

# Selección de una tecnología de banda ancha para la Universidad Nacional de Colombia – Sede Bogotá, usando una técnica de decisión multicriterio

## Using multi-criteria decision-making for selecting broad-band technology for the National University of Colombia, Bogotá

Félix Antonio Cortés Aldana,<sup>1</sup> Mónica García Melón,<sup>2</sup> y Pablo Aragonés Beltrán<sup>3</sup>

### RESUMEN

La Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá (U.N. Bogotá) ha planteado un proyecto para mejorar sus servicios de acceso a Internet mediante el empleo de una tecnología de banda ancha. En una fase inicial del proyecto se ha tenido que seleccionar la tecnología más adecuada entre las cuatro disponibles en Colombia: LMDS, ADSL, Cable Modem y Fibra óptica. Para adoptar esta decisión se ha aplicado el proceso analítico jerárquico (AHP). Este método, basado en el análisis de decisiones multicriterio (MCDA), permite establecer los criterios de decisión, ponderarlos y valorar las alternativas en función de las prioridades que el decisor establezca para cada criterio. Como apoyo en todo el proceso de decisión se ha considerado la opinión de diferentes expertos. En la presente comunicación se expone el proceso seguido con el objetivo de mostrar que el empleo de métodos basados en el análisis de decisiones multicriterio (MCDA) puede resultar útil a la hora de adoptar decisiones complejas.

**Palabras clave:** tecnologías de banda ancha, selección de tecnologías de banda ancha, análisis de procesos jerárquicos, toma de decisiones multicriterio, toma de decisiones en grupo, sistemas de soporte a la decisión, procesos de toma de decisión.

### ABSTRACT

The National University of Colombia, Bogotá, has proposed a project for improving Internet access by using broad band technology. Four possible technologies have been selected in the first step: LMDS, ADSL, cable modem and optical fibre. The analytic hierarchy process (AHP) has been applied for taking such decision. This method, based on multi criteria decision analysis (MCDA) allows decision-taking criteria to be established, pondered and the alternatives evaluated regarding the priorities established for each criterion. Different experts' opinions have been considered as support during the decision-making process. MCDA was used for ranking these alternatives. AHP was used for helping such decision-making.

**Keywords:** broad-band technology, analytic hierarchy, multi-criteria decision-making, group decision-making, decision support system.

Recibido: septiembre 5 de 2006

Aceptado: marzo 1 de 2007

### Introducción

El análisis de decisiones multicriterio (MCDA) es un término amplio que incluye una colección de conceptos, métodos y técnicas que persiguen ayudar a los individuos o grupos a tomar decisiones que implican diferentes puntos de vista en conflicto y múltiples agentes interesados (adaptado de Belton y Stewart, 2002). Desde finales de los años cincuenta del siglo XX se ha desarrollado una intensa investigación cuyo objetivo

ha sido ayudar a los gerentes y líderes a tomar decisiones complejas que precisan la gestión de gran cantidad de información. Una revisión de estos métodos se puede encontrar en Romero (1993) y en Pomerol y Barba-Romero (1997).

En la presente comunicación se aplica el método AHP (Saaty, 1994, 1996) al problema de seleccionar una tecnología de

<sup>1</sup> Ingeniero de sistemas. M. Sc., en ciencias económicas. Especialista, administración de empresas. Ph.D., en proyectos de ingeniería e innovación, Universidad Politécnica de Valencia, España. Profesor, Departamento Ingeniería de Sistemas e Industrial, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. [facortesa@unal.edu.co](mailto:facortesa@unal.edu.co)

<sup>2</sup> Ph.D, en ingeniería industrial. Profesora titular, Universidad Politécnica de Valencia, España. [mgarciam@dpi.upv.es](mailto:mgarciam@dpi.upv.es)

<sup>3</sup> Ph.D, en ingeniería industrial. Profesor titular, Universidad Politécnica de Valencia, España. [aragones@dpi.upv.es](mailto:aragones@dpi.upv.es)

banda ancha para el proyecto de mejora de la red de acceso a Internet de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá. Este método tiene un sólido fundamento científico y está siendo utilizado en numerosas aplicaciones prácticas. La selección de un modelo matemático basado en MCDA no es tarea sencilla. Existen diferentes propuestas y hasta la fecha ninguna de ellas domina sobre las demás, todas ellas tienen ventajas e inconvenientes, resumidas en la bibliografía (Moreno-Jiménez, 2002).

En el presente trabajo se ha empleado AHP porque este método está basado en el establecimiento de una estructura jerárquica del problema (Figura 1), permite trabajar con mucha información, admite la integración de las opiniones y juicios de diferentes expertos y es fácil de entender por personas no expertas en MCDA. Tiene en cuenta la consistencia de los juicios emitidos. Además, se apoya en un *software* fácilmente manejable que presenta los resultados de manera clara y permite realizar un análisis de sensibilidad.

Todo el proceso se ha desarrollado con el apoyo de cuatro expertos en el área de las tecnologías de banda ancha, seleccionados por la Universidad Nacional de Colombia. Los principales pasos del proceso de decisión que se ha seguido son los siguientes (Henig y Buchanan, 1996):

1. Análisis de las alternativas.
2. Selección de los criterios de decisión.
3. Ponderación de los criterios.
4. Valoración de las alternativas según cada criterio.
5. Cálculo de la prioridad global en el conjunto de alternativas.
6. Análisis de resultados e informe final.

## Planteamiento del caso

La transmisión de información por Internet ha ido incrementándose a medida que la tecnología disponible permite enviar mayor cantidad de información a mayor velocidad. La tecnología de banda ancha es un medio capaz de transportar múltiples canales de datos, voz y video, con una gran velocidad de respuesta. Tiene diferentes aplicaciones como videotelefonía y videoconferencia, comercio electrónico, educación interactiva a distancia, telemedicina, acceso electrónico a sistemas de entretenimiento digital, transmisión vía e-mail de grandes archivos con fotografías y videos.

Es así como, para la universidad, tener la tecnología de banda ancha más adecuada es hoy en día una decisión que se debe tomar con el mayor cuidado y seriedad posibles. La Universidad Nacional de Colombia – Sede Bogotá no es ajena a la situación mencionada anteriormente.

En Colombia las tecnologías de banda ancha identificadas como alternativas por los técnicos de la Universidad han sido las siguientes:

- *Cable Modem*. Acceso de banda ancha a Internet mediante la infraestructura televisión por cable. Esta

tecnología de banda ancha hace uso de alambres largos recubiertos, que se utilizan para transmitir señales de un dispositivo a otro.

- *Fibra óptica*. Acceso de banda ancha a Internet por medio de redes de fibra óptica.
- *ADSL* (Asymmetric Digital Subscriber Line). Acceso de banda ancha a Internet mediante la infraestructura telefónica convencional.
- *LMDS* (Local Multipoint Distribution System). Acceso de banda ancha a Internet vía radio.

Todas estas tecnologías tienen ventajas e inconvenientes, por lo que resulta complejo adoptar una u otra. El panel de expertos que han apoyado el proceso de decisión ha sido seleccionado por su conocimiento de ellos y por su vinculación con la U. N. Bogotá. Los expertos han sido:

- |                             |  |
|-----------------------------|--|
| a) Mónica Alvarado Forero   | Ingeniera de Sistemas,<br>U.N. Bogotá.         |
| b) Efraín Chiguasuque Bello | Ingeniero de Sistemas,<br>U.N. Bogotá.         |
| c) Óscar Aldana Hernández   | Ingeniero de Sistemas,<br>U. Católica, Bogotá. |
| d) Félix A. Cortés Aldana   | Ingeniero de Sistemas<br>U. N. Bogotá.         |

Los autores de la presente comunicación han actuado como facilitadores del proceso y expertos en MCDA.

## Selección de criterios

Para la selección de los criterios se ha optado por realizar una descomposición jerárquica, siguiendo el método AHP. Se aplicó como técnica de consulta al panel de expertos, se realizó una primera propuesta por parte del ingeniero Cortés y se consultó al resto de los expertos por medio de correo electrónico. Cada uno manifestó su opinión, la cual fue sintetizada por los facilitadores. Después de una segunda ronda se logró el acuerdo. Los criterios seleccionados fueron los siguientes:

C1.- *Criterio tecnológico*. En este nivel se agrupan los aspectos técnicos para identificar de manera específica las necesidades de la organización como cliente de un servicio de banda ancha. Este criterio se puede descomponer en los subcriterios:

C1.1.- *Ancho de banda (maximizar)*. Evalúa la velocidad de transmisión que se requiere tanto de la estación central proveedora del servicio hacia el cliente como viceversa. Se mide en *bits* por segundo o *bps*.

C1.2.- *Número de equipos a conectar (maximizar)*. Evalúa la cantidad de equipos que se pueden incorporar a la red de banda ancha para cada tecnología teniendo en cuenta las condiciones de la organización en donde se pretende hacer la implementación. Se mide en número de equipos a conectar.

C1.3.- *Disponibilidad de equipos proveedor (maximizar)*.

Es importante establecer si los proveedores en Colombia tienen una cobertura geográfica amplia para ofrecer conexión al cliente de una forma adecuada. Se mide el número de ciudades con cobertura.

C1.4.- *Tiempo de instalación (minimizar)*. La duración en días o meses para instalar una determinada tecnología de banda ancha. En este estudio se mide en días necesarios para la instalación.

C2.- *Criterio financiero*. Cubre los aspectos económicos que están inmersos en la decisión de adoptar una nueva tecnología en la empresa. Los criterios aquí considerados permiten establecer de manera clara lo que le implica a ella la inversión a realizar. Las variables a considerar en esta dimensión son:

C2.1.- *Costos de instalación (minimizar)*. Corresponde a una estimación del valor a pagar por las tareas de implementación de la tecnología de banda ancha. Se valora en dólares estadounidenses.

C2.2.- *Costos de suscripción mensual (minimizar)*. Hace referencia a un valor estimado que debe ser pagado mensualmente por los servicios como Internet, voz, entre otros. Se valora mensualmente en dólares estadounidenses.

C3.- *Criterios de calidad*. Características que debe tener la solución de banda ancha adoptada a unos niveles que satisfagan las expectativas de los usuarios de la red. Las variables que se consideran en esta dimensión son:

C3.1.- *Seguridad (maximizar)*. Este criterio evalúa la posibilidad de acceso por parte de extraños, por lo tanto se analiza prácticamente la vulnerabilidad en la red y la posibilidad de caída de la misma. Se mide con una escala entre 1 y 5, donde 1 corresponde a un menor nivel y 5 al mayor nivel de seguridad ofrecido por la tecnología de banda ancha.

C3.2.- *Mantenimiento (minimizar)*. Aunque es responsabilidad del operador, es necesario considerar este tipo de variable para garantizar al cliente una buena calidad del servicio, además es importante considerar la periodicidad del mismo y si se incurre en algún costo. Se mide en número de revisiones al año.

### Ponderación de los criterios

Los pesos de los criterios expresan la medida de la importancia relativa que ellos tienen para el decisor. Existe un profundo debate en la bibliografía sobre el significado que los pesos de los criterios ejercen según el modelo MCDA con el que se esté trabajando, así como la forma de obtenerlos. Básicamente se presentan dos enfoques: en los modelos basados en la teoría de la utilidad los pesos significan tasas de intercambio entre los criterios, mientras que en los modelos de superación (Electre o Promethee) significan coeficientes de importancia (Belton y Stewart, 2002).

Siguiendo el método AHP, en el cual los criterios se representan mediante un árbol jerárquico, se han de realizar

comparaciones binarias entre los vértices de cada nivel, en base a la importancia o contribución de cada uno de ellos al vértice del nivel superior al que están ligados. Este proceso de comparación conduce a una escala de medida relativa de prioridades o pesos de los elementos cuya suma total es la unidad. Para calcular los pesos de los criterios en cada nivel jerárquico estos han de ir comparándose dos a dos, preguntándose si el criterio  $C_i$  es mejor que el  $C_j$  (o viceversa) y cuánto mejor, utilizando la siguiente escala (Saaty, 1994):

- $C_{ij} = 1$ : se considera igualmente importante el criterio  $i$  que el criterio  $j$
- $C_{ij} = 3$ : se considera ligeramente más importante el criterio  $i$  que el criterio  $j$
- $C_{ij} = 5$ : se considera bastante más importante el criterio  $i$  que el criterio  $j$
- $C_{ij} = 7$ : se considera mucho más importante (o demostrablemente más importante) el criterio  $i$  que el criterio  $j$
- $C_{ij} = 9$ : se considera absolutamente más importante el criterio  $i$  que el criterio  $j$

En el presente caso, los facilitadores elaboraron un sencillo cuestionario que se envió a cada experto vía correo electrónico (Anexo 1). Los datos fueron introducidos en el programa Expert Chice 2000, que aplica el método AHP. De esta forma se obtuvieron los pesos de los criterios. La Figura 1 muestra la estructura jerárquica de criterios y sus pesos (local y global) entre paréntesis. El *peso local* (L) significa la prioridad del subcriterio en relación con el resto de criterios situados en el mismo subnivel (la suma de estos pesos es igual a 1). El *peso global* del subcriterio es el que resulta de multiplicar su peso local por el peso global del criterio inmediatamente superior del que se descuelga el subcriterio bajo consideración. En la Figura 1 se exhiben los resultados consensuados, esto es, los pesos de los criterios que resultan por agregación, mediante la media geométrica, de los juicios emitidos individualmente por cada experto.

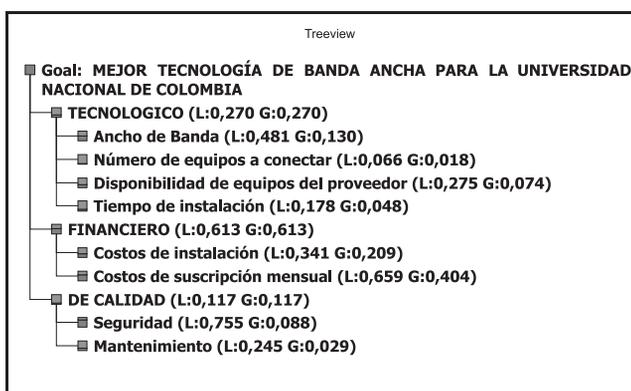


Figura 1. Representación de la jerarquía de criterios y sus pesos

Se puede observar que los criterios financieros son los valorados como más importantes (61,3%), después los tecnológicos (27%) y por último los de calidad (11,7%). Entre los

criterios de más bajo nivel, en base a las que se va a valorar cada una de las alternativas, se puede ver que el que tiene mayor peso global es el del “costo de suscripción mensual” (40,4%), y el de menor peso es el del “número de equipos a conectar” (1,8%).

### Valoración de las alternativas

Una vez determinados los criterios y la forma de valorar las alternativas, se estableció la Tabla 1, que representa la *matriz de decisión*. Los datos de la matriz fueron obtenidos a partir del trabajo realizado por Alvarado y Chiguasuque (2004) y revisados por el panel de expertos. Se aprecia que las valoraciones de todos los criterios, excepto el de seguridad, se basan en datos cuantitativos obtenidos del citado trabajo. La valoración del criterio seguridad se obtuvo por consenso y se basó en la experiencia de los miembros del panel.

Tabla 1. Matriz de decisión

Nivel	Criterio	Tecnologías banda ancha			
		LMDS	CABLE	FIBRA OPTICA	ADSL
Tecnología	Velocidad (Kbps)	1000	256	1000	256
	Equipos a conectar	100	90	150	90
	Cobertura (ciudades)	3	3	6	7
	Tiempo de instalación (días)	5	8	8	8
Financiera	Costo de instalación. US	200	120	200	120
	Costo de suscripción US/mes	70	50	70	50
Calidad	Seguridad	5	2	5	2
	Mantenimiento	10	3	3	6

Los datos de la matriz se introdujeron en el programa informático, el cual permite transformar estas valoraciones en preferencias del decisor (en este caso el panel de expertos) de varias formas, según sean los datos disponibles. Si algún criterio fuera cualitativo y dependiera de la opinión de cada miembro del panel de expertos se hubiera podido establecer la valoración o prioridad de las alternativas para ese criterio por comparación binaria, al igual que se ha procedido con los pesos. Esto es así porque el número de alternativas es menor que 7, cantidad considerada como máxima para poder establecer comparaciones sin producir grandes inconsistencias (Saaty, 1994). En el presente caso sólo estaba en esta situación el criterio “seguridad” y se optó, por razones de tiempo, por establecer una escala de 1 a 5 y que el panel de expertos, por consenso, estableciera la valoración según su opinión experta.

El resto de valoraciones se introdujeron de forma directa en el programa mediante la fórmula lineal. Esto significa, para un criterio determinado, transformar la escala de valoración numérica de cada alternativa en preferencia del decisor de forma lineal. La preferencia se incrementará a medida que aumenta (o disminuye) la valoración de las alternativas, de forma lineal. Todos los criterios han seguido esta función

de preferencia, salvo el criterio “número de equipos a conectar”, que sigue una curva exponencial (cuantos más equipos se puedan conectar mucho más se incrementa la preferencia).

### Cálculo de la prioridad global y análisis de resultados

Una vez introducidos los datos el programa calcula la prioridad global. Establecidas las prioridades entre los criterios y las alternativas para cada criterio, lo que hace el método AHP es calcular una suma ponderada. La Figura 2 muestra los resultados de forma gráfica.

Se observa que la tecnología considerada más adecuada para el presente proyecto, considerando todos los criterios establecidos y ponderados por el panel de expertos, es el ADSL.

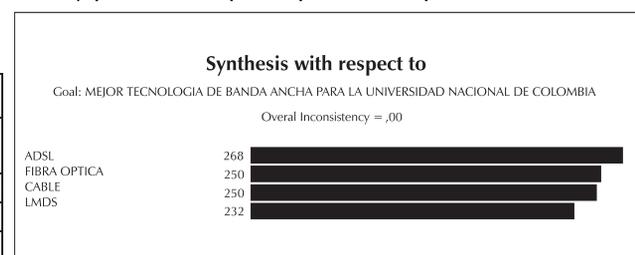


Figura 2. Prioridad global

A partir de estos resultados es conveniente realizar un análisis de sensibilidad (Anexo 2). Modificando sucesivamente los pesos de los criterios se puede constatar si varía la ordenación inicial. Con ayuda del Expert Choice 2000 este análisis se logra realizar de forma interactiva, observando qué criterios son más sensibles a las posibles modificaciones de los pesos.

### Conclusiones

El análisis de decisiones multicriterio resulta una herramienta útil para ayudar a tomar decisiones en proyectos. Durante el desarrollo de un proyecto de ingeniería hay que adoptar decisiones que son críticas para los desarrollos futuros del mismo. Además los encargados de tomar decisiones asumen grandes responsabilidades y la mayoría de las veces tienen que apoyarse en expertos que los asesore. En otras ocasiones existen diferentes agentes con intereses contrapuestos que hay que conjugar para lograr una solución.

En tal contexto, estas técnicas pueden servir de apoyo. Permiten abordar problemas complejos analizando los diferentes aspectos, dimensiones o puntos de vista del problema. Los expertos o las partes interesadas pueden aportar sus puntos de vista y sus valoraciones. Esto suele conducir a adoptar decisiones de consenso, que son mejor aceptadas por las partes afectadas. Además, por medio de estas técnicas se puede generar una gran cantidad de información que está ordenada y analizarla con profundidad, haciendo ejercicios del tipo: ¿qué pasa si se modifica el peso del criterio  $j$ , o las valoraciones de ciertas alternativas, o si se incorpora la opinión de cierto experto?

En el presente caso se ha aplicado un método, el AHP, fácilmente comprensible y que además tiene un fundamento científico contrastado. Existen otros también válidos pero que requieren, a nuestro juicio, más apoyo técnico y conocimientos específicos.

Sin embargo, conviene destacar que, afortunadamente, estos métodos no sustituyen el buen o mal juicio del decisor, no reducen la subjetividad inherente a cualquier proceso de toma de decisiones. Sin embargo ayudan a gestionar la complejidad y que el decisor tenga la sensación de que al concluir el proceso sabe más que antes de empezar. Esta situación suele tranquilizar a muchos que, en un momento determinado, valoran más cómo se adoptan las decisiones que la solución final adoptada.

Los resultados obtenidos en este trabajo permiten mostrar cómo el método analítico jerárquico (AHP) contribuye a mejorar el proceso de decisión, por la gran información que aporta y por la ayuda que brinda en el conocimiento del problema. En particular, ilustra cómo pasar de procedimientos de selección de alternativas por asignación directa de pesos hacia nuevos esquemas que permiten obtener una valoración indirecta de pesos por medio del uso de técnicas de comparación de criterios, de manera agregada y con la colaboración de varios expertos en el tema.

También se muestra cómo abordar problemas tan complejos como la selección de tecnologías de banda ancha, tan importantes en el desarrollo de las actividades de una universidad, involucrando una estructura jerárquica de criterios y subcriterios. Durante el trabajo con los expertos se evidenció que el diseño de las jerarquías requiere experiencia y conocimiento del problema que se plantea, para lo cual es indispensable disponer de toda la información necesaria.

Finalmente, reseña las múltiples aplicaciones que en la universidad colombiana se pueden hacer con el proceso analítico jerárquico (AHP). Esta técnica se puede usar para apoyar procesos complejos de toma de decisión propios de la comunidad universitaria. Se pueden citar los siguientes casos: evaluación de méritos de profesores, planificación estratégica universitaria, evaluación de artículos de investigación, rediseño de planes de estudios de maestría, selección de docentes, evaluación de la efectividad de las diferentes técnicas de enseñanza en el logro de los objetivos de formación, asignación de recursos universitarios, planeación de la infraestructura de información, planificación de la infraestructura de la universidad, entre otras aplicaciones.

## bibliografía

Alvarado, M. y Chiguasque, E., Metodología para determinar la factibilidad de la implementación de la tecnología de banda ancha (LMDS-Local Multipoint Distribution System), en una organización., Tesis de grado, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2004.

Belton, V. and Stewart, Th., Multiple criteria decision analysis. An integrated approach., Kluwer Academic Publishers, 2002.

Henig, M.I. and Buchanan, J., Solving MCDM problems: Process concepts., J. Multi-Crit. Decis Anal, 5, 1996, pp. 3-21.

Moreno-Jiménez J.M., El proceso analítico Jerárquico (AHP). Fundamentos, metodología y aplicaciones., En Toma de decisiones con criterios múltiples. Caballero R. y Fernández, G.M. Ed. ASEPUMA, Madrid, 2002.

Pomerol, J.C. and Barba-Romero S., Multicriterion decision in management: Principles and practice., Boston Hardbound: Kluwer Academic Publishers, 2000.

Romero, C., Teoría de la decisión Multicriterio: Conceptos, técnicas y aplicaciones., Alianza Editorial S.A., Madrid. 1993.

Saaty, Th., Fundamentals of Decision Making and Priority Theory with the Analytic Hierarchy Process., Pittsburgh: RWS Publications, 1994.

Saaty, Th., The Analytic Hierarchy Process. Planning, Priority Setting, Resource Allocation., Pittsburgh: RWS Publications, 1996.

## Anexo 1. Modelo de cuestionario para que responda cada experto

### Comparaciones binarias. Criterios del primer nivel

1.- Entre el criterio C1: Tecnológico y C2: Financiero

- ¿Qué criterio considera más importante? C1 C2  
(Marcar con una X)

- ¿En qué grado? 1 3 5 7 9

2.- Entre C1: Tecnológico y C3: Calidad.

- ¿Qué criterio considera más importante? C1 C3  
(Marcar con una X)

- ¿En qué grado? 1 3 5 7 9

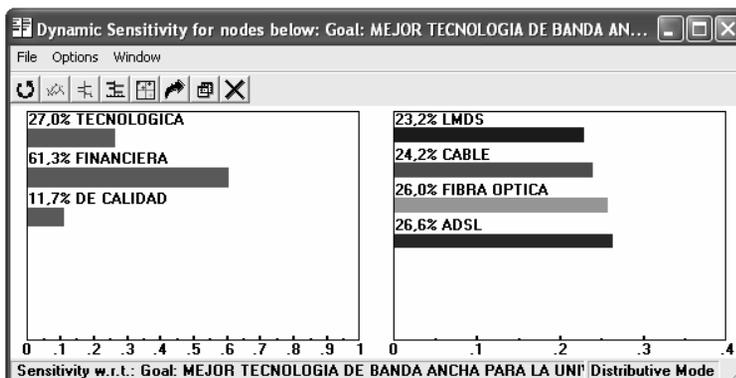
3.- Entre C2: Financiero y C3: Calidad.

- ¿Qué criterio considera más importante? C2 C3  
(Marcar con una X)

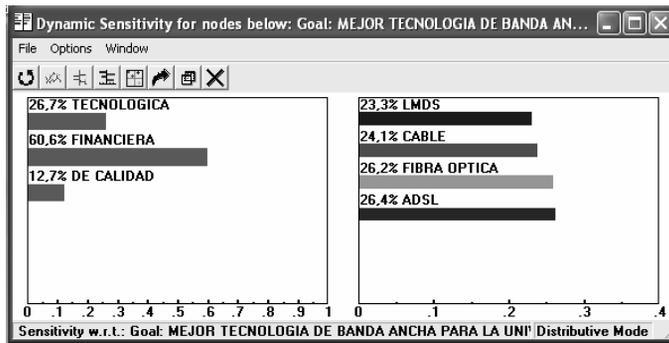
- ¿En qué grado? 1 3 5 7 9

Con esta información se pueden obtener los pesos de cada uno de los tres criterios de primer nivel y verificar la consistencia de los juicios emitidos.

## Anexo 2. Gráficas de análisis de sensibilidad



A.1 Solución con las ponderaciones inferidas de los juicios de decisor



A.2 Solución con una ponderación igual al 12,7% para la calidad

A.3. Tabla resumen

	Criterios			Alternativas			
	Tecnológico	Financiero	De Calidad	LMDS	CABLE	FIBRA OPTICA	ADSL
1	27,0	61,3	11,7	23,2	25,0	25,0	26,8
2	26,7	60,6	12,7	23,3	24,1	26,2	26,4
3	29,30	59,40	11,30	23,40	23,80	26,40	26,40
4	22,80	67,30	9,90	22,40	25,40	24,80	27,40

# Alfaomega Colombiana S.A.



Incluye  
CD-ROM

## HARDWARE MICROINFORMÁTICO

MARTÍN, José María  
Rústica, 17 x 23 cm  
ISBN 970-15-1131-x  
EA: 9789701511312

## NOVEDAD

Es un referente a las hora de entender las PC's. Así, se contempla la máquina de un modo somero, analizando de forma modular cada uno de sus elementos integrantes. Placas base, microprocesadores, sistemas de entrada-salida, video, etc. se tratan con una visión actual y práctica, aportando ideas, trucos cálculos, direcciones de interés y todo aquello que cualquier técnico o usuario avanzado debe conocer.

### Resumen del contenido

Arquitectura de un PC – Placas base – Microprocesadores - Memorizando datos – Tarjetas gráficas o de video – Monitores – Soportes físicos de información – Almacenamiento óptico – Comunicaciones con el exterior

Adquiera nuestros textos en el punto de venta **Alfaomega Carrera 15 No 64a - 29** o en las principales librerías del país.

Afíliase a nuestro **CLUB DEL CONOCIMIENTO** a través de nuestra página web, y reciba descuentos en nuestro punto de venta, contenidos actualizados vía Internet, información de novedades, prioridad en productos promocionales y entregas a domicilio sin costo adicional.

Visite nuestra página Web:  
[www.alfaomega.com.co](http://www.alfaomega.com.co)