



OPTIMIZACIÓN DEL USO DEL PAR DE COBRE COMO MEDIO DE TRANSMISIÓN

■ Iván Carmona

Escuela de Ingeniería de Telecomunicaciones
Universidad Católica Andrés Bello
carmonaivan@gmail.com

■ Karla Vilchez

Escuela de Ingeniería de Telecomunicaciones
Universidad Católica Andrés Bello
vilchezkarla@gmail.com

Fecha de Recepción: 03 de noviembre de 2011
Fecha de Aceptación: 22 de octubre de 2012

RESUMEN

El par de cobre ha representado durante años uno de los medios de transmisión más utilizados por los proveedores de servicios de telecomunicaciones en el mundo. Sin embargo, su desempeño se ve seriamente afectado por la atenuación de las señales a lo largo del espectro de frecuencias, al propagarse una determinada distancia (entre 3,3 a 5Km). Bajo el escenario hipotético de una disminución en la longitud de propagación sobre pares telefónicos, los niveles de atenuación de señales en frecuencias superiores a las de los actuales servicios de telefonía e Internet, disminuirían de manera tal que llegarían al extremo receptor con una potencia aceptable y serían recuperables. Esto permitiría el uso de un mayor ancho de banda del que se aprovecha hoy en día. El planteamiento se ha realizado pese a un escepticismo generalizado en el mundo sobre el uso del par telefónico para frecuencias superiores a 2,1MHz (límite superior de ADSL2+). Para determinar la factibilidad y condiciones necesarias para una optimización del uso del ancho de banda, se realizó un estudio teórico-documental que sirvió como base para una caracterización del comportamiento de los pares de cobre a lo largo del espectro de frecuencias, para una distancia menor a la promedio. Esta caracterización se logró a través de la simulación computarizada de la línea, con una posterior verificación

de los resultados mediante mediciones sobre los pares de cobre, agregando validez y confiabilidad al modelo obtenido. Los resultados comprobaron la validez de la hipótesis planteada, y permitieron realizar una propuesta tecnológica para el aprovechamiento eficiente del espectro comprendido entre 2.208KHz y 20.000KHz. El sistema "AMODT" (nombre asignado a la propuesta), plantea la división del espectro "útil" del cableado, en cinco sub-bandas con el mismo ancho y separación que las utilizadas por ADSL2+, trasladadas en frecuencia para un aumento en la eficiencia espectral.

Palabras clave: atenuación, frecuencia, par, cobre, eficiencia, espectro, ADSL2+, optimización, medio, transmisión.

OPTIMIZING THE USE OF THE COPPER PAIR AS A TRANSMISSION MEDIUM

ABSTRACT

Twisted pair has represented, along many years, one of the most used transmission media by telecommunications service providers, all over the world. However, its performance along the frequency spectrum is seriously affected by the attenuation that signals undergo across it, within an average distance between 3.3 and 5Km. Under the hypothetical scenario of a decrease in the propagation length over telephone twisted pairs, the levels of attenuation in signals of higher frequencies than those used by the current telephony and Internet services, would diminish to the point that signals would reach the receiver with an acceptable power and would be recoverable. This would permit the usage of a broader bandwidth on telephone cables than the one used nowadays. The approach has been made in spite of a generalized skepticism in the world about the use of telephone pairs for frequencies over the 2.1MHz (upper limit of ADSL2+). In order to determine the feasibility and conditions under which it would be possible a bandwidth usage optimization, a documental research was made, forming a basis to obtain a characterization of the copper pairs' behavior, along the frequency spectrum, for a shorter distance than the average. This characterization was obtained through a computer simulation of the line's behavior, and the subsequent verification of the results through electric measurements on the cables, validating and giving reliability to the mathematic model

developed. The results obtained verified the proposed hypothesis, and allowed (in a second part of the research work) the design of a technological proposal to efficiently take advantage of the bandwidth among 2,208KHz and 20,000KHz. "AMODT" (assigned name to the proposal), finally raises the division of the "usable spectrum" in five sub-bands, with the same width and separation used by the ADSL2+ technology, moved in frequency looking for an increase in the spectral efficiency.

Keywords: attenuation, frequency, pair, copper, efficiency, spectrum, ADSL2+, optimization, medium, transmission.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Dada la existencia en el mundo de más de 900 millones de pares de cobre instalados, y los enormes costos que suponen nuevas acometidas y cableado, hoy más que nunca se precisa encontrar formas de obtener el máximo rendimiento de estos medios de transmisión, para dar solución a las crecientes necesidades de servicios y anchos de banda; todo esto sin considerar importantes factores económicos que exigen la reducción de costos de operación y mantenimiento de las redes, así como un aumento en la calidad de los servicios prestados.

En cuanto a la infraestructura existente, si se toma en consideración que en la mayoría de las edificaciones del mundo existen acometidas de pares de cobre, destinadas a llevar servicios de telefonía y datos a cada uno de los clientes, y que al mismo tiempo, dentro de estas infraestructuras existen otros requerimientos relacionados con el mundo de las comunicaciones (video-vigilancia, control, intercomunicación, entre otros), surge entonces **la necesidad de optimizar el uso del par de cobre como medio de transmisión, a través de la implementación de una red privada que funcione en los predios de los usuarios.** Esta red bien podría operar en parte de lo que se considera la “red de última milla” de una red de telefonía pública conmutada (PSTN, por sus siglas en inglés), donde los hilos conductores ya no pertenecen a la empresa proveedora de servicios (dueña de la red), sino al ente de administración del lugar a donde lleguen dichos servicios, siendo parte de la propia infraestructura. Esto permitiría la implementación de una diversidad de aplicaciones requeridas en condominios, empresas, complejos urbanísticos, centros comerciales, entre otros, disminuyendo costos de operación y mantenimiento, así como el pago de servicios basados en redes de telecomunicaciones.

2. OBJETIVO GENERAL

Diseñar una propuesta para optimizar el uso del par de cobre como medio de transmisión, mediante la implementación de una red privada en los predios de los usuarios, que soporte nuevos servicios y garantice la continuidad de los ya existentes en telefonía y datos, prestados por un proveedor mediante una red pública.

3. MARCO TEÓRICO

La línea de transmisión es el elemento más común que compone a una red de telecomunicaciones. Está constituida por, al menos, un par de conductores a través de los cuales se propaga la señal desde el punto de generación hasta el de recepción. Las dimensiones de una línea pueden variar según la utilidad de la misma. Su comportamiento en frecuencia está determinado, además, por los bien conocidos parámetros primarios (los cuales surgen del proceso de fabricación de la misma), y los parámetros secundarios (dependientes de las condiciones bajo las cuales se efectúa la transmisión).

De la gran cantidad de parámetros involucrados en el comportamiento de las líneas de transmisión, la “resistencia” es quizás uno de los más complejos, pues su valor depende de dos fenómenos de suma importancia sobre el medio; ellos son: el Efecto “Skin” (o Efecto Pelicular), y el Efecto Proximidad. El primero, se refiere a la distribución de la densidad de corriente a lo largo de la sección transversal de un conductor: *“Sólo en corriente continua la distribución de corriente en la sección del conductor es uniforme. En corriente alterna, y a medida que aumenta la frecuencia, las diferencias entre las densidades de corriente en las distintas zonas de una sección transversal se hacen más notorias”* [12]. El segundo fenómeno se refiere al flujo de campo magnético en dos conductores que se encuentran cercanos uno del otro. Si cada uno de los conductores transporta corrientes con la misma dirección, la distribución de las cargas no será uniforme en la sección transversal, sino que la mayor proporción se encontrará en las mitades lejanas. Si por el contrario, las corrientes tienen direcciones opuestas, las mitades cercanas cargarán con la mayor densidad de corriente. La incidencia de este efecto sobre el valor de resistencia se condensa en un parámetro conocido como “factor de proximidad” f_p .

Otro concepto importante de resaltar para la comprensión de los tópicos planteados es el de “Par Telefónico”, el cual se define como la línea de transmisión básica, conformada por dos hilos de cobre entrecruzados, recubierto con un material aislante, y que une la central telefónica con el suscriptor o abonado. A través de él se propagan las señales que permiten establecer las comunicaciones de voz y datos entre puntos extremos. Inicialmente, el par telefónico transmitía únicamente señales vocales (frecuencias entre 0 y 4KHz), desperdiçando un gran ancho de banda del conductor. Dada la necesidad de implementar nuevos servicios y obtener

un mayor provecho de la gran inversión que representa el cableado, surgieron con el tiempo nuevas familias de tecnologías como lo son las xDSL, las cuales permiten implementar redes de acceso de alta velocidad para la transmisión de datos sobre los pares de cobre. Fue así como la empresa venezolana CANTV se abrió paso, desde 1999, en la prestación de servicios de Internet sobre banda ancha, implementando la tecnología ADSL sobre sus pares de cobre, la cual utiliza el espectro hasta los 1,108MHz. Sin embargo, existen proyectos para la implementación de ADSL2+, el cual extiende su ancho de banda hasta 2,208MHz, con la finalidad de brindar, además, servicios de televisión por suscripción mediante IPTV (*Internet Protocol Television*). Esta representa justamente la razón por la cual el presente estudio se realiza sobre frecuencias superiores a las utilizadas por ADSL2+ (2,208MHz).

4. METODOLOGÍA

Luego de un levantamiento de información preliminar, en el que se obtuvieron datos que afirman que en un tramo de longitud promedio entre 3,3 y 5Km se produce una atenuación de hasta 500dB, a una frecuencia de 20MHz, y que la atenuación a una frecuencia determinada posee un comportamiento aproximadamente lineal con la distancia, pero ciertamente varía si cambia la frecuencia, se formuló la siguiente hipótesis: *si se reduce en al menos un 90% la distancia máxima de propagación de la señal en un cable telefónico, fijando como límite 500mts (que bien pudiera ser la longitud máxima promedio del cableado interno en una edificación), entonces la atenuación disminuirá considerablemente, y para frecuencias menores a 20MHz no superará los 50dB*". Este último valor representa el 10% de la atenuación máxima típica para un segmento de 5Km, para una longitud justamente del 10% de esta distancia. De este planteamiento debían corroborarse varios puntos: el primero, la linealidad o no de la atenuación como una función de la frecuencia, especialmente en las condiciones reales del cableado; el segundo, que la variabilidad de los valores de atenuación para diversos calibres de cable telefónico se encontrase dentro del rango esperado para la longitud indicada; y el tercero, que los comportamiento de la velocidad de fase y velocidad de grupo (también como funciones de la frecuencia) fuesen ciertamente lineales en el rango de estudio, de forma de que resulten mínimas las afectaciones a señales de en todo el rango, hasta los 20MHz. De comprobarse la hipótesis, se demostraría que resulta posible la introducción de nuevos servicios de distinta

naturaleza, sobre un ancho de banda en los pares de cobre que, hasta ahora, no está siendo utilizado.

Dado el hecho de tratarse de una propuesta tecnológica sobre un elemento con un comportamiento poco estudiado desde el punto de vista fenomenológico (al menos bajo las condiciones específicas anteriormente expuestas), el presente trabajo ha sido desarrollado en tres fases diferentes, mediante las cuales se aborda de manera sistemática el problema planteado:

En una *primera fase* se ha realizado una exhaustiva investigación de conceptos, definiciones y terminología, referente a aquellos aspectos y fenómenos relacionados con las líneas de transmisión, así como de los elementos más relevantes de las tecnologías implementadas sobre las redes de acceso de distintos proveedores de servicios de telecomunicaciones en Venezuela. De esta manera se logró identificar y documentar las características físicas, eléctricas y limitaciones de los pares de cobre, utilizados para una red de telefonía conmutada (PSTN). En la investigación documental se han consultado diversas fuentes de información, entre las cuales se encuentran: manuales de capacitación del Centro de Estudios de Telecomunicaciones de CANTV^{[1][2]}, documentos referentes a estudios relacionados con el tema, publicaciones en revistas y medios electrónicos^{[3][4][5]}, consultas a expertos y personal de CANTV, recomendaciones y estándares de instituciones y organismos internacionales (IEEE, UIT, entre otros)^{[6][7][8]}, así como publicaciones académicas sobre temas relacionados^{[9][10][11]}.

Una vez culminada la investigación teórica, se realizó (en una *segunda fase*) una caracterización de los pares de cobre, para la evaluación de su desempeño como medios de transmisión de señales de alta frecuencia (en comparación con las señales de telefonía), utilizando para ello parámetros que se han considerado útiles, fundamentalmente por su variabilidad con la frecuencia y/o la distancia. Esta segunda fase comprende, en primer lugar, un modelaje computarizado de la línea

- 1 CANTV (s.f.). *Mediciones Eléctricas Planta Externa*.
- 2 CANTV (s.f.). *Mantenimiento Correctivo Planta Externa*.
- 3 Xiao Y. y otros. (2007, Noviembre).
- 4 Lofti A. y otros (1992, Septiembre). Proximity Effects in Coils for High Frequency Power Applications.
- 5 The Mathworks, Inc. (2008). *Signal Processing Toolbox*.
- 6 UIT-T (Junio, 1999). Rec. G.992.1.
- 7 UIT-T (Enero, 2005.a). Rec. G.992.3.
- 8 UIT-T (Enero, 2005.b). Rec. G.992.3.
- 9 D. Kagklis y otros. (2005). A comparative Performance Evaluation of the ADSL2+ and ADSL Technologies. GESTS Int'l Trans.
- 10 Barton, M. y otros. (1995). "Optimization of discrete multitone to maintain spectrum compatibility".
- 11 Yarali, A. y otros. (2005). Internet Protocol Television (IPTV).

de transmisión y de algunos de los fenómenos que la afectan, realizado mediante la utilización del *software* de simulación MATLAB, versión 7.0.0.19920, desarrollado por el grupo "THE MATHWORKS, Inc.". Para ello se ha realizado una detallada programación basada en la utilización de arreglos vectoriales de dos y tres dimensiones. Este modelaje ha permitido la obtención de gráficas y valores que muestran el comportamiento de la línea de transmisión para un determinado rango de frecuencias y distancias, obteniendo una visión clara del desempeño de la misma al ser sometida a señales en el rango de frecuencia entre 2,208 y 20MHz.

En segundo lugar, y como método alternativo para una mayor confiabilidad de los resultados, se ha realizado un conjunto de mediciones de parámetros eléctricos sobre algunos ejemplares de líneas de transmisión, lo cual ha permitido obtener una serie de valores característicos que ayudan a describir las condiciones de la línea y los fenómenos que en ella se producen, y corroborar así los resultados obtenidos en la simulación computarizada. Estas mediciones fueron realizadas en una edificación residencial, en la ciudad de Caracas, Venezuela, la cual cuenta con una altura de 50,4 metros y su infraestructura de pares de cobre data de (aproximadamente) 30 años de antigüedad. De la edificación se utilizaron los cableados pertenecientes a dos apartamentos del piso 18, obteniendo de esta manera un tramo de longitud 76,91 metros por par.

Con base en los fundamentos teóricos estudiados en la fase uno, y los resultados obtenidos en la simulación y mediciones de la fase dos, se realizaron diversas definiciones. Estas corresponden fundamentalmente a la "usabilidad" de una porción del espectro de frecuencias que no estaba siendo utilizada, y que se consideró apta para su implementación en diversas aplicaciones, sin afcción de los servicios prestados actualmente sobre la infraestructura de cableado de cobre estudiada. Las definiciones realizadas delimitan bandas y sub-bandas de frecuencia, de donde se desprenden los conceptos de "Ancho de Banda de Servicios Tradicionales", "Semi-Banda Remanente", "Ancho de Banda Disponible" y "Ancho de Banda Útil", explicados en detalle más adelante.

La *tercera fase*, correspondiente al diseño de una solución para la optimización del uso del par de cobre como medio de transmisión, comprende la realización una propuesta tecnológica que incluye lo siguiente: especificación de las técnicas de modulación requeridas para la interconexión de la red privada; interconexión con una red pública; características mínimas de los equipos de filtrado y conmutación requeridos; determinación de

los servicios que puedan ser prestados sobre el ancho de banda definido como "útil", tomando en cuenta los requerimientos de velocidad de transmisión, ancho de banda de la aplicación y factibilidad de implementación; especificación de la interfaz de conexión de un sistema centralizado de control de variables, y evaluación de dispositivos y protocolos existentes, compatibles con la solución planteada.

5. RESULTADOS

5.1. Caracterización de la línea de transmisión

5.1.1. Modelaje computarizado utilizando MATLAB

La elaboración de un modelo computarizado de la línea de transmisión, permitió la obtención de un conjunto de gráficas que representan resultados parciales de la fase 2. Para cada uno de los parámetros simulados, se estudió su comportamiento a lo largo del rango de frecuencias antes descrito, tal como se muestra con la resistencia AC en la fig.1.

Las gráficas de la figura 1 permiten apreciar que la resistencia AC de los pares de cobre posee un comportamiento creciente y no lineal con respecto a la frecuencia, a partir del valor de la resistencia DC del cable, el cual es $0,175\Omega/m$, aproximadamente. Obsérvese que la función es continua en todo momento, y que en baja frecuencia existe un valor hasta el cual la resistencia AC es aproximadamente igual a la DC. Esto se debe al hecho de que la profundidad de penetración de la onda EM asociada a la señal es mucho mayor al radio del conductor para frecuencias suficientemente bajas. Para el caso del cable calibre 24, la frecuencia hasta la cual R_{ac} es aproximadamente igual a R_{dc} es 127,72KHz.

Realizando las gráficas de la resistencia AC de los cables en estudio, y comparándolas entre ellas, se determinó que este es el parámetro que varía de forma más crítica entre los primarios, especialmente si se toma en consideración que el resto de los parámetros no varía entre cables telefónicos de diferente calibre, dado que los fabricantes garantizan valores similares entre ellos. De aquí se desprende la razón por la cual la impedancia característica de los cables es casi igual en alta frecuencia, a pesar del grosor de los conductores, y es que la resistencia AC aporta muy poco al valor de la impedancia característica $z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}$ cuando la frecuencia es elevada, mientras que en frecuencias intermedias y bajas, Z_0 varía más por ser R más significativo.

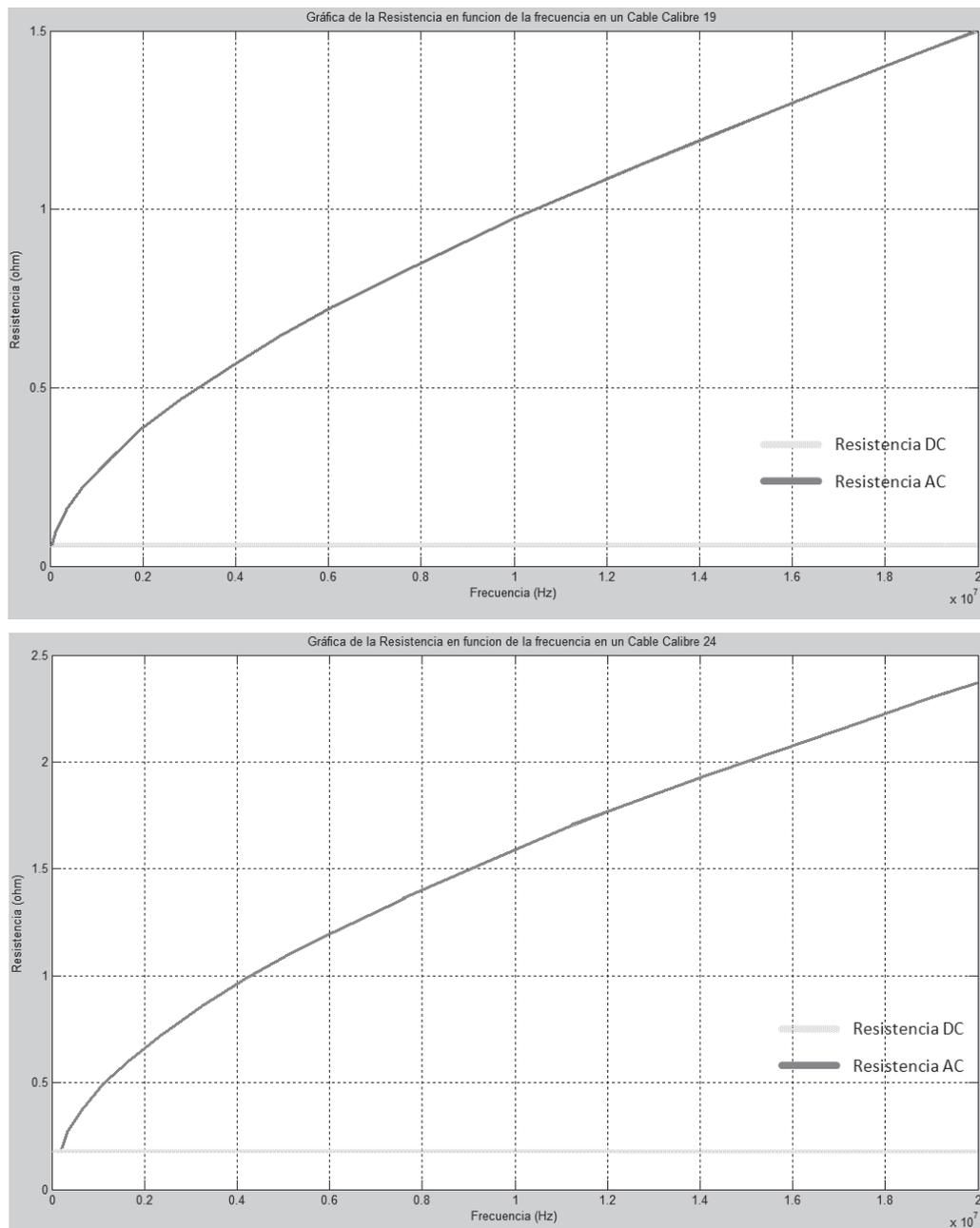


Figura 1. Resultados de la simulación de la Resistencia AC en función de la frecuencia (cables calibre 19 y 24).

5.1.2. Aproximación de alta frecuencia para la Impedancia Característica

Tras la obtención de la función general de impedancia característica Z_0 de la línea, se realizó la búsqueda de condiciones bajo las cuales se cumpliera que la potencia reflejada en una interfaz con una carga conectada $Z_L=100\Omega$ fuese menor al 1% de la potencia en transmisión ($|\Gamma_{P_{linea}}|_{Z_L=100\Omega}| = 0,01$). De este procedimiento se obtuvo como resultado el punto en el plano complejo: $Z=(102,0319 - j20,2099)\Omega$, el cual corresponde a la in-

tersección de la circunferencia resultante de la ecuación modular anterior, con la curva “impedancia característica compleja de la línea”. Se pudo verificar que este punto corresponde a un valor de frecuencia $f=127,72\text{KHz}$, en un cable calibre 24, obtenido a partir de las gráficas “módulo” y “fase” de la impedancia característica, y representa el valor de frecuencia a partir del cual, la aproximación $Z_0 - \sqrt{L/C}$ (definida en el marco teórico) se considera válida para el presente estudio.

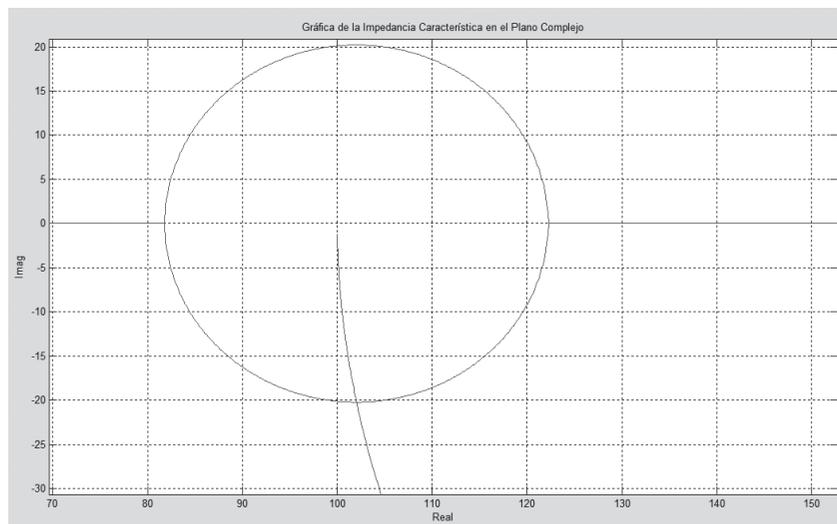


Figura 2. Aproximación de la Impedancia Característica para alta frecuencia.

Análogamente, se calcularon los rangos desde donde es válida la aproximación de alta frecuencia y los valores de Z_0 para distintos calibres, obteniéndose:

| Calibre | Válido desde | Impedancia Aprox. |
|---------|--------------|-------------------|
| 19AWG | 39,43KHz | 100Ω |
| 22AWG | 67,07KHz | 100Ω |
| 24AWG | 127,72KHz | 100Ω |
| 26AWG | 198,88KHz | 100Ω |

Tabla 1. Frecuencia mínima para la aproximación de alta frecuencia, en cables de distintos calibres

5.1.3. Impedancia Característica para distintos calibres

La figura 3 muestra las gráficas de módulo y fase de la impedancia característica compleja de la línea, en función de la frecuencia, sobre una escala logarítmica en el eje de las abscisas.

Se observa que el comportamiento de la curva “módulo de la impedancia característica” es asintóticamente al valor teórico de la impedancia característica para alta frecuencia, en cables de pares trenzados ($Z_{0,aprox} = 100\Omega$), calculado con la aproximación correspondiente,

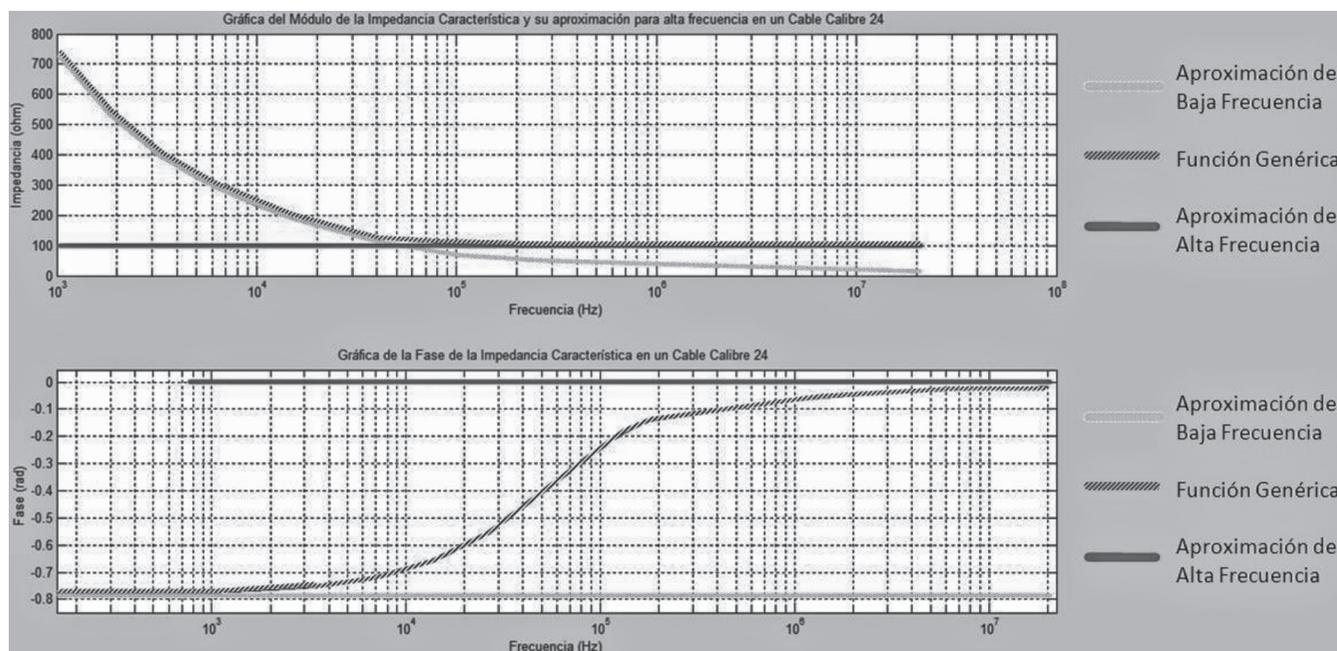
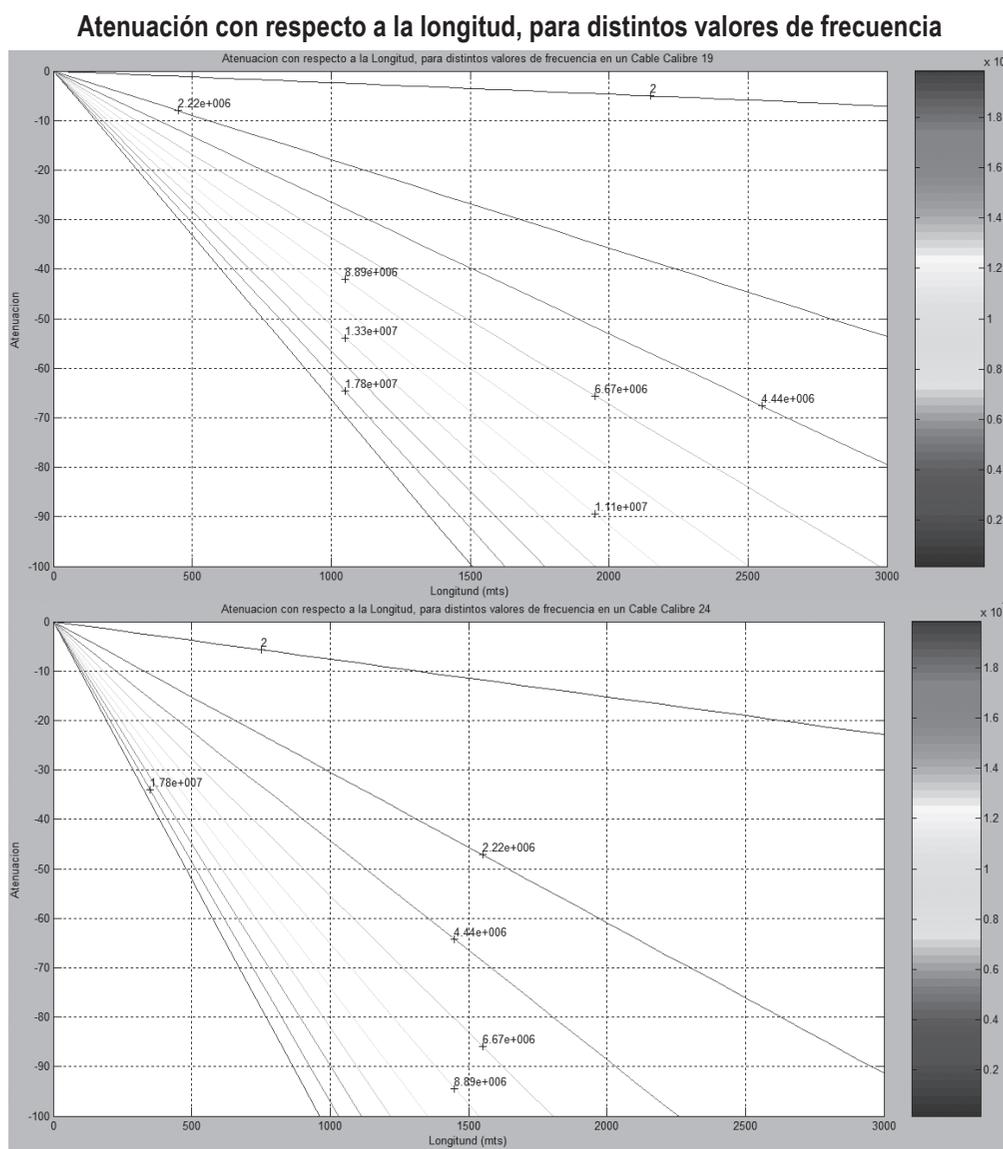


Figura 3. Resultados de la simulación de Impedancia Característica para cables calibre 24.

utilizando los valores típicos de capacitancia e inductancia en pares de cobre ($C = 52\eta\text{F/Km}$ y $L = 530\mu\text{H/Km}$ respectivamente). Esto demuestra que, tal como se esperaba, el valor de la impedancia característica en “alta frecuencia” (con relación a 4KHz), es de 100Ω aproximadamente. En las curvas de la figura 3 se muestra la curva genérica, conjuntamente con las aproximaciones de baja y alta frecuencia. En ellas se observa que para alta frecuencia se cumple muy bien la aproximación de Z_0 , siendo la impedancia de la línea “real pura” cuando ésta se acerca al valor esperado, conforme aumenta la frecuencia.

5.1.4. Atenuación como Función de la Distancia y la Frecuencia

El estudio de la atenuación, representa otro de los elementos fundamentales para la elaboración de conclusiones acerca del comportamiento de la línea, sobre todo en alta frecuencia. Las gráficas obtenidas, mostradas en las figuras 4 y 5, demuestran que la atenuación varía con respecto a la frecuencia y a la longitud del tramo de propagación, en forma diferente. Para las gráficas de atenuación por unidad de longitud (fig. 4), se observa una linealidad en cuanto se hace fija la frecuencia. Las rectas de dicha gráfica definen los valores de atenuación en decibeles conforme aumenta la longitud del tramo de propagación de una señal por un par telefónico, para distintas frecuencias (una por recta).

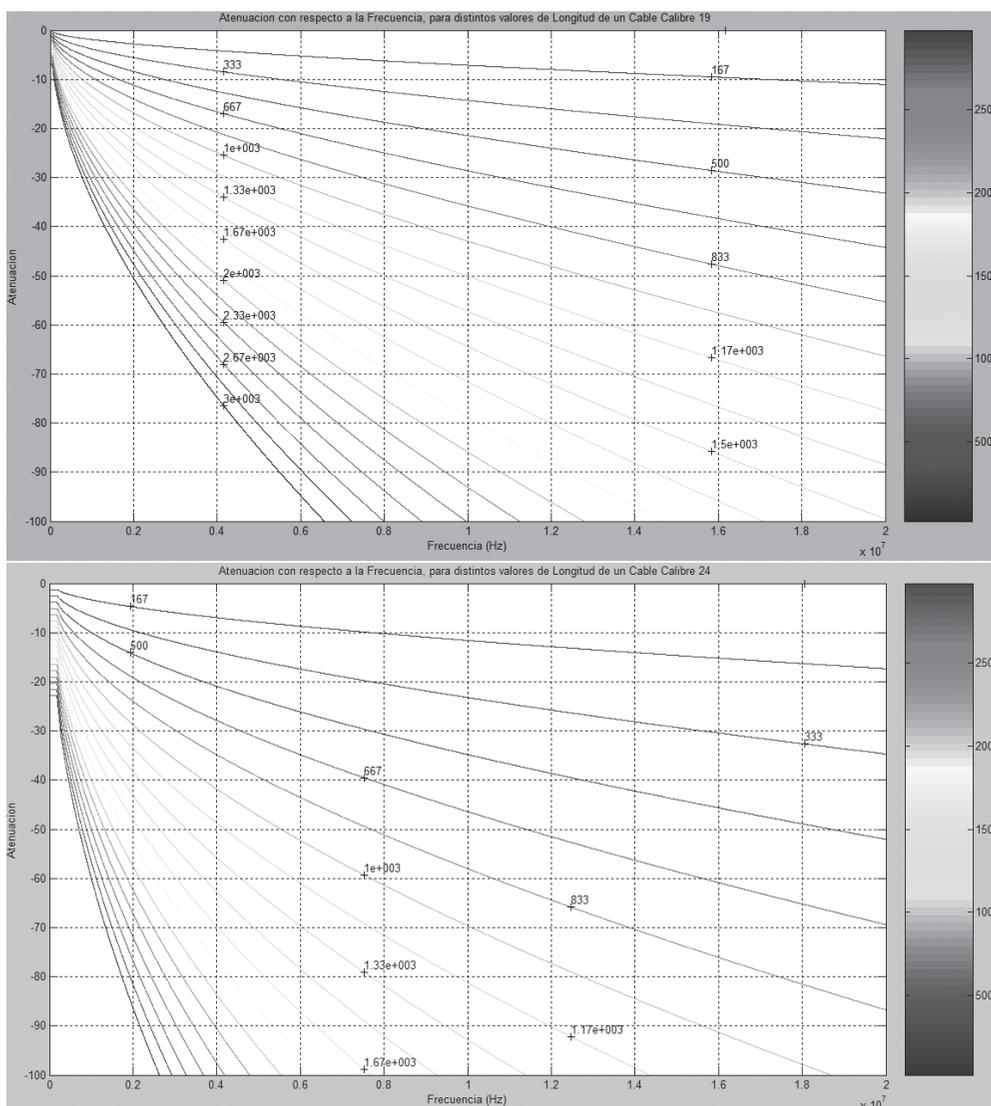


Figuras 4a y 4b. Resultados de la simulación de Atenuación con respecto a la longitud, para calibres 19 y 24.

En comparación con las gráficas de atenuación en función de la longitud, se puede observar que el comportamiento atenuación vs frecuencia es mucho más acentuado, además de no lineal, (ver fig.5), lo que significa que pequeños incrementos en la frecuencia producen grandes aumentos en el valor de atenuación por kilómetro, no solo para una distancia específica, sino para distancias relativamente similares. En cables calibre 24 se observa que para altas frecuencias se requieren

tramos de poca longitud (menos de 1Km), para que la señal se atenúe 50dB o más. El comportamiento de la atenuación en los distintos cables estudiados varía dependiendo del calibre. Para cables con bajo grosor, la atenuación es elevada en pocos metros, mientras que, a medida que aumenta la sección transversal del conductor, la atenuación es mucho menor para tramos de igual longitud. Esto se debe a la variación de la resistencia AC en función del diámetro, como se mencionó anteriormente.

Atenuación con respecto a la frecuencia, para distintos valores de longitud



Figuras 5a y 5b. Resultados de la simulación de Atenuación con respecto a la frecuencia, para calibres 19 y 24.

5.2. Mediciones Eléctricas Obtenidas sobre Cables Telefónicos Reales

De las mediciones de parámetros en la infraestructura residencial se obtuvo que los cables de prueba se encontraban en buen estado, pues poseían una resistencia de aislamiento muy superior a 1Gohm/km , el cual es el valor mínimo de referencia de CANTV para el cableado de última milla (CANTV, Mediciones Eléctricas Planta Externa)^[1], lo cual indica que las corrientes de fuga son mínimas.

Los valores de capacitancia y resistencia DC difieren un poco de los valores nominales. Esto puede deberse principalmente al hecho de que la línea en realidad está conformada por la unión o empalme de varios cables a lo largo del tramo, además de la corrosión de los mismos por el tiempo que tienen funcionando. No obstante, no se observaron diferencias demasiado significativas. Esto permitió continuar con las pruebas en busca de los parámetros más importantes a evaluar.

Resistencia DC

| Tramo en estudio | Resistencia DC (Fluke) | Resistencia DC (Megger) | Resistencia DC promedio | Resistencia DC por unidad de longitud (Ω/Km) |
|------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|--|
| Línea A | 10,54 Ω | 11 Ω | 10,77 Ω | 140,03 |
| Línea B | 12,84 Ω | 13,20 Ω | 13,02 Ω | 169,29 |

Tabla 2. Resultados de medición de Resistencia DC

Capacitancia por unidad de longitud

| Tramo en estudio | Cap. entre el hilo A y Tierra | Cap. entre el hilo B y Tierra | Cap. entre el hilo A y el hilo B | Cap. Mutua | Cap. por unidad de longitud (nF/Km) |
|------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|------------|-------------------------------------|
| Línea A | 4,85nF | 4,85nF | 1,57nF | 3,995nF | 51,94 |
| Línea B | 4,80nF | 4,80nF | 1,45nF | 3,85nF | 50,06 |

Tabla 3. Resultados de medición de Capacitancia

Conductancia

| Tramo en estudio | Resistencia de aislamiento (hilo A y Tierra) | Resistencia de aislamiento (hilo B y Tierra) | Resistencia de aislamiento entre hilos | Conductancia por Km |
|------------------|--|--|--|-----------------------|
| Línea A | $3,00 \times 10^{10}$ | $3,00 \times 10^{10}$ | $3,50 \times 10^{10}$ | $1,24 \times 10^{-9}$ |
| Línea B | $3,00 \times 10^{10}$ | $3,00 \times 10^{10}$ | $3,00 \times 10^{10}$ | $1,30 \times 10^{-9}$ |

Tabla 4. Resultados de medición de Conductancia

5.2.4. Atenuación y Velocidad de Propagación

Los valores obtenidos en la medición de atenuación permitieron alcanzar resultados concluyentes. El máximo valor medido (extrapolado a 1000m) fue de 98,23dB/km para 20MHz (menos de 50dB por cada 500m). Con los valores de atenuación obtenidos para las distintas frecuencias (tabla 5), se construyó una gráfica, y sobre ella una aproximación polinómica de orden 6 (fig.6a), de modo de generar una función del comportamiento de la línea, despreciando los errores de apreciación que pudieron estar presente durante las mediciones.

| Long. del cable (mts) | Long. Eléct. (mts) | Frec. (MHz) | Voltaje de Llegada | Voltaje de Salida | Atenuación (dB) | Atenuación (dB/m) | Atenuación (dB/Km) |
|-----------------------|--------------------|-------------|--------------------|-------------------|-----------------|-------------------|--------------------|
| 153,82 | 158,43 | 2,20 | 0,36 | 0,68 | -5,52 | -0,045 | -34,868 |
| | | 3,18 | 0,13 | 0,32 | -7,82 | -0,049 | -49,384 |
| | | 4,00 | 1,00 | 2,50 | -7,96 | -0,050 | -50,234 |
| | | 5,00 | 1,00 | 2,60 | -8,29 | -0,052 | -52,384 |
| | | 6,02 | 1,10 | 2,90 | -8,42 | -0,053 | -53,146 |
| | | 6,94 | 1,10 | 3,00 | -8,72 | -0,055 | -55,004 |

| | | | | | | | |
|--------|--------|-------|--------|--------|---------|--------|---------|
| 153,82 | 153,43 | 8,06 | 0,40 | 1,30 | -10,24 | -0,065 | -64,618 |
| | | 9,09 | 0,35 | 1,15 | -10,33 | -0,065 | -65,217 |
| | | 10,00 | 0,35 | 1,10 | -9,95 | -0,063 | -62,780 |
| | | 11,11 | 0,30 | 0,90 | -9,54 | -0,060 | -60,229 |
| | | 12,00 | 0,33 | 1,05 | -10,19 | -0,064 | -64,292 |
| | | 13,16 | 0,22 | 0,76 | -10,77 | -0,068 | -67,964 |
| | | 14,29 | 0,24 | 0,86 | -11,09 | -0,069 | -69,970 |
| | | 15,15 | 0,17 | 0,74 | -12,78 | -0,081 | -80,637 |
| | | 16,12 | 0,10 | 0,50 | -13,98 | -0,088 | -88,235 |
| | | 17,24 | 0,11 | 0,56 | -14,14 | -0,089 | -89,222 |
| | | 17,86 | 0,10 | 0,54 | -14,65 | -0,092 | -92,454 |
| | | 19,23 | 0,10 | 0,58 | -15,27 | -0,096 | -96,371 |
| 20,00 | 0,10 | 0,60 | -15,56 | -0,098 | -98,230 | | |

Tabla 5. Resultados de medición de Atenuación

En cuanto a la velocidad de propagación, los valores obtenidos permitieron comprobar que la línea de transmisión posee un comportamiento constante a trozos, para anchos de banda pequeños, en los que el retardo de grupo introducido es mínimo. Los resultados se muestran en la tabla 6, y su respectiva gráfica, en donde se evidencia el comportamiento de la velocidad de fase para distintas frecuencias, se muestra en la fig.6b.

| Desfasaje | Frec (MHz) | Vel. Prop. | # long. de onda (λ) | Tiempo Prop. (s) | Vel. de Fase (m/s) | Vel. de Fase % |
|-------------|------------|------------|-------------------------------|------------------|--------------------|----------------|
| 0,000000455 | 2,20 | 0,58 | 1,45 | 0,00000091 | 174098901 | 0,58 |
| 0,00000026 | 3,17 | 0,58 | 2,89 | 0,00000089 | 178011236 | 0,59 |
| 0,00000026 | 4,00 | 0,58 | 3,64 | 0,00000101 | 156861386 | 0,50 |
| 0,000000166 | 5,00 | 0,58 | 4,55 | 0,000000966 | 164006211 | 0,55 |
| 0,000000084 | 6,02 | 0,58 | 5,48 | 0,000000914 | 173336980 | 0,58 |
| 0,000000148 | 6,94 | 0,58 | 6,32 | 0,000001012 | 156551383 | 0,52 |
| 0,00000005 | 8,06 | 0,58 | 7,34 | 0,000000918 | 172581699 | 0,58 |
| 0,0000002 | 9,09 | 0,58 | 8,27 | 0,00000108 | 146694444 | 0,49 |
| 0,00000008 | 10,00 | 0,58 | 9,10 | 0,00000098 | 161663265 | 0,54 |
| 0,000000084 | 11,11 | 0,58 | 10,11 | 0,000000984 | 161006098 | 0,54 |
| 0,000000084 | 12,00 | 0,58 | 10,11 | 0,000000984 | 161006098 | 0,54 |
| 0,00000008 | 13,16 | 0,58 | 11,97 | 0,000000916 | 172958515 | 0,58 |
| 0,00000007 | 14,29 | 0,58 | 13,00 | 0,00000098 | 161663265 | 0,54 |
| 0,000000074 | 15,15 | 0,58 | 13,79 | 0,000000932 | 169989270 | 0,57 |
| 0,00000005 | 16,13 | 0,58 | 14,68 | 0,000000918 | 172581699 | 0,58 |
| 0,000000062 | 17,24 | 0,58 | 15,69 | 0,000000932 | 169989270 | 0,57 |
| 0,000000053 | 17,86 | 0,58 | 16,25 | 0,000000949 | 166944152 | 0,56 |
| 0,000000056 | 19,23 | 0,58 | 17,50 | 0,00000094 | 168542553 | 0,56 |
| 0,000000042 | 20,00 | 0,58 | 18,20 | 0,000000942 | 168184713 | 0,56 |

Tabla 6. Resultados de medición de Velocidad de Fase

Los resultados obtenidos en la fase de medición son comparables y complementables con los que se derivan de la simulación. Los valores contenidos en la columna dB/km de la tabla 5, resultan altamente coincidentes a los graficados en MATLAB para la atenuación en cables calibre 24 (fig.4b), mismo utilizado en las mediciones. Mediante una simple inspección visual se puede verificar, por ejemplo, que el valor de atenuación para la frecuencia de 2,2MHz en la gráfica de la simulación es aproximadamente de -31dB/km, mientras que en la tabla es de -34,868dB/km; para 6,67MHz, en la gráfica se tiene un valor aproximado de -55,5dB/km, cuando en la tabla a los 6,94MHz es de -55,004dB/km; finalmente, observando el extremo superior, en la gráfica se tiene un valor de atenuación de -97dB/km para una frecuencia de 17,8MHz, y en la tabla, para la misma frecuencia se tiene -92,454dB/km. Diferencias pequeñas en el orden de los 5dB pueden presentarse en algunos tramos, y pueden deberse a errores de apreciación o de precisión de la medida, debido a limitaciones con los instrumentos. Sin embargo, ciertamente se observa que los valores se mantienen alrededor de los obtenidos en la simulación, con lo que se verifica que el modelo fue construido con gran similitud al comportamiento real, y puede ser utilizado para la caracterización del comportamiento de líneas de transmisión, introduciendo sus parámetros primarios y calibre de los cables.

Con estos resultados se verifica además que, en la banda comprendida entre 2,208MHz y 20MHz, la atenuación para señales menores a los 20MHz es inferior a los 100dB/km, equivalente a 50dB en 500m, mientras que la velocidad de fase posee un comportamiento lineal con una pendiente decreciente muy baja (-0,0005933191), lo que determina una mínima distorsión en señales de banda angosta, distribuidas a lo largo de este espectro, haciendo de ella una banda apta para la transmisión de señales e implementación de nuevos servicios, para longitudes menores a 500m.

A partir de los resultados mencionados, ha sido posible realizar las siguientes definiciones: “Banda de Servicios Tradicionales”, conformada por la banda de telefonía tradicional POTS, y la banda ADSL2+, incluyendo márgenes de guarda (comprendida entre 0 y 2,208MHz); “Semi-Banda Remanente” definida como la porción semi-infinita del espectro de frecuencias de un par telefónico, por encima de la “Banda de Servicios Tradicionales”, cuyo límite inferior es 2,208MHz; “Banda Disponible” corresponde a la porción de la “Semi-Banda Remanente” comprendida entre 2,208MHz y 20MHz, y que puede ser utilizada para el préstamo de nuevos

servicios, definiendo un margen de guarda con la “Banda de Servicios Tradicionales”; “Banda de Guarda con ADSL2+” banda de protección por encima de ADSL2+, que va desde 2.208KHz, hasta 3.178,3125KHz; y final-

mente, “Banda Útil”, que va desde el final de la “Banda de Guarda” (3.178,3125KHz.), hasta los 20MHz, que determinan el final de la porción del espectro sobre la cual se realizó el estudio, y que se determinó apta para la transmisión de datos.

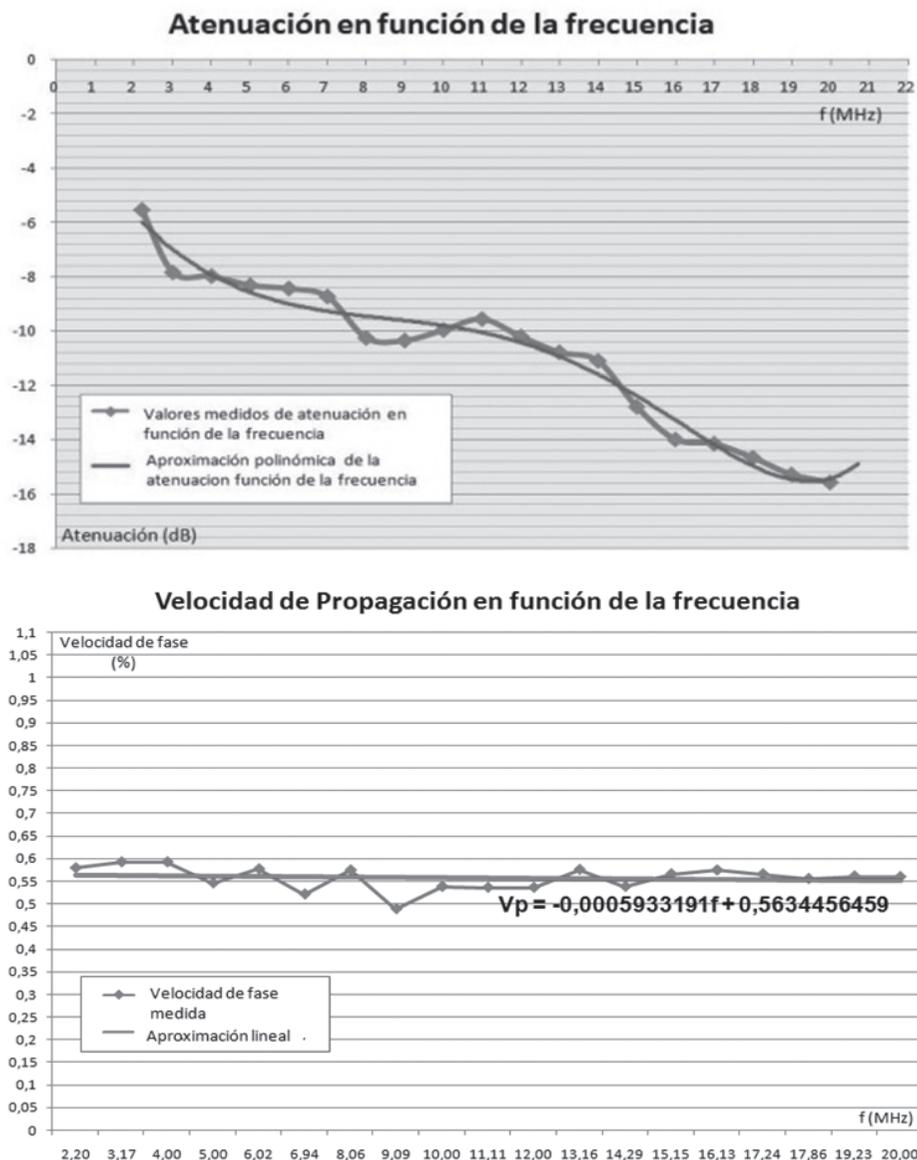


Figura 6. Gráficas de: a) Atenuación en función de la frecuencia; b) Velocidad de Propagación en función de la frecuencia.

5.3. Propuesta Tecnológica:

Una vez definidos los conceptos referentes a la “usabilidad” del espectro de frecuencias del par de cobre, se elaboró una propuesta tecnológica que permitiese el aprovechamiento del ancho de banda no utilizado, a través del uso de señales de frecuencias por encima

de la banda telefónica y de ADSL2+. En ese sentido, se estudiaron diferentes alternativas en cuanto a técnicas de modulación combinadas que aumentasen la eficiencia espectral, para permitir la transmisión de datos a altas velocidades. La familia de tecnologías xDSL cuenta con

un robusto esquema de modulación que permite el envío de una gran cantidad de bits por cada porción del espectro, aumentando la eficiencia espectral del par de cobre respecto al servicio convencional de telefonía. Por esta razón, se escogió ADSL2+ como tecnología base a ser utilizada en la propuesta realizada para la optimización del uso del par de cobre como medio de transmisión. El sistema propuesto, el cual persigue la inclusión de señales sobre los pares de cobre en bandas antes no utilizadas, permite la prestación de servicios de diversos tipos, y ha sido designado con el nombre "AMODT", cuyas siglas significan "ADSL2+ Modulated Over Discrete Tones", o "ADSL2+ Modulado Sobre Tonos Discretos".

El sistema está compuesto por un conjunto de dispositivos que, en esencia, permiten incluir señales ADSL2+ varias veces en el espectro de frecuencia. Esto se logra realizando, en primer lugar, una división de la banda considerada como "útil" en cinco sub-bandas, cada una con igual tamaño que la banda de ADSL2+, y espaciamientos o márgenes de guarda correspondientes a 1MHz. Los márgenes de guarda están determinados por el factor de caída de la densidades espectrales de potencia (PSD) en transmisión, de las entidades ADSL2+. Sobre cada sub-banda se coloca una señal ADSL2+, obteniéndose cinco en total, moduladas sobre tonos discretos para efectuar la traslación en frecuencia. Esto permite quintuplicar las velocidades de transmisión que ofrece ADSL2+ por sí solo, de 24Mbps a 120Mbps para el enlace de bajada (*downstream*), y de 2Mbps a 10Mbps para el enlace de subida (*upstream*). La implementación de este sistema es ideal para infraestructuras con pares de cobre para telefonía, desplegados en toda su extensión, a los cual se le quiera sacar mayor provecho del que ya tienen. Sobre este cableado, mediante el uso del sistema AMODT, podría implementarse una red LAN con topología en estrella y bus lógico, a través de un sistema centralizado que interconecte otras redes existentes en los predios de los usuarios, funcionando como medio físico y lógico para la prestación de servicios privados de diversa índole.

En cuanto a los elementos que compondrían al sistema propuesto "AMODT", se tiene lo siguiente (ver fig.7): en primer lugar, dos divisores de señal AMODT, conformados por filtros analógicos *bessel* de tipo paso-bajo y paso-alto, de orden 6 y frecuencias de corte 2,208MHz y 3,208MHz respectivamente. El objetivo de estos divisores sería separar las señales de Internet, telefonía y televisión que provienen del ISP, de las señales que soportan los servicios propios del sistema AMODT; esto ocurriría tanto en el extremo del abonado como en

la tanquilla de telefonía de la edificación (FXB). De este modo se evita la interferencia y el ingreso de señales no deseadas a la red pública del ISP y a los equipos del sistema. En segundo lugar, un módem AMODT por cada interfaz de usuario (cable telefónico), cuya misión será modular y demodular señales ADSL2+ en las distintas sub-bandas. Finalmente, se requiere un sistema centralizado de control y conmutación, el cual estará conformado por: un MODEM AMODT-T, que es en realidad un arreglo de módems AMODT en el extremo del FXB, dispuestos uno a continuación del otro para la recepción y transmisión de datos desde y hacia los abonados, y seguidamente un IP-DSLAM, que conectado al MODEM AMODT-T, tendrá como función la conmutación interna de tramas y el enrutamiento a otras redes a través de interfaces de alta velocidad (10Gbps), vía fibra óptica. La salida hacia una red WAN bien podría darse sobre tecnologías como ATM o Metro Ethernet.

Los módems AMODT y AMODT-T forman parte de la propuesta tecnológica del presente trabajo, más no existen comercialmente. En un futuro pueden ser fabricados mediante un arreglo de módems ADSL2+ y algunos elementos de electrónica que deben ser desarrollados, y que tendrán la función de re-modular las señales ADSL2+ y colocarlas a lo largo de la banda considerada como "util", desde los 3,208MHz hasta los 20MHz.

La modulación utilizada en el sistema AMODT sería de tipo SSB Discreta. En el interior de un DSP (digital signal processor), se realizaría la modulación de las señales ADSL2+, mediante el producto de sus representaciones discretas, con las muestras de tonos discretos y un filtrado posterior para la obtención de una banda lateral única. Esta señal se colocaría finalmente sobre en cableado, mediante un conversor digital-analógico y acopladores de línea.

La implementación de un sistema AMODT en estructuras con pares telefónicos operativos, ofrecería a sus usuarios la posibilidad de garantizar la continuidad de los servicios de la red pública, e incluir al mismo tiempo servicios privados de video-vigilancia, intercomunicación, control, monitoreo y datos (por mencionar algunos), según las necesidades a cubrir. Todo lo anterior cuenta con la ventaja, además, de poder trabajar bajo una arquitectura tradicional para la conformación de red LAN basada en la suite de protocolos TCP/IP, en combinación con Ethernet como protocolo de capa de enlace.

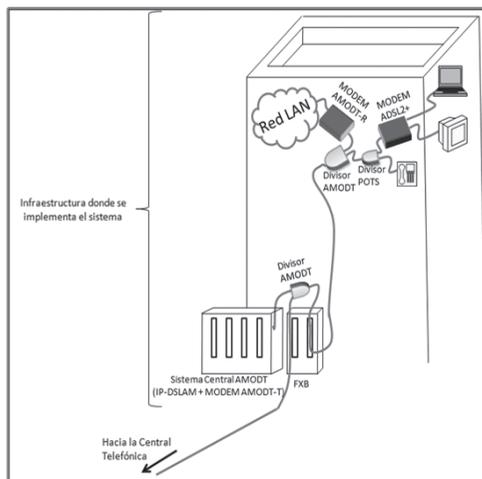


Figura 7. Diagrama de red del sistema AMODT sobre una infraestructura vertical (conexión de un solo usuario). (Fuente: propia).

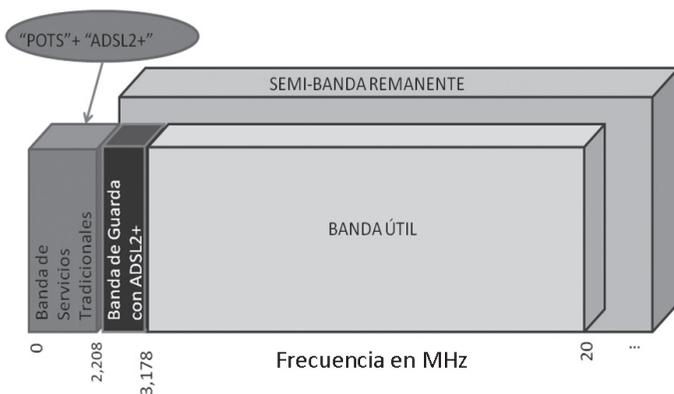


Figura 8. Definiciones asociadas al ancho de banda en un par de cobre con tecnología ADSL2+ operando. (Fuente: propia).

6. CONCLUSIONES

De todos los involucrados en el desempeño de los pares de cobre, se concluye que la resistencia AC es el parámetro más crítico, ya que su valor se incrementa proporcionalmente con la frecuencia, produciendo aumentos considerables en los valores de atenuación de la línea. Este comportamiento se acentúa con el envejecimiento de los cables y las pérdidas de algunas

propiedades físicas, lo cual representa una limitante para la transmisión de datos sobre pares de cobre.

La atenuación en pares de cobre aumenta de manera exponencial con la frecuencia, llegando a obtenerse valores sumamente bajos de potencia en el extremo receptor, en relación a la señal colocada en la línea. Esta consecuencia se reduce de manera dramática cuando se acorta la longitud del tramo de propagación, condición que es de provecho si se considera la utilización de un ancho de banda mayor al utilizado actualmente en las infraestructuras de pares de cobre.

La velocidad de propagación en los pares de cobre, es una función aproximadamente lineal y decreciente, de variación muy lenta en la banda comprendida entre 2 y 20MHz. Si se considera un ancho de banda suficientemente pequeño, se puede asegurar que los tonos que la conforman se propagan a velocidades aproximadamente iguales, con lo que los retardos de fase son constantes a trozos, y la distorsión de las señales debería ser mínima.

Tanto en Venezuela, como en otras partes del mundo donde se implementa esta tecnología, existe una semi-banda de frecuencia, por encima de la banda ADSL2+, la cual se encuentra disponible para su uso en cables de pares trenzados, en vista de la no existencia de señales de otros servicios sobre los mismos. La determinación de un ancho de banda estimado del par telefónico, depende exclusivamente de la fijación de parámetros, que permitan definir un límite superior para convertir la semi-banda remanente en una “banda útil”. Para el caso particular del presente trabajo, los parámetros que satisfacen las condiciones exigidas por el problema en estudio, han determinado como límite superior de la banda útil, 20MHz (ver figura 8).

Para un mejor aprovechamiento del ancho de banda de los pares de cobre, pueden ser implementados sobre el cableado telefónico interno de cualquier edificación, sistemas que permitan la introducción de servicios en la banda que se considere “útil”; esto en vista del hecho de que el tramo de cableado telefónico interno a las edificaciones, pertenece al ente de administración del edificio, y no a la empresa proveedora de servicio.

La propuesta tecnológica realizada es aplicable a cualquier estructura con cables telefónicos que cumplan con la condición de ser menores a 500mts (si el cable es calibre 19, 22 o 24AWG), o 333mts (si el cable es calibre es 26AWG), y que satisfagan los requerimientos mínimos especificados, mediante la realización de mediciones eléctricas y la determinación de los niveles de atenuación, los cuales no deben superar los 50dB, para una señal de prueba de 20MHz.

La tecnología y banda de trabajo propuesta para la optimización del uso del par de cobre como medio de transmisión, reciben por nombre: "AMODT" (ADSL2+ Modulated Over Discrete Tones, o ADSL2+ Modulado Sobre Tonos Discretos). Consiste en la división del ancho de banda considerado "útil" en pares telefónicos, desde 3,308MHz a 20MHz, en 5 sub-bandas de igual tamaño de la banda ADSL2+, para la introducción en ellas de señales de ésta tecnología, trasladadas en frecuencia mediante modulación SSB-discreta.

Los equipos mínimos requeridos para la implementación del sistema propuesto son: un MODEM AMODT por usuario (extremo del usuario), un MODEM AMODT-T (extremo del FXB), dos (2) divisores AMODT para la separación de señales de telefonía, ADSL2+ y señales AMODT y un IP-DSLAM ADSL2+.

Por último, AMODT constituye únicamente una propuesta o planteamiento desde el punto de vista técnico, con la intención de mostrar una de las tantas formas en las que la banda considerada como "útil", en el espectro entre 3,308MHz y 20MHz, puede ser aprovechada, y de servir como punto de inicio de otras investigaciones que puedan derivar en desarrollos comerciales y de estándares. No se especifican costos ni detalles del sistema desde el punto de vista financiero, ya que para ello tendrían que desarrollarse prototipos funcionales que determinen en definitiva el detalle de los elementos de hardware requeridos para una implementación, lo cual no forma parte del alcance del presente trabajo.

7. RECOMENDACIONES

Para una mejor definición y caracterización de los pares de cobre, se recomienda realizar todas las mediciones referentes a parámetros primarios y secundarios en líneas de transmisión, lo cual no fue posible ejecutar en su totalidad debido a la no disponibilidad de los equipos y recursos necesarios, durante el período de desarrollo del presente trabajo.

Para una futura implementación de tecnologías basadas en la propuesta realizada en el presente trabajo, es necesario profundizar en la definición de detalles referente a interfaces, dispositivos electrónicos como los módems y filtros, y estudio de alternativas que permitan la adaptación de los aspectos planteados a condiciones específicas. La propuesta realizada solo debe ser considerada como un modelo de referencia en el cual se muestra una las tantas formas en que puede ser utilizada

la porción del espectro que se consideró útil, dentro del cableado telefónico interno a las infraestructuras.

8. REFERENCIAS

- [1] CANTV (s.f.) *Mediciones Eléctricas Planta Externa*. (TEPEX – MODULO XIV)
- [2] CANTV (s.f.). *Mantenimiento Correctivo en Planta Externa*. (Tepex – Módulo XVI)
- [3] Xiao Y., Du X., Zhang J., Hu F. y Guisan S. (2007, Noviembre). *IP Protocol Television (IPTV): The Killer Application for the Next-Generation Internet*. IEEE Communication Magazine, 45(11), 126-134.
- [4] Lofti A., Gradzki P. & Lee F. (1992, Septiembre). *Proximity Effects in Coils for High Frequency Power Applications*. Extraído desde: <http://ieeexplore.ieee.org/iel1/20/4499/00179432.pdf> el 01.09.2008
- [5] *The Mathworks, Inc. (2008). Signal Processing Toolbox*. Extraído desde: <http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/signal/index.html?/access/helpdesk/help/toolbox/signal> el 05.09.2008
- [6] UIT-T (Junio, 1999). *Rec. G.992.1. Transceptores de línea de abonado digital asimétrica*. Extraída desde <http://www.itu.int> el 20.12.2007
- [7] UIT-T (Enero, 2005.a). *Rec. G.992.3. Transceptores de línea de abonado digital asimétrica 2*. Extraída desde <http://www.itu.int> el 20.12.2007
- [8] UIT-T (Enero, 2005.b). *Rec. G.992.3. Transceptores de línea de abonado digital asimétrica – Línea de abonado digital asimétrica 2 de anchura de banda ampliada (ADSL2+)*. Extraída desde <http://www.itu.int> el 20.12.2007
- [9] D. Kagklis, S. Androulidakis, G. Patikis and T. Doukoglou. (2005). A comparative Performance Evaluation of the ADSL2+ and ADSL Technologies. GESTS Int'l Trans. Computer Science and Engr., Vol.19, No.1
- [10] Barton, M. Bellcore, Morristown, NJ Honig, M.L. (1995). Optimization of discrete multitone to maintain spectrum compatibility with other transmission systems on twisted copper pairs. Publicado en: *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*. (2005, Diciembre) Volumen: 13 , Edición: 9. Pags.: 1558-1563.
- [11] Yarali, A. Telecommun. Syst. Manage., Murray State Univ., Murray, KY Cherry, A. (2005). Internet

- Protocol Television (IPTV). Presentado en: *TENCON 2005 IEEE Region 10* .(2005, Nov 21-24).
- [12] Fernández R., Sepúlveda R. y Bustos M. *Efecto Pelicular*. Extraído desde http://146.83.6.25/software/pelicular/pagproyecto/efecto_skin.htm el 20.12.2007.
- [13] Aware Inc. (2002). *ADSL and ADSL2+: The New ADSL Standards White Paper*. Extraído desde <http://www.dslprime.com/a/adsl21.pdf> el 20.12.2007
- [14] Alcatel (2004). *Introducción al ADSL*. Extraído desde <http://www.fain.uade.edu.ar/simposio/images/archivos/2.pdf> el 21.10.2007
- [15] Díaz, M. *Planta Externa*. Extraído desde <http://www.plantaexterna.cl/parámetros%20secundarios/impedancia.htm> el 15.12.2007
- [16] Galea, G. *CANTV se prepara para ofrecer televisión digital*. Extraído desde <http://ip-com.blogspot.com/> el 26.01.2008
- [17] Hernández D. (s.f.). *Teoría de Líneas de Transmisión*. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de Baja California. Extraído desde http://yaqui.mx/uabc.mx/~dhernan/especial/ing_mi9.gif el día 15.12.2007
- [18] Palma, R. Página Personal. Extraído desde http://146.83.6.25/software/pelicular/pagproyecto/efecto_skin.htm. el 15.12.2007
- [19] Polo, I.M. (Octubre, 2003). *VDSL - Nuevos Retos para Planta Externa*. Extraído desde: [www.sunri-setelecom.com/espanol/VDSL-Nuevos Retos para Planta Externa.pdf](http://www.sunri-setelecom.com/espanol/VDSL-Nuevos_Retos_para_Planta_Externa.pdf) el 08.11.2007
- [20] *Stanford Exploration Project*. Extraído desde http://sepwww.stanford.edu/sep/prof/pvi/spec/paper_html/node18.html el 01.02.2008
- [21] Walker and Associates Inc. (2007). *DSLAMS*. Extraído desde http://www.walkerfirst.com/technology_details.php?tech_name=DSLAMS, el 15.01.2008
- [22] Candia, M. (2008). *Planta Externa*. Extraído desde http://www.emb.cl/gerencia/articulo_mv?num=350&sec=3 el 20.08.2008
- [23] General Cable. (s.f.). *AC Resistance, Skin & Proximity Effect*. Extraído desde www.generalcable.co.nz/Technical/10.3.2.1.pdf el 25.08.2008
- [24] EDN. (2000, Junio). *Twisted-pair transmission-line distributed parameters*. Extraído desde: <http://www.edn.com/contents/images/83652.pdf> el 25.08.2008
- [25] Bautista, R. (2005, Septiembre). *Matlab y el diseño de filtros digitales*. Extraído desde: www.escet.urjc.es/~matemati/TCTS/matlab-filtros.pdf el 01.09.2008.

Referencias del Trabajo Extendido

Carmona I., Vilchez K. (2008, septiembre). *Optimización del Uso del Par de Cobre como Medio de Transmisión*. Trabajo Especial de Grado. Facultad de Ingeniería. Escuela de Telecomunicaciones. Universidad Católica Andres Bello. Caracas, Venezuela. <http://www.ucab.edu.ve>