(-2.*Cp.*u(5)));
```

### 11.2 Conductancia.m.

```
function [G]=Conductancia(u)
F1=u(1);
F2=u(2);
cm=u(3);
d=u(4);
long=u(5);
dx=(F2-F1)/cm;
f=F1:dx:F2;
C=50E-12; %capacidad en (F/m)
switch(d)
case(0.32)
ge=1.21;
tan=4E-4;
G=2*pi.*(f.^(ge)).*C.*tan;
case(0.4)
ge=1.16;
tan=5E-4;
G=2*pi.*(f.^(ge)).*C.*tan;
case(0.5)
ge=1.05;
tan=5E-4;
G=(2*pi.*f).^ (ge) .*C.*tan;

case(0.65)
```

```

ge=1.02;
tan=5E-4;
G=2*pi.*(f.^(ge)).*C.*tan;
case (0.9)
ge=1.02;
tan=5E-4;
G=2*pi.*(f.^(ge)).*C.*tan;
end

```

## 11.3 Resistencia.m.

---

```

function [R]=Resistencia(u) %frecuencia
%u=[Frecuencia inicial, Frecuencia final, intervalos, diametro]
F1=u(1);
F2=u(2);
cm=u(3); %Cantidad de portadoras
d=u(4);
long=u(5);
dx=(F2-F1)/cm;
f=F1:dx:F2;
sg=5.8E7; %conductividad del cobre
uo=pi*4E-7; %Permeabilidad del vacio
ur=1; %Permeabilidad relativa del cobre
prof=sqrt(2./(2.*pi.*f.*sg.*uo.*ur));%Profundidad para efecto peicular
switch(d)
case(0.32)
r=0.16E-3;%radio del conductor
gr=0.05E-3;%grosor del aislante
d=2*sqrt(2)*(r+gr);

Ri=1/(pi.*r^2.*sg).*real((1+1j).*r./(2.*prof).*besselj(0,(1+1j).*r./prof)./
besselj(1,(1+1j).*r./prof));
Rn=1/(pi*sg*d^2).*real(-
(1+1j).*r./prof.*besselj(1,(1+1j).*r./prof)./besselj(0,(1+1j).*r./prof));
Rns=4/(pi*sg*d^2).*real(-
(1+1j).*r./prof.*besselj(1,(1+1j).*r./prof)./besselj(0,(1+1j).*r./prof));
R=2*(Ri+Rn+Rns)*long;
case(0.4)
r=0.2E-3;
gr=0.13E-3;
d=2*sqrt(2)*(r+gr);

Ri=1/(pi.*r^2.*sg).*real((1+1j).*r./(2.*prof).*besselj(0,(1+1j).*r./prof)./
besselj(1,(1+1j).*r./prof));
Rn=1/(pi*sg*d^2).*real(-
(1+1j).*r./prof.*besselj(1,(1+1j).*r./prof)./besselj(0,(1+1j).*r./prof));
Rns=4/(pi*sg*d^2).*real(-
(1+1j).*r./prof.*besselj(1,(1+1j).*r./prof)./besselj(0,(1+1j).*r./prof));
R=2*(Ri+Rn+Rns)*long;

case(0.5)
r=0.25E-3;
gr=0.15E-3;
d=2*sqrt(2)*(r+gr);

```

```

Ri=1/(pi.*r^2.*sg).*real((1+1j).*r./(2.*prof).*besselj(0,(1+1j).*r./prof)./
besselj(1,(1+1j).*r./prof));
    Rn=1/(pi*sg*d^2).*real(-
(1+1j).*r./prof.*besselj(1,(1+1j).*r./prof)./besselj(0,(1+1j).*r./prof));
    Rns=4/(pi*sg*d^2).*real(-
(1+1j).*r./prof.*besselj(1,(1+1j).*r./prof)./besselj(0,(1+1j).*r./prof));
    R=2*(Ri+Rn+Rns)*long;
    case(0.65)
        r=0.325E-3;
        gr=0.20E-3;
        d=2*sqrt(2)*(r+gr);

Ri=1/(pi.*r^2.*sg).*real((1+1j).*r./(2.*prof).*besselj(0,(1+j).*r./prof)./b
esselj(1,(1+j).*r./prof));
    Rn=1/(pi*sg*d^2).*real(-
(1+1j).*r./prof.*besselj(1,(1+1j).*r./prof)./besselj(0,(1+1j).*r./prof));
    Rns=4/(pi*sg*d^2).*real(-
(1+1j).*r./prof.*besselj(1,(1+1j).*r./prof)./besselj(0,(1+1j).*r./prof));
    R=2*(Ri+Rn+Rns)*long;
    case(0.9)
        r=0.45E-3;
        gr=0.27E-3;
        d=2*sqrt(2)*(r+gr);

Ri=1/(pi.*r^2.*sg).*real((1+1j).*r./(2.*prof).*besselj(0,(1+1j).*r./prof)./
besselj(1,(1+1j).*r./prof));
    Rn=1/(pi*sg*d^2).*real(-
(1+1j).*r./prof.*besselj(1,(1+1j).*r./prof)./besselj(0,(1+1j).*r./prof));
    Rns=4/(pi*sg*d^2).*real(-
(1+1j).*r./prof.*besselj(1,(1+1j).*r./prof)./besselj(0,(1+1j).*r./prof));
    R=2*(Ri+Rn+Rns)*long;

```

end

## 11.4 Inductancia.m.

---

```

function [L]=Inductancia(u)
F1=u(1);
F2=u(2);
cm=u(3);
d=u(4);
long=u(5);
dx=(F2-F1)/cm;
f=F1:dx:F2;
sg=5.8E7;
muo=pi*4E-7;
mur=1;
delta=sqrt(2./(2.*pi.*f.*sg.*muo.*mur));
switch(d)
    case(0.32)
        r=0.16e-3;
        lam=(1+j).(r./delta);
        co=0.05e-3; %grosor del aislante
        d=2*sqrt(2)*(r+co);

```

```

La=muo/(2*pi).*log(d/r);
Li=((muo*mur)/(2*pi)).*real((-
1./lam).*besselj(0,lam))./(besselj(1,lam));
Ln=(-muo/(2*pi)).*((r/d)^2).*real(-
(besselj(2,lam))./(besselj(0,lam)));
Lns=(-muo/(2*pi)).*((r/d).^2)*4.*real(-
(besselj(2,lam))./(besselj(0,lam)));
L=2.*(La+Li+Ln+Lns).*long;

```

case(0.4)

```

r=0.2e-3;
lam=(1+j).* (r./delta);
co=0.13e-3;%grosor del aislante
d=2*sqrt(2)*(r+co);
La=muo/(2*pi).*log(d/r);
Li=((muo*mur)/(2*pi)).*real((-
1./lam).*besselj(0,lam))./(besselj(1,lam));
Ln=(-muo/(2*pi)).*((r/d)^2).*real(-
(besselj(2,lam))./(besselj(0,lam)));
Lns=(-muo/(2*pi)).*((r/d).^2)*4.*real(-
(besselj(2,lam))./(besselj(0,lam)));
L=2.*(La+Li+Ln+Lns).*long;

```

case(0.5)

```

r=0.25e-3;
lam=(1+j).* (r./delta);
co=0.15e-3;%grosor del aislante
d=2*sqrt(2)*(r+co);
La=muo/(2*pi).*log(d/r);
Li=((muo*mur)/(2*pi)).*real((-
1./lam).*besselj(0,lam))./(besselj(1,lam));
Ln=(-muo/(2*pi)).*((r/d)^2).*real(-
(besselj(2,lam))./(besselj(0,lam)));
Lns=(-muo/(2*pi)).*((r/d)^2)*4.*real(-
(besselj(2,lam))./(besselj(0,lam)));
L=2.*(La+Li+Ln+Lns).*long;

```

case(0.65)

```

r=0.325e-3;
lam=(1+j).* (r./delta);
co=0.20e-3;%grosor del aislante
d=2*sqrt(2)*(r+co);
La=muo/(2*pi).*log(d/r);
Li=((muo*mur)/(2*pi)).*real((-
1./lam).*besselj(0,lam))./(besselj(1,lam));
Ln=(-muo/(2*pi)).*((r/d)^2).*real(-
(besselj(2,lam))./(besselj(0,lam)));
Lns=(-muo/(2*pi)).*((r/d).^2)*4.*real(-
(besselj(2,lam))./(besselj(0,lam)));
L=2.*(La+Li+Ln+Lns).*long;

```

case(0.9)

```

r=0.45e-3;
lam=(1+j).* (r./delta);
co=0.27e-3;%grosor del aislante
d=2*sqrt(2)*(r+co);

```

```
La=muo/(2*pi).*log(d/r);  
Li=((muo*mu_r)/(2*pi)).*real((-  
1./lam).*besselj(0,lam)./(besselj(1,lam)));  
Ln=(-muo/(2*pi)).*((r/d)^2).*real(-  
besselj(2,lam)./(besselj(0,lam)));  
Lns=(-muo/(2*pi)).*((r/d).^2)*4.*real(-  
besselj(2,lam)./(besselj(0,lam)));  
L=2.*(La+Li+Ln+Lns).*long;  
  
end
```

## Bibliografía

- [1]. Dirección de Desarrollo y Formación. Telefónica S.A. (2008). ADSL. Instalación, Configuración y Mantenimiento. España.
- [2]. Proakis J. G., Manolakis D. G. (1996). Digital Signal Processing. Principles, Algorithms and Applications (Third Edition). New Jersey: Prentice Hall International, Inc.
- [3]. Recomendación UIT-T G.996.1 (2001). Procedimientos de prueba para transceptores de líneas de abonado digitales. Ginebra.
- [4]. Recomendación UIT-T G.992.1 (1999). Transceptores de línea de abonado digital asimétrica.
- [5]. Recomendación UIT-T G.992.2 (1999). Transceptores de línea de abonado digital asimétrica sin divisor.
- [6]. Recomendación UIT-T G.992.3 (2005). Transceptores de línea de abonado digital asimétrica 2 (ADSL2)
- [7]. Recomendación UIT-T G.992.5 (2010). Transceptores de línea de abonado digital asimétrica de banda extendida
- [8]. Tomasi W. (2003). Sistemas de Comunicaciones Electrónicas (Cuarta Edición). México: Prentice Hall International, Inc.
- [9]. Proakis J. G., Salehi M. (1998). Contemporary Communication Systems using MATLAB. Boston: PWS Publishing Company.
- [10]. Documentación MATLAB, MathWork Inc. Consultado (2017-2019)  
<https://www.mathworks.com/help/comm/examples/256-channel-adsl.html>

- [11].** Universidad Pública de Navarra. Tecnologías xDSL – ADSL. [en línea]. Navarra, España. Consultado el 03/10/2016 en dirección URL: [https://www.tlm.unavarra.es/~daniel/docencia/redes/redes10\\_11/slides/26-ADSL\\_1.pdf](https://www.tlm.unavarra.es/~daniel/docencia/redes/redes10_11/slides/26-ADSL_1.pdf)
- [12].** Fernández Vicente H. (2013). Evolución de las Tecnologías xDSL[en línea]. Universidad Politécnica de Madrid.Consultado el 23/11/2016 en direcciónURL: [http://oa.upm.es/22126/1/PFC\\_HELENA\\_FERNANDEZ\\_VICENTE\\_a.pdf](http://oa.upm.es/22126/1/PFC_HELENA_FERNANDEZ_VICENTE_a.pdf)
- [13].** López Martínez, Francisco Javier. Diseño de transmisor y recepto para redes inalámbricas W-MAN. Tesis de grado. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación. Universidad de Málaga, 2005.
- [14].** Aware Inc. (2002). ADSL 2 ADSL 2+ The new ADSL standards. Dirección URL: [http://ictregulationtoolkit.org/action/document/download?document\\_id=2942](http://ictregulationtoolkit.org/action/document/download?document_id=2942).