

Comparación del desempeño de los algoritmos de balanceo de espectro para el downstream de sistemas ADSL

Andrés Gil Molina*, Ana M. Cárdenas Soto*

**Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia,
Grupo de Investigación, Desarrollo y Aplicación en
Telecomunicaciones e Informática (GIDATI)*

Resumen: En este artículo se presenta una breve descripción de ADSL y del modelo del sistema característico de las tecnologías DSL que implementan un esquema de modulación DMT. Adicionalmente se mencionan los tres algoritmos más importantes dentro de los diferentes desarrollos de Balanceo de Espectro para el Manejo Dinámico de Espectro de DSL. Estos algoritmos son sometidos a comparación por medio de la simulación de un escenario de dos sistemas ADSL. Finalmente, los resultados de tasas de datos y densidades espectrales de potencia son analizados con el fin de comparar el desempeño de cada uno de los algoritmos.

Copyright © 2008 UPB.

Abstract: This paper shows a brief description of ADSL and the system model for DMT based technologies. In addition, we mention three of the most important Spectrum Balancing algorithms for Dynamic Spectrum Balancing of DSL. These algorithms are evaluated through a simulation process, which consists of two ADSL systems. Finally, PSD's and data rate results are analyzed, so a comparison of each algorithm's development may be done.

Keywords: PSD (Densidad espectral de potencia), DSM (Manejo Dinámico de Espectro), SB (Balanceo de Espectro), cable multipar, diafonía, atenuación, descomposición dual, equilibrio de Nash, punto de operación, *Iterative Water-Filling*, *Optimal Spectrum Management/Balancing* y *Autonomous Spectrum Balancing*.

1. Introducción

Las tecnologías DSL son tecnologías que se implementan en los pares de cobre, que constituyen el bucle de abonado del sistema telefónico convencional. Debido a que estos sistemas fueron diseñados para la banda vocal, existen ciertos fenómenos que se hacen más notorios en las bandas de alta frecuencia, las cuales son utilizadas por las tecnologías DSL. Los fenómenos que más afectan el desempeño de los sistemas son la atenuación y la diafonía. El primero de ellos representa el debilitamiento de la señal a lo largo del par de cobre; y el segundo representa la interferencia que se produce entre los pares que comparten un mismo cable multipar, debido a los acoplamientos electromagnéticos entre ellos.

Los métodos de Balanceo de Espectro son una clase de métodos que se definen dentro del contexto del Manejo Dinámico del Espectro para DSL (*Dynamic Spectrum Managemnet*). Estos métodos implementan diferentes procesos de optimización con el fin de determinar las asignaciones de densidad espectral de potencia (*Power Spectral Density* - PSD) más óptimas para los sistemas DSL que comparten un mismo cable multipar, con el fin de considerar los fenómenos de atenuación y mitigar el efecto de los fenómenos de diafonía. Hasta el momento se han desarrollado diferentes algoritmos de balanceo de espectro, pero los más relevantes son *Iterative Water-Filling*, *Optimal Spectrum Management/Balancing* y *Autonomous Spectrum Balancing*, ya que representan los puntos de referencia más importantes dentro de la evolución de los desarrollos en balanceo de espectro, teniendo cuenta factores como menor complejidad computacional, resultados más óptimos, y técnicas de optimización implementadas en cada uno de ellos.

Este artículo está estructurado de la siguiente manera: se presenta una descripción básica del sistema ADSL en la sección 2. En la sección 3 se describe el modelo del sistema para los sistemas DSL que poseen una técnica de modulación DMT. En la sección 4 se detallan los tres algoritmos de balanceo de espectro mencionados. En la sección 5 se describe la simulación realizada para comparar el desempeño de los algoritmos y se presentan los resultados. Finalmente, se concluye en la sección 6.

2. Descripción del sistema ADSL

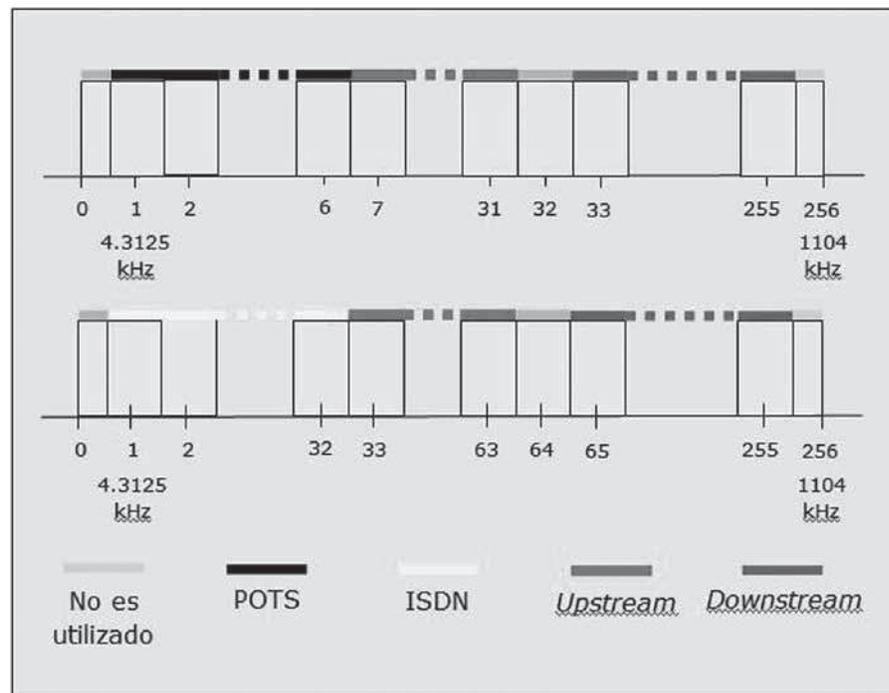
ADSL surgió partiendo de la necesidad de generar una manera más eficiente de entregar T1 y E1 a los usuarios residenciales, haciendo uso de los pares de cobre y

buscando una coexistencia con el sistema POTS e ISDN. Su proceso de estandarización comenzó en 1989 por parte del T1E1.4 *working group*. Este proceso se caracterizó por la discusión acerca de cuál esquema de modulación se adoptaría. Sin embargo en 1993 DMT fue seleccionado como el esquema de modulación para ADSL. Hasta el momento existen tres estándares de ADSL, el estándar norteamericano T1.413 (ANSI, 1995), el estándar europeo TS 101 388 (ETSI, 1998), y a nivel internacional para la ITU-T generó la recomendación de la ITU-T G.992.1 (ITU-T,1999).

2.1. Plan de frecuencias

El rango de frecuencias utilizado por el transmisor de ADSL depende tanto de la dirección de transmisión como del modo de operación, es decir, si coexiste con POTS o ISDN. En ambos modos de operación, el ancho de banda utilizado es de 0 a 1.104 Mhz; el cual se divide en 257 subcanales o tonos, de los cuales 255 son de 4.3125 kHz, y dos son de 2.15625 kHz de ancho de banda. Los subcanales son indexados en orden ascendente con respecto a la frecuencia, del 0 al 256. La asignación de canales para cada sentido y modo de operación se ilustra en la Figura 1.

Figura 1. Distribución de canales para ambos modos de operación y sentidos de transmisión



2.2. Densidad Espectral de Potencia

De acuerdo con el anexo A de la recomendación ITU-T G.992.1 (ITU-T,1999) para la transmisión en sentido *downstream*, se tiene un límite de potencia máxima de 20.4 dBm y 12.5 dBm en sentido *upstream*. Adicionalmente, para delimitar el máximo de potencia en cada subcanal, se define una máscara espectral para cada modo de operación y sentido de transmisión. Para el caso del *downstream* de ADSL sobre POTS, la máscara se caracteriza por un nivel pico de PSD de -36.5 dBm/Hz y un nivel de PSD promedio requerido de -40 dBm/Hz sobre toda la banda. La máscara de PSD se establece 3.5 dB sobre el nivel de PSD promedio para simplificar la carga de bits y para considerar el rizado ocasionado por los filtros de transmisión.

3. Modelo del sistema

En DMT se calcula el número de bits que puede ser ubicado en cada subcanal, y estos son mapeados en una constelación M-QAM de dos dimensiones. El cálculo la tasa de datos para cada subcanal k puede estimarse por:

$$R_k = \frac{1}{T} \log_2 \left(1 + \frac{\text{SNR}_k}{\Gamma} \right)$$

Donde $1/T$ es la tasa de símbolos, SNR_k el valor promedio del nivel señal a ruido en el subcanal k y Γ es una constante que representa un espaciamento entre la capacidad real y la capacidad teórica de Shannon, que además involucra un margen de ruido y ganancia de codificación. Este espaciamento puede ser calculado por medio de:

$$\Gamma = \frac{\Gamma(P_e) \cdot \gamma_m}{\gamma_c}$$

Donde $\Gamma(P_e)$ representa la constante de espaciamento de Shannon para un valor de probabilidad de error de bit determinado, que para un esquema de modulación M-QAM la constante de espaciamento de Shannon es de 9.95 dB (aproximadamente) para una probabilidad de error de bits de 10^{-7} . γ_c y γ_m representan la ganancia de codificación y el margen de ruido, respectivamente. La ganancia de codificación es típicamente de 3 a 5 dB, pero se pueden obtener ganancias un poco mayores, y un valor común para el margen de ruido es de al menos 5 o 6 dB. La tasa de símbolos $1/T$ es de 4KHz si se considera el 7.8% de encabezados debido a la implementación del prefijo cíclico y una separación de subcanales de 4.3125 KHz (Jonsson, 2006).

El cálculo del valor de SNR_k para un sistema i dentro de un grupo de N usuarios, está dado por la siguiente expresión (Jonsson, 2006):

$$\text{SNR}_k = \frac{P_i f_k |H_{ii}(f_k)|^2}{(\sigma_i f_k + \sum_{j \neq i}^N P_j f_k |H_{ij}(f_k)|^2)} \quad (3)$$

Donde P_i representa la PSD del sistema i , $|H_{ii}(f_k)|^2$ su función de transferencia, $\sigma_i(f_k)$ su correspondiente ruido de fondo, $|H_{ij}(f_k)|^2$ su función de transferencia de diafonía con respecto al sistema j y f_k corresponde al valor de frecuencia central para cada subcanal.

4. Algoritmos de balanceo de espectro

Los algoritmos de balanceo de espectro implementan métodos que se encargan de decidir cuál es la asignación más óptima de los recursos que se asignan a un sistema en particular (anchos de banda y potencias), teniendo en cuenta las condiciones del canal dadas (ruidos y atenuación). Esto se hace con el fin de encontrar un balance entre el desempeño de un sistema en particular y el nivel de ruido que aporta a los demás sistemas en el mismo cable multipar, debido a los efectos de la diafonía. A continuación se detallan los algoritmos *Iterative Water-Filling (IWF)*, *Optimal Spectrum Management/Balancing (OSM/OSB)* y *Autonomous Spectrum Balancing (ASB)*.

4.1. Iterative Water-Filling (IWF)

Water-Filling es un proceso de distribución de potencia conocido en los sistemas DSL; en el cual, dado el nivel de señal a ruido del canal en función de la frecuencia, la asignación más óptima de PSD para un sistema en particular se obtiene ubicando más potencia en las bandas cuyo nivel de señal a ruido es mayor, con el fin de maximizar su tasa de datos.

Iterative Water-Filling es una extensión del proceso *Water-Filling* para un ambiente de comunicación de múltiples sistemas, y se basa en formular un juego competitivo (no cooperativo), en el cual cada sistema trata de maximizar su tasa de datos realizando el proceso de WF de manera iterativa; considerando la diafonía proveniente de los demás usuarios como ruido. Se puede demostrar que este proceso iterativo converge en un punto de equilibrio, que dentro de la perspectiva de la teoría de juegos es llamado equilibrio de Nash (Chung, 2008), (Cioffi, 2002). Las pruebas de existencia y unicidad de este equilibrio se presentan en (Yu, 2000) y son tomadas bajo el concepto de *Competitive Optimality* en (Yu *et al.*, 2002a), (Yu *et al.*, 2002b).

Para caracterizar el equilibrio de Nash en el caso de dos usuarios se plantea el siguiente problema de optimización que se presenta en (Yu *et al.*, 2002b).

$$\begin{aligned} & \max \int_0^{F_s} \log_2 \left[1 + \frac{P_1(f) |H_{11}(f)|^2}{\Gamma(\sigma_1(f) + P_2(f) |H_{12}(f)|^2)} \right] df \\ & \text{s.t.} \int_0^{F_s} P_1(f) df \leq P_1 \\ & P_1(f) \geq 0, \quad \forall f \end{aligned} \quad (4)$$

Donde f representa la variable continua de frecuencia y P_i el límite de potencia máxima para el usuario 1. Este problema se plantea de la misma manera para el usuario 2.

La solución de este problema es la asignación óptima de PSD para el usuario 1, $P_1(f)$; conservando $P_2(f)$ fija, y puede ser encontrada por medio de una función de costo que se muestra en (Van Den Bogaert *et al.*, 2005), (Van Den Bogaert *et al.*, 2004) y está dada en función f_k . Esta función de costo se representa de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} & \max_{P_1(f_k), P_2(f_k)} J(P_1(f_k), P_2(f_k)) \\ & \sum_k \log_2 \left(1 + \frac{P_1(f_k) |H_{11}(f_k)|^2}{\Gamma N_1(f_k)} \right) \\ & + \sum_k \log_2 \left(1 + \frac{P_2(f_k) |H_{22}(f_k)|^2}{\Gamma N_2(f_k)} \right) \\ & + \lambda_1 \cdot \left(P_1 - \sum_k P_1(f_k) \right) + \lambda_2 \cdot \left(P_2 - \sum_k P_2(f_k) \right) \end{aligned} \quad (5)$$

En esta función encontramos la suma de la tasa de bits de ambos usuarios junto con los multiplicadores de Lagrange λ_1 y λ_2 que representan un costo en la restricción de potencia total para ambos usuarios. En esta función de costo, se ha realizado previamente la aproximación de $N_1(f_k) = \sigma_1(f_k) + P_2(f_k) |H_{12}(f_k)|^2$ y $N_2(f_k) = \sigma_2(f_k) + P_1(f_k) |H_{21}(f_k)|^2$, que se llevan a cabo gracias al hecho de que por medio de la implementación del proceso de WF, el ruido de diafonía producido por el otro usuario es temporalmente constante y puede ser incorporado

en el término del ruido de fondo. La solución de esta función para ambas asignaciones $P_1(f_k)$ y $P_2(f_k)$, teniendo en cuenta la aproximación vista, está dada por:

$$P_1(f_k) = \left[\frac{1}{\lambda_1 \ln(2)} - \frac{\Gamma \sigma_1(f_k) + P_2(f_k) |H_{12}(f_k)|^2}{|H_{11}(f_k)|^2} \right] \quad (6)$$

$$P_2(f_k) = \left[\frac{1}{\lambda_2 \ln(2)} - \frac{\Gamma(\sigma_2(f_k) + P_1(f_k) |H_{21}(f_k)|^2)}{|H_{22}(f_k)|^2} \right] \quad (7)$$

Donde $1/\lambda_i \ln(2)$ representa el nivel de *Water-Filling* que corresponde a un valor constante y asegura que se cumpla la restricción de potencia máxima P_i , y $\sigma_1(f_k) + P_2(f_k) |H_{12}(f_k)|^2 / |H_{11}(f_k)|^2$ el nivel de canal a ruido CNR_k que tiene en cuenta la relación entre el nivel de ruido y la función de transferencia del canal (*Channel to Noise Ratio*). De esta manera se puede reescribir (6) como:

$$P_1(f_k) = K_1 - \Gamma \text{CNR}_k \quad (8)$$

De esta manera, (8) corresponde a la solución óptima de $P_1(f_k)$ por medio del proceso de *Water-Filling*, y de la misma forma se obtiene la solución para $P_2(f_k)$. Para la implementación de IWF, esta solución es incorporada al algoritmo de control de potencia que se encuentra publicado en (Yu *et al.*, 2002a), (Yu *et al.*, 2002b).

4.2. Optimal Spectrum Management/Balancing (OSM/OSB)

Este es un algoritmo de tipo centralizado que se encuentra publicado en varios artículos como (Cendrillon, 2006), (Cendrillon *et al.*, 2004a), y en varias contribuciones a estándares (Cendrillon *et al.*, 2003), (Cendrillon *et al.*, 2004b), (Cendrillon *et al.*, 2004c). Para el funcionamiento de este algoritmo se requiere de un ente centralizado que conozca las características de ruido y atenuación de cada sistema; y además, que sea el encargado de la selección de asignación de PSD para cada uno de los sistemas. Una desventaja de los algoritmos centralizados es que cuando un par entra o sale de servicio, se requiere de una reoptimización de la asignación de la PSD de todos los sistemas para garantizar un desempeño óptimo; y además, la existencia de este ente centralizado aún no ha sido contemplada en los estándares actuales (Cendrillon, 2004). Sin embargo, este algoritmo proporciona una frontera de desempeño superior con respecto a los otros algoritmos de balanceo de espectro, tanto de tipo centralizado como distribuido; y sirve como motivación para futuros estudios que se enfoquen en el diseño de nuevos algoritmos de balanceo de espectro de tipo distribuido.

En OSM/OSB se presenta el siguiente problema de balanceo de espectro para el caso de dos usuarios, y se define como (Cendrillon, 2004):

$$\begin{aligned} \max_{P_1(f_k), P_2(f_k)} R_2 \quad \text{s.t.} \quad R_1 \geq R_1^{\text{objetivo}} \\ \sum_k P_k^n \leq P_n, \quad n = 1, 2 \\ P_k^n \leq P_k^n \max, \quad \forall k, \quad n = 1, 2 \end{aligned} \quad (9)$$

Donde R_1^{objetivo} denota el objetivo de tasa del usuario 1, P_k^n la asignación de PSD para el usuario n en el tono k , y $P_k^n \max$ es el máximo de asignación por tono que se define por medio de la máscara espectral. Las asignaciones óptimas de $P_1(f_k)$ y $P_2(f_k)$ están dadas por la solución de (9), condicionada por las restricciones en potencia, y el valor de R_1^{objetivo} . Este problema de optimización con restricciones es no convexo, y la implementación de una búsqueda exhaustiva (*Exhaustive Search*) conlleva a una complejidad exponencial en el número de tonos k de la modulación DMT. Por ende, se convierte en un problema imposible de resolver, desde el punto de vista de la complejidad computacional. El algoritmo OSM/OSB afronta esta complejidad computacional de tipo exponencial en el número de tonos, por medio del uso de una técnica llamada descomposición dual (*Dual Decomposition*).

En OSM/OSB, las restricciones de la potencia total se involucran dentro del problema de optimización para dos usuarios, por medio de la definición de L como:

$$\begin{aligned} L = \omega R_1 + (1 - \omega) R_2 + \lambda_1 (P_1 - \sum_k P_1(f_k)) \\ + \lambda_2 (P_2 - \sum_k P_2(f_k)) \end{aligned} \quad (10)$$

Donde ω representa el peso o prioridad para la tasa de datos del sistema 1, y λ_n es el multiplicador de Lagrange para el usuario n que se escoge de manera que la

restricción en potencia para el usuario n sea casi nula, es decir $\sum_k P_1(f_k) = P_1$, o que $\lambda_n = 0$. De esta manera (9) puede ser resuelto por medio de una optimización sin restricciones de la siguiente manera:

$$\max_{P_1(f_k), P_2(f_k)} L(P_1(f_k), P_2(f_k), \omega, \lambda_1, \lambda_2) \quad (11)$$

La prueba de esto puede ser encontrada en (Cendrillon, 2006), (Cendrillon *et al.*, 2004a).

También se puede definir L por tono k como:

$$L_k = \omega b_k^1 + 1 - \omega b_k^2 - \lambda_1 P_k^1(b_k^1, b_k^2) + \lambda_2 P_k^2(b_k^1, b_k^2) \quad (12)$$

Donde b_k^n representa la carga de bits por subcanal k para el sistema n .

De alguna manera (10) puede ser descompuesta en una suma de (12) sobre todos los tonos y un término independiente de P_k^1 y P_k^2 , esto se conoce como la descomposición dual, y como resultado de esta descomposición, el proceso de optimización puede ser dividido en k optimizaciones que se acoplan entre sí por medio de ω , λ_1 y λ_2 . Esto conlleva a una complejidad computacional de tipo lineal en k , en lugar de una complejidad computacional de tipo exponencial; lo cual, según (Cendrillon, 2004), se convierte en un proceso viable desde el punto de vista de la complejidad computacional. El algoritmo de OSM/OSB se encuentra detallado en (Cendrillon, 2006), (Cendrillon *et al.*, 2004a).

4.3. Autonomous Spectrum Balancing (ASB)

Este algoritmo es autónomo y puede ser aplicado en una manera distribuida, tiene una baja complejidad computacional, tanto en el número de tonos como de usuarios, y su convergencia ha sido comprobada en (Cendrillon *et al.*, 2007) y (Huang *et al.*, 2006). Además, para todos los escenarios, ASB logra un desempeño mucho mejor que IWF y realmente cercano a OSM/OSB.

La idea fundamental que presenta ASB es que toma ventaja del hecho que el canal de interferencias en DSL (par de cobre) presenta variaciones muy lentas en el tiempo, lo cual permite el uso efectivo del concepto de "Línea de referencia". Esta línea de referencia es una línea ficticia que representa un típico sistema víctima dentro de una red DSL, entendiendo víctima como aquel sistema sometido a los efectos de interferencia provenientes de los otros sistemas. Una manera de escoger la línea de referencia, pero no la única, es seleccionar la línea de mayor longitud dentro de una red DSL en particular, ya que esta posee el canal más débil, debido a los fenómenos de atenuación e interferencia. La ventaja del uso del concepto de línea de referencia es que no se requiere el conocimiento de las características de ruido y atenuación por parte de un ente centralizado, y en lugar de esto, cada sistema trata de maximizar la tasa de datos de la línea de referencia, sujeto a su propia tasa objetiva y a su límite de potencia total.

La tasa que alcanzada por la línea de referencia se calcula dependiendo de cada usuario. En otras palabras, desde el punto de vista del sistema n , la tasa de datos de la línea de referencia se define como:

$$R_n^{\text{ref}} = \sum_k \tilde{b}_k^n \quad (13)$$

Donde la tasa de datos por tono $\tilde{\mathbf{b}}_k^n$ está definida por:

$$\tilde{b}_k^n = \log_2 \left(1 + \frac{P_k^{\text{ref}} |H_k^{\text{ref}, \text{ref}}|^2}{\left(\Gamma \sigma_k^{\text{ref}} + P_k^n |H_k^{\text{ref}, n}|^2 \right)} \right) \quad (14)$$

Donde σ_k^{ref} es un ruido de fondo estático para la línea de referencia, al igual que su PSD transmitida P_k^{ref} , esta puede ser la PSD obtenida por medio de un proceso de *Water-Filling* para el caso de un solo usuario (Cendrillon *et al.*, 2007). $|H_k^{\text{ref}, \text{ref}}|^2$ representa la función de transferencia del canal de la línea de referencia, $|H_k^{\text{ref}, n}|^2$ la función de transferencia de ruido de diafonía entre la línea de referencia y el sistema n , la PSD transmitida por el sistema, n y Γ es la constante que refleja un espaciamiento con respecto a la capacidad de Shannon calculada a partir de (2).

En lugar de resolver (9), se plantea el siguiente problema de optimización para ASB:

$$\begin{aligned} \max_{P_n(f_k)} R_n^{\text{ref}} \quad \text{s.t.} \quad R_n \geq R_n^{\text{objetivo}} \\ \sum_k P_k^n \leq P_n \\ P_k^n \leq P_k^n \max, \quad \forall k \end{aligned} \quad (15)$$

Cabe aclarar que cada sistema n resuelve una versión diferente de (15) de forma autónoma. De esta manera, el problema (15) solo incluye la optimización sobre la PSD del sistema n , $P_n(f_k)$; la cual determina su tasa R_n , y la tasa de la línea de referencia desde el punto de vista de este sistema n , R_n^{ref} . La interferencia generada por otros usuarios se considera dentro del ruido de fondo, y las tasas alcanzadas por los otros sistemas en la red no necesitan ser consideradas. Después que cada sistema resuelve su propia versión del problema (15), las interferencias producidas por la diafonía cambian. Entonces cada sistema tiene que resolver (15) nuevamente, repitiendo esto de manera iterativa hasta lograr una convergencia del proceso.

ASB también hace uso de la descomposición dual para resolver (15). Para esto se incluye la restricción de la potencia total en el objetivo de optimización por medio de la definición de L_n como:

$$L_n = (1 - \lambda_n) (\omega_n R_n + (1 - \omega_n) R_n^{ref}) - \lambda_n \sum_k P_n(f_k) \quad (16)$$

Donde $\lambda_n \in [0, 1]$ y se escoge de manera que $\left(\sum_k P_n[k] - P_n \right) \lambda_n = 0$, entonces (15) puede ser resuelto por medio de una optimización sin restricciones de la siguiente manera:

$$\max_{P_n(f_k)} L(\omega_n, \lambda_n, P_n(f_k), P_{-n}(f_k)) \quad (17)$$

Donde $\mathbf{P}_{-n}(f_k) = (\mathbf{P}_1(f_k), \dots, \mathbf{P}_{n-1}(f_k), \mathbf{P}_{n+1}(f_k), \dots, \mathbf{P}_N(f_k))$

$$\mathbf{P}_{-n}(f_k) = (P_1(f_k), \dots, P_{n-1}(f_k), P_{n+1}(f_k), \dots, P_N(f_k)) ;$$

es decir, es la PSD de todos los sistemas, excepto el sistema n . Además se hace la definición de L por cada tono k como:

$$L_k^n = (1 - \lambda_n) (\omega_n b_k^n + (1 - \omega_n) \tilde{b}_k^n) - \lambda_n P_k^n \quad (18)$$

Por lo tanto el problema (17) se puede descomponer en k subproblemas de la forma:

$$\max_{(P_k^n)} L_k^n(\omega_n, \lambda_n, P_k^n, P_k^{-n}) \quad (19)$$

Cada sistema entonces actualiza el valor de λ_n , para forzar la restricción en la potencia total, y también actualiza el valor de ω_n para asegurar la restricción en la tasa de datos.

El algoritmo de ASB se encuentra detallado en (Cendrillon *et al.*, 2007) y (Huang *et al.*, 2006).

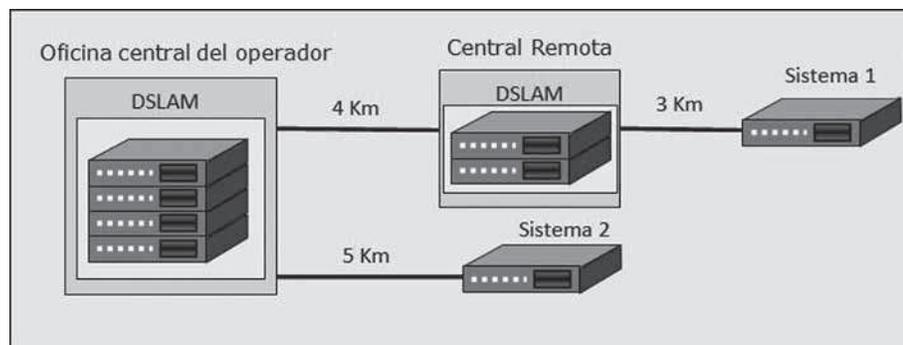
5. Simulaciones y resultados

La comparación del desempeño de los tres algoritmos, consiste en lograr un punto de operación similar por medio de la implementación de los mismos en un escenario determinado y bajo las mismas condiciones de simulación. El escenario de simulación consiste en dos sistemas que implementan la tecnología ADSL. El sistema número

1 se ubica a 3 km de una central remota ubicada a 4 km de la oficina central del operador, y el sistema número 2 está ubicado a 5 km de la oficina central del operador. Esta distribución se ilustra en la figura 2.

Las condiciones de simulación adoptadas para los dos sistemas son las siguientes: ambos sistemas implementan la tecnología ADSL y su desempeño se evalúa en sentido downstream; el diámetro utilizado es de 0.5 mm (24 AWG); la potencia de transmisión máxima para ambos es de 20.4 dBm; la constante de espaciamento Γ es de 12 dB, esto corresponde a un espaciamento de Shannon de 9.95 dB para un BER de 10^{-7} , una ganancia de codificación de 3 dB y un margen de ruido de 5.05 dB en consideración de posibles fuentes de ruido; La tasa de símbolos es considerada de 4 KHz; se utilizan los valores de frecuencia correspondientes al *downstream* de ADSL en coexistencia con POTS; La función de transferencia del canal es calculada por medio de los modelos presentes en (Cendrillon, 2004), (Jonsson, 2006) y el ruido de diafonía FEXT se estima por medio de los modelos que se muestran en los estándares (ANSI, 1995), (ITU-T, 1999); adicionalmente, se incorpora el ruido FEXT proveniente de otro tipo de sistemas acorde al modelo de diafonía A de la ETSI (ITU-T, 2001), en el cual se define la plantilla de PSD correspondiente al ruido de diafonía generado por 10 sistemas ADSL, 10 ISDN y 4 HDSL.

Figura 2. Escenario de dos sistemas ADSL, para la comparación del desempeño de IWF, OSM/OSB y ASB.



El punto de operación definido para este proceso comparativo se ha conseguido fijando un objetivo de tasa para el sistema 1 en 4 Mbps, mientras que el sistema 2 intenta maximizar su tasa bajo las condiciones de optimización que le permite cada algoritmo en particular.

Las tasas alcanzadas por los dos sistemas bajo la implementación de los tres algoritmos se exponen en la tabla 1.

Tabla 1. Comparación de tasas de datos obtenidas por medio de los algoritmos IWF, OSM/OSB y ASB para el caso de ADSL *downstream*, el objetivo de tasa de datos para el sistema 1 es de 4Mbps

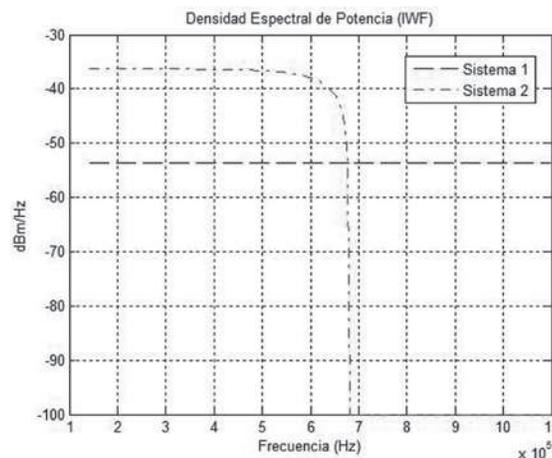
Sistema	IWF [Mbps]	OSM/OSB [Mbps]	ASB [Mbps]
Sistema 1	4.19	3.76	3.86
Sistema 2	0.92	1.70	1.69

Los valores de tasas mostrados en la tabla 1 han sido aproximados para brindar una comparación mucho más clara, las tasas alcanzadas por el sistema 1 por medio de la implementación de los tres algoritmos difieren ligeramente respecto a 4 Mbps, lo cual es producto de las condiciones de convergencia propias de cada algoritmo.

Como se puede ver las tasas alcanzadas por el sistema 2 por medio de la implementación de OSM/OSB y ASB son prácticamente iguales, esto se debe a que los algoritmos presentan el desempeño más óptimo que se ha logrado por medio de los desarrollos de balanceo de espectro. Además, estas tasas superan la tasa lograda por la implementación del algoritmo IWF en aproximadamente 0.8 Mbps.

Adicionalmente se presentan las asignaciones de PSD correspondientes a los puntos de operación mostrados en la tabla 1, bajo la implementación de los tres algoritmos. Estas se presentan en las figuras 3, 4 y 5 para IWF, OSM/OSB y ASB, respectivamente.

Figura 3. Asignación de PSD por parte de IWF para el caso de ADSL *downstream*, tasas alcanzadas de 4.19 y 0.92 Mbps para el sistema 1 y 2, respectivamente.



Como resultado de la asignación de PSD por parte de IWF se evidencia una PSD plana en ciertas porciones de la banda espectral, como se puede observar en la figura 3. La desventaja de este tipo de asignación es que un sistema en particular tiene en cuenta solo sus condiciones de ruido y atenuación, adoptando un comportamiento competitivo respecto a los demás sistemas. De esta manera ambos sistemas asignan un nivel alto de PSD para los valores bajos de frecuencia, ya que estos se caracterizan por un nivel bajo de ruidos y atenuación, sin tener en cuenta que esta porción del espectro puede ser aprovechada por el sistema que posea las peores condiciones de ruido y atenuación. El algoritmo OSB afronta esta desventaja por medio de una asignación de PSD que tiene en cuenta las características de ruido y atenuación de todos los sistemas que comparten el mismo cable multipar. De esta manera se logra un resultado mucho más óptimo respecto a las tasas de datos logradas por todos los sistemas.

En la figura 4 se puede observar que la PSD del sistema 1 posee valores menores de potencia en la porción del espectro de menores valores de frecuencia, lo cual es resultado de la consideración de las características de ruido y atenuación de ambos sistemas por parte del algoritmo. Estas características se ilustran en la figura 6. De esta manera el sistema 2 puede tomar ventaja de esta porción del espectro al máximo.

Figura 4. Asignación de PSD por parte de OSM/OSB para el caso de ADSL *downstream*, tasas alcanzadas de 3.76 y 1.70 Mbps para el sistema 1 y 2, respectivamente.

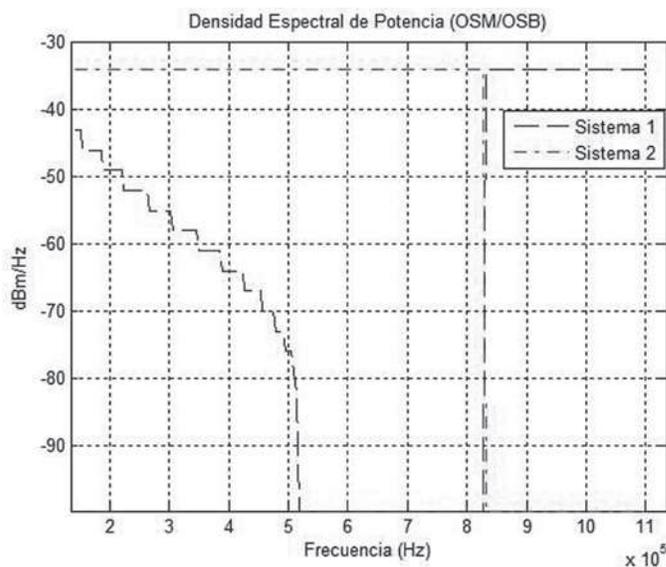
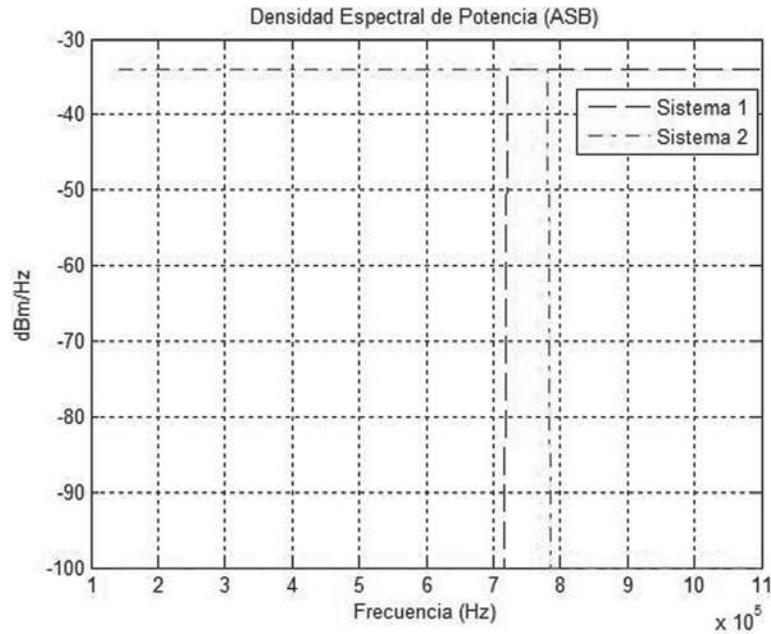


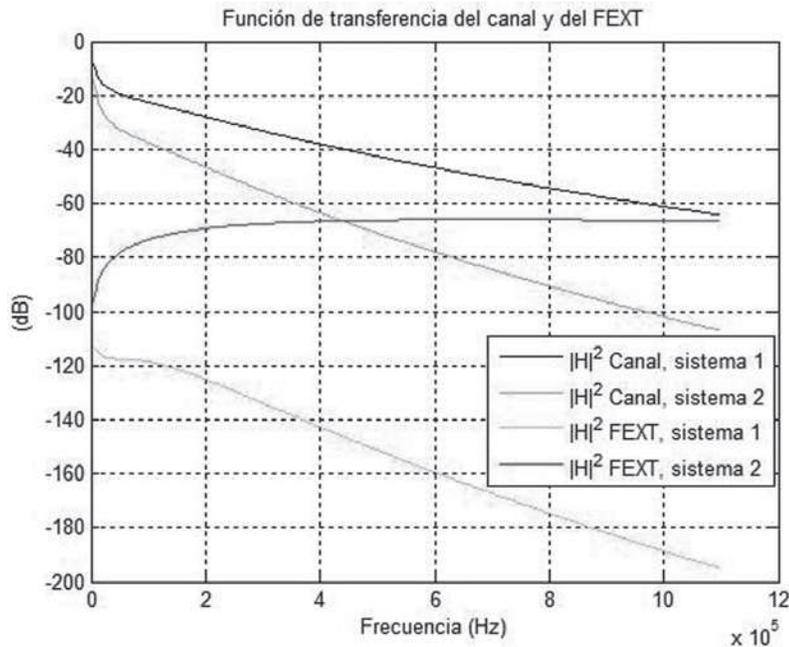
Figura 5. Asignación de PSD por parte de ASB para el caso de ADSL *downstream*, tasas alcanzadas de 3.86 y 1.69 Mbps para el sistema 1 y 2, respectivamente.



El algoritmo ASB considera las condiciones de ruido y atenuación de los demás sistemas por medio de la línea de referencia. Para el caso particular de este escenario se ha elegido una línea de referencia con las mismas características del sistema 2. De esta manera cada uno de los sistemas optimiza su espectro de una manera similar que en OSB considerando el daño que ocasiona a la línea de referencia.

Como se puede ver en la figura 5, la asignación de PSD de los sistemas es similar al del caso de OSB, donde el sistema 2 aprovecha los valores bajos de frecuencia y asigna más potencia para alcanzar una tasa mayor.

Figura 6. Función de transferencia del canal y funciones de transferencia del ruido FEXT para ambos sistemas



6. Conclusiones

En este artículo se realizó un proceso comparativo entre tres de los más importantes algoritmos de balanceo de espectro dentro del contexto del Manejo Dinámico de Espectro para DSL y la descripción propia de cada uno de ellos. Este proceso comparativo se llevó a cabo por medio de la evaluación de los algoritmos en un punto de operación determinado para los diferentes sistemas que conforman el escenario utilizado. Los resultados mostraron que el desempeño del algoritmo IWF se encontraba por debajo del desempeño de OSM/OSB y ASB, lo cual es evidencia de la consideración de las características de ruido e interferencia de todos los sistemas para la selección de la asignación de PSD. En IWF cada sistema tiene en cuenta sus propias condiciones de ruido y atenuación para la optimización de su PSD, generando de esta manera un ambiente competitivo entre los sistemas. Por otro lado, OSM/OSB y ASB consideran las características de ruido y atenuación de todos los sistemas; sin embargo, OSM/OSB requiere del conocimiento de todas las condiciones del canal de los sistemas por parte de un ente centralizado, lo cual incrementa la complejidad computacional a la hora de seleccionar la PSD óptima para cada sistema; mientras

que, gracias al uso del concepto de línea de referencia, ASB presenta resultados óptimos de tasas de datos y PSD, pero disminuye la complejidad y se implementa de manera distribuida en cada uno de los sistemas.

Referencias

1. AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. Network to Customer Installation Interfaces : Asymmetric Digital Subscriber Line (ADSL) Metallic Interface, Issue 1. 1995. (ANSI Standard; T1.413).
2. EUROPEAN TELECOMMUNICATIONS STANDARDS INSTITUTE. Transmission and Multiplexing (TM); Access transmission systems on metallic access cables; Asymmetric Digital Subscriber Line (ADSL), V.1.1.1. 1998. (ETSI Standard.; TS 101 388).
3. INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNIT – TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR. Asymmetric Digital Subscriber Line (ADSL) Transceivers. 1999. (ITU-T Recommendation; G.992.1).
4. JONSSON, Ragnar H. Chapter 4: The Twisted Pair Channel : Models and Channel Capacity. En: GOLDEN, Philip y otros. Fundamentals of DSL Technology. Boca Raton : Auerbach publications, 2006. 454 p.
5. CHUNG, Seong. Chapter 8 : Dynamic Spectrum Management. En: GOLDEN, Philip y otros. Implementation and Applications of DSL Technology. Boca Raton : Auerbach publications, 2008. 804 p.
6. CIOFFI, John. Chapter 11 : Dynamic Spectrum Management. En: STARR, Thomas y otros. DSL Advances. Upper Saddle River : Prentice Hall, 2002. 576 p.
7. YU, Wey y CIOFFI, John. Competitive Equilibrium in the Gaussian Interference Channel. En: IEEE ISIT. Sorrento. (2000); p. 431.
8. YU, Wey, GINIS, George, y CIOFFI, John. An Adaptive Multiuser Power Control Algorithm for VDSL. En: IEEE JSAC special issue on twisted pair transmission. Vol. 20, n.º 5. (junio 2002); 5 p.
9. YU, Wey, GINIS, George, y CIOFFI, John. Distributed Multiuser Power Control for Digital Subscriber Lines. En: IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 20. (junio 2002); pp.1105-1115.
10. VAN DEN BOGAERT, Etienne y otros. ADSL transceivers applying DSM and Their Nonstationary Noise Robustness. En: EURASIP Journal on Applied Signal Processing. Vol. 2006. (mayo 2005); pp. 1-8.
11. VAN DEN BOGAERT, Etienne y otros. DSM in Practice : Performance Results of Iterative Waterfilling Implemented on ADSL Módems. En: IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASS). (agosto 2004); pp. 1-5.

12. CENDRILLON, Raphael. Optimal Multi-user Spectrum Balancing for Digital Subscriber Lines. En: IEEE Transactions on Communications. Vol. 54. (mayo 2006); pp. 922-933.
13. CENDRILLON, Raphael y otros. Optimal Multi-user Spectrum Management for Digital Subscriber Lines. En: IEEE International Conference on Communications (ICC). París. Vol. 1. (junio 2004); pp. 1-5.
14. CENDRILLON, Raphael y otros. On the Optimality of Iterative Waterfilling in DSL. En: ANSI T1E1.4 Working Group (DSL Access) Meeting. San Diego. Contribution 2003-325. (diciembre 2003); 13 p.
15. CENDRILLON, Raphael y otros. Optimal Spectrum Management. En: ANSI T1E1.4 Working Group (DSL Access) Meeting. North Carolina. Contribution 2004-459. (mayo 2004); 6 p.
16. CENDRILLON, Raphael y otros. Proof of the Optimality of Optimal Spectrum Management. En: ANSI T1E1.4 Working Group (DSL Access) Meeting. North Carolina. Contribution 2004-460. (mayo 2004); 5 p.
17. CENDRILLON, Raphael. Multi-User Signal and Spectra Coordination for Digital Subscriber Lines. Leuven, 2004, 201 p. Doctoral Thesis (Ph.D. in Electrical Engineering). Katholieke Universiteit Leuven, Department of Electrical Engineering.
18. CENDRILLON, Raphael y otros. Autonomous Spectrum Balancing for Digital Subscriber Lines. En: IEEE Transactions on Signal Processing. Vol. 55, n.º 8. (agosto 2007); pp.4241-4257.
19. HUANG, Jianwei y otros. Autonomous Spectrum Balancing (ASB) for Frequency Selective Interference Channels. En: IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT). Seattle. (julio 2006); pp. 610-614.
20. INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNIT - TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR. Test procedures for digital subscriber line (DSL) transceivers. 2001. (ITU-T Recommendation; G. 996.1).