

# REVISTA DE LA ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA

Año 17 N° 66

Abril - Junio de 2007

TARIFA POSTAL REDUCIDA N 2007-107 SERVICIOS POSTALES NACIONALES S.A. • VENCE 31 DE DICIEMBRE DE 2007

Análisis de los fenómenos electromagnéticos en un cable de fibra óptica tipo ADSS en las líneas de transmisión de alta tensión

Diseño de una antena fractal siguiendo el modelo de Mandelbrot

Deformaciones del concreto por fraguado y cambio de temperatura

El presupuesto como eje de la administración universitaria

Estándares de competencias matemáticas para ingeniería

Ecuaciones diferenciales lineales transformables en ecuaciones de coeficientes constantes

Gerencia de proyectos por valor ganado

Posibles soluciones estructurales aplicadas a la rehabilitación de puentes vehiculares

II Foro y panel de discusión:  
Telecomunicaciones,  
Convergencia e Innovación



Publicación admitida por Colciencias en el Índice Nacional de Publicaciones Seriadas, Científicas y Tecnológicas colombianas -Publindex- Clasificación tipo C

TARIFA POSTAL REDUCIDA N° 2007-107  
SERVICIOS POSTALES NACIONALES S.A.  
VENCE 31 DE DICIEMBRE DE 2007



ESCUELA  
COLOMBIANA  
DE INGENIERÍA  
JULIO GARAVITO

# Notas editoriales

**JAVIER BOTERO ÁLVAREZ**

Director de la Oficina de Desarrollo Institucional de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito y director científico de la Revista.

Durante sus 16 años de existencia, la *Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería* ha sido un medio importante de divulgación de los trabajos de investigación desarrollados en la Escuela y en otras instituciones de educación superior. Ésta es quizás su principal función: que los resultados de los proyectos de investigación de las instituciones los conozca un público amplio, entre el que se debe contar no sólo con profesionales del ámbito académico, sino también de los sectores empresarial y público. En sus 65 ediciones, la *Revista* ha servido para que diversos investigadores presenten las conclusiones o avances de sus estudios a numerosos lectores, razón por la cual ha dado un giro sutil para consolidarse como una publicación de investigación científica y técnica en las áreas de la ingeniería, la economía, la administración y las ciencias que las soportan.

En este número, por ejemplo, aparecen los resultados de investigaciones cuya aplicación puede ser casi inmediata, como es el caso de los artículos “Deformaciones del concreto por fraguado y cambio de temperatura”, “Posibles soluciones estructurales aplicadas a la rehabilitación de puentes vehiculares”, “Gerencia de proyectos por valor ganado” y “El presupuesto como eje de la administración universitaria”; otros más de estudio, como “Análisis de los fenómenos electromagnéticos en un cable de fibra óptica tipo ADSS en las líneas de transmisión de alta tensión” y “Estándares de competencias matemáticas para ingeniería”, y otro de carácter más teórico y general, “Ecuaciones diferenciales lineales transformables en ecuaciones de coeficientes constantes”.

Es que precisamente lo que diferencia a una universidad de los demás centros de educación superior es la cantidad y la calidad de la investigación que se realice en la institución y la forma como utilice esos resultados. Una universidad basa el ejercicio de sus otras funciones esenciales (la formación y la relación con el entorno) en la investigación a través del mejoramiento continuo de la docencia, centrada en el aprendizaje del estudiante en aras de lograr una formación integral; la generación o adaptación de nuevos conocimientos, metodologías, procesos o tecnologías, de modo que otros los puedan usar, ya sea para continuar la ampliación del cada día más complejo círculo del conocimiento, o para mejorar el nivel de vida de las personas mediante nuevos productos, servicios u otras aplicaciones tecnológicas.

La Escuela, después de casi 35 años de existencia y desarrollo, puede demostrar hoy en día que cumple con los requisitos que la ley y la sociedad exigen para que se le reconozca como una institución de educación superior que centra el desarrollo de su comunidad en las características antes mencionadas, que definen una universidad: la formación de personas íntegras, con sólidas bases científicas, técnicas y éticas; la generación y adaptación de conocimiento y tecnología, y el mejoramiento del entorno. En este proceso, la *Revista* cumple un papel fundamental como medio de divulgación de los resultados de investigación que pueden llegar a impactar de manera positiva dicho ámbito.

Desde la *Revista* le auguramos mucho éxito a la Escuela en este proceso, por medio del cual de seguro se le reconocerá como lo que es: una excelente universidad.

# Deformaciones del concreto por fraguado y cambio de temperatura

Artículo recibido: 02/08/2006  
Evaluación par externo: 22/02/2007  
Evaluación par externo: 30/03/2007  
Aprobado: 28/08/2007

CARLOS ALBERTO RODRÍGUEZ FLÓREZ

Ingeniero civil de la Universidad Nacional de Colombia, MIC, profesor de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

## Resumen

El hombre ha vivido una continua edad de piedra, desde cuando el *Homo habilis* empezó a manosear las rocas hace 2.800.000 años. La edad de piedra antigua o paleolítico abarca el 99,7% de la permanencia del hombre sobre la Tierra, como que se extiende desde la aparición del *Homo habilis* hasta hace 10.000 años. Pero en las subsiguientes etapas de su estancia, no ha dejado de usar la piedra como un material irremplazable en la construcción de obras de arte y de ingeniería. En la novísima edad de piedra, que empieza en 1824 con el invento del cemento Pórtland, ha resuelto crear su propia piedra, que puede materializar en formas preconcebidas. Tal vez al hombre primitivo no le importó mucho la deformabilidad de las piedras que hacían sus pirámides, sus menhires y sus dólmenes, pero al actual le ha preocupado la deformabilidad de su piedra, le inquieta su agrietamiento. Y es que su inventiva, que produce piedras en un mes, no logra la inercia de las rocas que la naturaleza ha formado en millones de años.

He aquí un episodio de esa preocupación.

**Palabras claves:** fraguado, retracción, agrietamiento, clinker, aditivos.

## Abstract

Man has lived a continuous stone, since *Homo habilis* began to use rocks 2.800.000 years ago. The ancient stone age, or Paleolithic, covers 99,7% of man's stay on Earth, as it started when *Homo habilis* appeared to 10.000 years ago. But he has still employed stone, as an essential material, for art crafts and engineering construction. In the newest stone age, that began on 1824 with the invention of Portland cement, man determined to create his own stone that can be materialized in preconceived shapes. Perhaps primitive man was not very concerned about the deformations of the stones that formed his pyramids, menhirs and dolmens, but to day's man is preoccupied with deformation and cracking of his stone, because the stone that he produces in a month doesn't have the inertia of natural rocks that nature has formed in millions years.

Here is an episode of this preoccupation.

## INTRODUCCIÓN

En obras de ingeniería civil de concreto reforzado y compuestas de acero y concreto se detectan agrietamientos importantes, atribuibles a retracción de fraguado y a cambios de temperatura, que ocasionan serios inconvenientes a diseñadores, constructores y mantenedores, pues la reparación de los daños que causan conlleva costosas demoliciones y renovaciones.

## MARCO TEÓRICO

Las causas del agrietamiento en el concreto van desde componentes inadecuados, como cemento que no cumple con las especificaciones de deformabilidad, agregados reactivos con el cemento, aditivos incompatibles con el cemento, un curado deficiente, hasta armaduras inapropiadas. Por tanto, la investigación de las causas de los agrietamientos observados implica la consideración de numerosos parámetros.

Cuando el concreto pasa de fresco a endurecido, cambia su volumen con la pérdida de humedad. El término “retracción plástica” se usa para el concreto fresco, ya que es completamente diferente su respuesta a la pérdida de humedad. La “contracción por carbonatación”, que ocurre cuando el cemento hidratado reacciona con el dióxido de carbono atmosférico, puede considerarse un caso especial de “contracción por secado”. Otro caso especial de la contracción seca es la “contracción autógena”, que ocurre cuando el concreto se autodeseca durante la hidratación. Pero la retracción por secado es el más importante fenómeno de retracción. Una inadecuada prevención de los efectos de retracción por secado en el diseño del concreto y la construcción puede causar agrietamiento o alabeo de elementos estructurales. Un obvio ejemplo es la necesidad de disponer de juntas de expansión para evitar los efectos inconvenientes de un agrietamiento aleatorio e irregular en pavimentos de concreto. Se modifica la respuesta de la pasta a la pérdida de humedad con la presencia de los agregados y la forma del elemento de concreto. Los parámetros que afectan la retracción por secado y la fluencia del concreto están relacionados con la pasta: porosidad y edad (ligadas con la relación A/C), composición del cemento, temperatura de curado, contenido de humedad, aditivos; con el concreto: rigidez de los agregados, contenido de agregados, relación de volumen a superficie, espesor; y con el medio: hume-

dad relativa, tasa de secamiento, tiempo de secamiento; la fluencia es afectada también por las cargas aplicadas y su duración.

El estudio de la contracción por secado requiere elementos de sección transversal pequeña, pues de otra manera se hace muy difícil la interpretación de datos al perder agua el elemento con el medio circundante. Parte de la retracción total ocurre por el primer secado irreversible; así, la subsecuente expansión de volumen que ocurre por el rehumedecimiento y la contracción de volumen por el posterior secado son pequeñas.

Las deformaciones por cambios de temperatura constituyen un factor que se ha de tener en cuenta en el diseño de todos los tipos de estructuras, donde pueden presentarse calentamientos diferenciales, bien por efectos ambientales, tal como el calentamiento de placas de pavimentos y tableros de puentes, o por condiciones de servicios, como en los recipientes de presión de reactores nucleares o en hornos. Pueden ocurrir fallas por los esfuerzos ocasionados por expansión o retracción térmica no previstas en el diseño estructural, o por esfuerzos debidos a la expansión diferencial que puede haber entre la pasta de cemento y el agregado; esos esfuerzos obtendrían un valor crítico para grandes cambios de temperatura.

## OBJETIVO DEL ESTUDIO

En este trabajo se plantea un cuidadoso estudio de la deformación en obras de concreto reforzado y en probetas mantenidas en ambiente de laboratorio, buscando relacionar sus causas con las características de los materiales constitutivos de la mezcla, con el curado inicial, con la humedad del ambiente y con los cambios de temperatura.

- Determinación de deformaciones por fraguado y cambios de temperatura en concretos utilizados en obras civiles en la región de Bogotá.
- Determinación de deformaciones por fraguado y por cambios de temperatura en las obras de concreto típicas destinadas a vivienda en la región de Bogotá, en ambiente de obra.
- Determinación de deformaciones por fraguado, en probetas de concreto obtenidas de mezclas diseñadas para tal fin, en diferentes ambientes de curado.

- Determinación de deformaciones por cambio de temperatura en probetas de concreto obtenidas de mezclas de concreto diseñadas para tal fin.

#### Parámetros considerados en deformaciones por fraguados y por cambio de temperatura

- Tipo de cemento: dos tipos (I rico en clínker, II pobre en clínker).
- Relación A/C: tres valores (0,52, 0,47 y 0,40).
- Contenido de aditivo fluidificante: tres dosificaciones (0, 1 y 3%).
- Ambiente de curado: laboratorio, bajo agua, intemperie.
- Edad de la mezcla.

En las deformaciones por cambio de temperatura se tomaron en cuenta las muestras destinadas a permanecer sumergidas en agua, cuando tuvieron más de seis meses de edad. Por tanto, los parámetros considerados fueron tipo de cemento, relación A/C y dosificación del aditivo fluidificante.

#### METODOLOGÍA

1. Por medio de deformímetros de hilo vibrátil, se miden deformaciones unitarias, embebiendo los hi-

los en muros de concreto o aplicándolos superficialmente en placas de entrepiso; los muros y las placas forman parte de estructuras de edificios de vivienda.

2. Por medio de deformímetros de hilo vibrátil, se miden deformaciones unitarias embebiendo los hilos en probetas de concreto preparadas para tal fin, en edades tempranas, en ambiente de laboratorio.
3. Por medio de deformímetros mecánicos de un micrómetro de sensibilidad, se leen deformaciones de ejes de probetas obtenidas de mezclas preparadas para ese propósito, habiéndolas curado en tres ambientes: laboratorio, sumergidas en agua y en intemperie en el norte de Bogotá.
4. Por medio de deformímetros mecánicos de un micrómetro de sensibilidad, se miden cambio de longitud de probetas de concreto saturadas, para diferentes cambios de temperatura.

#### RESULTADOS

- 1a. Deformaciones unitarias en muros de concreto obtenidas con deformímetros de hilo vibrátil embebidos en muro de cuarto piso (fotos 1 y 2) de un edificio de la obra La Sirena (gráficos 1 y 2).



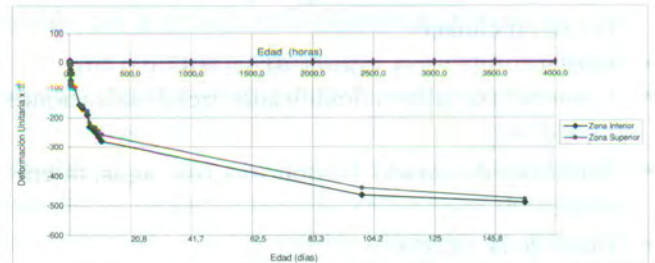
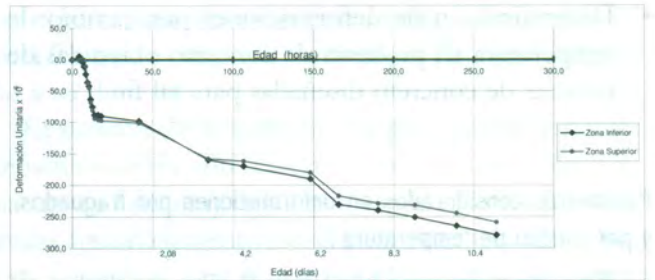
Fotografía 1



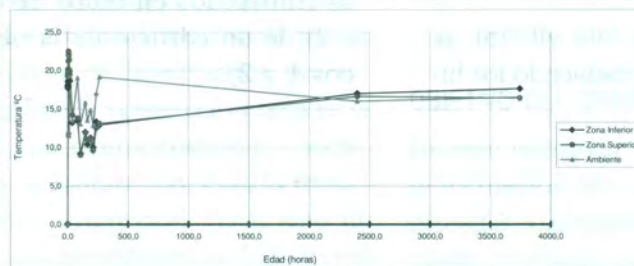
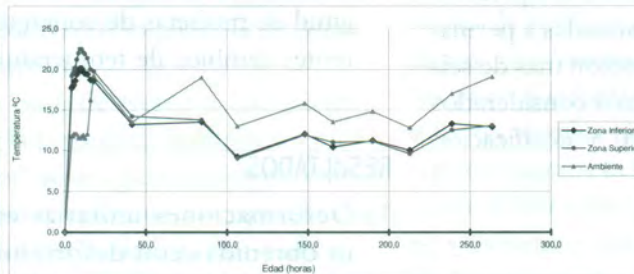
Fotografía 2

**Gráfico 1**  
Deformaciones del concreto por fraguado en la obra La Sirena. Muro de cuarto piso, dirección horizontal.

Tiempo (horas)	DUx10 <sup>0</sup> Inferior	DUx10 <sup>0</sup> Superior
0,0	0,0	0,0
4,5	5,5	-0,3
5,0	2,1	-1,8
5,5	1,8	-0,6
6,0	0,7	0,9
6,5	-3,3	0,9
7,5	-10,4	0,0
8,5	-23,0	-10,8
9,5	-36,0	-37,0
10,5	-42,0	-45,0
11,5	-63,0	-68,0
12,5	-75,0	-81,0
14,0	-85,0	-94,0
16,0	-88,0	-96,0
18,0	-90,0	-97,0
41,5	-98,0	-101,0
84,5	-160,0	-158,0
106,5	-170,0	-162,0
148,0	-190,0	-180,0
165,5	-231,0	-217,0
190,0	-240,0	-229,0
213,0	-251,0	-232,0
239,0	-265,0	-245,0
264,0	-280,0	-259,0
2400,0	-464,0	-440,0
3745,0	-490,0	-478,0

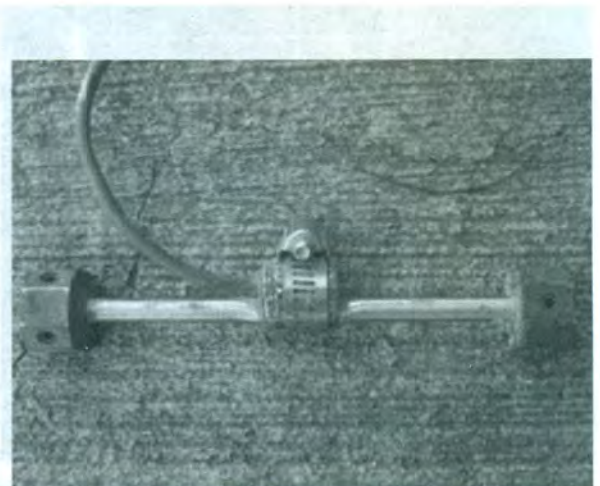


Tiempo (horas)	Temp. °C Inferior	Temp. °C Superior	Temp. °C Ambiente
0,0	0,0	0,0	0,0
4,5	17,7	19,2	11,7
5,0	17,9	19,4	11,8
5,5	18,1	19,7	12,0
6,0	18,5	20,1	12,0
6,5	18,6	20,2	12,0
7,5	19,4	21,2	12,0
8,5	19,7	22,0	11,6
9,5	20,1	22,5	11,5
10,5	20,1	22,5	11,7
11,5	19,7	22,1	11,9
12,5	19,5	21,9	11,5
14,0	19,4	21,4	12,0
16,0	18,7	20,0	16,2
18,0	18,6	19,8	19,2
41,5	13,2	14,2	13,5
84,5	13,5	13,8	19,0
106,5	9,2	9,0	13,0
148,0	12,0	11,9	15,8
165,5	10,4	11,0	13,5
190,0	11,2	11,1	14,8
213,0	10,0	9,6	12,8
239,0	13,3	12,5	17,0
264,0	12,9	13,1	19,1
2400,0	17,0	16,6	16,0
3745,0	17,6	16,4	16,5



**Gráfico 2**  
Temperatura del concreto del medio ambiente en la obra La Sirena.

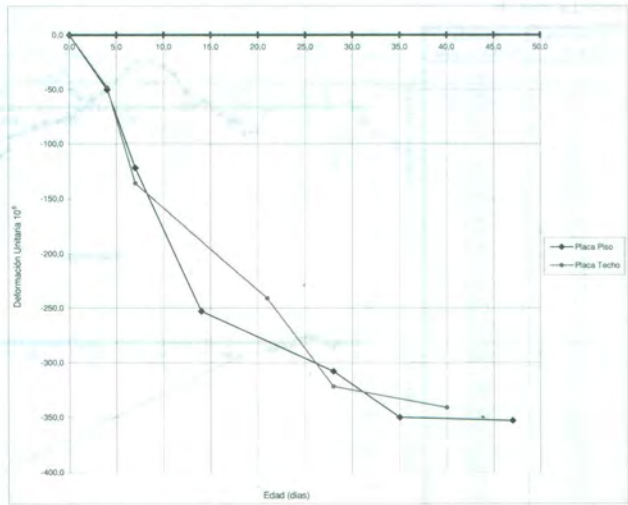
1b. Deformaciones unitarias en placas de entrepiso y de techo del cuarto piso de un edificio de Almadría, obtenidas con deformímetros de hilo vibrátil de aplicación superficial (foto 3 y gráficos 3 y 4).



Fotografía 3

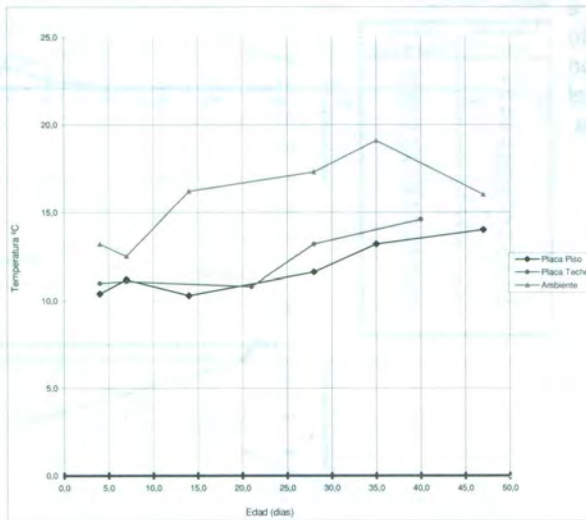
**Gráfico 3**  
Deformaciones del concreto por fraguado en la obra Almadía. Cuarto piso: placa piso y placa techo.

Edad (días)	D <sub>Ux10</sub> <sup>o</sup> Inferior	Edad (días)	D <sub>Ux10</sub> <sup>o</sup> Superior
0,0	0,0	0,0	0,0
4,0	-50	4,0	-48,0
7,0	-122	7,0	-136,0
14,0	-253	21,0	-241,0
28,0	-308	28,0	-322,0
35,0	-350	40,0	-341,0
47,0	-353		



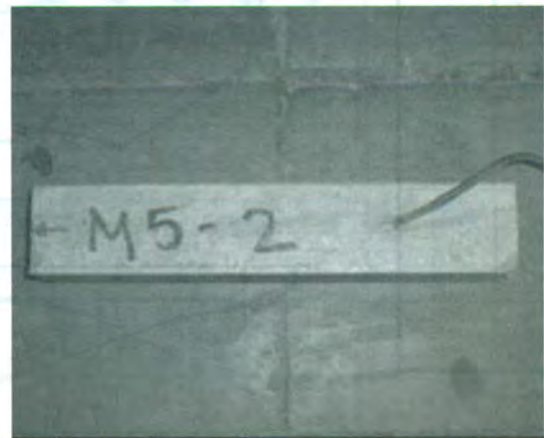
Deformaciones referidas a la edad de 3 días.

Edad (días)	Temp. °C Inferior	Edad (días)	Temp. °C Superior	Edad (días)	Temp. °C Ambiente
4,0	10,4	4,0	11,0	4,0	13,2
7,0	11,2	7,0	11,1	7,0	12,5
14,0	10,3	21,0	10,8	14,0	16,2
28,0	11,6	28,0	13,2	28,0	17,3
35,0	13,2	40,0	14,6	35,0	19,1
47,0	14,0			47,0	16,0



**Gráfico 4**  
Deformaciones del concreto por fraguado en la obra Almadía. Temperaturas del concreto y del ambiente.

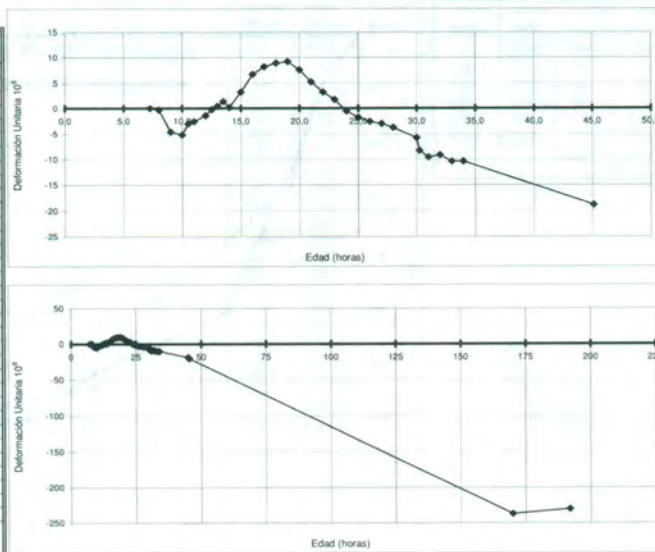
2. Deformaciones unitarias de probetas de concreto, en edades tempranas y ambiente de laboratorio, medidas con deformímetros de hilo vibrátil embebidos (foto 4 y gráficos 5 a 10).



Fotografía 4

MEZCLA 052 - 0

Laboratorio DUx10 <sup>6</sup>	Curado Edad (horas)
0	7.3
-0.3	8.0
-4.6	9.0
-5.2	10.0
-3.0	10.5
-2.6	11.0
-1.4	12.0
-0.2	12.5
0.4	13.0
1.4	13.5
0.2	14.0
3.2	15.0
6.7	16.0
8.2	17.0
8.9	18.0
9.2	19.0
7.6	20.0
5.2	21.0
3.2	22.0
1.7	23.0
-0.5	24.0
-1.8	25.0
-2.6	26.0
-3.0	27.0
-3.8	28.0
-5.8	30.0
-8.3	30.3
-9.6	31.0
-9.2	32.0
-10.4	33.0
-10.4	34.0
-18.9	45.1

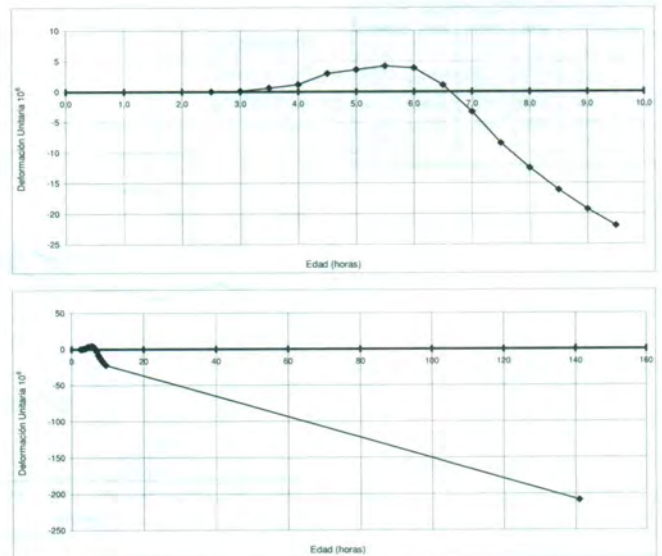


**Gráfico 5**  
Deformación del concreto por fraguado en edades tempranas. Deformación unitaria por fraguado. Ambiente del laboratorio.

**Gráfico 6**  
Deformación del concreto por fraguado en edades tempranas. Deformación unitaria por fraguado. Ambiente del laboratorio.

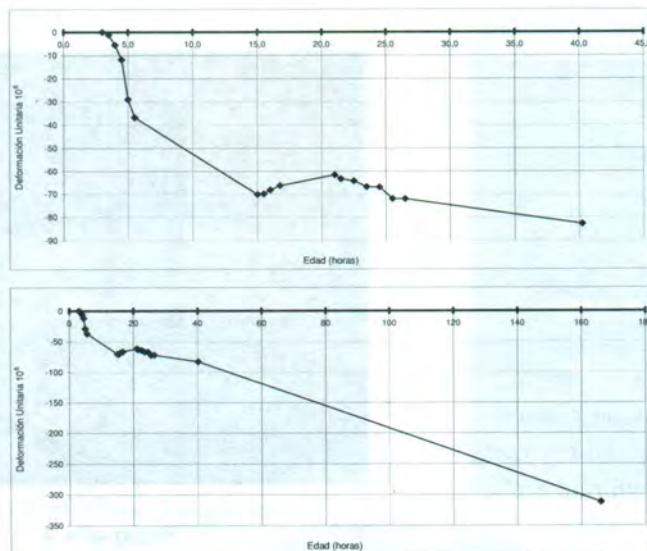
MEZCLA 047 - 0

Laboratorio DUx10 <sup>6</sup>	Curado Edad (horas)
0	2.5
0.1	3.0
0.6	3.5
1.2	4.0
3.0	4.5
3.6	5.0
4.2	5.5
3.9	6.0
1.1	6.5
-3.3	7.0
-8.5	7.5
-12.6	8.0
-16.2	8.5
-19.3	9.0
-22.0	9.5



MEZCLA 040 - 0

Laboratorio DUx10 <sup>6</sup>	Curado Edad (horas)
0	3.00
-1.2	3.50
-5.6	4.00
-11.9	4.50
-29.0	5.00
-36.8	5.50
-70.2	15.00
-70.0	15.50
-68.2	16.00
-66.3	16.75
-61.6	21.00
-63.4	21.50
-64.3	22.50
-66.8	23.50
-67.0	24.50
-72.0	25.50
-72.0	26.50
-83.0	40.25



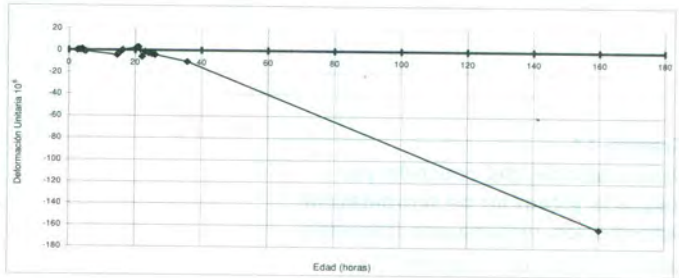
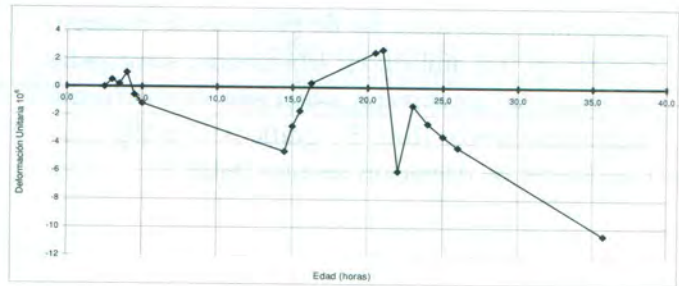
**Gráfico 7**  
Deformación del concreto por fraguado en edades tempranas. Deformación unitaria por fraguado. Ambiente del laboratorio.



**Gráfico 8**  
Deformación del concreto por fraguado en edades tempranas. Deformación unitaria por fraguado. Ambiente del laboratorio.

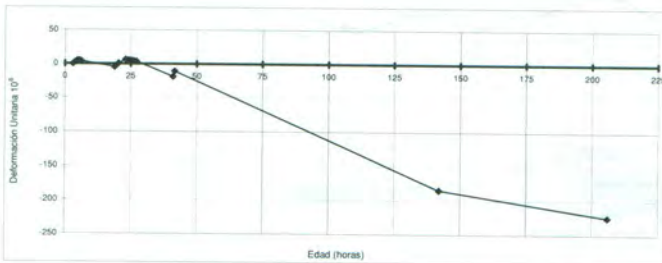
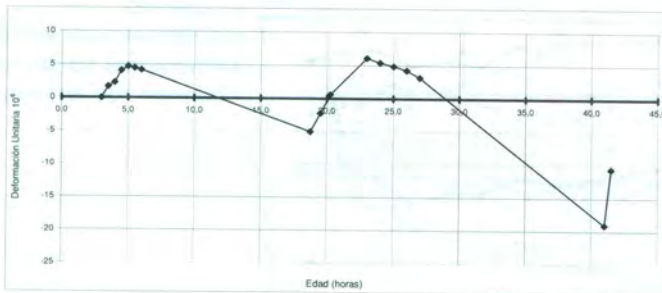
MEZCLA 052 - 0 II

Laboratorio DUX10 <sup>6</sup>	Curado Edad (horas)
0	2,50
0,5	3,00
0,2	3,50
1,0	4,00
-0,6	4,50
-1,2	5,00
-4,6	14,50
-2,8	15,00
-1,7	15,50
0,3	16,25
2,5	20,50
2,7	21,00
-6,0	22,00
-1,3	23,00
-2,6	24,00
-3,5	25,00
-4,3	26,00
-10,5	35,75

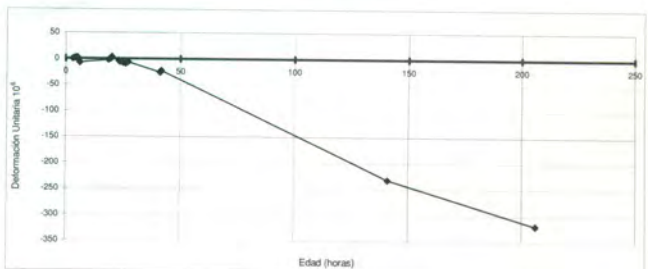
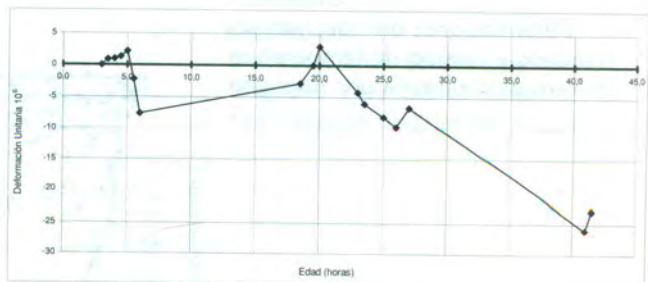


MEZCLA 047 - 0 II

Laboratorio DUX10 <sup>6</sup>	Curado Edad (horas)
0	3,00
1,7	3,50
2,3	4,00
4,1	4,50
4,7	5,00
4,5	5,50
4,2	6,00
-5,0	18,75
-2,2	19,50
0,6	20,25
6,1	23,00
5,4	24,00
4,9	25,00
4,3	26,00
3,2	27,00
-19,0	41,00
-10,6	41,50



**Gráfico 9**  
Deformación del concreto por fraguado en edades tempranas. Deformación unitaria por fraguado. Ambiente del laboratorio.



**Gráfico 10**  
Deformación del concreto por fraguado en edades tempranas. Deformación unitaria por fraguado. Ambiente del laboratorio.

MEZCLA 040 - 0 II

Laboratorio DUX10 <sup>6</sup>	Curado Edad (horas)
0	3,00
0,9	3,50
1,0	4,00
1,3	4,50
2,2	5,00
-2,2	5,50
-7,6	6,00
-2,8	18,50
0,0	19,50
3,0	20,00
-4,2	23,00
-6,0	23,50
-8,1	25,00
-9,6	26,00
-6,6	27,00
-26,0	41,00
-23,0	41,50

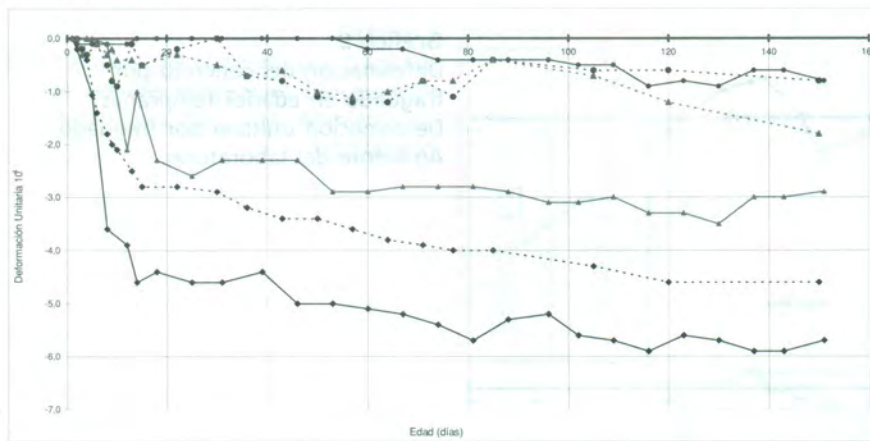
3. Deformaciones unitarias de probetas de concreto curadas en tres ambientes: laboratorio, sumergidas en agua y en intemperie, obtenidas con deformímetros mecánicos (foto 5 y gráficos 11 a 19).
4. Coeficiente de dilatación térmica (tabla 1).



Fotografía 5

**Gráfico 11**  
Deformaciones del concreto por fraguado y cambio de temperatura.  
Deformación unitaria por fraguado.

MEZCLA 052 - 0 - CON CEMENTOS I Y II

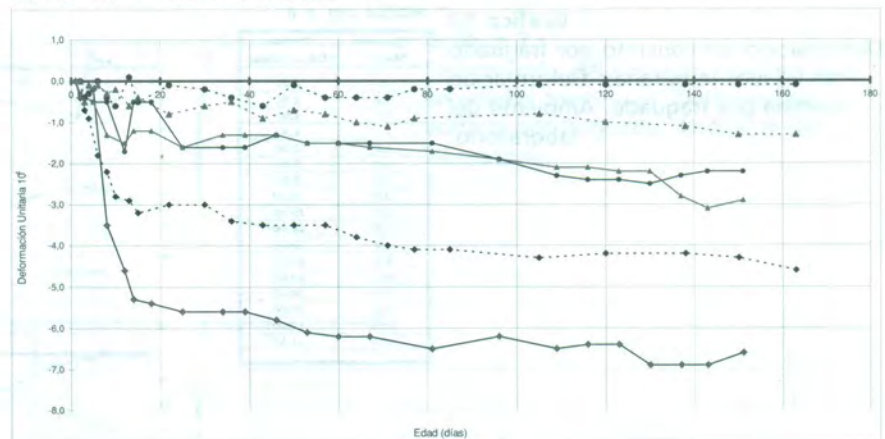


SEGUNDO SEMESTRE 2004

CEMENTO I		CEMENTO II	
Laboratorio: —	Agua: —	Laboratorio: - - - - -	Agua: - - - - -
Intemperie: —		Intemperie: - - - - -	

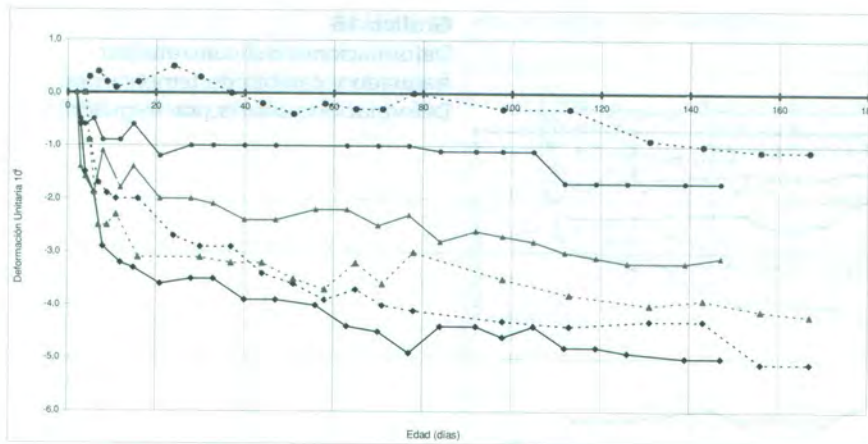
**Gráfico 12**  
Deformaciones del concreto por fraguado y cambio de temperatura.  
Deformación unitaria por fraguado.

MEZCLA 052 - 1 - CON CEMENTOS I Y II



SEGUNDO SEMESTRE 2004

CEMENTO I		CEMENTO II	
Laboratorio: —	Agua: —	Laboratorio: - - - - -	Agua: - - - - -
Intemperie: —		Intemperie: - - - - -	



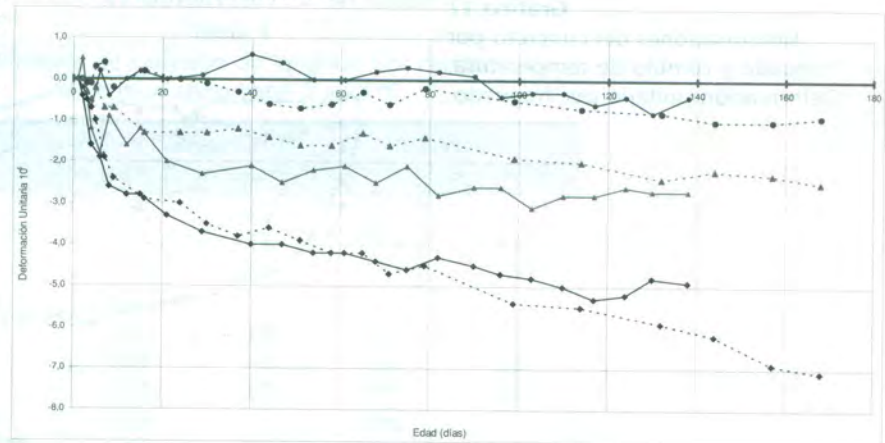
**Gráfico 13**  
Deformaciones del concreto por fraguado y cambio de temperatura.  
Deformación unitaria por fraguado.

SEGUNDO SEMESTRE 2004

CEMENTO I		CEMENTO II	
Laboratorio: —	Laboratorio: - - - - -	Laboratorio: - - - - -	Laboratorio: - - - - -
Agua: —	Agua: - - - - -	Agua: - - - - -	Agua: - - - - -
Intemperie: —	Intemperie: - - - - -	Intemperie: - - - - -	Intemperie: - - - - -

**Gráfico 14** MEZCLA 047 - 0 - CON CEMENTOS I Y II

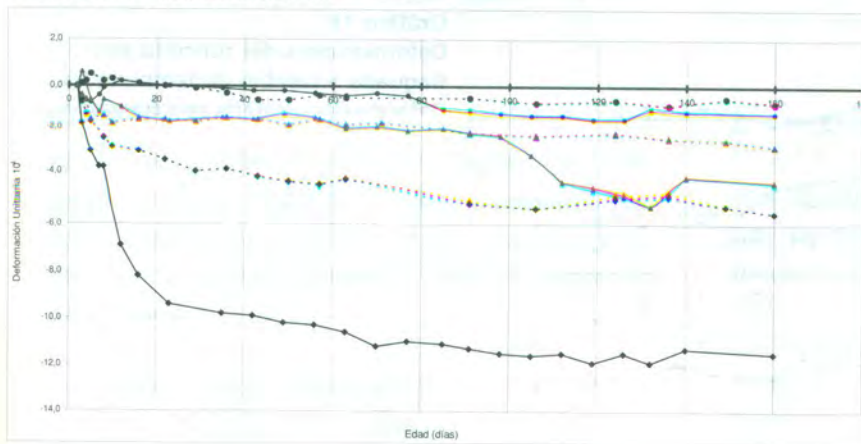
Deformaciones del concreto por fraguado y cambio de temperatura.  
Deformación unitaria por fraguado.



SEGUNDO SEMESTRE 2004

CEMENTO I		CEMENTO II	
Laboratorio: —	Laboratorio: - - - - -	Laboratorio: - - - - -	Laboratorio: - - - - -
Agua: —	Agua: - - - - -	Agua: - - - - -	Agua: - - - - -
Intemperie: —	Intemperie: - - - - -	Intemperie: - - - - -	Intemperie: - - - - -

MEZCLA 047 - 1 - CON CEMENTOS I Y II

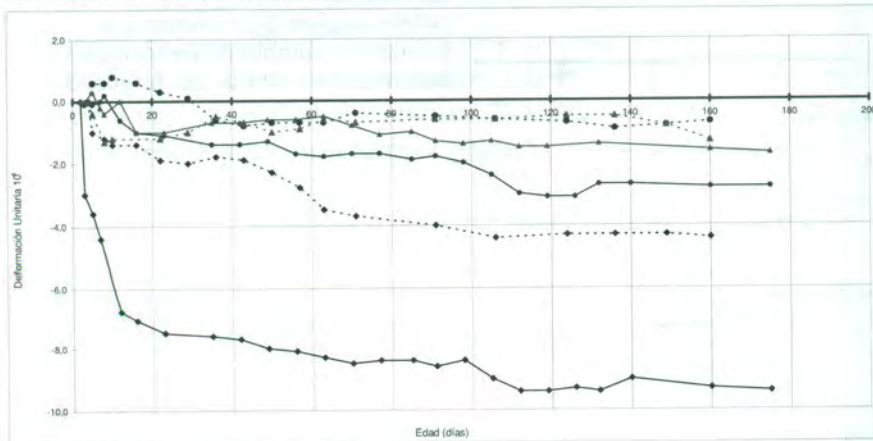


**Gráfico 15**  
Deformaciones del concreto por fraguado y cambio de temperatura.  
Deformación unitaria por fraguado.

SEGUNDO SEMESTRE 2004

CEMENTO I		CEMENTO II	
Laboratorio: —	Laboratorio: - - - - -	Laboratorio: - - - - -	Laboratorio: - - - - -
Agua: —	Agua: - - - - -	Agua: - - - - -	Agua: - - - - -
Intemperie: —	Intemperie: - - - - -	Intemperie: - - - - -	Intemperie: - - - - -

MEZCLA 047 - 3 - CON CEMENTOS I Y II



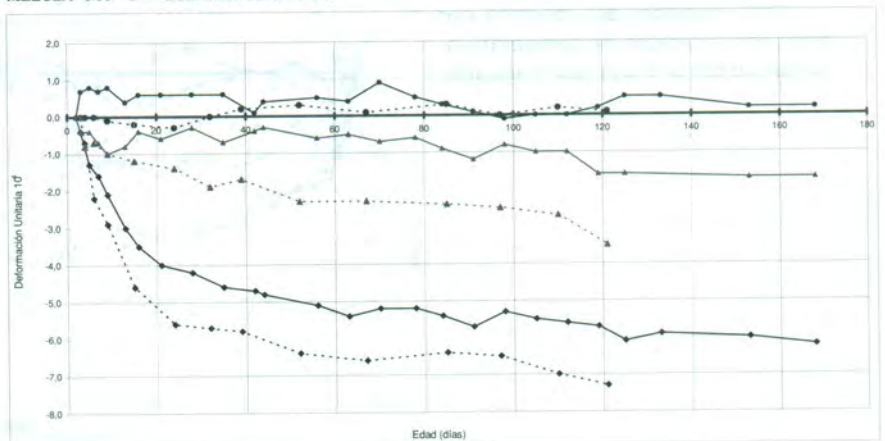
**Gráfico 16**  
Deformaciones del concreto por fraguado y cambio de temperatura.  
Deformación unitaria por fraguado.

SEGUNDO SEMESTRE 2004

CEMENTO I		CEMENTO II	
Laboratorio: _____	Agua: _____	Laboratorio: - - - - -	Agua: - - - - -
Intemperie: _____		Intemperie: - - - - -	

**Gráfico 17**  
Deformaciones del concreto por fraguado y cambio de temperatura.  
Deformación unitaria por fraguado.

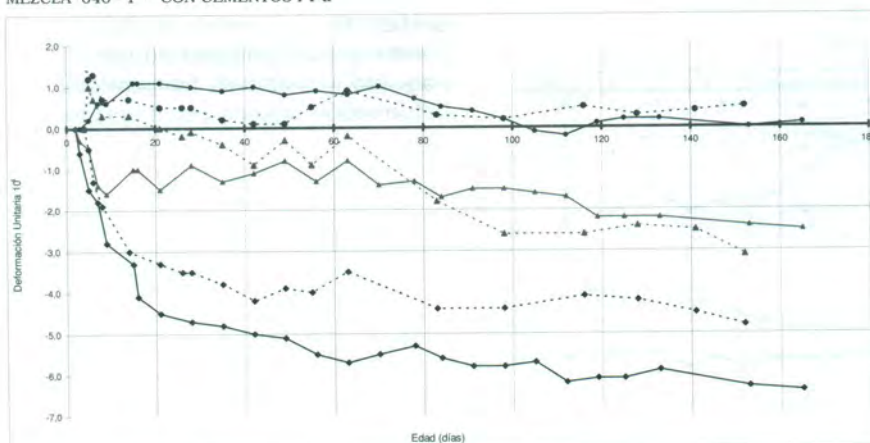
MEZCLA 040 - 0 - CON CEMENTOS I Y II



SEGUNDO SEMESTRE 2004

CEMENTO I		CEMENTO II	
Laboratorio: _____	Agua: _____	Laboratorio: - - - - -	Agua: - - - - -
Intemperie: _____		Intemperie: - - - - -	

MEZCLA 040 - 1 - CON CEMENTOS I Y II



**Gráfico 18**  
Deformaciones del concreto por fraguado y cambio de temperatura.  
Deformación unitaria por fraguado.

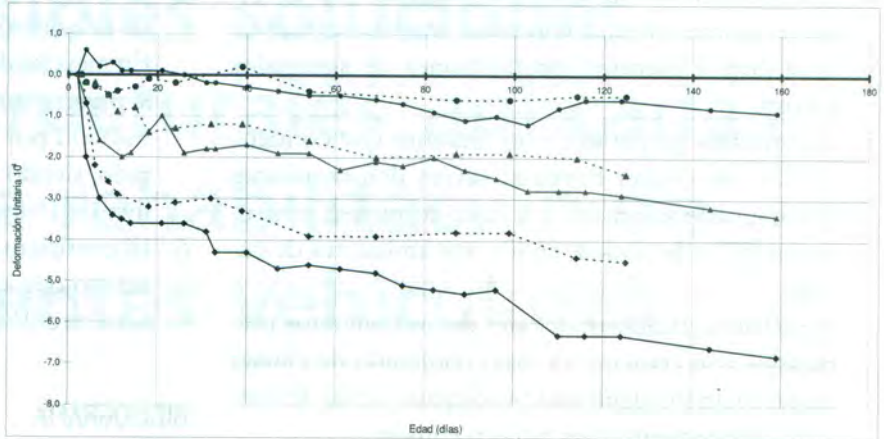
SEGUNDO SEMESTRE 2004

CEMENTO I		CEMENTO II	
Laboratorio: _____	Agua: _____	Laboratorio: - - - - -	Agua: - - - - -
Intemperie: _____		Intemperie: - - - - -	

Gráfico No. 18

**Gráfico 19** MEZCLA 040 - 3 - CON CEMENTOS I Y II

Deformaciones del concreto por fraguado y cambio de temperatura. Deformación unitaria por fraguado.



SEGUNDO SEMESTRE 2004

CEMENTO I		CEMENTO II	
Laboratorio: ———	Agua: - - - - -	Laboratorio: - - - - -	Agua: - - - - -
Intemperie: - - - - -		Intemperie: - - - - -	

**Tabla 1**  
Coeficiente de variación de longitud por cambio de temperatura entre 0 y 23 °C

Mezcla	Cemento I		Cemento II	
	$\alpha$ ( $10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ )	Coef. disp.	$\alpha$ ( $10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ )	Coef. disp.
052-0	1,28	4,2	1,27	5,2
052-1	1,30	7,6	1,33	4,1
052-3	1,29	3,3	1,31	2,9
Promedio	1,29		1,30	
047-0	1,30	4,0	1,37	1,1
047-1	1,32	7,0	1,34	2,6
047-3	1,33	2,5	1,34	1,9
Promedio	1,32		1,35	
040-0	1,32	5,3	1,31	2,9
040-1	1,34	4,6	1,32	4,0
040-3	1,33	5,2	1,29	4,5
Promedio	1,33		1,71	
Promedio general	1,31		1,32	

**CONCLUSIONES**

1. Las deformaciones unitarias por fraguado del concreto observado, medidas desde los primeros instantes después de fundido, son de retracción y varían con la edad de la mezcla, según la expresión logarítmica.

$$y = A - B \text{Ln}x$$

y: deformación unitaria  $\times 10^4$

x: edad de la mezcla en días

A y B: coeficientes que dependen del ambiente de curado, el tipo de cemento y la dosificación de la mezcla.

- En ambiente de intemperie de la zona norte de Bogotá, las deformaciones unitarias por fraguado son significativamente menores (40% a 120 días) que las que ocurren en ambiente de temperatura media mayor (22 °C) y humedad relativa entre 40 y 55%.
- En ambiente de saturación, las deformaciones unitarias por fraguado en los primeros días pueden ser de expansión, luego son de retracción y a 120 días corresponden como al 15% de las que suceden en ambiente cálido (22 °C, HR de 40 a 55%) y como al 35% de las que se presentan en intemperie.

4. Las retracciones unitarias por fraguado son mayores en las mezclas que contienen mayor cantidad de agua libre y menores proporciones de agregados inertes.
5. Las mezclas preparadas con cemento que contiene un 75% de clinker Pórtland sufren deformaciones por fraguado inferiores a las que contienen cemento con 87% de clinker, en los tres ambientes de curado.

A 120 días, las deformaciones de los concretos preparados con cemento de bajo contenido de clinker representan los siguientes porcentajes de las de concretos de cemento más rico en clinker:

Ambiente cálido (22 °C, HR entre 40 y 50%)	70%
Saturación	30%
Intemperie	78%

5. En mezclas de cemento que tiene 87% de clinker, la presencia de aditivo fluidificante aumenta la deformación por fraguado en los tres ambientes, siendo del orden del 38% cuando la dosis de aditivo es 1%

referente al peso del cemento y 27% cuando la dosis de aditivo es 3%.

En mezclas de cemento que contiene 75% de clinker, la presencia de aditivo fluidificante disminuye la retracción por fraguado en los tres ambientes de curado, siendo 30% la disminución para dosis de aditivo de 1% y 20% para dosis del 3%.

6. El coeficiente de dilatación térmica del concreto saturado que se observó cuando la temperatura cambia entre 0° y 24 °C, es de  $1,32 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ .

### BIBLIOGRAFÍA

1. ASTM Standards *Annual Book of Concrete and Aggregate*, C490-00 standard practice for use of apparatus for the determination of length change of hardened cement paste, mortar and concrete
2. Bresler, Boris. *Concreto reforzado de ingeniería*, Vol. 1, materiales, elementos estructurales, medidas de seguridad. 3.13.3. Adam M. Neville. Limusa, pp. 155-156.
3. *Geokon Installation Manual Models VCE 4200/4202/4210*. Vibrating Wire Strain Gages. Copyright 1986, 1996 by Geokon, Inc.
4. Mindess, Sidney & Young, J. Francis (1981). *Concrete*, Englewood Cliffs N.J.: Prentice Hall Inc, 18.2. pp. 481-485.

INGENIERÍA CIVIL

# Posibles soluciones estructurales aplicadas a la rehabilitación de puentes vehiculares

PEDRO EDMUNDO ARIAS MATOS

Ingeniero civil de la Universidad Nacional de Colombia, especialista en diseño, construcción y conservación de puentes de la Universidad Militar Nueva Granada, candidato al título de especialista en estructuras de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

Artículo recibido: 15/01/2007

Evaluación par externo: 20/02/2007

Evaluación par externo: 15/06/2007

Aprobado: 28/08/2007

## Resumen

En este artículo se presentan los aspectos más relevantes del trabajo de grado, cuyo título es también el expuesto, para optar al grado de especialista en estructuras. Así mismo, se mencionan las principales causas de la falla de varios puentes vehiculares en Colombia, y se sintetiza la información correspondiente a las soluciones estructurales aplicadas a diversos puentes, que por necesidades diferentes se han rehabilitado. Se tabulan estas necesidades acompañándolas de la respectiva solución estructural, aplicada a la superestructura o a la infraestructura. Esta información serviría para ayudar a obtener la posible solución estructural de rehabilitación de un puente vehicular con patología y diagnóstico similares a los tabulados.

**Palabras claves:** puente, rehabilitación, infraestructura, superestructura.

## Abstract

This document presents the most important aspects of the work of degree, whose title is also exposed, to choose to the degree of Specialist in Structures. In this article the main causes of the fault of several highways bridges are mentioned in Colombia. Also the information corresponding to the structural solutions applied to diverse bridges is synthesized, that by different necessities have been rehabilitated. These necessities are listed and accompanying them by the respective structural solution, applied to the superstructure or to the infrastructure. This information would be of aid to orient, to that consults it to obtain the possible structural solution of rehabilitation of a highways bridges with pathology and diagnosis similar to the tabs.

**Keywords:** Bridge, rehabilitation, substructure, superstructure.

## INTRODUCCIÓN

Se reúne la información de cinco puentes rehabilitados por causas diferentes, las cuales forman un patrón típico de falla de los puentes vehiculares. Es la razón que motiva a dar una explicación inicial de por qué colapsan tantos puentes en el país, tema de interés general para la ingeniería nacional, que obliga a tomar correctivos.

La información presentada en este artículo ayudará a encontrar la posible solución estructural, que podría aplicar a la rehabilitación de un puente vehicular, con diagnóstico y patología similares a cualquiera de los estudiados en este trabajo.

## ANTECEDENTES

Las políticas recientes de rehabilitación estructural de los puentes vehiculares en Colombia, además de ser una función social del Estado, no sólo surgen a raíz de las deficiencias en los estudios iniciales de los puentes, o por la carencia de ellos, o por la falta de un sistema de gestión de conservación y mantenimiento efectivo o por el terrorismo, sino también por la misma modernización de las vías, que exige del Estado su intervención, para incrementar el desarrollo del país.

## CAUSAS DE LA REHABILITACIÓN DE LOS PUENTES VEHICULARES

Las entidades encargadas de la administración de la infraestructura vial han orientado parte de los recursos a evaluaciones y diagnósticos en diversos puentes, desde el punto de vista de estabilidad estructural, haciendo la respectiva inversión en los estudios de rehabilitación o conservación, si éstos se requieren.

La rehabilitación de un puente surge de la necesidad de aumentar su nivel de servicio, en condiciones de seguridad adecuada con un costo razonable respecto al costo social que implicaría llegar a la decisión de demolerlo y construir uno nuevo.

Las principales causas para la rehabilitación de los puentes vehiculares se pueden clasificar en cuatro grupos:

- Carencia o deficiencia en la planeación, en los estudios y diseños.
- Factores generados durante el proceso constructivo e interventoria.

- Factores de orden público: atentados terroristas.
- Factores debido a una regular administración de la infraestructura vial.

### Carencia o deficiencia en la planeación, en los estudios y diseños

Desde la etapa de planificación y construcción de un puente se establece su vida útil. Si se ignoran los estudios o si éstos son deficientes, la suerte de la estructura será incierta.

Entre los factores inherentes a la falla de puentes por carencia o deficiencias en los estudios y diseños se mencionan los siguientes:

- Carencia o deficiencia en los estudios hidrológicos, hidráulicos y de socavación. Esto lleva a la infraestructura a una eventual falla, por la transformación que sufre el cauce al presentarse las crecientes, sobre todo en ríos de montaña.
- Localización inadecuada del ponedero. Ha sido costumbre en el país que el ponedero quede determinado por el diseño geométrico de la vía, independiente de la dinámica del río.
- Carencia o deficiencia en el estudio geotécnico, el cual, junto con el de socavación, son determinantes para garantizar la estabilidad del puente. Obviarlos, o que sean de pobre calidad, expone al puente a mayores costos en el futuro, no sólo económicos sino también sociales.
- Modelación estructural deficiente. Los puentes vehiculares son estructuras complejas que requieren por parte del especialista alto manejo técnico en el arte de la modelación estructural, sobre todo en el empleo de *softwares*. Los puentes metálicos son más propensos a tener deficiencias en la etapa de análisis y diseño.

El colapso presentado en varios puentes, construidos hace más de 25 años, tiene su origen en las deficiencias de los diseños de pilas y estribos por socavación o por capacidad portante del estrato de fundación. Esto es razonable, puesto que el antiguo Ministerio de Obras Públicas y el también desaparecido Caminos Vecinales establecieron la práctica del uso de las cartillas de modelos de puentes y, en forma equivocada, varias entidades evitaron contratar los estu-



dios correspondientes, procediéndose a la construcción sin éstos.

Con esta concepción, el presupuesto asignado para satisfacer la necesidad de un puente, en cualquier parte del país, se basaba en el del puente que según la cartilla se ajustara al ponteadero, sin tener en cuenta el entorno.

Con esta práctica de la ingeniería se hizo escuela en el país y fue así como se construyeron diversos puentes. Aún más, los estudios geotécnicos por lo general se fundamentaban únicamente en capacidad portante.

### Factores generados durante el proceso constructivo e interventoría

En esta etapa es posible detectar errores en los diseños, por lo tanto el constructor y el interventor deben ser ingenieros con buena experiencia y conocimiento en el tema de puentes.

Es conveniente que el proceso constructivo se estudie etapa por etapa para minimizar posibles errores que podrían incidir en el deterioro prematuro del puente. Los errores más comunes son los siguientes:

- Falta de recubrimiento adecuado del refuerzo, implicando oxidación y, por consiguiente, carbonatación del concreto.
- Deficiencia en el curado del concreto, generándose fisuras que expondrían al concreto a la carbonatación.
- El no retiro de pedazos de formaletas de madera, lo que implica un proceso de biodegradación, dando como resultado hongos o vegetación que acelerarían el proceso de carbonatación.
- En los puentes metálicos los errores de construcción tienen una marcada incidencia en su estabilidad. Es frecuente encontrar errores en las soldaduras, la falta o pobreza de las pinturas anticorrosivas.

### Factores de orden público: atentados terroristas

Los puentes han sido el blanco preferido por el terrorismo para lograr la parálisis del transporte, presentándose el desequilibrio económico de una región. Los daños pueden ir desde una reparación parcial del tablero hasta la reconstrucción total de éste, en especial en los puentes metálicos.

### Factores debido a una regular administración de la infraestructura vial

Debido al alto grado de exposición a que se encuentran las estructuras de los puentes, a pesar de haberse cumplido todo el desarrollo técnico desde sus diseños hasta su construcción, es necesario realizar sobre éstos la gestión de inspección y mantenimiento rutinario. Esta labor está a cargo de las entidades estatales de la administración vial.

En el deterioro y colapso de varios puentes ha tenido gran incidencia el abandono a que han estado sometidos, siendo los metálicos los más afectados.

Es competencia de las entidades de la administración vial, en conjunto con la policía de carreteras, velar porque no se presenten sobrecargas en la estructura de los puentes, como tampoco sobrecargas debido a repavimentaciones si previamente se ha evaluado la capacidad del puente.

El panorama anterior ha concientizado a las entidades encargadas de la administración de la infraestructura vial de invertir recursos en estudios para evaluar y diagnosticar el estado estructural de muchos puentes, y al mismo tiempo hacer la respectiva inversión en la construcción de la rehabilitación.

### SOLUCIONES ESTRUCTURALES APLICADAS A LA REHABILITACIÓN DE PUENTES VEHICULARES

La estrategia óptima para la rehabilitación de un puente vehicular debe estar amparada por procedimientos técnicos, respaldados por los principios del análisis y diseño estructural, los cuales deben estar estrechamente ligados a los procedimientos constructivos para minimizar el costo social.

Las técnicas de rehabilitación de la superestructura van desde la repotenciación con refuerzo pasivo o con tensionamiento exterior, adosamiento de nuevos elementos, o el empleo de fibras especiales para controlar el exceso de flexión o de cortante.

Respecto a la rehabilitación de la infraestructura, dependerá de la naturaleza del agente desestabilizador: socavación, fuerzas sísmicas o deficiencia en la capacidad portante del estrato de fundación, o simplemente la infraestructura se podría rehabilitar para incrementar su capacidad en carga viva o carga muerta.

En los puentes metálicos las técnicas de rehabilitación son más delicadas, requieren mayor especialidad

por la flexibilidad de la superestructura, y por el grado de deterioro de los elementos cuando las condiciones de mantenimiento han sido precarias. En el país se han rehabilitado numerosos puentes metálicos con excelentes resultados.

### VALOR AGREGADO DE LOS PROCESOS DE REHABILITACIÓN DE ALGUNOS PUENTES VEHICULARES

Como la administración de la red nacional de carreteras es una función del Estado, implica que toda la experiencia: estructural, geotécnica, hidráulica y en general toda la tecnología que se ha obtenido en el país en el tema de la rehabilitación de puentes, se encuentra en poder de las entidades oficiales encargadas de la contratación, archivada, sometida a la suerte del deterioro o pérdida parcial o total. Esta misma información está en manos de las firmas consultoras o constructoras seleccionadas para ejecutar los proyectos de rehabilitación. Tales circunstancias han imposibilitado la divulgación efectiva de las experiencias obtenidas en las rehabilitaciones de los puentes.

No se puede desconocer que toda la contratación relacionada con la rehabilitación de los puentes, estudios y construcción, se ha financiado con recursos públicos; por consiguiente, se le debe buscar un valor agregado, aparte del cumplimiento del objetivo de la contratación, valor que correspondería a la divulgación de las experiencias o procedimientos técnicos aplicados.

Dado que un puente, con los respectivos problemas que implican su rehabilitación, no se puede modelar de manera fácil y económica en el laboratorio debido a su entorno, no le queda más opción a la ingeniería estructural, en lo que respecta a la rehabilitación de puentes vehiculares, que nutrirse de las experiencias obtenidas en puentes arreglados.

De aquí parte la necesidad de ampliar la cobertura académica en el campo del análisis y diseño estructural de los puentes, no sólo para la etapa de construcción e inicio de la vida útil de éstos, sino también para cuando haya que repotenciarlos o rehabilitarlos, independiente de la causa que obligue a intervenirlos.

Es función de las facultades de ingeniería del país divulgar los conocimientos, el ingenio y demás experiencias que se han obtenido en la rehabilitación estructural de nuestros puentes. Sobre todo si se parte de la base de que la solución estructural debe estar orien-

tada a garantizar, entre otras, la optimización del procedimiento constructivo, porque al ser un puente un bien público comprometido con el progreso de una región y el diario vivir de una comunidad, la rehabilitación estructural se debe diseñar de manera que minimice el costo social.

### ALGUNAS SOLUCIONES ESTRUCTURALES RECOMENDADAS PARA LA REHABILITACIÓN DE PUENTES VEHICULARES

Las causas y los daños presentados en los puentes estudiados son la representación típica, en el medio colombiano, de lo que ocurre en aquellos que necesitan ser rehabilitados.

Se ha identificado que las causas y daños generados son el producto de la deficiencia de los estudios o la carencia de éstos, y de la falta de buenas políticas de conservación y mantenimiento de los puentes vehiculares por parte de las entidades encargadas de la administración de la red vial.

De acuerdo con lo anterior, se dan algunas recomendaciones estructurales para aplicarlas a puentes vehiculares con diagnósticos y necesidades de rehabilitación similares a los expuestos (tabla 1).

### CONCLUSIONES

La falla de varios puentes en Colombia, independiente de los efectos que la provoca, está ligada al manejo dado a estas estructuras desde su etapa de planeación.

Entre los factores más relevantes se mencionan las deficiencias en los estudios o la carencia de éstos, y la falta de políticas eficientes de conservación y mantenimiento.

La desestabilización de estribos y pilas, por la insuficiencia en los estudios geotécnicos y de socavación, es causa de gran incidencia en la toma de decisiones para la rehabilitación de puentes vehiculares.

Los atentados terroristas se han constituido en otro factor que hay que considerar en el contexto de las políticas de gestión vial.

La solución estructural elegida para la rehabilitación de un puente debe estar comprometida con el proceso constructivo, permitiendo al máximo que el puente quede habilitado al tráfico vehicular y peatonal, al menos en un carril. Por lo general, la entidad contratante

**Tabla 1**  
 Algunas soluciones estructurales para la rehabilitación de puentes vehiculares

CAUSAS DE LA REHABILITACIÓN	SOLUCIÓN ESTRUCTURAL
Inestabilidad de las pilas y estribos por socavación.	<p><b>Infraestructura</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ Usar pilotes a una longitud no susceptible de socavación y apoyar ampliación de dados y zapatas, usando conectores de cortante y epóxicos para soldar los concretos.</li> </ul> <p><b>Infraestructura</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ Usar pilotes con capacidad sísmica y apoyar ampliación de dados y zapatas usando conectores de cortante y epóxicos para soldar los concretos.</li> <li>• Reforzar cuerpo de pilas o de columnas.</li> <li>• Reforzar viga cabezal.</li> </ul>
Inestabilidad de pilas por baja capacidad del estrato de fundación.	<p><b>Infraestructura</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Transportar las cargas a estrato competente, utilizando pilotes que apoyan la ampliación de las zapatas o dados. Usar conectores de cortante y epóxicos para soldar los concretos.</li> </ul>
Inestabilidad de estribos por baja capacidad del estrato de fundación.	<p><b>Infraestructura</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Transportar la carga de la superestructura a un pórtico cuya cimentación se debe pilotear hasta un estrato competente.</li> <li>• El modelo del pórtico, espacial o plano, dependerá de la sección hidráulica.</li> </ul>
Actualización del puente a la carga viva del camión C40-95.	<p><b>Infraestructura</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Transportar las cargas a estrato competente, utilizando pilotes que apoyan la ampliación de las zapatas o dados. Usar conectores de cortante y epóxicos para soldar los concretos.</li> </ul> <p><b>Superestructura</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Verificación de losa existente con respecto a la carga del C40-95 para tomar la decisión de la demolición o no de una nueva losa.</li> <li>• En puentes metálicos, inspeccionar la existencia o no de conectores de cortante. La nueva losa deberá tener conectores para permitir su trabajo como sección compuesta, aumentándose la capacidad de la superestructura.</li> <li>• Repotenciación de vigas con las siguientes opciones:                         <ul style="list-style-type: none"> <li>– Tensionamiento exterior</li> <li>– Fibras de carbono</li> <li>– Reforzamiento en fibras metálicas con cubreplacas o nuevos elementos adicionados al patín inferior.</li> </ul> </li> </ul>
Ampliación y actualización del puente a la carga viva del C40-95.	<p><b>Infraestructura</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Transportar las cargas a estrato competente utilizando pilotes que apoyan la ampliación de las zapatas o dados. Usar conectores de cortante y epóxicos para soldar los concretos.</li> <li>• Diseñar reforzamiento del cuerpo de las pilas, ampliándola o colocando nuevas columnas que recibirán la ampliación de la viga cabezal. Usar conectores y epóxicos para soldar los concretos.</li> <li>• Ampliar estribos o nueva estructura aporticada, cimentada en estrato competente. El modelo dependerá de la sección hidráulica.</li> </ul> <p><b>Superestructura</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Repotenciación de vigas metálicas: preesforzadas o de concreto usando cualquiera de los sistemas expuestos anteriormente.</li> <li>• Diseño de nuevas vigas: metálicas preesforzadas o de concreto, dependiendo del tipo de puente.</li> <li>• Ampliación de losa, verificando previamente si la existente cumple con los requerimientos del camión C40-95.</li> </ul>

lo impone al constructor de la rehabilitación cuando no es posible un desvío alterno y el costo de hacerlo es representativo, comparado con el de la rehabilitación.

El ingeniero especialista en estructuras, frente a una solución de rehabilitación de un puente vehicular, aparte de ser idóneo y experto en el diseño de estos proyectos, deberá tener conocimiento y práctica en los respectivos procesos constructivos; de lo contrario, la solución corre riesgo de ser irrealizable o tener un costo elevado respecto al presupuesto asignado a las posibles alternativas de rehabilitación.

El conjunto de causas y daños presentados en los puentes estudiados responde a un patrón típico en el medio colombiano, de lo que ocurre en otros puentes que necesitan ser rehabilitados.

En cuanto a la rehabilitación de la infraestructura, independiente de la causa que la motive, la propuesta de la solución estructural con pilotes es la más práctica.

## BIBLIOGRAFÍA

- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (1995). Ministerio de Transporte - Instituto Nacional de Vías. *Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes*.  
Bridge Strengthening and Rehabilitation. Nueva Jersey. Prentice Hall ptr. Petros P. Xanthakos, 959 pp.  
Cúcuta. Área metropolitana (2000). *Interventoría técnica y administrativa para la construcción y pavimentación del puente Jorge Gaitán Durán: Consorcio Interpuentes*.  
Invías (2002). *Interventoría para el mantenimiento de la carretera anillo vial de Cúcuta, mediante la rehabilitación y conservación del puente internacional Francisco de Paula Santander*. Cúcuta, 71 pp.  
\_\_\_\_\_ (2003). *Interventoría para la rehabilitación del puente Rafael García Herreros PR16+0058 del anillo vial de Cúcuta, ruta 55, tramo 55 NSA*. Cúcuta, 41 pp.  
Instituto Nacional de Vías (1997). *Sistema de Administración de Puentes en Colombia*, Sipucol.

# Análisis de los fenómenos electromagnéticos en un cable de fibra óptica tipo ADSS en las líneas de transmisión de alta tensión

**MARIO ALBERTO RÍOS MESÍAS**

Ingeniero eléctrico, profesor asistente de la Universidad de los Andes.

**ÁLVARO CHAVARRO LEAL**

Ingeniero electricista, profesor de cátedra de la Universidad de los Andes.

**GIOVANNI LÓPEZ PACHÓN**

Ingeniero eléctrico, actualmente trabaja como ingeniero de diseño en Consultoría Colombiana S.A.

Artículo recibido: 22/05/2006  
Evaluación par interno: 16/08/2006  
Evaluación par externo: 14/02/2007  
Aprobado: 28/08/2007

## Resumen

En el documento presentado a continuación, se muestran los resultados del análisis de los campos electromagnéticos producidos por las fases en una torre de alta tensión sobre un cable de fibra óptica tipo ADSS instalado en ella. El principal objetivo es observar las interacciones eléctricas y magnéticas del cable ADSS en la torre y así determinar cómo puede fallar a causa de estos fenómenos para obtener puntos óptimos de instalación. Para el análisis electromagnético se utilizó el método de parámetros matriciales de líneas de transmisión, donde se tiene en cuenta la geometría transversal (2D) de la torre.

**Palabras claves:** líneas de transmisión de alta tensión, cable de fibra óptica tipo ADSS, campo eléctrico, campo magnético, espacio de potencial, corriente de contacto.

## Abstract

This paper shows results about the analysis of electromagnetic fields produced by the electric phases of a trifasic circuit on an hige voltages transmission lines' towers and their effect on an ADSS optical fiber cable installed in the tower. The main purposes are to show the electrical and magnetical interactions between the ADSS cable and the electric phases installed on the tower, and to evaluate how the ADSS could fail as consequence of these phenomena in order to obtain optimal points of installation of the ADSS on the tower. Matricial parameters method applied to overhead transmission lines is used to analyze the electromagnetic fields taking into account the transversal geometry of the tower (in 2D).

**Keywords:** High voltage transmission lines, ADSS fiber optical cable, electrical field, magnetic field, contact current.

## INTRODUCCIÓN

Actualmente se ha vuelto muy útil localizar un cable de fibra óptica para comunicaciones en las torres de líneas de transmisión por cuestiones de bajo costo y alto beneficio al aprovechar estructuras ya establecidas; cuando estas líneas son de alta tensión, se puede utilizar un cable de fibra óptica tipo ADSS, el cual está normalmente situado paralelo a la fase más baja [1], [2].

Algunas veces el cable ADSS podría tener fallas por la exposición a campos eléctricos de alta magnitud, ya que éste puede inducir corrientes que pueden ser significantes y producir descargas que causan daños en el revestimiento del cable y deteriorar las fibras por efectos térmicos. El cable también puede deteriorarse por efectos climáticos, contaminación y ambiente seco.

La idea es analizar este tipo de fenómenos en el cable mediante simulación y analíticamente, utilizando herramientas computacionales sobre un sistema piloto de líneas de transmisión de alta tensión.

## CONTENIDO

### Estado del arte

A mediados de los años setenta las industrias de telecomunicaciones hicieron grandes esfuerzos en la investigación sobre las fibras ópticas, ya que las redes de telecomunicaciones de cobre no eran muy eficientes para el futuro. Las siguientes son algunas ventajas de la fibra óptica sobre las líneas de transmisión de datos de cobre:

- *Ancho de banda.* Tiene una capacidad mucho mayor para llevar información que la transmisión de bits-seriales. El costo, tamaño y complejidad del *software* son mucho menores.
- *Atenuación.* Tiene muy baja atenuación a grandes distancias, por lo que no se necesitan muchas repetidoras.
- *Vulnerabilidad al ruido.* No es afectada por ningún tipo de radiación electromagnética. Es inmune al EMI, por lo que está hecho de material no metálico que no permite corrientes de conducción.
- *Seguridad.* La única forma de interceptar comunicaciones de fibra óptica es interrumpiendo la comunicación.

- *Costo.* El costo del cable es relativamente bajo gracias a su masiva producción en la actualidad, los verdaderos costos están representados en transmisores y receptores ópticos.

Una fibra óptica es una guía de onda dieléctrica que opera a frecuencias ópticas del orden de 100 THz. Un cable de fibra óptica contiene varias secciones cilíndricas. El más simple se compone de un núcleo, normalmente hecho de vidrio; un revestimiento, normalmente hecho de plástico, el cual tiene un índice de reflexión distinto al del núcleo, y una chaqueta, hecha de algún polímetro para protección y para darle resistencia mecánica al cable. En la figura 1 se ilustra esto más claramente [7].

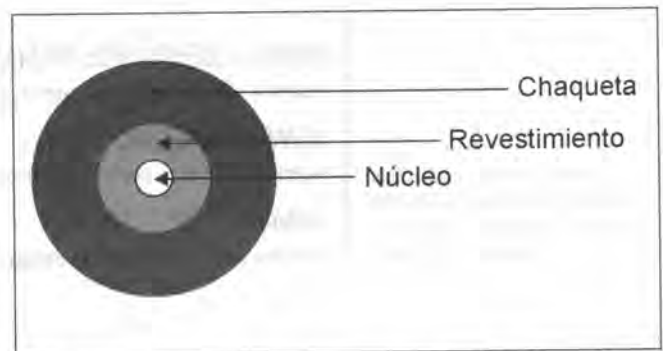


Figura 1. Sección transversal cable simple [7]

Un rayo de luz se propaga por el núcleo y puede ser reflejado por el revestimiento a diferentes ángulos, lo que genera una propagación multimodo, la cual tiene una limitante en la transmisión de datos por tiempo y número de modos. Por eso existe la propagación de modo simple, la que no utiliza la refracción y elimina totalmente la distorsión de la señal; en este caso, el radio del núcleo es mucho más pequeño. El sistema de comunicaciones de fibra óptica funciona como un sistema convencional, el emisor óptico convierte la señal digital en una señal óptica modulada y el receptor toma la señal óptica y la convierte de nuevo en digital; las señales de luz las pueden producir fotodiodos o láser que varían la intensidad de luz. En la figura 2 se ilustran los modos de propagación y el diagrama de bloques de un sistema de comunicación de fibra óptica [7].

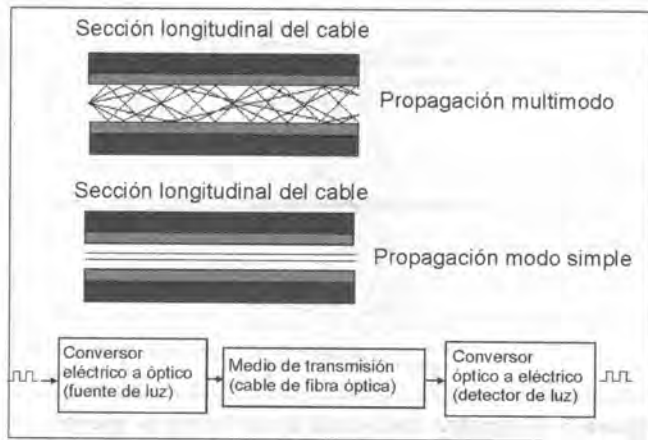


Figura 2. Modos de propagación y sistema de comunicación óptica [7].

Cuando se quieren instalar cables de fibra óptica en estructuras de líneas de transmisión de alta tensión existen varias opciones: la primera son los OPGW (*optical ground wires*), donde las fibras son instaladas en el centro del cable de guarda utilizado para apantallamiento de la línea. La segunda son los WRAP, donde las fibras son enrolladas en los conductores de fase para baja tensión o son instaladas en el centro del conductor en alta tensión. La tercera y última opción son los ADSS (*all-dielectric self-supporting*), que normalmente son instalados debajo de las fases más bajas [1], [3]. Esto puede apreciarse en la figura 3.

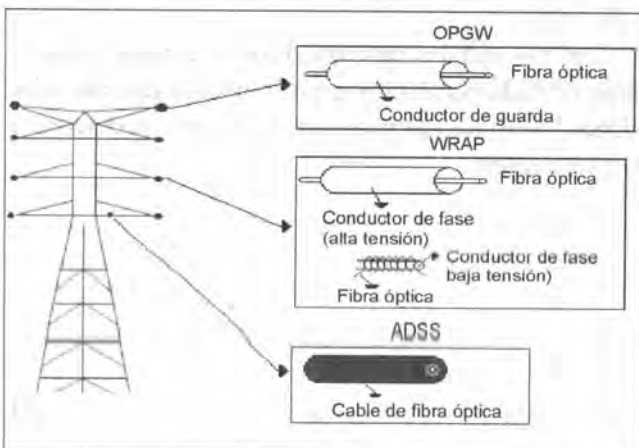


Figura 3. Clases de cables de fibra óptica para instalación en estructuras de alta tensión.

Los cables OPGW y WRAP son opciones muy buenas, puesto que al estar dentro del conductor éstos no se exponen a la radiación electromagnética, pues la co-

rriente tiende a fluir en la superficie de los conductores y los campos internos son prácticamente nulos; el problema de este tipo de cables es que son muy costosos y su mantenimiento es muy difícil, ya que se tiene que desenergizar el circuito; por eso en la mayoría de los casos se tiende a utilizar el cable ADSS, puesto que se requiere menos material y es de bajo costo, comparado con las otras opciones; además, para su mantenimiento no se requiere la interrupción del servicio. Una desventaja del cable ADSS es que se han reportado fallas por fenómenos electromagnéticos; en líneas menores de 85 kV no se han reportado fallas prematuras, pero en ambientes de alta exposición a campos eléctricos, líneas de 138, 345 y 500 kV, sí han fallado en menos de dos años de instalación. Por eso es de gran importancia el análisis de este fenómeno sobre el cable [3].

La mayoría de las fallas que se presentan son por efecto corona cuando se exponen a un potencial eléctrico demasiado alto y el aire alrededor pierde su rigidez dieléctrica; también cuando existen diferencias de potencial en la superficie del cable por la contaminación y efectos climáticos, como las lluvias, se pueden producir pequeñas descargas que pueden deteriorar el revestimiento o puede haber exposición a descargas atmosféricas, o cuando se forma un arco entre las fases y la torre y el cable se encuentra en el camino del arco; esto puede ocurrir más fácilmente en la parte donde se cuelga el cable a la torre. Por eso es tan importante el análisis del espacio potencial y el campo eléctrico en la torre.

En la actualidad, los cables ADSS que se encuentran en el mercado están hechos para un ambiente de espacio potencial de 25 kV, ya que el aire a este voltaje pierde su rigidez dieléctrica; éste puede ser un parámetro de diseño para su ubicación en la estructura de la línea de transmisión. Un ejemplo de cable ADSS se muestra en la figura 4 [9].

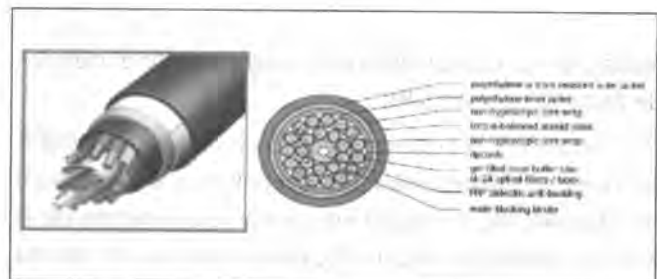


Figura 4. Cable ADSS [9].

El cable de la figura 4 puede llegar a tener 18 tubos y cada uno con 14 fibras, o sea que en total un cable puede tener 432 fibras; esto varía de acuerdo con el diámetro. Cada fibra de éstas puede ser multimodo (125 modos) o de modo simple, lo cual depende de la referencia. La resistencia lineal es aproximadamente de 100.000 Ω/m, que también puede depender del grado de polución y factores climáticos del medio de instalación. El nivel de potencial para instalación es de máximo 25 kV.

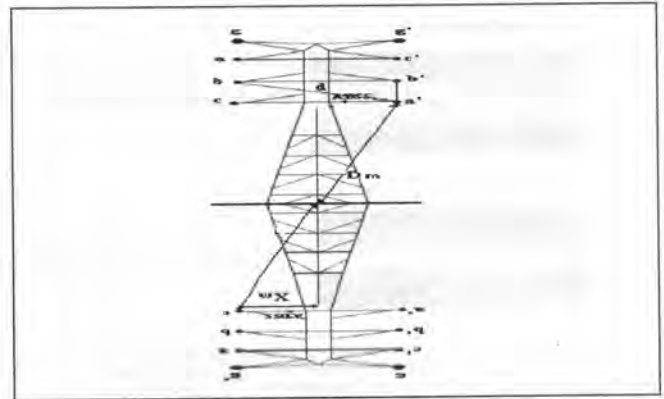


Figura 5. Geometría transversal de la línea y su imagen.

**Modelos de análisis**

Existen varios métodos para la solución de los campos en este tipo de problema; la formulación se hace con base en la ecuación de Laplace, que da una relación entre el campo eléctrico y el espacio potencial inducido; para la parte magnética se utiliza la ley de Ampère, que dependiendo de la cantidad de corriente que transporte el conductor de fase puede inducir un campo magnético alrededor [7]. Métodos numéricos, como elementos finitos (FEM), diferencias finitas (DFT) y el método de los momentos (MoM), son los usados comúnmente, pero para líneas de transmisión de alta tensión el método de parámetros matriciales puede ser un poco más ventajoso en cuanto a cálculos computacionales, ya que se manipulan matrices de dimensión hasta de  $n+1$ , donde  $n$  es el número de fases, pero el resultado es para un solo punto; mientras en los métodos numéricos va a haber una sola matriz con toda la información de los puntos de análisis, pero ésta puede llegar a ser muy grande, dependiendo del paso de simulación. Para este análisis se utilizó el método de parámetros matriciales, donde se tienen en cuenta las capacitancias en paralelo inducidas por el campo eléctrico y las impedancias serie producidas por el campo magnético.

**Análisis de los campos eléctrico y magnético por el método de parámetros matriciales**

Para el análisis del campo eléctrico y voltajes inducidos primero se deben hallar los coeficientes de potencial de Maxwell [8], teniendo en cuenta la geometría de la línea y su imagen (figura 5), para construir su matriz con (1) y (2), tomando el cable ADSS como un componente de ésta.

$$P_{ii} = \frac{10^{-9}}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{D_{ii}}{r_i}\right) \text{ km}/\mu\text{F} \tag{1}$$

$$P_{ij} = \frac{10^{-9}}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{D_{ij}}{d_{ij}}\right) \text{ km}/\mu\text{F} \tag{2}$$

$$I = (2\pi f)YV \tag{3}$$

$$C = P^{-1} \mu\text{F}/\text{km} \tag{4}$$

Con la matriz  $P$  es posible hallar los voltajes inducidos y la matriz de capacitancia, ya que se presume que por el cable ADSS no existen corrientes de conducción y por tanto son cero; de (1) y (2) se puede llegar a (3) y (4).

Con los voltajes determinados es posible hallar la carga de cada conductor y, por consiguiente, del cable ADSS. El campo eléctrico para la figura 5 se determina de esta manera:

$$\begin{bmatrix} q_a \\ q_b \\ q_c \\ q_{a'} \\ q_{b'} \\ q_{c'} \\ q_{ADSS} \end{bmatrix} = [C] \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \\ V_{a'} \\ V_{b'} \\ V_{c'} \\ V_{ADSS} \end{bmatrix} \text{ C/m} \tag{5}$$

$$E_x = \frac{q}{2\pi\epsilon_0} \left( \frac{(x-d)}{(x-d)^2 + (y-h)^2} - \frac{(x-d)}{(x-d)^2 + (y+h)^2} \right) \text{ V/m} \tag{6}$$



$$E_y = \frac{q}{2\pi\epsilon_0} \left( \frac{(y-h)}{(x-d)^2 + (y-h)^2} - \frac{(y+h)}{(x-d)^2 + (y+h)^2} \right) \text{V/m} \quad (7)$$

La ubicación de (d, h) de (6) y (7) corresponde a las fuentes de campo eléctrico. En el caso de la figura 5 son todos los conductores de fase, y lo que se quiere mirar es el aporte de cada uno de éstos al punto (x, y) donde está ubicado el cable ADSS; el campo total en cada componente es su suma.

En el análisis del campo magnético se debe hallar la matriz de impedancia utilizando la aproximación de Lewis [8], que tiene en cuenta la resistividad del terreno  $\rho$ , en este caso no se consideran las imágenes, o sea que geométricamente estaríamos analizando la mitad horizontal de la figura 5. No se puede tener en cuenta el cable ADSS dentro de la matriz porque el cable es totalmente dieléctrico y no se induce campo magnético sobre él, pero sí va a haber un campo magnético presente en el punto de ubicación provocado por cada fase de la línea. De (8) y (9) se determinan (10) y (11).

$$R_e = 0,004765f \text{ ohm/milla} \quad (8)$$

$$X_e = 0,01397f \log_{10} \left( 2162 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \right) \text{ ohm/milla} \quad (9)$$

$$Z_{ii} = R_i + \frac{R_e}{3} + j \left( 0,12134 \ln \left( \frac{1}{0,7788r_i} \right) + \frac{X_e}{3} \right) \text{ ohm/milla} \quad (10)$$

$$Z_{ij} = \frac{R_e}{3} + j \left( 0,12134 \ln(d_{ij}) + \frac{X_e}{3} \right) \text{ ohm/milla} \quad (11)$$

La corriente de fase se determina con la matriz de impedancias y los voltajes en cada fase. También existe una dependencia de la distancia de la línea, la cual es restringida por la corriente nominal del conductor. El campo de densidad de flujo magnético se determina con (12) y la distancia radial del conductor al punto (x, y) donde está ubicado el cable ADSS; el campo total es la suma del aporte de cada fase.

$$I_{\text{fase}_i} = \frac{1}{1} (Z^{-1} V_{\text{fase}_i}) \text{ Amp} \quad (12)$$

$$B = \frac{\mu_0}{2\pi} \sum_{i=1}^n \frac{I_{\text{fase}_i}}{\sqrt{(x^2 - x_{\text{fase}_i}^2) + (y^2 - y_{\text{fase}_i}^2)}} \text{ Teslas} \quad (13)$$

Tanto en la matriz de coeficientes de Maxwell como en la de impedancia de la línea se toman en cuenta los cables de guarda y luego se realiza la reducción de Kron para eliminarlos.

### Corriente de contacto

Una ventaja que tiene el cable ADSS es que se puede hacer trabajo de maniobra o mantenimiento estando la línea energizada. Si un trabajador toca el cable ADSS y éste está haciendo contacto con tierra, la corriente que pasa a través se puede modelar como el potencial espacial producido electroestáticamente en ese punto, dividido por la mitad de la impedancia característica (14) del cable [3], [5]. Como se sabe, los efectos inductivos son nulos; entonces tenemos:

$$Z_o \approx (1-j) \sqrt{\frac{R}{2\omega C}} \Omega \quad (14)$$

$$I_{\text{contacto}} = \frac{2V(x,y)}{Z_o} \text{ Amp} \quad (15)$$

La impedancia de una persona sin aislamiento a bajas frecuencias está aproximadamente entre 500 y 1.500  $\Omega$ , que comparada con la resistencia del cable es muy pequeña; por eso no se tiene en cuenta en (14), el valor de la capacitancia se toma de (4), que es el valor en la diagonal que corresponde al cable ADSS. Según la NESC (National Electric Safety Code), las corrientes de contacto como (15) deben ser menores de 5 mA [3].

### DEFINICIÓN DEL SISTEMA PILOTO DE ANÁLISIS

Se utilizó una línea con torres de doble circuito, con un nivel de voltaje de 230 kV (dimensiones mostradas en la figura 6). Los parámetros de los conductores de fase, guarda y el cable ADSS se muestran en la tabla 1.

### SIMULACIÓN

En Matlab® se implementó el programa de cálculo de la distribución del espacio potencial, los campos eléctricos y magnéticos. Se realizó un barrido espacial en 2D en la parte transversal de la línea (en la torre de la figura 6). Cada punto del barrido, comenzando desde

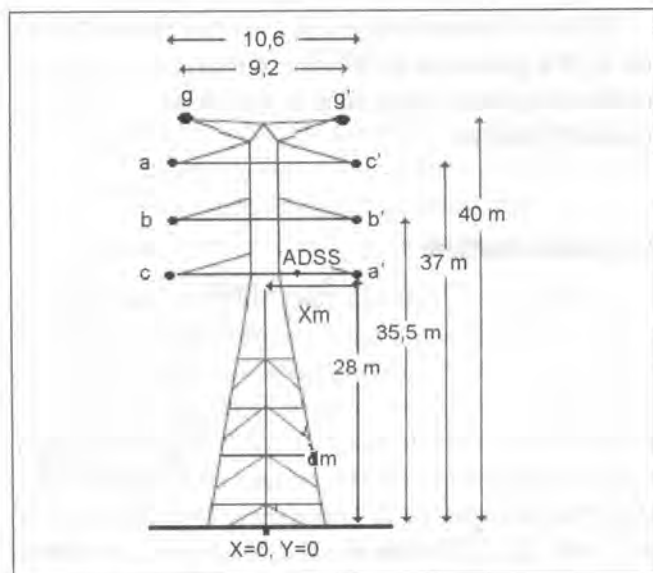


Figura 6. Línea de análisis y su geometría.

Tabla 1

	Referencia	Diámetro [mm]	R [W/m]
Conductor fase	ACSR Bluejay	31,953	0,00004890
Conductor guarda	ACSR Minorca	12,192	0,00005338
Cable ADSS	AFL 432 Fibras	25,4	100000

el origen, es un punto de instalación hipotético del cable ADSS, y para cada uno se determinan los parámetros matriciales para construir la matriz de potencial de Maxwell y la matriz de impedancia serie, en ambas matrices eliminando los cables de guarda; también se determinan los voltajes y campos eléctricos inducidos; por último, se determinan las corrientes de cada fase, teniendo en cuenta la corriente nominal del conductor que, de acuerdo con el sistema de análisis para el conductor Bluejay, es de 970 Amp y se halla la densidad de flujo magnético presente en cada punto de instalación. Teniendo cada variable con su ubicación (x, y) después de terminado el barrido espacial, es posible graficar una curva de contorno en 2D. Para determinar los puntos de instalación en la torre, se delimita una región en donde no se alcancen 25 kV en magnitud del espacio potencial y que la magnitud de corriente de toque sea menor de 7 mA. El barrido espacial se hizo cada 0,1 metros. El tiempo de simulación es de aproximadamente quince minutos. Se realizaron los siguientes casos de simulaciones:

- *Caso I:* configuraciones de fases a, b, c, c', b', a'. (como en la figura 7).
- *Caso II:* configuraciones de fases a, b, c, a', b', c'.
- *Caso III:* un circuito en servicio (a, b, c) y el otro aterrizado (a', b', c' o c', b', a').

### ANÁLISIS DE RESULTADOS

En los tres casos simulados se observa que los mayores voltajes inducidos, corrientes y campos se presentan en el caso II (figura 8); la zona de instalación es bastante restringida (figura 10 b). Para el caso I las zonas de instalación son más accesibles y los niveles de los campos y corriente de contacto son más tolerables. Se debe tener en cuenta que cuando hay un solo circuito en servicio –caso III– se inducen más voltajes electrostáticamente que en el caso I (figuras 7 y 9). Para determinar los puntos de instalación se consideran las combinaciones de los casos I-III y II-III, ya que en cualquier configuración de fases se puede tener un solo circuito en servicio.

Los puntos óptimos de instalación están cercanos al centro de la torre y paralelos a las fases de la mitad; para cualquier caso en esta zona es donde menos se inducen voltajes, corrientes y campos eléctricos. Así mismo, es donde menos se presenta el campo de densidad de flujo magnético. Si se es riguroso, este punto entre las dos fases del medio cumple con la restricción de los 25 kV y 5 mA recomendados por la Nesc, lo cual es útil para nuevas líneas en las que se considere instalar un cable tipo ADSS desde el principio.

En la práctica, se utilizan estructuras ya establecidas para determinar la instalación. Para este tipo de torres lo admisible sería dejar un circuito fuera de servicio para maniobra y utilizar como zona más segura para la instalación las fases más bajas. La flecha del cable de fibra óptica debe ser igual o menor que la de las fases conductores más bajas, lo cual significa que el cable puede estar paralelo a éstas o un poco más arriba para respetar las distancias mínimas de seguridad; para este tipo de instalación la restricción es de 7 mA, ya que al observar las figuras 11, 12 y 13 la corriente mínima para la zona de instalación no tiene como valor el recomendado por la Nesc (5 mA).

En la tabla 2 se presentan los puntos de ubicación del cable tanto para líneas nuevas como para ya establecidas, de acuerdo con los resultados obtenidos y te-

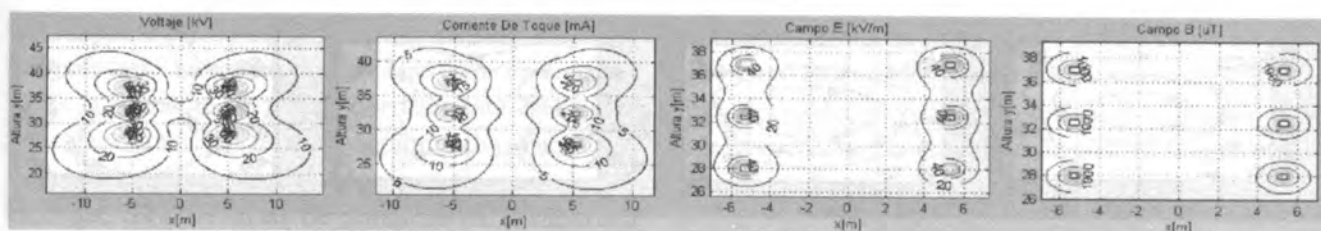


Figura 7. Resultados caso I.

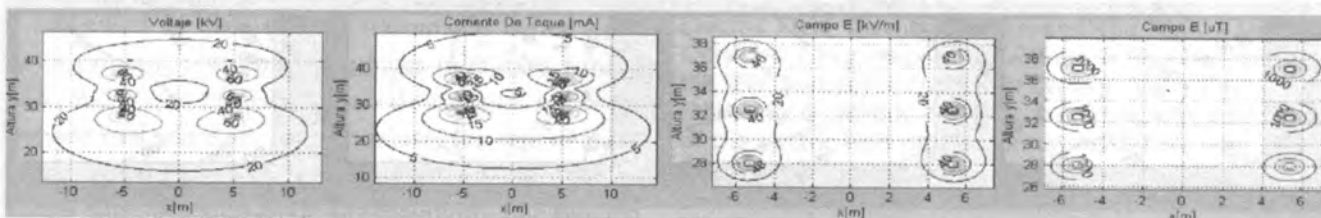


Figura 8. Resultados caso II.

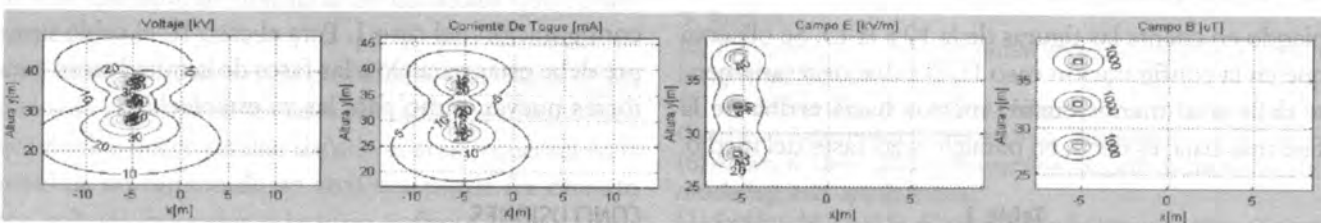


Figura 9. Resultados caso III.

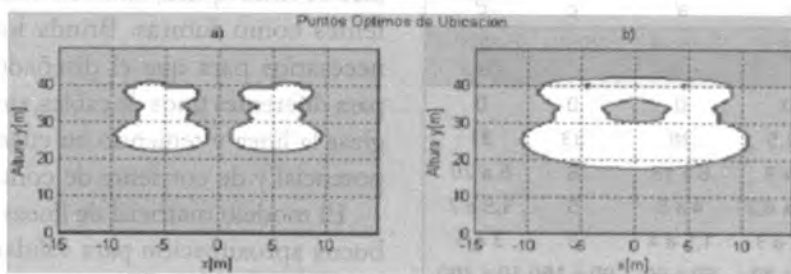


Figura 10. Puntos de instalación <math>< 25\text{ kV}</math> y <math>< 7\text{ mA}</math> a) casos I y III b) casos II y III.

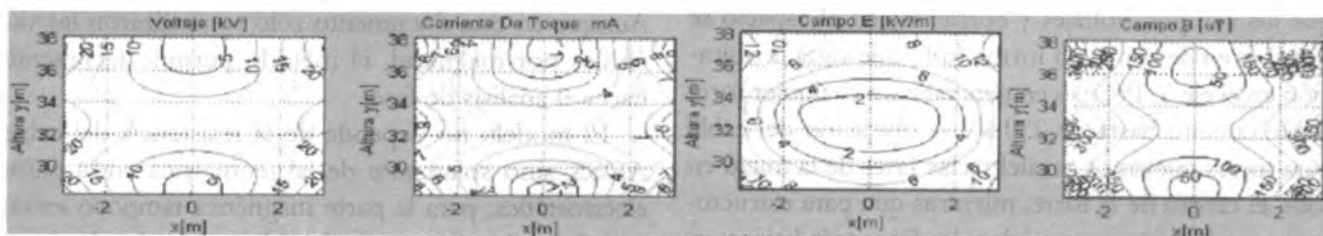


Figura 11. Variables electromagnéticas cercanas a los puntos óptimos de instalación (caso I).

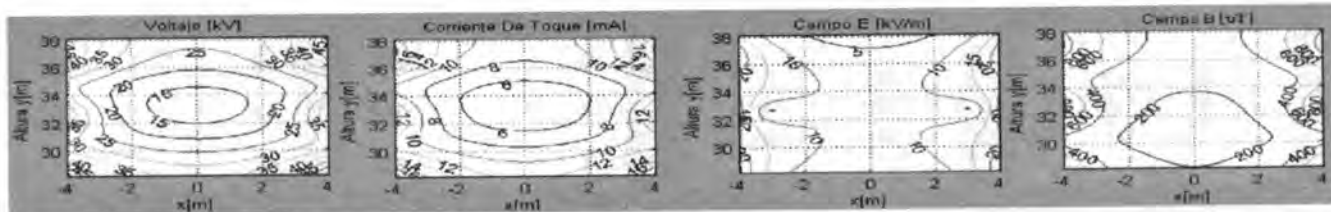


Figura 12. Variables electromagnéticas cercanas a los puntos óptimos de instalación (caso II).

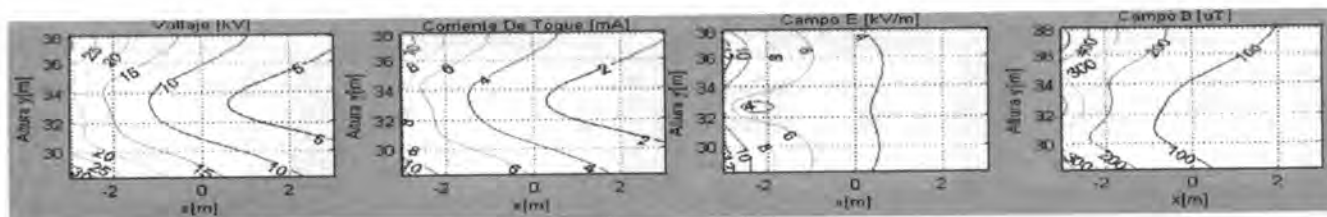


Figura 13. Variables electromagnéticas cercanas a los puntos óptimos de instalación (caso II).

niendo en cuenta las figuras de la 10 a la 13. Se observa que en la configuración caso II, el cable necesariamente debe ir al menos cuatro metros hacia arriba de la fase más baja, es decir, en paralelo a las fases del medio.

configuración del caso I. Para el caso II, el cable siempre debe estar paralelo a las fases de la mitad tanto para torres nuevas como para las ya establecidas.

Tabla 2

	Config. (CASO I)		Config. (CASO II)	
	a	c'	a	a'
	b	b'	b	b'
	Nueva	Establecida	Nueva	Establecida
X [metros]	0	0	0	0
Y [metros]	32,5	28	33	31
Voltaje inducido [kV]	8 a 9	6 a 13	8	6 a 20
Campo E [kV/m]	0,2 a 4,2	4 a 5	5	3,5 a 7
Corr. de contacto [mA]	2,8 a 3	1,5 a 4	3	3 a 5
Campo B [ $\mu$ T]	50 a 80	50 a 90	90 a 150	10 a 100

La misma simulación se realizó para torres de la misma característica pero variando la altura, y se observó que los campos, voltajes y corrientes en el espacio se distribuyen de la misma forma, sólo que varía la ubicación en el eje Y. Por eso en general para cualquier torre doble circuito hasta de 230 kV la ubicación del cable para torres nuevas es paralelo a las fases de la mitad en todo el centro de la torre, mientras que para estructuras ya establecidas es paralelo a las fases más bajas y en todo el centro de la torre. Esto es solamente para la

### CONCLUSIONES

El modelo planteado se convierte en una herramienta de análisis electromagnético para la ubicación de cables de fibra óptica, tanto en líneas de transmisión existentes como futuras. Brinda los elementos de juicio necesarios para que el diseñador defina la ubicación para diferentes tipos de cables, sin necesidad de desenergizar la línea y teniendo en cuenta las restricciones de potencial y de corriente de contacto.

El modelo matricial de líneas de transmisión es una buena aproximación para validar fácilmente un modelo de distribución de campos y espacio de potencial (voltaje inducido). Se comprobó que el modelo es consistente con la teoría. Este método facilita el análisis de cualquier tipo de torre con geometrías distintas, diferentes niveles de voltajes y diversas configuraciones. Aunque en este documento sólo se analizaron las variables por magnitud, el método permite fácilmente hacer el análisis de fase.

El modelo no depende de la resistencia del cable ADSS, sino solamente de la geométrica en la parte electrostática; para la parte magnética tampoco existe esta dependencia, ya que el cable está hecho de materiales no magnéticos y es totalmente dieléctrico, por lo

que resulta imposible considerarlo en la matriz de impedancia serie. La resistencia sólo interviene en los cálculos de la corriente de toque; normalmente ésta puede aumentar cuando hay mucha contaminación y ambiente seco; esto bajaría la corriente de toque, pero puede producir que las diferencias de potencial en la superficie del cable aumenten porque se crean zonas con distinto nivel de resistencia. Es muy importante lograr una ubicación en donde todos los campos sean mínimos.

Las zonas de instalación determinadas tienen niveles de campos, corrientes y voltajes tolerables para el cable, tanto que la distribución de campos no se ve afectada casi por éste. Esta zona asegura que el cable no se exponga a fenómenos tales como corona y diferencias entre potenciales de alta magnitud, que pueden producir descargas que con el tiempo deterioren el revestimiento del cable. Los puntos de instalación también se encuentran ubicados de tal modo que tienen apantallamiento perfecto, ya que si caen descargas atmosféricas a la torre lo más probable es que caigan en los cables de guarda o en las fases más altas. La única forma que el cable puede resultar dañado es si se encuentra en la mitad de un camino de un arco que puede ser causado por voltajes inducidos a la torre o flameo inverso; sin embargo, este fenómeno es muy poco probable.

Como trabajo futuro se propone continuar con un análisis más detallado en aspectos tales como los fenó-

menos electromagnéticos sobre la superficie del cable a lo largo del vano, el punto donde se cuelga a la torre y el efecto del revestimiento del cable a campos de altas frecuencias. Para este tipo de análisis se pueden utilizar métodos numéricos.

## REFERENCIAS

- [1] Kwska, B.; Jackowicz, A. & Timler, M. (2004). Analysis of Electric Field Distribution Around the High - Voltage Overhead Transmission Lines with an ADSS Fiber-Optic Cable. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 19, N° 3, July.
- [2] Huang, Q.; Karady, G.; Shi, B. & Tuominen, M. Calculation of the electric field distribution on ADSS fiber optic cable. 2003 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena.
- [3] Olsen, R. (1999). An improved model for the electromagnetic compatibility of All-Dielectric Self-Supporting Fiber-optic Cable and High-voltage Power lines. *IEEE Transactions on electromagnetic compatibility*, Vol. 41, N° 3, August.
- [4] Tuominen, M. Space potential versus electric field; Which is right for ADSS?
- [5] Anuszewska, H. (2001). Fiber Optic Installation On Overhead Transmission Power Lines. Zakopane.
- [6] Anjan, K. Deb. (2000). *Power line Ampcity systems theory, modeling and applications*.
- [7] Sadiku, M. (2001). *Elements of electromagnetics*. Oxford University Press.
- [8] Eprí (1982). *Transmission Line Reference Book*.
- [9] AFL Telecommunications Fiber Optic Cable Brochure. (2005).

# Diseño de una antena fractal siguiendo el modelo de Mandelbrot

## HERNÁN PAZ PENAGOS

Magíster en telecomunicaciones de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Ingeniero electricista de la Universidad Nacional de Colombia, ingeniero electrónico de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas y filósofo de la Universidad Santo Tomás de Aquino. Docente del área de comunicaciones, Programa de Ingeniería Electrónica de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. hpaz@escuelaing.edu.co.

## XIMENA ACERO BRICEÑO

Ingeniera electrónica de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. ximena.acero@gmail.com.

## ROBERTO FERRO ESCOBAR

Ingeniero electrónico de la Universidad Distrital. Magíster en telecomunicaciones, profesor de la Facultad de Ingeniería Electrónica de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. rferro@segobdis.gov.co.

Artículo recibido: 01/02/2006

Evaluación par externo: 19/02/2007

Evaluación par externo: 07/07/2007

Aprobado: 28/08/2007

## Resumen

Obedeciendo a la necesidad de construir antenas con amplios anchos de banda y dimensiones más pequeñas que las antenas típicas, se ha implementado la geometría fractal como recurso para cumplir estos requerimientos. El trabajo de investigación presentado aquí está principalmente enfocado a analizar los rasgos geométricos de una antena fractal construida con el modelo de Mandelbrot, con el fin de verificar las características y el desempeño de la misma. Se construyeron varias antenas con este modelo, cada una con un número de iteración diferente; se observaron sus características en cuanto a resistencia de pérdidas, inductancia, capacitancia, eficiencia, resistencia de radiación, factor de calidad y ancho de banda, con el propósito de averiguar la influencia de la geometría fractal en el comportamiento de la antena.

**Palabras claves:** diseño, antena, modelo fractal, experimentación.

## Abstract

Obeying the necessity to make antennas with wide bandwidth and dimensions smaller than the typical antennas, fractal geometry has been implemented like resource to fulfill these requirements. Investigation displayed here is focused to analyze the geometric characteristics of an antenna fractal built under Mandelbrot's model, with the purpose of verifying the characteristics and performance of the same one. Several antennas under this model, each one with a number of different iteration were built, were observed their characteristics as far as resistance of losses, inductance, capacitance, efficiency, radiation resistance, factor of quality and bandwidth, in order to investigate the influence of geometry fractal in the behavior of the antenna.

**Keywords:** Design, antenna, fractal model, experimentation.

## INTRODUCCIÓN

Uno de los inconvenientes planteados en las comunicaciones modernas es la necesidad de construir antenas que resuenen a diferentes frecuencias y cuyo tamaño no aumente con dicha variación. En la actualidad, ha surgido una nueva forma de construir antenas que cumplan con los anteriores requerimientos, cuyo diseño está dado por la implementación de modelos matemáticos que siguen la geometría fractal. Esta geometría nació con el fin de representar las formas de la naturaleza<sup>1</sup> imposibles de ser caracterizadas con la exactitud de las figuras descritas en la geometría euclidiana [1]. La palabra fractal fue acuñada por Benoit B. Mandelbrot, profesor de la Universidad de Yale, a finales de los setenta, cuando descubrió su primer modelo matemático al experimentar con las teorías propuestas y publicadas en 1918 por los matemáticos Gaston Julia y Pierre Fatou sobre la iteración de funciones racionales en el plano complejo[2].

Un modelo fractal se describe por algoritmos recursivos (iteraciones) y se desarrolla a partir de las propiedades de autosimilaridad y dimensión fraccionaria. La autosimilaridad o autosemejanza hace referencia a que una pequeña porción del fractal puede verse como todo el fractal reducido a una escala menor; la autosimilaridad no es necesariamente geométrica, también puede ser estadística. En cuanto a la dimensión, se puede decir que un punto tiene dimensión 0, una línea tiene dimensión 1, una superficie tiene dimensión 2, etc., pero los fractales tienen dimensión fraccionaria; es decir, si hay  $n$  copias de la geometría original disminuidas por una fracción  $f$ , la dimensión  $D$  queda definida como:

$$D = \frac{\log n}{\log \left( \frac{1}{f} \right)} \quad [1]$$

Los fractales se han convertido en uno de los principios de la ciencia [3]-[8], formas geométricas que se están aplicando en teoría del caos [9], lógica difusa, ter-

1. Los fractales son la geometría adecuada para las formas irregulares de la naturaleza: hojas de helecho, árboles, cabeza de una coliflor, alas de algunas mariposas, líneas costeras, relámpagos, terrenos rugosos, montañas, nubes, etc.

modinámica de los procesos irreversibles, algoritmos genéticos [10], [11], redes neuronales, simulación por computador de paisajes naturales, descripción de fenómenos físicos, modelación del ruido en sistemas electrónicos, codificación y compresión de imagen y sonido digitalizados [12]-[14], y diseño de antenas [15]-[23].

Las antenas fractales las diseñaron en primera instancia Nathan Cohen y un equipo de ingenieros de la Universidad Politécnica de Cataluña, construyendo modelos de las curvas de Koch y de los triángulos de Sierpinski con el fin de evaluar el comportamiento de este tipo de antenas. Hoy en día se han venido implementando otros modelos, como las curvas de Minkowski, árboles fractales en dos y tres dimensiones, carpetas de Sierpinski, curvas de Hilbert y modelos combinados como el doble fractal de Hilbert y Koch.

En diseños e implementación de antenas multibanda, para comunicaciones de radio, se están implementado algunos modelos fractales, puesto que se alcanza el mismo comportamiento electromagnético en tantas bandas de frecuencia como iteraciones contenga la antena fractal, sin aumentar el tamaño de la misma.

## CONJUNTO FRACTAL DE MANDELBROT

El conjunto de Mandelbrot "M" consiste en una serie de números complejos "C" cuyas órbitas de 0 bajo  $z^2 + C$  correspondientes no escapan al infinito; cada número está compuesto por una parte real y otra imaginaria, representada por  $i (\sqrt{-1})$ ; se toma un número complejo cualquiera Z "la semilla" y se eleva al cuadrado, al número obtenido se le suma C y se vuelve a elevar al cuadrado y continua, así una y otra vez con el mismo proceso; la función no lineal que lo describe es:

$$Z_{n+1} = Z_n^2 + C \quad [2]$$

Si la sucesión queda acotada se dice que el primer parámetro C con el cual se comenzó a iterar pertenece al conjunto de Mandelbrot, de lo contrario este número quedará excluido del mismo. Por ejemplo, si se escoge  $C=2$ , siguiendo la sucesión se tendrían las siguientes iteraciones: 2, 6, 38, 1.446, ..., como la órbita tiende al infinito, la sucesión diverge, es decir,  $C=2$  no está dentro del conjunto de Mandelbrot; mientras que con  $C=-2$ , cuyas iteraciones serán -2, 2, queda acotado al conjunto entre [-2,2]; la sucesión no tiende al infinito, por tanto  $C=-2$  pertenece al conjunto de Mandelbrot.

**Criterio del escape.** Para saber qué número  $C$  no pertenece al conjunto de Mandelbrot, basta con encontrar un solo término en la sucesión con el cual comprobar que  $|Z_n| > 2$ , pues los puntos cuya distancia al origen es superior a 2, es decir  $x^2 + y^2 > 4$ , no pertenecen al conjunto de Mandelbrot.

Para que un punto pertenezca al fractal de Mandelbrot, éste debe estar entre  $[-2,2]$ , pues de lo contrario la figura tiende al infinito; por consiguiente, el área siempre queda delimitada por un círculo de radio 2. El matemático Shishikura probó que el área de un fractal de Mandelbrot tiende a estar entre 1,66 y 1,71<sup>2</sup>.

Algunos ejemplos del conjunto de Mandelbrot generados mediante el *software* "Ultrafractal 4.0" son:

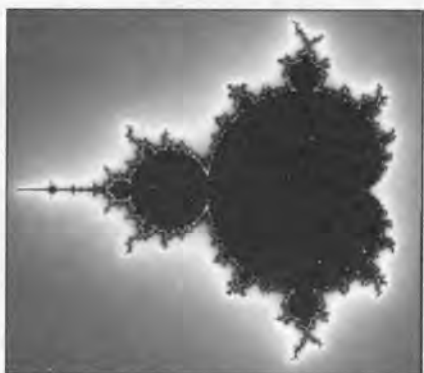


Figura 1. Modelo fractal de Mandelbrot  $Z^2 + C$  con cien iteraciones graficado con el *software* "Ultrafractal".

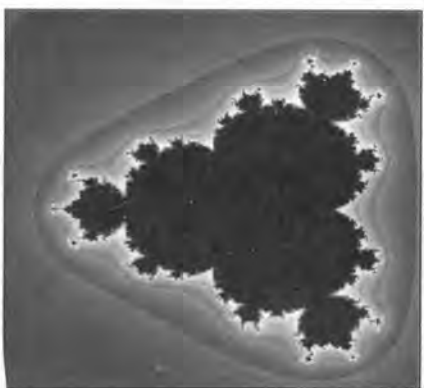


Figura 2. Modelo fractal de Mandelbrot  $Z^4 + C$  con cien iteraciones graficado con el *software* "Ultrafractal".

2 Según Hubbard y De Douday, el área de un fractal de Mandelbrot se calcula así:  $A = \pi \left( 1 - \sum_{n=1}^{\infty} n b_n^2 \right)$  donde  $b_n$  son los coeficientes de la serie infinita de Laurent del borde exterior del disco unitario que está en el exterior de la figura de Mandelbrot.

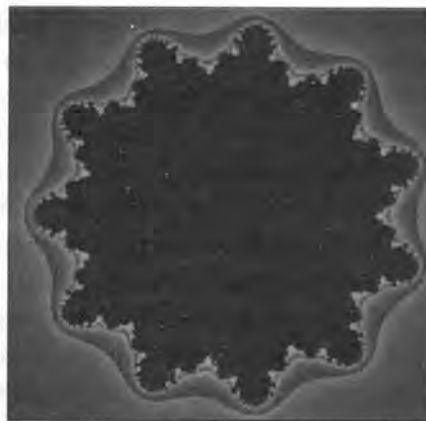


Figura 3. Modelo fractal de Mandelbrot con cinco iteraciones graficado con el *software* "Ultrafractal".

## DISEÑO DE LA ANTENA CON EL MODELO DE MANDELBROT

Para el diseño de la antena se resume a continuación el trabajo desarrollado por el equipo de proyecto dirigido, área de comunicaciones del Programa de Ingeniería Electrónica de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Se seleccionaron las iteraciones 7, 10, 13 y 16 del modelo de Mandelbrot " $Z^2 + C$ ", con un factor de escala de 3, porque en ellas se obtuvieron los mejores resultados en multibandas, después de diseñar y experimentar por tanteo con otras ecuaciones y número de iteraciones, por ejemplo: " $Z^1 + C$ ".

En el diseño de la antena fractal se siguieron los mismos pasos que se dan para la construcción de una antena *loop* pequeña<sup>3</sup>: área de la *loop*  $\ll \lambda^2$ ; se eligió esta configuración por la similitud con la forma fractal y por la sencillez en su implementación (figura 4).



Figura 4. El sistema de Mandelbrot es la imagen de un círculo y se puede construir de un disco por ciertos arcos que se van disminuyendo hacia el interior.

3. La antena *loop* pequeña tiene una longitud aproximada de  $\lambda/8$  o menos; se puede considerar como un dipolo corto con carga.



Las antenas en bucle con longitud de perímetro  $\lambda$  necesitan una cantidad importante de espacio; por esta razón se trabajó sobre un bucle pequeño (radio = 20,24 cm) que, mediante el modelo fractal de Mandelbrot, puede salvar este inconveniente incrementando el perímetro hasta el infinito. Las cuatro iteraciones diseñadas se imprimieron sobre cuatro placas de material dieléctrico<sup>4</sup>, con las siguientes características: sustrato de Polytetrafluoroethylene (PTFE) Woen Glass,  $\epsilon_r = 2,2$ , espesor del dieléctrico = 0,8 mm, espesor del recubrimiento de cobre = 0,04 mm, factor de disipación = 0,0009. La antena fue polarizada linealmente (horizontal) y montada ortogonal a un plano de tierra de 115 cm \* 76,4 cm; la estructura presenta simetría respecto a un punto en el cual se alimenta a través de una línea de transmisión balanceada, con impedancia característica de 50  $\Omega$ . Atendiendo a la geometría particular de este fractal, se espera observar la corriente fluyendo desde el centro de la alimentación hacia las puntas, donde se radia la potencia; lo interesante es que esas puntas no son los extremos de la antena, sino todas aquellas salientes que presenta el modelo fractal según el número de iteraciones.

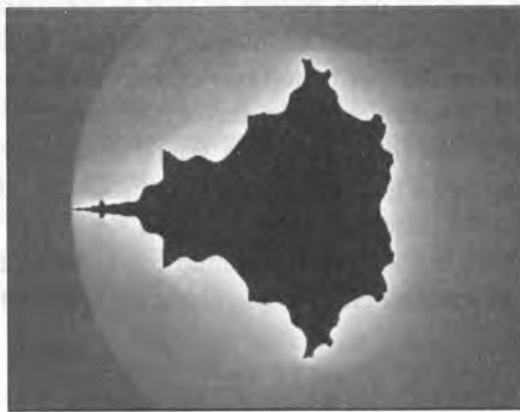


Figura 5. Modelo fractal de Mandelbrot  $Z^2 + C$  con siete iteraciones graficado con el software "Ultrafractal".

4. Taconic: Advanced Dielectrics Division facilitó al proyecto dirigido siete muestras gratis de láminas PTFE de fibra de vidrio recubiertas de cobre; estas bases se caracterizan por sus bajas pérdidas, constante dieléctrica uniforme y consistente en un buen rango de frecuencia y estable a lo largo y ancho de su dimensión.

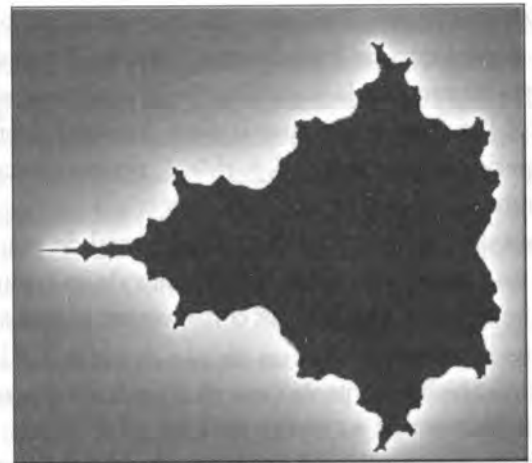


Figura 6. Modelo fractal de Mandelbrot  $Z^2 + C$  con diez iteraciones graficado con el software "Ultrafractal".

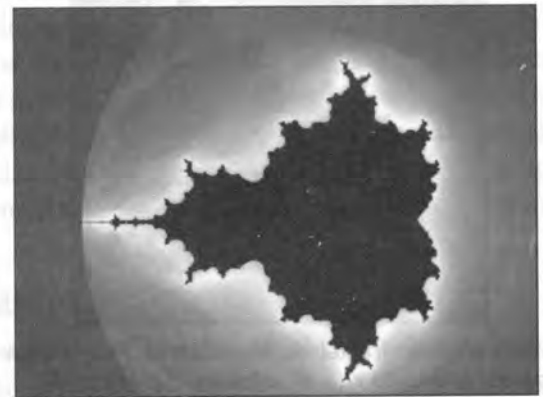


Figura 7. Modelo fractal de Mandelbrot  $Z^2 + C$  con trece iteraciones graficado con el software "Ultrafractal".

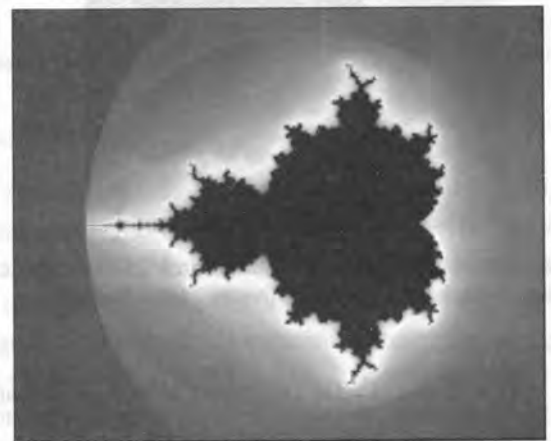


Figura 8. Modelo fractal de Mandelbrot  $Z^2 + C$  con 16 iteraciones graficado con el software "Ultrafractal".

Se observa en las figuras 5 a 8 un aspecto aproximado en todas las escalas (autosimilaridad no perfecta); se espera que una antena autosemejante opere de manera similar en varias longitudes de onda; es decir, que mantenga sus parámetros de radiación similares en diversas bandas de frecuencia. Así mismo, se observa que en los modelos fractales de Mandelbrot el círculo de radio "r" que enmarca el fractal permanece constante a lo largo del proceso iterativo.



Figura 9. Antena fractal de Mandelbrot  $Z^2 + C$  con 16 iteraciones conectada a ASD512 Antenna Systems Demonstrator - Feedback.

El área encerrada por la iteración N° 16, del modelo fractal de Mandelbrot " $Z^2 + C$ " (figura 9), queda delimitada en un radio de 16,79 a 17,30 cm.

$$A_{\text{BUCLECIRCULAR}} \approx \pi \cdot r^2 \approx 3,1415 \cdot (20,24 \text{ cm})^2 \\ \approx 1286,946 \text{ cm}^2$$

Al relacionar las dos áreas, obtendremos:

$$A_{\text{CURVAMANDELBROT}} \div A_{\text{BUCLECIRCULAR}} \approx 0,709$$

Al comparar las áreas de las antenas fractal con el modelo de Mandelbrot y la antena *loop* circular pequeña en el rango de frecuencia de 83,63 y 501,61 MHz, encontramos que ésta presenta un valor promedio de 913,479 cm<sup>2</sup>; mientras que el área de la *loop* pequeña es de 1.286,945 cm<sup>2</sup>.

Como se observa, los fractales de Mandelbrot tienen un área limitada, es decir, finita; mientras que su perímetro es infinito, puesto que a medida que se itera las formas tienden a ser más pequeñas dentro de una misma área, haciendo entonces tender el perímetro al infinito. Cuanto más se aproxima el perímetro del bucle de una antena fractal a una longitud de onda, más tiende a resonar la estructura y más dependen sus características de la forma de la antena. La antena con el modelo fractal de Mandelbrot conserva la buena propiedad que poseen algunos fractales para rellenar el espacio, y por esto es posible disponer antenas multibandas más pequeñas.

#### IDENTIFICACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LA ANTENA SEGÚN EL MODELO DE MANDELBROT

Los parámetros de entrada (pérdidas de retorno, resistencias de pérdidas y de radiación, reactancias inductiva y capacitiva) y parámetros de salida (ancho de banda, factor de calidad, eficiencia de la antena, ganancia y patrón de radiación) frente a la frecuencia de operación se muestran a continuación.

El grado de desacoplamiento presentado entre la fuente<sup>5</sup> y la carga (antena fractal de Mandelbrot) fue el siguiente:

$$G_D = \frac{\text{Potencia}_{\text{reverse}}}{\text{Potencia}_{\text{forward}}} \quad [3]$$

N° de iteraciones	P <sub>reverse</sub>	P <sub>forward</sub>	G <sub>D</sub>
7	1 W	4 W	0,25
10	0,5 W	4 W	0,125
13	0,5 W	4 W	0,125
16	1 W	4 W	0,25

Para efectos de la resistencia de pérdidas de la antena, se obtuvo con la fórmula:

$$R_p = \frac{a}{b\sqrt{\pi f \delta}} \quad [4]$$

5. Generador de RF ASD152 de Feedback.

Donde  $\delta$  = profundidad de penetración del campo eléctrico<sup>6</sup>,  $a$  = radio de la espira,  $b$  = radio del alambre,  $f$  = frecuencia de operación

Nº de iteraciones	$R_p$ teórica	$R_p$ medida
7	0,613 $\Omega$	0,17 $\Omega$
10	0,741 $\Omega$	0,17 $\Omega$
13	0,819 $\Omega$	0,19 $\Omega$
16	0,916 $\Omega$	0,21 $\Omega$

Así mismo, la resistencia de radiación:

$$R_r = 31.200 \left( \frac{\Lambda}{\lambda^2} \right)^2 \quad [5]$$

donde  $\Lambda$  = área del fractal según el modelo de Mandelbrot,  $\lambda$  = longitud de onda.

Al comparar las antenas fractal con el modelo de Mandelbrot y la *loop* circular pequeña en cuanto a su resistencia de radiación, para el rango de frecuencia de 83,63 y 501,61 MHz, encontramos que ésta se mueve entre los valores de 1,48 y 2.157 $\Omega$ , mientras que para una antena *loop* pequeña es nominalmente de unas fracciones de ohmios. Aun cuando la resistencia de radiación es de sólo unos pocos ohmios para el valor más bajo de frecuencia en la antena fractal, éste alcanza el valor de 2.157  $\Omega$  en el extremo de las frecuencias altas; sendos valores desmejoran notablemente el acople con la línea de transmisión.

Las antenas de bucle pequeñas tienen dificultades en el acoplamiento entre la línea de transmisión y la antena por su baja impedancia de entrada<sup>7</sup>; sin embargo, el bucle fractal según el modelo de Mandelbrot tiene la ventaja de aumentar la resistencia de entrada, manteniendo constante el volumen ocupado, por el incremento de la longitud del perímetro hasta cierto número de iteraciones.

- Como criterio de diseño se tomó el 1% de dicha profundidad. Para las frecuencias de experimentación es de 0,5 a 1 mm, aproximadamente.
- La antena *loop* pequeña presenta una resistencia de radiación muy baja (del orden de fracciones de ohmio: 0,3  $\Omega$ ), y reducida eficiencia.

La inductancia de la antena está dada por:

$$L = \mu a \left( \ln \left( \frac{8a}{b} \right) - 2 \right) \quad [6]$$

Donde  $\mu = \mu_r \mu_0 = 1,26 \mu\text{H/m}$  para el cobre,  $a$  = radio de la espira,  $b$  = radio del alambre.

Nº de iteraciones	L teórica	L medida
7	0,339 $\mu\text{H}$	0,5 $\mu\text{H}$
10	0,35 $\mu\text{H}$	0,5 $\mu\text{H}$
13	0,38 $\mu\text{H}$	0,6 $\mu\text{H}$
16	0,387 $\mu\text{H}$	0,6 $\mu\text{H}$

La forma dentada de la antena fractal según el modelo de Mandelbrot genera capacitancias e inductancias adicionales que hacen innecesaria la introducción al sistema de elementos externos para su sintonización o para el incremento de su ancho de banda.

Capacitancia de la antena:

Nº de iteraciones	C teórico	C medido
7	2,38 * 10 <sup>-12</sup> F	1,82 * 10 <sup>-12</sup> F
10	2,39 * 10 <sup>-12</sup> F	1,82 * 10 <sup>-12</sup> F
13	2,68 * 10 <sup>-12</sup> F	1,51 * 10 <sup>-12</sup> F
16	3,16 * 10 <sup>-12</sup> F	1,51 * 10 <sup>-12</sup> F

El factor de calidad de la antena se obtuvo de la siguiente fórmula:

$$Q = \frac{X_L}{R_p} = \frac{2\pi fL}{R_p} \quad [7]$$

Donde  $X_L$  reactancia inductiva;  $R_p$  resistencia de pérdidas

Nº de iteraciones	Q teórico	Q medido
7	291	904
10	496	2.090
13	975	4.635
16	1.332	6.004

Para conseguir un factor de calidad  $Q$  alto en la antena fractal según el modelo de Mandelbrot, se construyó sobre una baqueta que tuviera un dieléctrico con un gran espesor para evitar las corrientes de fuga y ondas superficiales, y con una permitividad  $\epsilon_r$  baja para que las líneas de campo se confinaran entre la antena y el plano de tierra.

Mientras que el ancho de banda se calculó así:

$$BW = \frac{F_R}{Q} \quad [8]$$

Donde  $F_R$  frecuencia central,  $Q$  factor de calidad.

Nº de iteraciones	BW medido a -3 dB	BW teórico
7	106°	377 KHz
10	91,2°	343 KHz
13	52,4°	227 KHz
16	53,2°	236 KHz

La eficiencia de la antena:

$$\eta = \frac{R_r}{R_r + R_p} \quad [9]$$

Nº de iteraciones	Rp medida	$\eta$ medida
7	0,17 $\Omega$	26,6%
10	0,17 $\Omega$	27,1%
13	0,19 $\Omega$	28,6%
16	0,21 $\Omega$	30,9%

La antena fractal de Mandelbrot tiene una ganancia de 1,69 a 11,13 dBi para las iteraciones siete y dieciséis, respectivamente, mayor que en una antena *loop* pequeña (1,5 dBi). Esta última presenta menos ganancia debido a su baja eficiencia (22%),

## MEDICIONES Y RESULTADOS

En las figuras 10 a 13 se muestra el corrimiento<sup>8</sup> de la frecuencia de resonancia de la antena fractal según el

8. Las cuatro bandas de frecuencias están equiespaciadas y tienen un factor de espaciamiento de 2.

modelo de Mandelbrot " $Z^2 + C$ " a medida que aumenta el número de iteraciones. Se comprobó la independencia de la frecuencia de resonancia con el tamaño de la antena.



Figura 10. Portadora a 83,63 MHz radiada a través de la antena fractal de Mandelbrot, con siete iteraciones y visualizada en el analizador de espectros HM5012/14.



Figura 11. Portadora a 167,24 MHz radiada a través de la antena fractal de Mandelbrot, con diez iteraciones y visualizada en el analizador de espectros HM5012/14.



Figura 12. Portadora a 334,43 MHz radiada a través de la antena fractal de Mandelbrot, con trece iteraciones y visualizada en el analizador de espectros HM5012/14.

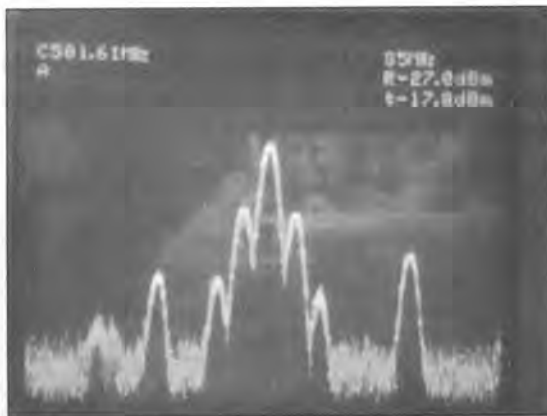


Figura 13. Portadora a 501,61 MHz radiada a través de la antena fractal de Mandelbrot, con 16 iteraciones y visualizada en el analizador de espectros HM5012/14.

Para la iteración N° 7 del fractal de Mandelbrot se descubrió una distribución de corriente a lo largo de la antena similar a la antena *loop* pequeña: corriente casi uniforme (se puede considerar en fase a lo largo del fractal); mientras que para las iteraciones 10, 13 y 16, la distribución de corriente no fue uniforme a lo largo del fractal, ocasionando que los campos resultantes se sumaran en el centro y se anularan en los extremos. En todos los casos se presentaron altas pérdidas por corrientes tangenciales debido a las formas irregulares del modelo fractal.

En las figuras 14 a 17 se muestran los patrones de radiación<sup>9</sup> para las antenas fractales, según el modelo de Mandelbrot; en las mencionadas figuras las frecuencias de resonancia más altas varían las características de radiación de la antena fractal. Así mismo, debido a la simetría del fractal de Mandelbrot y a que los campos eléctricos y magnéticos se cancelan en 0° y 180°, se presentan sendos nulos.

El patrón de radiación de la antena fractal con el modelo de Mandelbrot tiende a dispersar la densidad de potencia electromagnética en varios lóbulos laterales indeseados; si la frecuencia se duplica aparecen dos lóbulos, deformando la emisión ideal de potencia en el espacio libre.

9. Las figuras de distribución de campo en el plano polar, para las cuatro iteraciones, se obtuvieron por simulación con el software "Eznec-M".

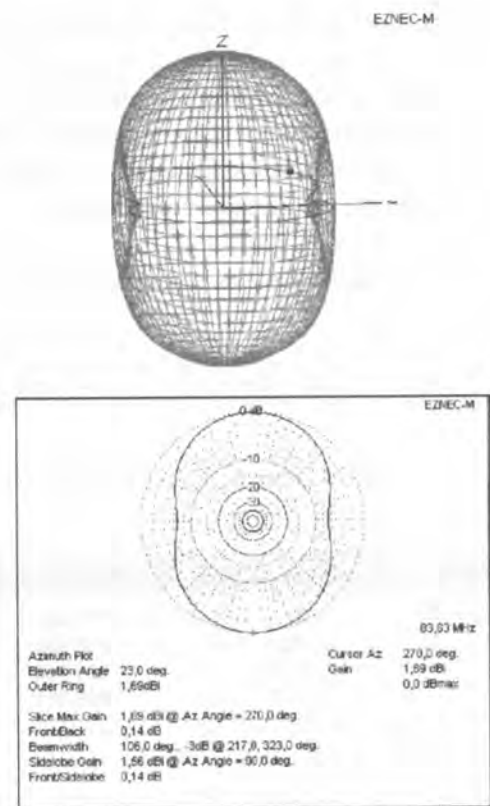


Figura 14. Patrón de radiación polar de la antena fractal en la séptima iteración, graficado con el software "Eznec-M".

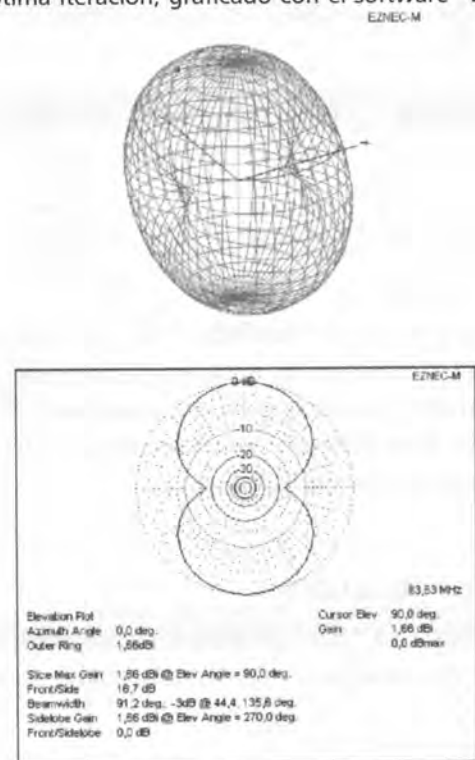


Figura 15. Patrón de radiación polar de la antena fractal en la décima iteración, graficado con el software "Eznec-M".

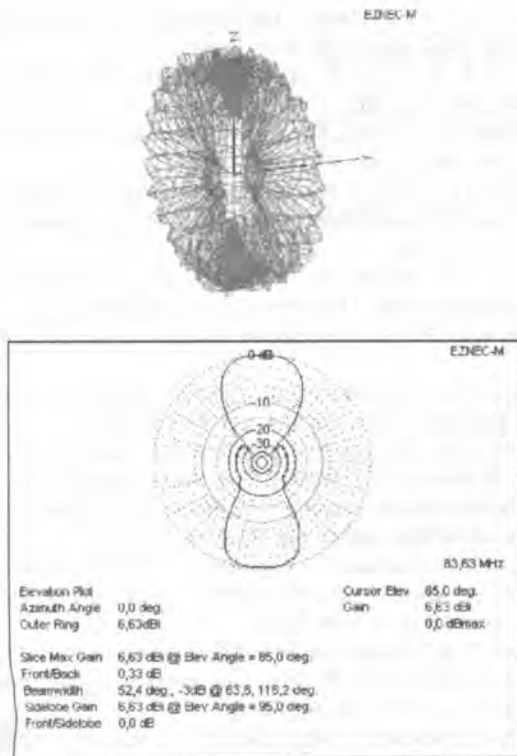


Figura 16. Patrón de radiación polar de la antena fractal en la decimotercera iteración, graficado con el software "Eznec-M".

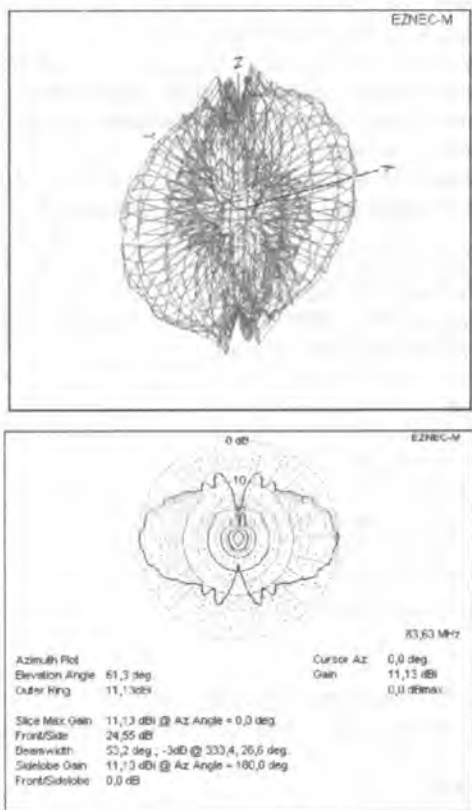


Figura 17. Patrón de radiación polar de la antena fractal en la decimosexta iteración, graficado con el software "Eznec-M".

## ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Se descubrieron las características multibanda de la antena fractal en diferentes iteraciones realizadas sobre el modelo de Mandelbrot; para cada una de ellas se comprobó una frecuencia de resonancia distinta, sin cambiar previamente el tamaño de la antena. Así mismo, es posible encontrar mayor directividad en los patrones de radiación.

A medida que aumenta el número de iteraciones del modelo, se obtiene una resistencia de pérdidas mayor debido al mayor número de puntos de inflexión que se presentan en la forma del fractal, ocasionando pérdidas por corrientes de fuga y afectando así el factor de calidad de la antena. Igualmente, la resistencia de radiación crece en forma logarítmica en función de la frecuencia.

Un punto a favor está dado por el valor de la capacitancia, la cual disminuye con el aumento en el grado de iteraciones; de igual manera, se puede obtener un grado de desacoplamiento menor, ya que la propiedad de autosemejanza hace que la antena radie a otras frecuencias y produzca una potencia de retorno menor, sin desconocer que estas pérdidas también son ocasionadas por la constante dieléctrica del material.

Al igual que en una *loop* circular, se obtiene menor eficiencia que con otras antenas; esto se presenta porque los electrones fluyen en la antena de un modo circular.

La antena fractal de Mandelbrot en su séptima iteración presenta la distribución de corriente y características de radiación similares a una antena *loop* circular monobanda clásica (el diseño del fractal en todas sus iteraciones se realizó siguiendo el mismo procedimiento de una *loop* pequeña); sin embargo, la reactancia de entrada es notablemente distinta en estos dos tipos de antenas. Se podrían comparar las impedancias de entrada de las antenas de Mandelbrot con antenas *loop* similares, pero éste no fue el propósito de nuestra experiencia investigativa.

Se comprobó la propiedad de autosimilaridad del fractal en todas sus iteraciones, ya que las distribuciones de corriente son las mismas en cada réplica.

## CONCLUSIONES

Una antena fractal de Mandelbrot puede usarse como antena multibanda, puesto que incrementa la frecuencia de resonancia con un espaciado de 2, a medida que

umenta el número de iteraciones sin modificar el tamaño de la antena.

El patrón de radiación cambia cuando el número de iteraciones se incrementa, ya que se producen pequeñas réplicas de la misma antena, presentando así diferentes lóbulos de radiación para distintas frecuencias.

La antena con 16 iteraciones reúne propiedades espectrales y de radiación de las antenas con menor número de iteraciones (7, 10, 13). De igual manera, no se observa interferencia entre las frecuencias de resonancia de dicha antena.

Las altas pérdidas y bajas eficiencias en las antenas fractales de Mandelbrot limitan sus aplicaciones a pequeña señal (puede ser útil en recepción), y se traduce en una desventaja frente a otros modelos de antenas fractales.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Mandelbrot, B.B. (1983). *The Fractal Geometry of Nature*, Nueva York: W.H. Freeman.
- [2] Falconer, K.J. (1990). *Fractal Geometry: Mathematical Foundations and Applications*, Nueva York: Wiley.
- [3] Peitgen, H.O.; Henriques, J.M. & Penedo, L.F. (eds.). (1991). *Fractals in the Fundamental and Applied Sciences*. Amsterdam: North Holland.
- [4] Cherepanov, G.P.; Balankin, A.S. & Ivanova, V.S. (1995). Fractal fracture mechanics. *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 51, pp. 997-1033.
- [5] Jeng, J.H.; Varadan, V.V. & Varadan, V.K. (1987). Fractal finite element mesh generation for vibration problems, *J. Acous. Soc. Amer.*, vol. 82, pp. 1829-1833.
- [6] Lakhtakia, A.; Holter, N.S.; Varadan, V.K. & Varadan, V.V. Self-similarity in diffraction by a self-similar fractal screen. *IEEE Trans. Ant. Propagat.*, vol. 35, pp. 236-239.
- [7] Jaggard, D.L. (1995). Fractal electrodynamics: Wave interactions with discretely self-similar structures en *Electromagnetic Symmetry*. Taylor, pp. 231-280.
- [8] Jaggard, D.L. (1990). On fractal electrodynamics en *Recent Advances in Electromagnetic Theory*. Springer Verlag, pp. 183-224.
- [9] Peitgen, H.O.; Jurgens, H. & Saupe, D. (1992). *Chaos and Fractals: New Frontiers of Science*. Nueva York: Springer-Verlag.
- [10] Werner, D.H.; Werner, P.L. & Church, K.H. (2001). Genetically engineered multiband fractal antennas. *Electron. Lett.*, vol. 37, pp. 1150-1151.
- [11] Werner, D.H.; Werner, P.L.; Church, K.H.; Culver, J.W. & Eason, S.D. (2001). Genetically engineered dual-band fractal antennas. *IEEE AP-S Inter. Symp. 2001*, vol. 3, pp. 628-631.
- [12] Jacquin, A.E. (1993). Fractal image coding: A review. *Proc. IEEE*, vol. 81, pp. 1451-1465.
- [13] Wohlberg, B. & DeJager, G. (1999). Review of the fractal image coding literature. *IEEE Trans. Image Processing*, vol. 8, pp. 1716-1729.
- [14] Barnsley, M.F. & Hurd, L.P. (1993). *Fractal Image Compression*. Wellesley, MA: A.K. Peters.
- [15] Collin, R.E. & Zucker, F.J. (1969). *Antenna Theory Pt. 1*. Nueva York: McGraw-Hill.
- [16] Wheeler, H.A. (1975). Small Antennas. *IEEE Trans. Ant. Propagat.*, vol. AP-23, pp. 462-469.
- [17] Jaggard, D.L. (1997). Fractal electrodynamics: From super antennas to superlattices. *Fractals in Engineering*, Springer, pp. 204-221.
- [18] Werner, D.H.; Haupt, R.L. & Werner, P.L. (1999). Fractal antenna engineering: The theory and design of fractal antenna arrays. *IEEE Ant. Propagat. Mag.*, vol. 41, N° 5, pp. 37-59.
- [19] Walker, G.J. & James, J.R. (1998). Fractal volume antennas. *Electron. Lett.*, vol. 34, pp. 1536-1537.
- [20] Werner, D.H.; Werner, P.L.; Jaggard, D.L.; Jaggard, A.D.; Puente, C. & Haupt, R.L. (1999). The theory and design of fractal antenna arrays. *Frontiers in Electromagnetics*, D.H. Werner and R. Mittra (eds.), pp. 94-203.
- [21] Baliarda, C.P.; Romeu, J. & Cardama, A. (2000). The Koch monopole: A small fractal antenna. *IEEE Trans. Ant. Propagat.*, vol. 48 pp. 1773-1781.
- [22] Werner, D.H.; Rubio Bretones, A. & Long, B.R. (1999). Radiation characteristics of thin-wire ternary fractal trees. *Electron. Lett.*, vol. 35, pp. 609-610.
- [23] Puente, C.; Romeu, J.; Bartolome, R. & Pous, R. (1996). Perturbation of the Sierpinski antenna to allocate operating bands. *Electron. Lett.*, vol. 32, pp. 2186-2187.
- [24] Kraus, John D. (1988). *Antennas*, 2<sup>nd</sup> ed. McGraw Hill.
- [25] Balanis, C.A. (1982). *Antenna Theory, Analysis and Design*, Harper & Row, Publishers.
- [26] Vinoy, K.J. (2002). *Fractal Shaped Antenna Elements for Wide-and Multi- band Wireless Applications*. The Pennsylvania State University The Graduate School College of Engineering, August.
- [27] González, J.M. & Romeu, J. (2002). *Task 1.1 Final Report, Fractalcoms Project (IST 2001-33055)*. Deliverable D1, Dec. 17th.
- [28] Jasik, H. (ed.). (1961). *Antenna Engineering Handbook*, Nueva York: McGraw-Hill.
- [29] Harrington, R.F. (1968). *Field Computations by Moment Methods*, Nueva York: Macmillan.

### Páginas web

www.Fractales.org  
<http://Omega.ilce.edu.mx:3000/sities/ciencia/volumen3/150/hm/sec4.htm>  
[www.xtec.es/jdomen28/article6.htm](http://www.xtec.es/jdomen28/article6.htm)  
[www.sunleitz.com/spanish/quees.html](http://www.sunleitz.com/spanish/quees.html)  
[www.Geocities.com/ingeniería\\_antnas/texto6.htm](http://www.Geocities.com/ingeniería_antnas/texto6.htm)  
[www.ultrafractal.com](http://www.ultrafractal.com)

### Empresas:

Taconica: Advanced Dielectrics Division  
 Fractal Antena Systems, e-mail: [aerlich@fractenna.com](mailto:aerlich@fractenna.com)  
 Fractus  
 T&M Antenas

GERENCIA DE PROYECTOS

# Gerencia de proyectos por valor ganado

## Earned value project management

### GERMÁN GUTIÉRREZ PACHECO

Ingeniero civil de la Universidad Nacional de Colombia, maestría en ingeniería de sistemas, Master of Science in Engineering - University of Pennsylvania, Master's Certificate in Project Management - George Washington University, Project Management Professional (PMP®). Exgerente nacional de ingeniería de sistemas de IBM de Colombia. Exgerente del Programa de Sistemas Mayores de IBM para Latinoamérica. Exgerente de servicios profesionales de NCR. Profesor y director de la Unidad de Proyectos de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

### CÉSAR AUGUSTO LEAL CORONADO

Ingeniero civil y especialista en recursos hidráulicos y medio ambiente de la Escuela Colombiana de Ingeniería, Master of Engineering in Construction Engineering and Management - University of Michigan Ann Arbor, Project Management Professional (PMP®). Profesor de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

Artículo recibido: 13/04/2007  
Evaluación par externo: 21/06/2007  
Evaluación par externo: 05/07/2007  
Aprobado: 28/08/2007

### Resumen

Los proyectos tienen una importancia fundamental en el desarrollo de las organizaciones, la cual se hace más evidente en el contexto de lo que hoy en día se conoce como la "Gerencia Moderna de Proyectos", en la que los proyectos representan un instrumento primordial para implementar los objetivos estratégicos de la organización y desarrollar su estrategia.

En consecuencia, debe entenderse claramente que el propósito de todo proyecto es contribuir en forma efectiva a la consecución de los objetivos estratégicos planteados.

Por otra parte, es necesario entender que el éxito en la gerencia de un proyecto implica, principalmente, cumplir los requerimientos en un alcance, un tiempo y un costo acordados.

Conseguir el éxito en la gerencia de un proyecto no es una tarea sencilla, y la obtención de ese objetivo implica desarrollar cuidadosamente un plan apropiado para alcanzar los elementos claves (alcance, tiempo y costo), así como controlarlos adecuadamente.

El control apropiado involucra un tratamiento y gerencia integrales alrededor de lo que se ha llamado "Triple Restricción" (alcance, tiempo y costo).

Éste es, precisamente, el contexto dentro del cual la técnica del *Earned Value Management* tiene un significado especial y una contribución efectiva al éxito en la gerencia de un proyecto.

**Palabras claves:** Gerencia de proyectos, valor ganado.

### Abstract

Projects have a paramount importance in the framework of the organization's development. This importance becomes more evident in the context of what is meant by "Modern Project Management", within which Projects represent a key instrument to implement the organization's strategic objectives and the strategy development itself.

Consequently, it must be clearly understood that the project's goal is to effectively contribute to the specific strategic objectives in mind.

On the other hand, it is mandatory to fully understand that the project's management success implies, mainly, to achieve the compliance of requirements in terms of agreed scope, time and cost.

To attain the project's management success is not an easy task and to achieve this purpose implies to carefully develop an appropriate plan oriented to reach these key elements (scope, time and cost), as well as to control them properly.

The appropriate control involves an integrated the treatment and management around the so called "triple constraint" (scope, time and cost).

It is, precisely, the issue and context within which the technique of "Earned Value Management" has a special meaning and effective contribution to the project's success.

**Keywords:** Project management, earned value.



## INTRODUCCIÓN

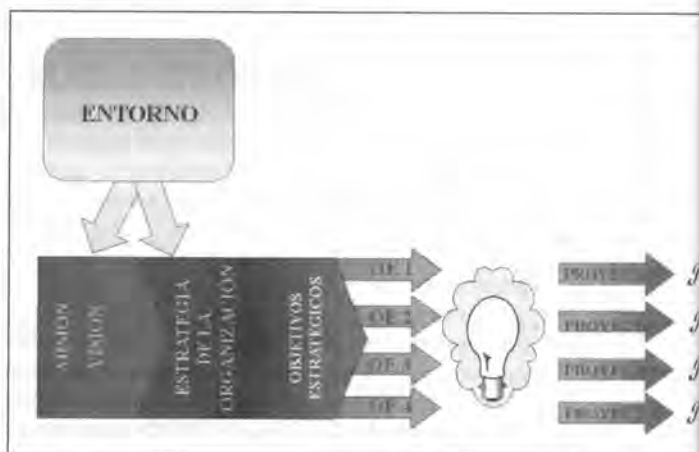
En el mundo empresarial actual, es crítico que las organizaciones identifiquen la necesidad de una estrategia claramente definida como única alternativa válida de respuesta ante la cada vez mayor exigencia en productividad y competitividad que la globalización representa. En otras palabras, una organización que no tenga bien estructurada su estrategia empresarial está condenada a desgastarse en esfuerzos fracturados y sin dirección, que no aportan apropiadamente a su desarrollo; por el contrario, si la organización estructura y desarrolla una estrategia empresarial que se origine en el correcto análisis de su entorno, y que claramente defina el cómo avanzar de lo que es (Misión) a lo que se propone alcanzar (Visión), se facilitará no sólo el desarrollo esperado y correctamente direccionado de la organización, sino que al mismo tiempo mejorará en la toma de decisiones estratégicas. La estrategia de la organización está compuesta por objetivos estratégicos que deben ser dinámicos (en constante cambio), y es en este momento donde los proyectos se convierten en protagonistas, ya que son el medio, la herramienta a través de la cual la organización cumplirá sus objetivos estratégicos y así conseguirá avanzar, siguiendo su estrategia hacia la Visión establecida.

Habiendo entendido la importancia de los proyectos dentro de una organización, el siguiente paso lógico es hacer lo necesario para garantizar que éstos se desarrollen de la mejor manera posible, lo cual es responsabilidad de la Gerencia de Proyectos. El estado del arte con respecto a la Gerencia Moderna de Proyectos identifica un amplio número de procesos necesarios que deben seguirse para asegurar el cumplimiento de los objetivos. Dentro de dichos procesos una parte crítica pertenece a los de control, que se ocupan de medir desviaciones con respecto al plan y de tomar acciones correctivas para volver a él. Este artículo trata sobre los fundamentos de una de las técnicas de control de proyectos más recientes y exitosas utilizadas en la actualidad, llamada *Earned Value Management* (EVM) o Gerencia por Valor Ganado.

## MARCO CONCEPTUAL

Como ya se mencionó, la importancia de los proyectos en una organización se debe a que éstos son el componente activo de la estrategia organizacional; es decir,

son el medio a través del cual la organización se propone pasar, competitivamente, de un estado presente a otro estado futuro, en un tiempo dado.



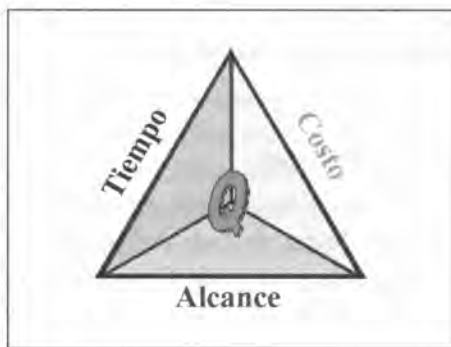
Se encuentran muy diversas definiciones de lo que se debe entender por proyecto, y aunque a primera vista se puede pensar que difieren bastante, en realidad en el fondo todas coinciden y giran alrededor de las que se podrían llamar características principales de un proyecto, entre las que están:

- Es limitado en el tiempo (tiene fechas planeadas de inicio y de fin).
- Tiene un producto definido, que puede ser un bien o un servicio.
- Tiene entregables que se deben definir y acordar entre cliente y contratista.
- Se desarrolla a través de actividades que están relacionadas entre sí.
- Necesita recursos (humanos, financieros, físicos).
- Tiene un patrocinador (*sponsor*).
- Es singular, tanto en el esfuerzo como en el producto que produce.

Es necesario, entonces, saber hacer el esfuerzo adecuado para lograr que el proyecto se desarrolle y cumpla con los objetivos por los cuales se originó. La gerencia de proyectos asume esta responsabilidad, para lo cual establece una serie de procesos gerenciales que deben aplicarse correctamente para conseguir el éxito.

En forma muy básica, se puede definir el éxito en la gerencia de un proyecto como el cumplimiento de lo que se conoce como la "triple restricción" (*triple cons-*

train), conformada por el alcance, el tiempo y el costo. Es decir, no se puede entender que la gerencia de un proyecto sea exitosa si, por ejemplo, entrega el producto solicitado pero sin cumplir con el tiempo o el costo acordados; así como es obvio que la gerencia de un proyecto no es exitosa si cumple con el tiempo y el costo acordados, pero sin entregar lo requerido en la forma en que se acordó. El éxito en la gerencia de un proyecto consiste, entonces, en lograr el alcance del proyecto (cumplir requerimientos) dentro del tiempo y del costo acordados.



El correcto entendimiento de esta frase corta y contundente evidencia la complejidad de conseguir el éxito en la gerencia de un proyecto en la práctica, ya que si se analiza únicamente la adecuada definición del alcance de un proyecto es un proceso bastante delicado, que unido a lo que implica planear y controlar no sólo lo referente al alcance sino también lo referente al costo y el tiempo, implica un esfuerzo de muy alto nivel, con múltiples trabajos interrelacionados.

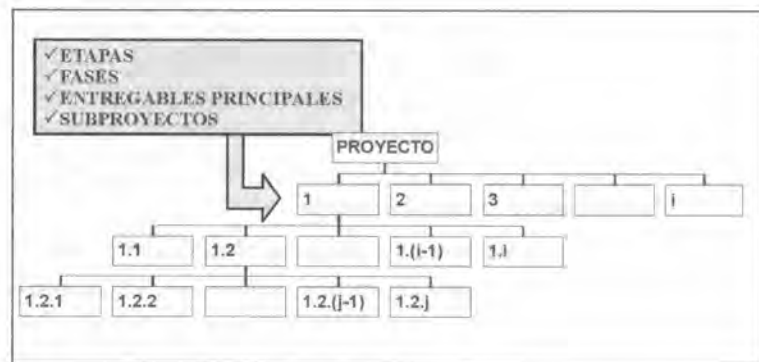
### Planeación

Entendiendo al gerente de proyectos como la persona responsable de la gerencia del proyecto, el cumplimiento de la triple restricción se establece como el indicador crítico en la medición del desempeño en esta función, razón por la cual se hace fundamental la elaboración adecuada, no sólo de un plan para cada uno de estos tres elementos claves, sino también de una forma clara y completa de controlar su cumplimiento. Hablando entonces de planes (líneas base) que son indispensables en un proyecto, es necesario mencionar los que deben crearse para cada uno de los componentes de la triple restricción.

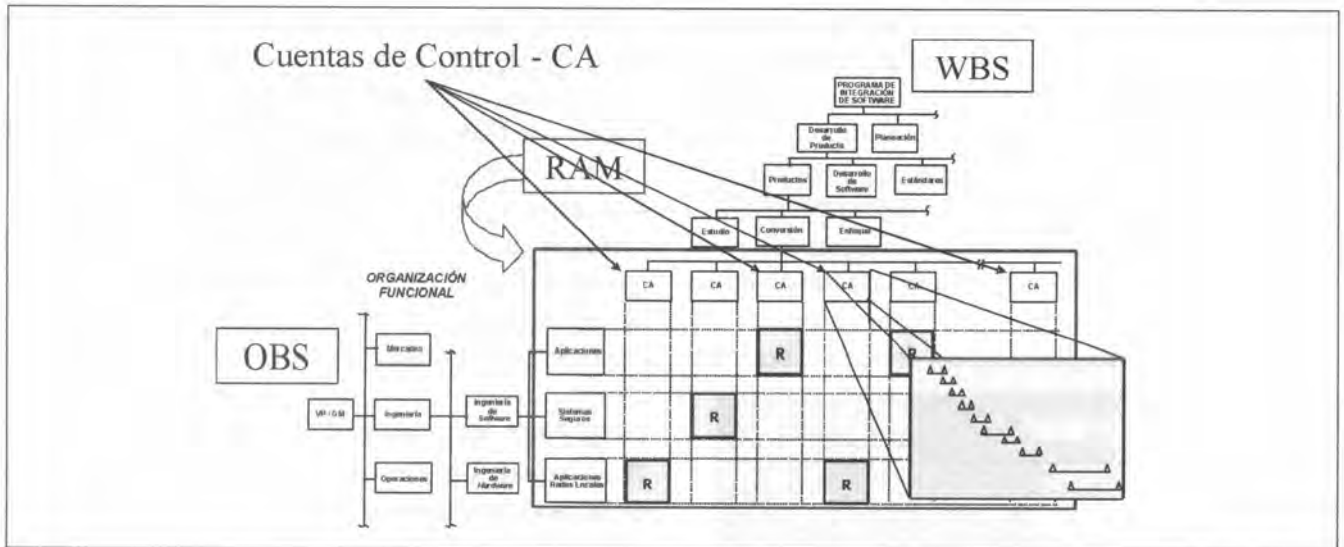
Para el alcance, que define qué incluye y qué no incluye el proyecto, la línea base está conformada por la Declaración de Alcance (*Scope Statement*) y por la Estructura de Descomposición del Trabajo (*WBS - Work Breakdown Structure*). Para el tiempo, que gira alrededor de la característica de temporalidad propia de los proyectos, la línea base es la programación (*Schedule*) del proyecto. Para el costo, que es una restricción porque las organizaciones no tienen recursos ilimitados, la línea base es el presupuesto (*Budget*) del proyecto.

### Estructura de Descomposición del Trabajo (WBS)

“La Estructura de Descomposición del Trabajo (WBS) es la descomposición jerárquica, orientada a los entregables del trabajo, que debe ejecutar el equipo del proyecto para lograr los objetivos propuestos y crear los entregables requeridos”<sup>(1)</sup>.



La WBS organiza en una forma gráfica el *qué* hay que hacer en el proyecto, no define ni trata sobre recursos, tiempo, costos o secuencia; específicamente define lo que hay que hacer y lo estructura de acuerdo con la descomposición de entregables. Los primeros niveles de una WBS se pueden estructurar siguiendo diferentes enfoques, es decir, el primer nivel de descomposición puede estar determinado por etapas del ciclo de vida, por fases del proyecto, por entregables principales, por subproyectos o por una combinación de todas las anteriores. Esta decisión depende del gerente de proyectos, quien debe tener en cuenta el entorno, la industria, la organización y la naturaleza del proyecto en sí. Cada una de las ramas de la WBS puede llegar a diferentes niveles de descomposición, encontrando en cada nivel descendente un mayor detalle en la definición del alcance del trabajo.



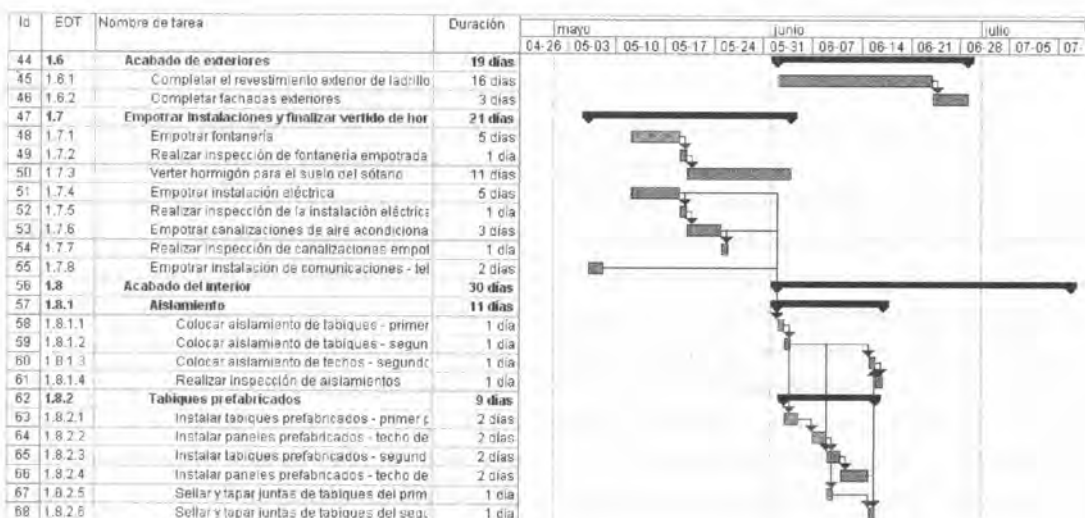
Los entregables pertenecientes al último nivel en cada una de las ramas son conocidos como Paquetes de Trabajo (*Work Packages*) y cumplen un papel importante en el control del proyecto, ya que guardan una estrecha relación con las cuentas de control, que es el nivel al cual el gerente de proyectos desea llevar el control del proyecto. En otras palabras, la descomposición de la WBS debe llevarse hasta el nivel al cual el gerente de proyectos desea controlar.

Además de ayudar a definir el alcance del proyecto, la WBS sirve para múltiples propósitos, entre otros mejorar la precisión de los estimados de tiempo y de costos, facilitar la asignación de responsabilidades, mejorar y facilitar el control y ganar compromiso hacia el proyecto por parte del equipo encargado del mismo.

### Programación (*Scheduling*)

Programar un proyecto consiste en determinar las fechas de inicio y de fin de cada actividad y, por tanto, definir las fechas de inicio y de fin del proyecto.

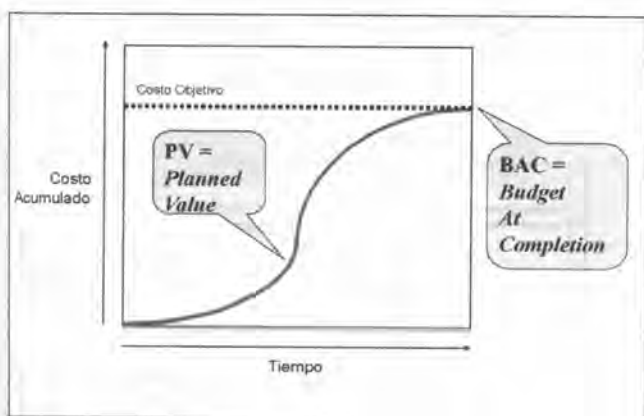
Se debe entender como un proceso iterativo no solamente porque en su desarrollo hay que tener en cuenta restricciones en fechas y costos, y los recursos deben haberse nivelado para evitar sobrecargas, sino porque a medida que el trabajo del proyecto avance, siempre existirán cambios que afecten el plan original, así como riesgos que se hayan identificado que pueden o no haber ocurrido. Para desarrollar la programación del proyecto es necesario tomar los Paquetes de Trabajo de la WBS y seguir su descomposición hasta el nivel de actividades, para así hallar el listado de actividades neces-



rias para el proyecto. Igualmente se requiere desarrollar los estimados de recursos, tiempo y costos, así como desarrollar un diagrama de red, en el cual se muestren claramente la secuencia y dependencias entre las actividades del proyecto. La programación se puede desarrollar a través de diferentes métodos, como son el Método de la Ruta Crítica (CPM - *Critical Path Method*), *Program Evaluation and Review Technique* (Pert), *Critical Chain Project Management* (CCPM) y *Graphical Evaluation and Review Technique* (Gert).

### Presupuesto (*Budget*)

Es un error común entender el presupuesto como un simple valor monetario o como una tabla estructurada de costos. Para evitar caer en este tipo de errores es necesario preguntarse, cuando se esté desarrollando un plan, si lo que se está obteniendo como línea base va a permitir realizar un control adecuado. Presupuestar los costos del proyecto consiste en asignar los estimados de costos a períodos de tiempo según la programación planteada, para así poder encontrar una línea base de costos sobre la cual se pueda controlar. El presupuesto se construye de acuerdo con la WBS y la programación, para representar los costos por período de cada una de las cuentas de control.



Al producir el gráfico del presupuesto, representado como una acumulación de los costos presupuestados, desde el comienzo hasta el final del proyecto, se obtiene la llamada "curva S" o curva de Valor Planeado (PV), la cual integra y refleja la "triple restricción" (alcance, tiempo y costo). Esta línea base (la curva completa) permite realizar control de costos adecuadamente, en cualquier momento en el tiempo.

### Control

Éste se debe entender como un proceso gerencial que, planteado en forma muy básica, consta de dos partes principales: medir desviaciones con respecto al plan y tomar acciones correctivas para volver a él. Teniendo claro este concepto, se entiende que para poder medir desviaciones es necesario haber elaborado correctamente el plan. Y ya teniendo claro que el éxito en la gerencia de un proyecto se basa en el cumplimiento de la "triple restricción", cuando se proceda a medir desviaciones se debe hacer referencia a estos tres elementos claves. Por tal razón en este artículo se ha presentado en forma concreta lo que debe entenderse como la línea base de cada uno de los componentes de la "triple restricción".

Habiendo entendido esto, es muy importante no olvidar el segundo componente del control: tomar acciones correctivas para volver al plan. El proceso de control estará incompleto y mal desarrollado si únicamente se presentan las desviaciones encontradas, así como también estará incompleto si no se cubren sus dos componentes sobre los elementos de la "triple restricción". Una de las técnicas que permiten el correcto desarrollo del control en un proyecto es el *Earned Value Management* (EVM).

### EARNED VALUE MANAGEMENT

#### Componentes claves

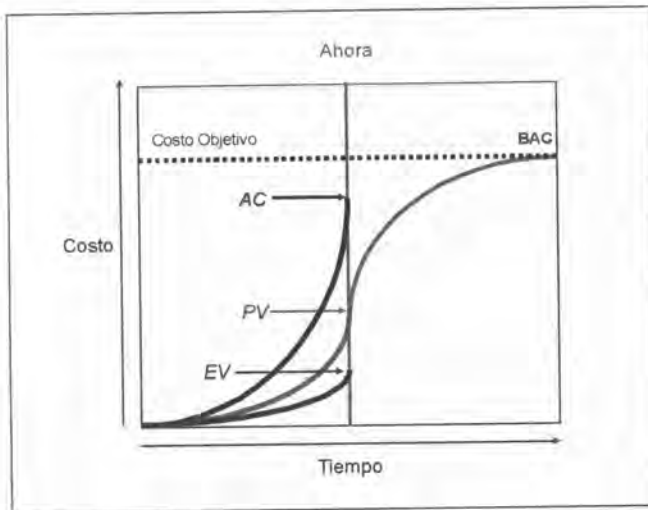
Para poder implementar con eficacia la técnica de *Earned Value Management* (EVM), es necesario haber planeado adecuadamente el proyecto en lo que se refiere a alcance, tiempo y costo. En otras palabras, se requiere haber desarrollado una WBS, un cronograma y un presupuesto que representen las líneas base de alcance, tiempo y costo, respectivamente.

El análisis de Valor Ganado se basa en tres valores fundamentales, establecidos en la fecha de control, a nivel de actividad, cuenta de control o proyecto:

- **Valor Planeado (PV).** Es el costo presupuestado del trabajo programado, desde el comienzo del proyecto hasta la fecha de control.
- **Costo Real (AC).** Es el costo real del trabajo realizado desde el comienzo del proyecto hasta la fecha de control.

- **Valor Ganado (EV).** Es el costo presupuestado del trabajo realizado desde el comienzo del proyecto hasta la fecha de control.

En el gráfico siguiente pueden observarse estos tres valores fundamentales hasta la fecha de control:



Esos tres valores, en la situación hipotética planteada en el gráfico anterior, representan:

- Un Valor Planeado (PV) en la fecha de control, un Valor Ganado (EV) menor que el PV, lo cual significa, dado que ambos valores son costos presupuestados, que a la fecha se ha realizado menos trabajo del planeado hasta la fecha.
- Un Costo Real (AC) mayor que el EV, lo cual indica, ya que ambos representan trabajo realizado, que éste ha costado más de lo presupuestado.

Teniendo en cuenta lo anterior, la técnica de *Earned Value Management* plantea las siguientes métricas respecto al desempeño del proyecto a la fecha:

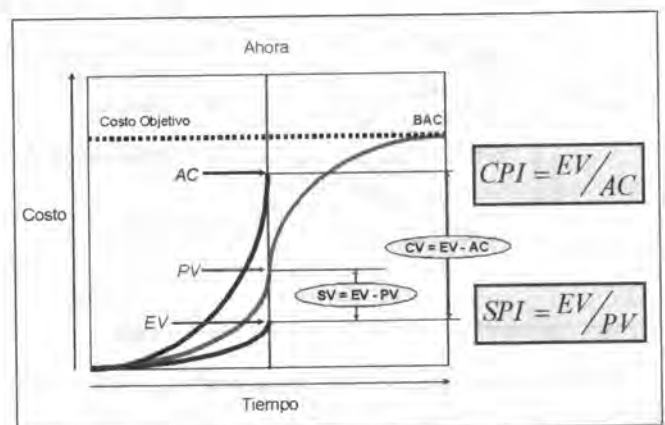
- **Desviación en Costos (CV):**  $CV = EV - AC$ , es decir, costo presupuestado del trabajo realizado menos costo real del trabajo realizado. El ideal es que no se presente desviación ( $CV = 0$ ).  $CV < 0$  indica que se está excediendo el presupuesto a la fecha.  $CV > 0$  indica que los costos del proyecto están por debajo de lo presupuestado.
- **Índice de Desempeño en Costos (CPI):**  $CPI = EV / AC$ , lo cual indica la relación entre el valor que se le

ha agregado al proyecto y el costo en que se ha incurrido. El valor ideal es  $CPI = 1$ , indicando que, por cada peso gastado, se ha agregado un peso de valor al proyecto.  $CPI < 1$  indicaría que por cada peso gastado, se ha agregado una fracción de peso al valor del proyecto. Por el contrario, si  $CPI > 1$ , por cada peso gastado se estaría agregando más de un peso al valor del proyecto.

En forma similar a las métricas de costos, la técnica de EVM plantea las correspondientes métricas de cronograma (tiempo):

- **Desviación en Cronograma (SV):**  $SV = EV - PV$ , es decir, costo presupuestado del trabajo realizado menos costo presupuestado del trabajo planeado. El ideal es que no se presente desviación ( $SV = 0$ ).  $SV < 0$  indica que el trabajo está retrasado.  $SV > 0$  indica que el trabajo está adelantado, respecto a lo planeado.
- **Índice de Desempeño en Cronograma (SPI):**  $SPI = EV / PV$ . El valor ideal es  $SPI = 1$ , indicando que se ha realizado exactamente el trabajo planeado.  $SPI < 1$  indicaría que se ha realizado menos trabajo del planeado. Por el contrario, si  $SPI > 1$ , se ha realizado más trabajo del planeado a la fecha.

En el siguiente gráfico se representan las métricas mencionadas:

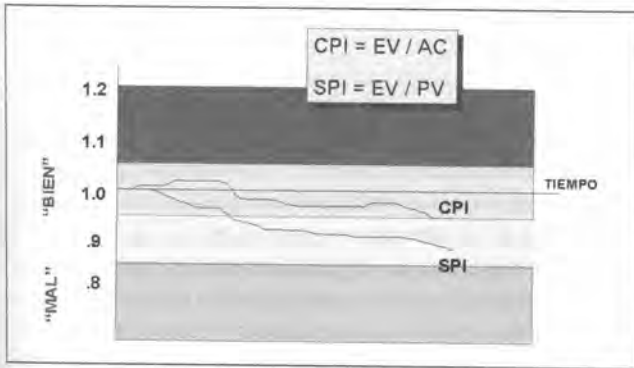


Sin embargo, es importante destacar que las métricas referentes al cronograma (SV y SPI) pierden su significado a medida que se acerca la finalización del proyecto pues, por definición, al terminar el proyecto (aunque sea muy tarde respecto a lo planeado), se ha

brá realizado la totalidad del trabajo planeado y, por tanto,  $EV = PV$ . Esto indicaría que  $SV = 0$  y  $SPI = 1$ , dando la impresión de que el proyecto ha terminado a tiempo, aunque lo haya hecho mucho más tarde de lo planeado. Por esta razón, las métricas de desempeño en cronograma planteadas por la técnica de EVM deben utilizarse cautelosamente hacia el final del proyecto para evitar conclusiones erróneas. Como respuesta a este problema, recientemente se han empezado a plantear nuevas métricas para la medición del desempeño en cronograma, las cuales serán motivo de un artículo posterior.

**Tendencias**

La elaboración de curvas de tendencias es fundamental para poder entender la tendencia del desempeño del proyecto. Poder establecer la tendencia que presentan las curvas de CPI y SPI en el tiempo permite obtener conclusiones valiosas sobre el desempeño futuro del proyecto.

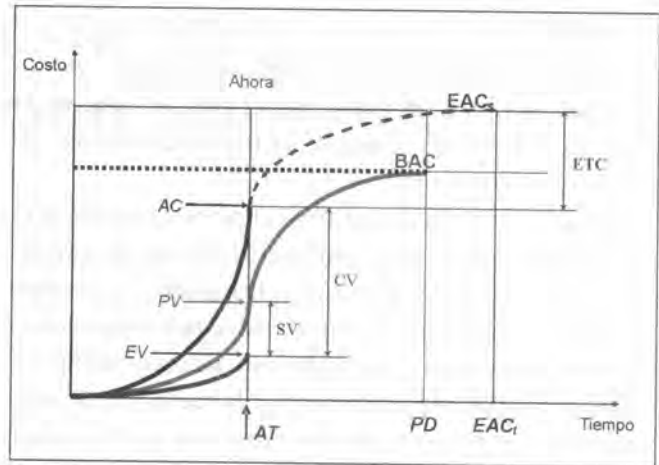


**Pronósticos**

Uno de los aportes más valiosos de la técnica de *Earned Value Management* es la posibilidad de pronosticar, con base en el desempeño hasta la fecha, cuál será el costo del proyecto cuando termine y cuánto dinero se requiere, a partir de la fecha, para terminar el proyecto.

El siguiente gráfico ilustra la forma como se pueden establecer los valores de EAC (Estimado al terminar) y ETC (Estimado para terminar) con base en el desempeño hasta la fecha.

Desde el comienzo del proyecto hasta la fecha, el trabajo realizado ha costado AC; sin embargo, el costo presupuestado de ese mismo trabajo era EV. Por tanto,



el trabajo faltante estará representado por  $ETC = EAC - AC$ . A costos presupuestados, el trabajo faltante costará  $ETC = BAC - EV$  (el presupuesto para todo el proyecto, menos el costo presupuestado del trabajo efectivamente realizado). Entonces,

$$EAC - AC = BAC - EV$$

$$EAC = BAC - EV + AC = BAC - (EV - AC)$$

$$EAC = BAC - CV$$

La deducción anterior asume que, desde la fecha actual hasta la finalización del proyecto, los costos se comportarán de acuerdo con lo presupuestado, lo cual implica asumir que, si ha habido desviaciones en el pasado, éstas fueron atípicas o coyunturales.

Si, por el contrario, el proyecto ha venido presentando una tendencia continua de desviaciones, el CPI indicará cual es esa tendencia. En ese caso,

$$EAC = AC + (BAC - EV) / CPI = AC + BAC / CPI - EV / CPI;$$

como  $EV / CPI = AC$ , entonces  $EAC = AC + BAC / CPI - AC$

$$EAC = BAC / CPI$$

Puede suceder que el análisis de las desviaciones que se han presentado hasta la fecha lleve a la conclusión de que el presupuesto está totalmente errado. En este caso, para calcular EAC sería necesario volver a planear totalmente lo que resta del proyecto.

### Conclusiones

La correcta planeación y el adecuado control de un proyecto cumplen un papel crítico para el éxito en la gerencia del mismo (cumplir la triple restricción: alcance, tiempo y costo).

Cuando se estén desarrollando planes, es necesario cuestionarse y verificar continuamente que lo encontrado va a permitir realizar un control adecuado sobre el elemento planeado. Un control adecuado debe, como mínimo, cubrir lo relacionado con alcance, tiempo y costo, y no limitarse únicamente a la medición de desviaciones con respecto al plan, sino que ha de incluir también las acciones correctivas necesarias para volver a él. Estas acciones pueden implicar, entre otras, decisiones como reasignación de recursos a las actividades, aprovechamiento de holguras libres o totales y revisión de las relaciones lógicas entre actividades.

La técnica de *Earned Value Management* permite hacer una gestión integrada de alcance, tiempo y costos. Especialmente en lo referente a costos, permite llegar

a conclusiones más precisas que con los métodos tradicionales, respecto a las reales desviaciones, los índices de desempeño y los pronósticos de lo que falta para terminar el proyecto.

En artículos posteriores se discutirá el aspecto de *Earned Schedule* para encontrar métricas confiables respecto al desempeño en tiempos.

### Bibliografía

1. *A Guide to the Project Management Body of Knowledge* (2004). Third Edition (PMBOK® Guide). An American National Standard ANSI/PMI 99-001-2004. Project Management Institute.
2. *Earned Value Project Management* (2000). Quentin W. Fleming & Joel M. Koppelman. PMI.
3. *Earned Value Management Practice Standard*, PMI.
4. *Earned Value Project Management Method and Extensions* (2003). Frank T. Ambari. *Project Management Journal*, December.
5. *Deltek Earned Value Management Guide* (2006). Deltek Systems Inc.
6. *Project Management - A Systems Approach to Planning, Scheduling and Controlling*. Harold Kerzner, Ph.D.

ADMINISTRACIÓN

# El presupuesto como eje de la administración universitaria

**MARÍA VICTORIA AYALA DE REY**

Economista del Colegio Mayor de Nuestra Señora del Rosario. Vicerrectora administrativa de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

Artículo recibido: 29/08/2007  
Evaluación par interno: 7/09/2007  
Aprobado: 28/08/2007

## Resumen

A lo largo de este artículo se muestra la importancia del presupuesto en la gestión universitaria como un mecanismo para identificar las debilidades económicas de los proyectos institucionales. Las universidades, al ser instituciones sin ánimo de lucro, se deben gerenciar como empresas rentables que permitan crecer y mantenerse en el tiempo; de ahí la importancia de una gestión financiera eficiente.

## Abstract

This document illustrates the importance of budget in the university management as a mechanism to identify the weaknesses of institutional projects. Universities as non-profit institutions, should be managed as profitable enterprises to grow and be maintained over time; hereby, the importance of a efficient financial management.



Las organizaciones cuya misión es prestar servicios a grandes grupos comunitarios y generar beneficios sociales y culturales en los últimos años están en pleno crecimiento, pues tienen gran impacto en la estructura económica y social de los países. Todas las tareas sociales importantes, como el cuidado de la salud, la educación, la preservación del medio ambiente, la búsqueda de nuevos conocimientos o la defensa nacional, se confían a grandes organizaciones diseñadas a perpetuidad y dirigidas por sus propios administradores; el desempeño de la sociedad moderna o incluso la supervivencia de cada individuo depende cada vez más del éxito de estas instituciones<sup>[1]</sup>.

Las organizaciones sin fines de lucro cuantifican el éxito de manera distinta de como lo hacen otras corporaciones, pero afrontan problemas muy similares a las empresas con ánimo de lucro: obtener un trabajo productivo y lograr que sus empleados cumplan metas, y desde el punto de vista de su responsabilidad social, no difieren de una empresa productiva, salvo por su misión específica.

Un número cada vez más elevado de profesionales están dedicados a la administración de las organizaciones sociales (hospitales, fuerzas armadas, universidades, entidades escolares), buscando transformarlas en compañías eficientes<sup>[2]</sup>.

Si bien las empresas han crecido durante los últimos 50 años, las organizaciones con fines sociales se han desarrollado mucho más. En las primeras décadas del siglo XX ninguna universidad tenía 6.000 alumnos y sólo muy pocas superaban los 5.000, mientras que en la actualidad la universidad de 6.000 estudiantes es pequeña; por tal motivo estas instituciones se han transformado en organizaciones gigantescas, muy complejas de administrar<sup>[3]</sup>.

Las universidades en general soportan en mayor medida, frente a otras organizaciones, el peso de los esfuerzos intrínsecamente improductivos. Son instituciones que difícilmente miden resultados productivos,

por cuanto en ellas no existe la disciplina de cuantificar su desempeño ni está en su mira la eficiencia. La improductividad siempre está justificada, hay también una tendencia a aferrarse al pasado en lugar de desecharlo y se pierde mucho tiempo en la defensa de hábitos y tradiciones informales que ya no tienen sentido ni sirven a ningún propósito.

Estas organizaciones pueden, por su naturaleza, asignar recursos a actividades que no necesariamente generan rendimientos económicos, sino que deben ser productivas académica y socialmente, como por ejemplo laboratorios de investigación, proyectos sociales, etc. El aspecto negativo es que los directores de este tipo de actividades se aferran a proyectos que tienen pocas probabilidades de producir resultados o cuya improductividad está demostrada, por lo que se incrementan los costos sin mayores beneficios; el esfuerzo de la administración entonces es limitar estos costos y compensarlos, porque en muchos casos no es posible eliminarlos.

Las universidades requieren para ser eficientes la gestión presupuestal, un sistema y estructura organizacional que se apoye en el trabajo en equipo de docentes y administrativos, y que se oriente hacia la utilización eficiente de los recursos.

Por ello es fundamental introducir el criterio de planeación, soportado en el presupuesto por programas y centros de costos, y la definición de los criterios e indicadores con que se miden los resultados, para permitir la autoevaluación económica, con el fin de redefinir objetivos y retirar actividades improductivas para evitar la mala distribución de los recursos y los esfuerzos en actividades donde los resultados son insatisfactorios. Esto facilita el establecimiento de políticas y estrategias, prioridades y metas a corto, mediano y largo plazos.

La universidad es una entidad que concierne no solamente a los estudiantes y a sus padres, sino a los fundadores, a los docentes, al personal administrativo y de servicios, a los contribuyentes, benefactores y a la comunidad en general; por ello se ha introducido en las últimas décadas el concepto de "rendición de cuentas a la sociedad" a través de los sistemas de información de carácter público, que presentan el quehacer de las instituciones de educación superior por medio de indicadores, como es el caso del SNIES.

- [1] Peter Druker (1995). *Gerencia para el futuro, el decenio de los 90 y más allá*. Editorial Norma.
- [2] Peter Druker (1998). *Tiempo de desafíos - tiempo de reinventones*, Editorial Hermes.
- [3] Peter Druker (1999). *Los desafíos de la gerencia para el siglo XXI*. Editorial Norma.

## LA GESTIÓN PRESUPUESTAL

La gestión presupuestal está basada en las previsiones hechas en función de condiciones internas y externas de la organización. Significa traducir en cifras los programas que hay que desarrollar para conseguir los objetivos establecidos en un plan. Hacer un presupuesto es tomar las medidas necesarias antes de gastar el dinero en lugar de hacerlo después<sup>[4]</sup>.

El presupuesto es un modelo económico de simulación, que considera a la institución en conjunto; no se puede desplazar, aumentar o disminuir una acción, sin que se produzca una serie de variaciones y efectos. Es, por tanto, un elemento fundamental para prever el futuro de una organización.

El manejo presupuestal es diferente del manejo contable. Sin embargo, se deben trabajar coherentemente y establecer entre ellos una integración de datos.

El presupuesto se articula claramente en tres etapas:

- **Previsión:** Estudio previo de la decisión, posibilidad y voluntad de cumplimiento.
- **Presupuesto:** Definición de objetivos y medios necesarios por alcanzarlos.
- **Control:** Diferencias observadas entre objetivos, realizaciones, explicación y aprovechamiento de estas desviaciones.

### Previsión

El diccionario define previsión como "ver, conocer por anticipado".

La previsión es una actitud voluntaria, es la expresión de una política, de una elección, de un compromiso sobre el futuro. Es, necesariamente, el marco dentro del cual se comporta la empresa, con mayor o menor exactitud; en esto consiste el problema de la gestión presupuestal.

Esto quiere decir que la actitud que asumen los directivos de la organización, así como los mandos medios, debe ser "común y voluntaria" para cumplir el presupuesto, el cual está enmarcado en una política general de la organización.

La previsión ha de ser una actitud científica. Uno de los fundamentos de la previsión es innegablemente el método científico: la base estadística y económica.

También debe ser una actitud colectiva, pese a que la empresa esta conformada por docentes de diferentes estamentos; en el caso de la universidad podríamos hablar del directivo, cuerpo docente y administrativo, y del estamento estudiantil. Todos estos grupos han de tener una misma actitud ante las políticas generales de la institución y deben ser partícipes y conocedores de las prioridades que se han de que reflejar en el presupuesto.

Para poder prever es necesario y fundamental manejar las estadísticas. Por ejemplo, en el caso de la universidad, para realizar un presupuesto se deben considerar estadísticas históricas de variables como:

- Tasa neta histórica de deserción por curso: se debe evaluar, por medio de la información estadística, el número de estudiantes que pierden, el número de estudiantes que se retiran por motivos diferentes del académico, el número de estudiantes transferidos de otras universidades y el número de estudiantes nuevos admitidos.
- Asignaturas en las cuales los estudiantes sufren más pérdidas,
- Número de solicitudes de inscripción a un programa.
- Número de créditos por semestre.

En términos económicos, se deben determinar los valores de matrícula, de inscripción, de certificados y de otros derechos pecuniarios.

Esta combinación de las tablas estadísticas con valores económicos permite manejar científicamente el presupuesto. Por tanto, es necesario contar con un sistema de información estadística.

### Presupuesto

La segunda etapa de la gestión presupuestal se apoya en la elaboración real del presupuesto. La definición más general que podemos dar es "Previsión de un conjunto de ingresos y gastos", lo que deja sentado su carácter financiero.

Qué es el presupuesto:

1. Atribución de objetos y de medios.
2. Un equilibrio microeconómico.

[4] L. Meyer (1994). *Gestión presupuestaria*. Ediciones Deusto.

3. Una atribución de responsabilidades.
4. Está en relación constante con el entorno económico y social.
5. Un modelo económico.

*Atribución de objetivos y de medios.* Una política a cualquier nivel se define por sus fines y por los medios que utiliza para alcanzarlos. El presupuesto contiene la evaluación en cifras de dos elementos:

1. En el campo de fines y objetivos se encuentra el presupuesto de inversión, de investigación, de extensión, en el caso universitario.
2. En el caso de los medios encontramos presupuesto de gastos de funcionamiento, de administración, etc., cuyos títulos son plenamente expresivos.

La relación entre fines y medios debe seguirse muy de cerca. Si se desea tener los medios necesarios para una política, se debe contar con una política de medios.

*El presupuesto como equilibrio microeconómico.* El presupuesto representa la comparación entre una serie de ingresos: algunos normales como las matrículas y otros excepcionales como las donaciones. En los gastos también sucede lo mismo: unos normales de funcionamiento y otros no permanentes (inversiones en planta física, laboratorios, equipos, etc.).

El presupuesto siempre debe presentar equilibrio. Para ello, la organización tiene que desarrollar acciones que permitan este resultado. El equilibrio se logra no necesariamente con recursos propios, ya que en algunos casos se deben obtener créditos para emprender proyectos a mediano y largo plazos; sin embargo, la dinámica de la institución y las acciones emprendidas deben permitir la estabilidad y el equilibrio económico.

*El presupuesto como atribución de responsabilidades.* Cuando se aprueba un presupuesto, se asumen responsabilidades: "Alcanzar por lo menos los objetivos previstos y no utilizar más medios de los señalados".

De esta noción se desprende una relación estrecha de responsabilidad entre el presupuesto y el comportamiento de la organización, puesto que hay una estructura administrativa que establece funciones y respon-

sabilidades de las distintas dependencias y departamentos; el presupuesto no es más que la traducción en cifras de esta distribución, que permite identificar y cuantificar todas las actividades en términos económicos.

No está de más aclarar que el presupuesto debe copiar fielmente el funcionamiento existente de la institución. La implantación de un presupuesto suele ser ocasión propicia para redimensionar la estructura administrativa, a veces en forma imperativa, puesto que al hacer intervenir valores monetarios, la atención de los responsables aumenta sensiblemente "Si la organización es deficiente, el control presupuestal es un medio insuperable para detectar errores".

*El presupuesto en relación constante con el entorno económico y social.* La influencia constante que ejercen los cambios en el entorno económico y social del país, como tasas de inflación, de devaluación, coyuntura económica, disminución de ingresos en los grupos familiares, políticas públicas, hace necesario tener en consideración estos factores que afectan el funcionamiento interno de la organización, y exigen estimar y cuantificar la percepción de estos fenómenos para incluirlos dentro del presupuesto, estableciendo premisas *a priori* dentro de un marco histórico previamente definido y basándose en conocimientos técnicos.

En la gestión presupuestal deben existir mecanismos y procedimientos de modificación para hacer flexible el presupuesto y permitir revisiones periódicas, con el fin de incluir los ajustes no previstos.

*El presupuesto como modelo económico.* Se entiende por modelo la representación simplificada del funcionamiento de un conjunto de variables económicas; en el aspecto económico, se trata más concretamente de un modelo matemático y contable de valores reales monetarios, que se relacionan a través de ecuaciones, unas contables y otras de conducta y comportamiento.

### Control

En un sentido estrictamente matemático y contable, control significa comparación entre previsiones y resultados, y se expresa con la ecuación:

$$\text{Previsiones} - \text{Realizaciones} = \pm \text{Desviaciones}$$

La desviación que se produce puede significar un error de gestión, y para poder corregir se necesita agilidad en la información.

Para una buena gestión presupuestal se deben tener en cuenta estos principios, con el fin de manejar las desviaciones:

1. No comunicarlas más que a quien le interese.
2. No resaltarlas más que las informaciones que se salen de lo normal.

La experiencia muestra que no es muy interesante comunicar a un departamento las desviaciones referentes a otro departamento, ya que hay tendencia a preocuparse más de los casos de los demás que de los propios. Para responder al control debe aplicarse el siguiente principio: "Debe existir un presupuesto por responsable y un responsable por presupuesto".

Una vez que se han determinado cuáles son las desviaciones importantes, es necesario comprenderlas y utilizarlas, se debe pedir una explicación de las desviaciones al responsable y analizarlas, en las reuniones periódicas que se realizan sobre gestión presupuestal.

Qué sucede normalmente cuando se analiza una desviación:

- El responsable pone en duda la certeza y el valor de las previsiones hechas en las que por lo general él ha participado.
- En la segunda fase, el valor de las previsiones mejora y el porcentaje de desviaciones disminuye; el responsable de la gestión presupuestal debe lograr que lo consideren como el que suministra la información y el "consejero" al que se puede recurrir para dar soluciones, con el fin de evitar las desviaciones.

## MOTIVACIONES DE LA GESTIÓN PRESUPUESTAL

La ejecución de la gestión presupuestal está bajo la responsabilidad de los tres niveles.

### Motivaciones a nivel de dirección

El presupuesto es una herramienta de dirección y de gestión. La gestión presupuestal impulsa a la dirección a preocuparse por el futuro.

"Gobernar es prever", dice un proverbio clásico. Gobernar una empresa o una institución es definir su política; es intentar prever no sólo a un año, sino a cinco o diez años, esto es, a corto, mediano y largo plazos.

Quiere decir que planificamos el futuro estableciendo directrices, planes de desarrollo a corto y mediano plazos.

El presupuesto es el reflejo del plan en términos económicos. La gestión presupuestal permite introducir coherencia entre los planes y programas, utilizando en la mejor forma los recursos escasos.

### Motivación a nivel ejecutivo

Este nivel se considera fundamental para la gestión presupuestal, porque son ellos los que ejecutan el presupuesto y deben tener los poderes suficientes para hacerlo; es necesario hacerles partícipes y capaces de entender que son elemento básico e importante para el cumplimiento del plan.

No basta con dar a este nivel el poder y la responsabilidad para ejercer, sino los medios y las herramientas para que esto se cumpla.

### Motivación a nivel operativo

Es necesario vincular a este grupo de personas, ya que son las que terminan ejerciendo las labores programadas; por tanto, deben ser partícipes y tener conocimiento claro de la gestión presupuestal, y obtener una colaboración activa de este grupo; en muchos casos, hablando de la universidad, el docente no conoce ni la filosofía ni los programas que van a desarrollar el rector y el Consejo Directivo, por lo que su interés no va más allá de dictar clase, sin tener en cuenta la filosofía del programa y, en muchos casos, de la universidad. La gestión presupuestal se presenta como un estorbo y no como un programa que produciría estímulos al ver su cumplimiento, por lo que es necesario para cada actividad medir sus desviaciones y hacerlas conocer.

## PUESTA EN MARCHA DEL CONTROL PRESUPUESTAL

La puesta en marcha de un control presupuestal es un proceso largo y complicado, que exige múltiples ajustes y rectificaciones que suponen un esfuerzo continuo y colaborativo.

Todo presupuesto debe apoyarse en un plan que descansa sobre un determinado número de objetivos y metas, y a su vez debe existir un cronograma de ejecución.

Hay tres aspectos fundamentales, en los que se deben centrar los esfuerzos:

1. La estructura organizacional de la universidad.
2. El sistema de información financiera, donde la herramienta fundamental es el sistema contable.
3. La preparación psicológica de los responsables en todos los niveles.

### TEORÍA Y PRÁCTICA DE LA ORGANIZACIÓN PRESUPUESTAL

Toda empresa, en cualquier nivel de desarrollo, está organizada y practica cierta división del trabajo; sin embargo, a veces existen importantes diferencias entre la teoría y la práctica del organigrama o de la definición de funciones. El control presupuestal descubre estas desviaciones y obliga a corregirlas, por lo cual no es conveniente efectuar los ajustes contra el tiempo sino actuar con él. Puede suceder, cuando se realiza la implantación de la gestión presupuestal, que haya programas o departamentos que no tienen un responsable<sup>[5]</sup>.

#### Base previa contable

Es frecuente presentar como cosas opuestas la contabilidad y el control presupuestal, queriendo ver en una el contenido histórico y en el otro una idea de prospección, poniendo en evidencia las diferencias de método. Es innegable que la gestión presupuestal se apoya en la contabilidad en la medida en que el pasado permita proyectar el futuro.

- Normalmente, los datos contables no suelen ser suficientes; aunque la información histórica es valiosa, es necesario determinar los costos que implica desarrollar el programa que se está presupuestando.

- En muchos casos se requiere reestructurar la contabilidad para manejar la información detallada por centros de costos reales, que seguramente antes de aplicar el método presupuestal no existían.
- Así mismo, es necesario redefinir el tipo de información rápida y periódica del manejo contable y presupuestal.

#### Responsabilidad y presupuesto

La regla básica es incluir en el presupuesto de un programa o de un centro de costo únicamente los gastos sobre los que el responsable tiene en realidad capacidad de actuación. Este principio, sencillo y fácil de admitir, no deja de presentar dificultades en su aplicación, bien para los gastos en sí o por la utilización del método de la delegación de responsabilidades en otros grupos.

#### Base previa psicológica

La última etapa previa para la implantación del control presupuestal, y sin duda la más difícil y más ardua de conseguir, es el individuo mismo. La costumbre, las rutinas de actuación, las convicciones íntimas fundadas en la experiencia, son los principales obstáculos y los más difíciles de superar. La gestión presupuestal exige en efecto una participación activa por parte de todos.

Para efectuar este trabajo, se presentan tres fases:

1. Convicción.
  2. Información.
  3. Formación.
- Sin convicción profunda de todos los miembros componentes de la institución, especialmente de los directivos y del nivel ejecutivo, la implantación del control presupuestal fracasará; se requiere una cooperación estrecha de todas las áreas y departamentos, y la continuidad de esfuerzos.
  - En cuanto a la información, el problema consiste en demostrar a todos los interesados, en este caso desde los miembros del Consejo Directivo y el rector hasta el último docente, la importancia que tiene el control presupuestal, en qué consiste y lo que se puede esperar de él.

[5] *Ibid.*

- En cuanto a la formación, consiste en demostrar a cada uno y a su nivel respectivo lo que puede hacer, a partir de los documentos elaborados para manejar el presupuesto. Se explica cómo puede llevarse el estudio de las desviaciones y las causas que lo motivan. Esta formación debe manejarse a través de reuniones y comités, convocados periódicamente, que deberán estar integrados por un determinado número de personas y nivel jerárquico.

10. Debe hacerse un control presupuestal y elaborar informes periódicos a nivel directivo y de las unidades ejecutoras, para informar cómo se está desarrollando la ejecución del presupuesto.

El presupuesto debe reflejar el funcionamiento de la universidad, por lo que se requiere que las áreas en las cuales está organizada la institución que se refleja en el organigrama institucional, deben estar plasmadas en el presupuesto, por medio de los centros de costos<sup>[6]</sup>.

## ESTRUCTURA DEL PRESUPUESTO DE UNA UNIVERSIDAD

### Conceptos fundamentales

El presupuesto de una institución de educación superior, sea pública o privada, debe reunir los conceptos comunes que se relacionan a continuación:

1. El presupuesto es el resumen monetario de todos los planes y programas de la institución.
2. En su elaboración deben participar todas las dependencias que conforman la universidad: departamentos, áreas, facultades, etc.
3. Debe existir conciencia de que los recursos son escasos y deben aplicarse para obtener la mayor eficiencia y productividad.
4. Debe presentarse equilibrado, es decir, no puede incluir programas que no tengan recursos disponibles para realizarlos; si se incluyen, debe haber claridad del monto del subsidio y de a dónde se trasladarán los recursos.
5. Los programas que se incluyan deben ser de fácil realización y estar acompañados con un cronograma de actividades que permita cumplir las metas propuestas para el período de vigencia presupuestal.
6. Debe existir un responsable por cada programa, tanto en términos de ingresos como de gastos.
7. Es necesario estructurar los diferentes centros de costos, pues no es lo mismo registrar los gastos de un programa de educación continua que de una investigación específica.
8. El cálculo de ingresos y gastos debe ir soportado siempre con un informe estadístico y de descripción de programas y valores.
9. A nivel institucional y de los directivos, el presupuesto elaborado se deberá respetar y exigir su cumplimiento.

Esquema general de los principales rubros que tienen en presupuesto universitario<sup>[7]</sup>

### Ingresos

Los ingresos están conformados por ingresos de funcionamiento: si la universidad es privada, tendrá aproximadamente entre el 60 y 70% del total correspondiente a matrículas; en otros ingresos académicos, se estima el 10%; si realiza investigación, puede obtener recursos del 10%, y el porcentaje restante corresponde a ingresos por recursos propios o ingresos no operacionales, como rendimientos por inversiones financieras y servicios administrativos. Adicionalmente, puede haber recursos del crédito, así como donaciones importantes de instituciones o benefactores que apoyan programas especiales.

Si la universidad es pública, la estructura del presupuesto muestra que aproximadamente el 80% de sus ingresos está representado por transferencias del presupuesto nacional o departamental, mientras que apenas el 20% del total de ingresos está conformado por el pago de matrículas y por recursos propios.

### Gastos

En términos de gastos, se pueden distribuir así: gastos de funcionamiento y gastos de inversión.

[6] Eduardo Aldana Valdés (1992). "En la búsqueda permanente del rumbo, la planeación estratégica". Documento de Ascun.

[7] Asociación Colombiana de Universidades (1997). Memorias del Programa de Financiamiento de la Educación Superior.

Los gastos de funcionamiento se distribuyen en:

- *Gastos de personal.* Deben incluir los salarios de personal docente, de planta de cátedra, personal administrativo y de servicios, honorarios, aportes parafiscales, capacitación, etc.
  - *Gastos generales.* Corresponden a los gastos requeridos para funcionar, tales como papelería, útiles de oficina, material de enseñanza, reactivos, elementos de laboratorios, dotación del personal, etc.
  - *Gastos de mantenimiento.* Incluye las reparaciones locativas, mantenimiento, elementos de aseo, servicios públicos; en este grupo de gastos se incluyen todos los requerimientos para mantener en buen funcionamiento la planta física.
  - *Bienestar Universitario.* Se incluyen los gastos que la universidad realiza para poner en marcha los programas de Bienestar para el estamento estudiantil, docente y administrativo; las instituciones, según la normatividad actual, deben dedicar el 2% de los ingresos corrientes para cumplir este objetivo.
  - *Fomento a la investigación.* Es importante destacar en un presupuesto universitario el gasto destinado a promover el fomento y desarrollo de programas de investigación.
  - *Transferencia.* Compromisos institucionales establecidos con otras entidades. Por lo general, este rubro se usa mucho en las entidades de carácter oficial, donde se tienen partidas comprometidas con otros organismos.
  - *Gastos de inversión.* Incluyen las partidas requeridas para la compra de equipos de oficina, de investigación, de laboratorios, computadores, *software*, compra de libros para dotación de bibliotecas, ampliaciones y construcción de planta física.
- *Servicio de la deuda.* Si existen préstamos con el sector público o privado, es necesario incluir la partida requerida para el pago en la vigencia presupuestal.

Todo presupuesto debe establecer unas partidas que permitan destinar una reserva para la reposición de equipos y de instalaciones, por lo que se debe calcular el valor de la depreciación de los activos representativos para evitar su obsolescencia.

Estos conceptos mencionados deberán discriminarse de acuerdo con la estructura de la organización universitaria, es decir, si está conformada por facultades o por departamentos que agrupan centros de estudios, de investigación, unidades de ejecución independientes, o por áreas de conocimiento y dependencias administrativas.

## BIBLIOGRAFÍA

- Aldana V., Eduardo (1992). En la búsqueda permanente del rumbo, la planeación estratégica. Documento de Ascun.
- Asociación Colombiana de Universidades (1997). *Memorias del Programa de Financiamiento de la Educación Superior*.
- Banco Mundial (2002). *Colombia educación terciaria*.
- Banco Mundial y Unesco (2000). *La educación superior en los países en vías de desarrollo: peligros y promesas año 2000*.
- Brown, W. Steven. *Trece errores fatales en que incurren los gerentes*. Editorial Norma.
- Drucker, Peter F. (1995). *Gerencia para un futuro: el decenio de los 90 y más allá*. Editorial Norma.
- Drucker, Peter F. & Nakauchi, Isao (1998). *Tiempo de desafíos – Tiempo de reinvisiones*. Editorial Hermes.
- Drucker, Peter F. (1995). *La gerencia, tareas y responsabilidades prácticas*. Editorial Ateneo.
- Icfes, *Memorias Seminario Permanente Calidad, Eficiencia y Equidad*, tomo II.
- Meyer, L. (1994). *Gestión presupuestaria*. Ediciones Deusto.

EDUCACIÓN

# Estándares de competencias matemáticas para ingeniería

## CARLOS ABEL ÁLVAREZ PÉREZ

Licenciado en matemáticas de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, magíster en matemáticas de la Universidad Nacional de Colombia, profesor de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito y director del proyecto de investigación "Definición de estándares de competencia matemática para el ingeniero". calvarez@escuelaing.edu.co.

## PATRICIA HERNÁNDEZ ROMERO

Matemática de la Pontificia Universidad Javeriana, magíster en matemáticas de la Universidad de Puerto Rico, profesora de la Pontificia Universidad Javeriana e investigadora principal en el proyecto de investigación "Definición de estándares de competencia matemática para el ingeniero". phernand@javeriana.edu.co.

## ÉDWARD O'BONAGA GARNICA

Licenciado en matemáticas de la Universidad Pedagógica Nacional, magíster en matemáticas de la Universidad de los Andes, profesor de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito e investigador en el proyecto de investigación "Definición de estándares de competencia matemática para el ingeniero". eobonaga@escuelaing.edu.co.

Artículo recibido: 18/05/2007  
Evaluación par externo: 31/07/2007  
Aprobado: 28/08/2007

### Resumen

En este documento se presentan algunos resultados obtenidos en el desarrollo del proyecto de investigación "Definición de estándares de competencia matemática para el ingeniero", proyecto realizado por la Pontificia Universidad Javeriana de Bogotá y la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, con la participación del Centro de Investigación y Desarrollo (Cidea) y con el apoyo financiero de Colciencias.

Como resultado de este proyecto se presentan las diez competencias matemáticas genéricas determinadas como de mayor importancia para el ingeniero, y los estándares matemáticos definidos tanto para el ingreso a carreras de ingeniería como de salida del ciclo de ciencias en las carreras, identificadas en la investigación.

**Palabras claves:** competencias matemáticas, estándares, formación de ingenieros, matemáticas universitarias.

### Abstract

This paper presents some of the results of the research project "Mathematical competence standards definition for the engineer", carried out by the Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, and the Escuela Colombiana de Ingeniería, in which the Centro de Investigación y Desarrollo participated too and was partially founded by Colciencias. The ten most relevant generic mathematical competences identified in the research and the mathematical standards for the engineer, as well as at the beginning of engineering studies and at the end of the basic cycle, are presented.

**Keywords:** College mathematics, Engineer education, Math competences, standards.



## INTRODUCCIÓN

La caracterización de la nueva función de la educación como generadora de competencias ha presentado la necesidad de determinar las competencias matemáticas en cada carrera, y debido a los pocos estudios conocidos realizados en esta dirección, el grupo de investigación ha efectuado el presente proyecto, cuya finalidad es avanzar en el desarrollo de iniciativas tendientes a diseñar pruebas objetivas para medir las competencias matemáticas y los estándares que necesita un estudiante, tanto al ingresar a carreras de ingeniería como al terminar el ciclo de formación en ciencias.

En el medio académico nacional ya es común hablar y trabajar con estándares y competencias para la educación básica y media, pero en la universitaria, quizás, ésta es una de las primeras propuestas encaminadas a determinar dichos estándares, por lo menos en el área de matemática para ingeniería.

Teniendo en cuenta esto, la Escuela Colombiana de Ingeniería y la Pontificia Universidad Javeriana han llevado a cabo un proyecto que busca definir las competencias matemáticas genéricas que deberán manifestar los egresados de programas de formación profesional en el campo de la ingeniería. Para lograr esto, inicialmente se definieron los ámbitos de dominio, tanto para la matemática escolar como para la universitaria en carreras de ingeniería. A continuación, con base en el proyecto "Tuning América Latina" y aplicando la metodología Dacum, se tomó un grupo de competencias genéricas estrechamente relacionadas con la matemática y al final se determinaron los estándares matemáticos, tanto para el ingreso a las carreras de ingeniería, como para la formación en ciencias.

## IDENTIFICACIÓN DE COMPETENCIAS

En el campo de la educación, el término *competencia* se usa para expresar una cierta capacidad para actuar de una manera eficaz en un contexto determinado. A nivel internacional se ha estado trabajado sobre este tema en los últimos años, en proyectos como "Pisa" (Ocde, 2000), "Las competencias clave" (Eurydice, 2002), "Tuning Europa" (González, 2003), "Tuning América Latina" (Tuning, 2005), cuyos objetivos principales son unificar los conceptos de competencias, homologar titulaciones, diseñar evaluaciones comunes y posibilitar la movilidad entre instituciones. También en Esta-

dos Unidos se ha realizado un trabajo con estos mismos propósitos, pero centrado en estándares (NCTM, 1991) y no en competencias. En Colombia se han tomado ambos conceptos, el de competencia y el de estándares, y se han desarrollado varios proyectos, liderados por el Ministerio de Educación Nacional, tales como "Lineamientos curriculares" (MEN, 1998), "Estándares" (MEN, 1998), "Pruebas Saber" (MEN, 2003), "Pruebas Icfes" (MEN, 2003) y "Pruebas Ecaes" (MEN, 2003).

A pesar de este juicioso trabajo no hay un consenso sobre el significado del término competencia y éste se ha interpretado de varias maneras. Por ejemplo: la comisión de los estados miembros de la Unión Europea (Euridyce, 2002) hizo a los países participantes la recomendación de "interpretar el concepto de competencia como un conjunto de conocimientos, destrezas y actitudes esenciales para que todos los individuos puedan tener una vida plena como miembros activos de la sociedad". El proyecto "Tuning Europa" (González, 2003) plantea que "las competencias representan una combinación dinámica de atributos —con respecto al conocimiento y su aplicación, a las actitudes y a las responsabilidades— que describen los resultados del aprendizaje de un determinado programa, o cómo los estudiantes serán capaces de desenvolverse al finalizar el proceso educativo". En Colombia, el concepto de competencia inicialmente se interpretó en el examen de Estado Icfes (MEN, 2003) como "saber hacer en contexto" y se ha retomado, con algunas variaciones, para las pruebas Saber (MEN, 2003) y Ecaes (MEN, 2003).

Lo que es claro es que las competencias no son los conocimientos únicamente sino el uso que se hace de ellos y cómo se aplican e integran en situaciones diversas.

En el marco de este proyecto, se considera que los contenidos básicos de aprendizaje y el enfoque en la resolución de problemas son componentes esenciales para desarrollar las competencias de los estudiantes de ingeniería y para lograr éxito en su desempeño profesional (MEN, 2003).

Por otro lado, las competencias se clasifican en diferente forma, dependiendo del interés y del enfoque particular que se considere. En este proyecto se tomó la clasificación de competencias básicas, genéricas y específicas. Las competencias básicas son aquellas que tratan sobre la comprensión y las destrezas necesarias para lograr objetivos personales y participar efectiva-

mente en la sociedad. Las genéricas son las que no están ligadas a ningún desempeño en particular, sino que son transversales al currículo, y las específicas son las propias de cada área del saber.

La investigación realizada se concentró en las competencias genéricas, asumiendo la definición dada en el proyecto "Tuning América Latina" (Tuning, 2005): "Son aquellas que identifican los elementos compartidos que pueden ser comunes a cualquier profesional, tales como la capacidad de aprender, de tomar decisiones, de diseñar proyectos...", y en el caso particular de las competencias genéricas para el ingeniero, se asumieron como "el conjunto básico de atributos requerido para intervenir con éxito en cualquier ámbito de desempeño profesional de la ingeniería" (Guerrero *et al.*, 2005).

En este proyecto se asumió la competencia como *una estructura conformada por conocimientos, habilidades, actitudes y valores que le permiten al ser humano desempeñarse en forma adecuada en diversas situaciones, y resolver de manera eficaz, eficiente y creativa los problemas de la sociedad en que vive*. Las competencias matemáticas en particular *involucran el conocimiento de conceptos matemáticos, la comprensión de su alcance y limitaciones en su aplicación para la solución de los problemas planteados, la comprensión y la evaluación de argumentos matemáticos, la habilidad para el análisis de situaciones mediante su representación matemática, el planteamiento y la resolución de problemas que requieran el uso de los conocimientos adquiridos, la expresión correcta en el lenguaje matemático y la interpretación de los resultados matemáticos obtenidos*.

Aquí se entiende como capacidad un conjunto de condiciones, cualidades o aptitudes, especialmente intelectuales, que permiten el desarrollo de un proceso o actividad, el cumplimiento de una función, el desempeño de una tarea específica, etc., y como habilidad el conocer, comprender y saber cómo actuar (es decir, la aplicación práctica y operativa del conocimiento en ciertas situaciones). Las habilidades tienen que ver con toda la manipulación algebraica y la aplicación de algoritmos, tales como calcular derivadas, integrales, límites, resolver ecuaciones, realizar operaciones. Y la capacidad tiene que ver con la posibilidad de selección y decisión de aquellos conocimientos que se deben aplicar para resolver un problema dado, y con la comprensión de las definiciones, los teoremas y su adecuada aplicación.

Uno de los objetivos del proyecto de investigación fue la identificación de un conjunto de diez competen-

cias genéricas para el desempeño matemático adecuado en la ingeniería. Esta labor se llevó a cabo a partir del análisis de las 27 competencias propuestas por el proyecto "Tuning América Latina" y mediante una cuidadosa síntesis realizada a partir de talleres con profesionales de la ingeniería, aplicando la metodología Dacum (Guerrero *et al.*, 2005). El desarrollo de los talleres se llevó a cabo de la siguiente manera: inicialmente se identificaron tres grupos de expertos, ingenieros en ejercicio, formadores de ingenieros y empleadores de ingenieros. Luego se convocó en cada caso a un grupo de 30 individuos que pertenecían a uno de los tres grupos definidos. Cada taller comenzó con una contextualización sobre el tema de las competencias, competencias genéricas y sobre el listado de las competencias genéricas generadas desde el proyecto Tuning. Posteriormente, se le entregó a cada participante el listado de las 27 competencias y se le solicitó identificar las cinco competencias más importantes para cada uno. A continuación se efectuó la misma tarea en grupos de tres o cuatro personas, y finalmente se realizó una puesta en común y una discusión sobre los resultados. En la tabla 1 se presentan las diez competencias seleccionadas en su orden de prioridad, según los participantes.

**Tabla 1**  
Listado de competencias genéricas del ingeniero

Nº	Nombre de la competencia
1	Capacidad para identificar, plantear y resolver problemas.
2	Capacidad de abstracción, análisis y síntesis.
3	Capacidad para formular y gestionar proyectos.
4	Habilidades en el uso de las TIC.
5	Capacidad de comunicación oral y escrita.
6	Capacidad de trabajo en equipo.
7	Capacidad de aplicar los conocimientos en la práctica.
8	Capacidad de investigación.
9	Capacidad de aprender y actualizarse permanentemente.
10	Capacidad creativa.

Las diez competencias identificadas en los talleres son todas primordiales para el estudio y el ejercicio de la ingeniería, y por ser genéricas no existe una asignatura específica en la cual se puedan potenciar, sino que, como se dijo antes, éstas son transversales al currículo y por tal razón se deben desarrollar en forma deliberada y sistemática a lo largo de las asignaturas que conforman el plan de estudio de las carreras de ingeniería.

Un segundo grupo de profesionales de la matemática y de la docencia conceptuó que de estas competencias las que están más estrechamente relacionadas con la matemática escolar y universitaria son la 1, 2, 5, 7 y 10, anteriormente citadas, y se agregó "La capacidad para la representación y la modelación", que surgió en este segundo taller. Cuando el grupo investigador entró a evaluar las seis competencias finalmente seleccionadas, encontró que sólo las numeradas con 1, 2 y 7 podrían evaluarse mediante una prueba objetiva, en tanto que las otras requerían otro tipo de prueba. Atendiendo a esto, y dado que otro de los objetivos del proyecto es avanzar en la implementación de pruebas objetivas, que no dependen de las personas o de la institución que las diseñe, se asumieron tales competencias para evaluarlas.

A continuación, se sintetiza lo que se entiende en el proyecto por cada una de estas tres competencias:

- *Capacidad de abstracción, análisis y síntesis.* La abstracción es el proceso mental mediante el cual se determinan características comunes a diferentes objetos, las relaciones existentes entre ellos, la materialización de esas características o relaciones mediante ideas, y se evalúa la posibilidad de trabajarlas independientemente de los objetos que están representados por ellas. En cualquier proceso de abstracción están implícitas las etapas de análisis y síntesis. La etapa de análisis consiste en dividir el todo en tantas partes como se pueda, hasta llegar a los elementos más simples. Este proceso permite la identificación de variables, constantes, parámetros, sus interrelaciones y la teoría que se puede aplicar para resolver un problema. La capacidad de análisis está relacionada con todo aquello que permite hacer predicciones a partir de la información que se tiene; el análisis nos permite comprender mejor la situación y proyectar un plan para su solución. La síntesis, por otra parte, es la construcción de un todo a partir de los distintos elementos. Esta construcción se puede realizar uniendo las partes, fusionándolas u organizándolas de diversas maneras, a la luz de teorías específicas. La síntesis permite entregar resultados precisos en situaciones concretas o establecer proyectos viables para resolver situaciones de la vida real.
- *Capacidad de aplicar los conocimientos en la práctica.* Esta capacidad está presente cuando se hace transferen-

cia del conocimiento a diversas situaciones que exigen realizar una tarea que no es un cálculo directo o aplicación algorítmica de teorías preestablecidas. Son las llamadas aplicaciones de la teoría, pero sin llegar a ser solución de problemas.

- *Capacidad para identificar, plantear y resolver problemas.* Un problema es una situación que debe solucionarse y quien la intenta resolver no conoce el camino de la solución, pero desea resolverla. Este tipo de problema es lo que se conoce como un problema abierto y es muy complicado de evaluar en pruebas objetivas.

Por esto, para el proyecto se considera un "problema" como una situación que el estudiante debe afrontar y en la cual posiblemente conozca el camino que hay que seguir; a él le corresponde construir los sistemas de representación que necesite para dar solución a dicha situación. Por ejemplo, cuando se le pide calcular el valor del área de una región de la cual sólo se le da la descripción general, él debe realizar las gráficas y todos los cálculos que crea necesarios para contestar correctamente.

## ESTÁNDARES

Los estándares de competencia pretenden establecer los conceptos mínimos que deben conocer los estudiantes, determinan lo que se espera de ellos y lo que deben ser capaces de hacer para demostrar que, efectivamente, han logrado el aprendizaje necesario, que les permita tener éxito en su desempeño profesional. Las pruebas objetivas elaboradas buscan ayudar a identificar los conocimientos de los estudiantes, y contribuyen a establecer una conexión más estrecha entre lo que se enseña y lo que se evalúa.

Según el Ministerio de Educación Nacional (MEN, 1998), los estándares curriculares son criterios que especifican lo que todos los estudiantes deben saber y ser capaces de hacer en una determinada área y grado. Se traducen en formulaciones claras, universales, precisas y breves, que expresan lo que debe hacerse y cuán bien debe hacerse.

Ahora bien, el establecimiento de estándares de competencia en un campo dado conlleva la definición de algunos criterios para la organización del saber. Para el caso de esta investigación, el conocimiento matemáti-

co es el resultado de una evolución histórica y cultural, que valora los procesos constructivos y la interacción social, y privilegia la estrategia de resolución de problemas como uno de los enfoques que facilitan el aprendizaje de las matemáticas. Teniendo en cuenta estos planteamientos se organizan las matemáticas universitarias en bloques que articulen núcleos conceptuales y procesos cognitivos, así como ambientes de aprendizaje y actuación. Los bloques estructurados en esta forma se denominarán ámbitos de dominio.

En la investigación se consideraron dos grandes bloques de conocimientos para la matemática universitaria en carreras de ingeniería: la primera es la matemática básica o escolar, que debe garantizar una permanencia en estas carreras con cierta probabilidad de éxito, y la segunda es la matemática universitaria, que forma parte de la mayoría de los currículos de ingeniería en nuestro país. La matemática escolar se organizó en cuatro ámbitos de dominio, centrados en los contenidos: numérico, algebraico, geométrico y funcional. Por su parte, la matemática universitaria se organizó en tres: algebraico universitario, analítico y aleatorio. Además, en ambos casos se consideró un ámbito de razonamiento matemático y solución de problemas que es transversal a los ámbitos de contenidos.

A continuación se presenta una descripción general de lo que se entiende en el proyecto por cada uno de estos ámbitos:

- **Ámbito numérico.** Este ámbito trata sobre los sistemas numéricos: las relaciones y operaciones que existen entre ellos; las diferentes maneras de representarlos, las razones y proporciones: el interés simple y el compuesto, y la aplicación de todos estos conceptos al planteamiento, modelación y solución de problemas.
- **Ámbito geométrico.** Este ámbito trata sobre el estudio y análisis de las propiedades de los espacios y los objetos geométricos en dos y tres dimensiones: las transformaciones geométricas, el cálculo de áreas y volúmenes, el estudio de las curvas cónicas, sus propiedades, sus ecuaciones y sus gráficas, y la aplicación de todos estos conceptos al planteamiento, modelación y solución de problemas.
- **Ámbito algebraico.** Este ámbito tiene que ver con el estudio y el reconocimiento de patrones, el establecimiento de relaciones y funciones, la representación de las matemáticas mediante símbolos algebraicos y gráficos, las propiedades de los números reales, manejo de expresiones algebraicas y solución de ecuaciones e inecuaciones, y la aplicación de todos estos conceptos al planteamiento, modelación y solución de problemas.
- **Ámbito funcional.** En este ámbito se estudian las variables y sus interrelaciones, que posibilitan la formulación de modelos matemáticos para diversos fenómenos, las funciones de variable real y valor real, las funciones de variable natural y valor real, las diferentes formas de representar funciones como verbal, algebraica, numérica y gráfica, y la aplicación de todos estos conceptos al planteamiento, modelación y solución de problemas.
- **Ámbito analítico.** En este ámbito se estudian todos los fenómenos de variación y cambio, y tiene como objetivo la comprensión de los conceptos básicos de funciones, sucesiones y series, derivada e integración de funciones en una y varias variables, teoremas fundamentales del cálculo y ecuaciones diferenciales ordinarias, con especial énfasis en las ecuaciones lineales. Todos estos conceptos se enfocan hacia la solución de problemas y el establecimiento de modelos matemáticos para el análisis de situaciones reales o idealizadas.
- **Ámbito algebraico universitario.** En este ámbito se identifican las propiedades de las figuras geométricas, el manejo de la semejanza y la congruencia, el cálculo de áreas, las propiedades de los polígonos regulares, el reconocimiento y utilización de los sistemas de coordenadas en el plano y en el espacio, la identificación de los diferentes tipos de cónicas a partir de sus ecuaciones y sus propiedades geométricas, el manejo de los principales conceptos del álgebra lineal y la aplicación de todos estos conceptos al planteamiento, modelación y solución de problemas.
- **Ámbito aleatorio.** En este ámbito se identifican los elementos básicos de un espacio probabilístico y su relación con los fundamentos de la teoría de probabilidades, el cálculo y la interpretación de probabilidades, el reconocimiento de los distintos tipos de variables aleatorias, el análisis de funciones de distribución y de densidad, los conceptos básicos de la estadística descriptiva e inferencial, y la

aplicación de todos estos conceptos al planteamiento, modelación y solución de problemas.

- **Ámbito de razonamiento y solución de problemas.** En este ámbito no se tratan temas en especial, sino que se trabaja en forma transversal a todos los otros ámbitos, ya que el razonamiento matemático está presente en todo el trabajo matemático escolar y universitario. Tiene que ver con acciones como formular hipótesis, hacer conjeturas y predicciones, justificar procesos, encontrar contraejemplos, usar hechos conocidos, propiedades y relaciones para explicar otros hechos, encontrar patrones y expresarlos matemáticamente.

Este tipo de razonamiento matemático se presenta con mayor énfasis en la solución de problemas que en ejercicios algorítmicos, ya que como lo dice Polya (citado en MEN, 1998), “resolver un problema es encontrar un camino allí donde no se conocía previamente camino alguno, encontrar la forma de salir de una dificultad, encontrar la forma de sortear un obstáculo, conseguir el fin deseado, que no es conseguible de forma inmediata, utilizando los medios adecuados”.

Para el proyecto es claro que la matemática que se estudia en los programas de ingeniería debe tener una gran aplicabilidad y los estudiantes deben ejercitarse en el planteamiento, modelación y solución de problemas. Teniendo en cuenta esto, en la clase se debe estimular este tipo de razonamiento con preguntas como ¿por qué?, ¿qué pasaría si...?, ¿puedes dar un ejemplo?, ¿puedes dar un contraejemplo?, ¿qué condición se debe cumplir?, ¿éste se cumple siempre, algunas veces o nunca así?, etc. En algunos casos, basta con cambiar las preguntas tradicionales de los textos para conseguir el desarrollo de un pensamiento matemático que vaya más allá de la simple evocación de hechos memorísticos o de destrezas en el manejo algorítmico.

Tomando como base los anteriores planteamientos y la síntesis que el proyecto realizó a partir de talleres con egresados, estudiantes y profesores de ingeniería, se presentan a continuación los estándares de competencia

matemática para ingeniería, tanto de ingreso a la universidad como de salida del ciclo básico de formación.

### Estándares de ingreso

Los estándares básicos que se presentan en la tabla 2 son los mínimos deseados para que los estudiantes que ingresan a la universidad, a carreras de ingeniería, tengan un buen desempeño y, por consiguiente, una alta probabilidad de éxito en su carrera. Para ello se tomaron como referencia los documentos sobre los estándares curriculares para matemáticas del MEN (MEN, 1998) y los del National Council of Teachers of Mathematics (NTCM, 1991) y se recopiló la información de los currículos de quince colegios: siete públicos (cuatro de Bogotá y tres de fuera de Bogotá) y ocho privados (cinco de Bogotá de diferentes estratos y tres de fuera de Bogotá); luego se construyeron matrices comparativas de los contenidos de los diferentes currículos, las cuales permitieron identificar los estándares comunes mínimos que se están trabajando.

### Estándares de salida del ciclo básico

Para la elaboración de los estándares en matemáticas de salida del ciclo básico, apoyados en la información suministrada por la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (Acofi), en diciembre de 2003, sobre el número de programas existentes en Colombia, se dividió el país en seis regiones: Bogotá, Andina, Viejo Caldas, Costa Atlántica, Occidente, y finalmente Llanos Orientales y Amazonia, de cada una se escogieron tres instituciones y de cada institución tres a cuatro programas de pregrado. Se procedió a la recopilación de la información definida en el currículo de cada uno de los programas escogidos y se construyeron matrices por programas de una misma institución, por programas de una misma región y de una misma denominación. Las comparaciones permitieron identificar los estándares unificados mínimos que se presentan en la tabla 3.

**Tabla 2**  
Estándares de ingreso

Ámbito	Estándares
Numérico	<p>Identifica y diferencia los sistemas numéricos.</p> <p>Realiza operaciones aritméticas con números enteros, racionales y reales.</p> <p>Entiende el concepto de proporción y lo aplica para resolver problemas.</p> <p>Comprende los conceptos de interés simple y compuesto, y los aplica para resolver problemas.</p> <p>Realiza operaciones con potencias, radicales y logaritmos con números reales.</p> <p>Encuentra patrones de comportamiento en una sucesión básica y los comprueba.</p>
Geométrico	<p>Reconoce y distingue los diferentes tipos de ángulos, triángulos, cuadriláteros y polígonos en general.</p> <p>Identifica los elementos fundamentales de los triángulos y sus propiedades.</p> <p>Conoce y aplica los teoremas de Pitágoras y de Tales.</p> <p>Reconoce y aplica las transformaciones de congruencia y las homotecias.</p> <p>Entiende y aplica los conceptos de congruencia y semejanza de polígonos.</p> <p>Reconoce e identifica las propiedades de los prismas, las pirámides, los cilindros, los conos y las esferas.</p> <p>Comprende y aplica los conceptos de área y volumen.</p> <p>Identifica los cinco poliedros regulares y sus propiedades.</p> <p>Identifica las curvas cónicas, sus elementos y sus ecuaciones en su forma estándar.</p> <p>Utiliza las relaciones trigonométricas de triángulos para la solución de problemas.</p>
Algebraico	<p>Aplica las operaciones básicas (suma, resta, multiplicación, división, potenciación, radicación y logaritmicación), de los números reales a las expresiones algebraicas.</p> <p>Distingue las diferentes clases de expresiones algebraicas y realiza operaciones con ellas.</p> <p>Reconoce un polinomio, sus partes y realiza operaciones con ellos.</p> <p>Factoriza polinomios.</p> <p>Resuelve ecuaciones y desigualdades de primer y segundo orden.</p> <p>Reconoce los números complejos y realiza operaciones con ellos.</p> <p>Reconoce las identidades trigonométricas fundamentales y deduce otras a partir de ellas.</p> <p>Resuelve ecuaciones trigonométricas.</p>
Funcional	<p>Reconoce las funciones como una relación especial entre conjuntos.</p> <p>Comprende el concepto de función de valor y variable real.</p> <p>Reconoce el dominio y el rango de una función y los encuentra para funciones básicas.</p> <p>Distingue las diferentes funciones básicas y sus gráficas: lineales, cuadráticas, polinómicas, racionales, trigonométricas, trigonométricas inversas, exponenciales y logarítmicas.</p> <p>Realiza operaciones entre funciones: adición, sustracción, multiplicación, división y composición.</p> <p>Reconoce y efectúa transformaciones de funciones: traslaciones, reflexiones, dilataciones y contracciones.</p> <p>Utiliza diferentes maneras para representar una función y puede pasar de un sistema de representación a otro.</p>
De razonamiento y solución de problemas	<p>Resuelve problemas mediante la selección de conceptos y técnicas matemáticas apropiadas.</p> <p>Reconoce una proposición condicional y sus componentes: hipótesis y conclusión.</p> <p>Identifica condiciones necesarias y suficientes.</p> <p>Traduce problemas del lenguaje común al matemático y los resuelve.</p> <p>Resuelve problemas que involucran diferentes clases de ecuaciones y aplica funciones inversas cuando es necesario.</p> <p>Identifica patrones y realiza generalizaciones.</p> <p>Verifica la validez de la solución a un problema.</p>

**Tabla 3**  
Estándares de salida del ciclo básico

Ámbito	Estándares
<b>Algebraico universitario</b>	<p>Reconoce y distingue los diferentes tipos de ángulos, triángulos, cuadriláteros y polígonos en general.  Identifica los elementos fundamentales y las propiedades de los triángulos, cuadriláteros y polígonos.  Conoce y aplica los teoremas de Pitágoras, Tales, senos y cosenos.  Reconoce y aplica las transformaciones de congruencia y las homotecias.  Entiende y aplica los conceptos de congruencia y semejanza de polígonos.  Reconoce e identifica las propiedades de los prismas, las pirámides, los cilindros, los conos y las esferas.  Comprende y aplica los conceptos de área y volumen.  Identifica los cinco poliedros regulares y sus propiedades.  Utiliza las relaciones trigonométricas de triángulos para la solución de problemas.  Identifica las curvas cónicas, sus elementos y sus ecuaciones en la ecuación cuadrática general.  Identifica y representa curvas en diferentes sistemas de coordenadas.  Reconoce y analiza los espacios en dos y tres dimensiones, y las formas y figuras que éstos contienen.  Comprende los conceptos de recta y plano en espacios euclídeos <math>n</math>-dimensionales.  Reconoce y opera adecuadamente con vectores y matrices.  Identifica diferentes clases de matrices: triangulares, singulares, simétricas...  Resuelve sistemas lineales de <math>m</math> ecuaciones con <math>n</math> incógnitas.  Calcula determinantes e inversas de matrices de orden 2 y 3.  Comprende los conceptos de base y dimensión y puede calcularlos para los espacios básicos y sus subespacios.  Comprende el concepto de espacio vectorial e identifica los básicos: euclídeos de <math>n</math>-dimensiones, matrices y polinomios.  Reconoce cuando un subconjunto es un subespacio vectorial de un espacio dado.  Comprende el concepto de transformación lineal, de núcleo e imagen.  Reconoce cuándo una transformación dada es lineal o no.  Comprende los conceptos de valores y vectores propios y puede calcularlos en transformaciones específicas.</p>
<b>Análítico</b>	<p>Reconoce las funciones como una relación especial entre conjuntos.  Comprende el concepto de función de valor y variable real.  Reconoce el dominio y el rango de una función y los encuentra para funciones específicas.  Distingue las diferentes funciones básicas y sus gráficas: lineales, cuadráticas, polinómicas, racionales, trigonométricas, trigonométricas inversas, exponenciales, logarítmicas e hiperbólicas.  Comprende los conceptos de función uno a uno, inversa, y puede hallar la inversa de funciones específicas.  Realiza operaciones entre funciones: adición, sustracción, multiplicación, división y composición.  Reconoce y efectúa transformaciones de funciones: traslaciones, reflexiones, dilataciones y contracciones.  Distingue entre funciones pares e impares y reconoce cuando la gráfica de una función es o no simétrica respecto a una recta o a un punto.  Utiliza diferentes maneras para representar una función y puede pasar de un sistema de representación a otro.  Comprende e interpreta el concepto de derivada: de orden superior, parciales, direccionales y utiliza diferentes técnicas para calcularlas.  Comprende el concepto de integral: indefinida, definida, múltiples, de línea y de superficie, y las calcula por diferentes métodos.  Comprende los teoremas fundamentales del cálculo (para integrales, para integrales de línea, el de Green, el de la Divergencia y el de Stokes) y los aplica.  Comprende los conceptos de sucesiones y series, y determina por diferentes métodos su convergencia.  Comprende el concepto de serie de potencias y puede aproximar funciones por series de Taylor.  Comprende el concepto de funciones: de valor real y variable vectorial, de valor vectorial y variable real, y de valor y variable vectorial.  Comprende el concepto de límite y continuidad para funciones de una y varias variables, y calcula límites utilizando diferentes métodos.  Identifica tipos de ecuaciones diferenciales de primer orden y las resuelve.  Reconoce ecuaciones diferenciales lineales de orden <math>n</math> y puede resolver las de coeficientes constantes.</p>

Ámbito	Estándares
	<p>Reconoce y resuelve las ecuaciones de Cauchy-Euler.</p> <p>Reconoce la transformada de Laplace, sus principales propiedades y la utiliza para resolver ciertos tipos de ecuaciones diferenciales, integrodiferenciales e integrales.</p> <p>Resuelve sistemas de ecuaciones lineales de primer orden utilizando diferentes técnicas, principalmente valores y vectores propios.</p>
<b>Aleatorio</b>	<p>Utiliza diferentes técnicas de conteo para determinar la cantidad de elementos de un conjunto dado.</p> <p>Comprende los conceptos de espacio muestral, eventos, probabilidad y probabilidad condicional.</p> <p>Calcula la probabilidad de eventos específicos.</p> <p>Comprende los conceptos de distribuciones de probabilidad tanto continuas como discretas.</p> <p>Calcula medidas de tendencia central y de dispersión.</p> <p>Calcula los parámetros de variables aleatorias.</p> <p>Encuentra intervalos de confianza.</p> <p>Realiza pruebas de hipótesis.</p>
<b>Razonamiento y resolución de problemas</b>	<p>Resuelve problemas mediante la selección de conceptos y técnicas matemáticas apropiadas.</p> <p>Reconoce una proposición condicional y sus componentes: hipótesis y conclusión.</p> <p>Identifica condiciones necesarias y suficientes.</p> <p>Traduce problemas del lenguaje común al matemático y los resuelve.</p> <p>Resuelve problemas que involucran diferentes clases de ecuaciones y aplica funciones inversas cuando es necesario.</p> <p>Identifica patrones y realiza generalizaciones.</p> <p>Verifica la validez de la solución a un problema.</p> <p>Distingue entre razonamientos inductivos y deductivos, y los aplica en la solución de problemas.</p> <p>Realiza pruebas directas e indirectas para verificar proposiciones.</p> <p>Resuelve problemas utilizando ideas geométricas y trigonométricas.</p> <p>Aplica los sistemas de ecuaciones lineales para resolver problemas tanto de la propia matemática como de otras disciplinas.</p> <p>Emplea el cálculo de determinantes para medir ciertas áreas y volúmenes.</p> <p>Utiliza derivadas y límites para analizar el comportamiento y trazar las gráficas de curvas en el plano.</p> <p>Soluciona problemas sobre razones de cambio.</p> <p>Resuelve problemas de optimización que involucran funciones de una y varias variables, usando derivadas.</p> <p>Aplica los conceptos de derivada e integral para resolver problemas de la física y de otros disciplinas.</p> <p>Utiliza la integral para calcular áreas, volúmenes, centros de masa, momentos de inercia, longitud de curvas...</p> <p>Modela y resuelve problemas utilizando ecuaciones diferenciales lineales de primer y segundo orden.</p> <p>Modela y resuelve problemas utilizando sistemas de ecuaciones lineales de primer orden.</p> <p>Usa la transformada de Laplace en la solución de problemas que involucran ecuaciones integrales e integrodiferenciales.</p> <p>Aplica los conceptos de probabilidad para la solución de problemas que involucran diferentes distribuciones de probabilidad.</p> <p>Recolecta, organiza y analiza datos con las técnicas apropiadas de la estadística y toma las decisiones correspondientes.</p>

## CONCLUSIONES

Se definieron los ámbitos de dominio, tanto para la matemática escolar como para la universitaria en las carreras de ingeniería, y se identificaron los estándares comunes mínimos para ingreso a la universidad y el ciclo básico.

Se identificaron las diez competencias genéricas más relevantes para el desempeño de profesionales de la ingeniería, las siete que están más relacionadas con la matemática y las tres que se van a evaluar por pruebas objetivas.

De las competencias genéricas identificadas en este proyecto existen algunas que no se pueden evaluar en



pruebas objetivas, y por tal razón se debe estudiar la forma de evaluarlas o de incorporarlas a los currículos de las carreras.

En el proyecto utilizamos preguntas de selección múltiple para evaluar las competencias genéricas más relacionadas con la matemática, pero quizás unas pruebas mixtas en las que una parte sea objetiva para medir fundamentalmente la comprensión conceptual y otra sea de preguntas abiertas para valorar la resolución de problemas y el razonamiento matemático, podrían orientar mejor en la determinación de las competencias específicas matemáticas por las que se pretende indagar.

El grupo de investigación, después de terminar el trabajo, propone la realización de una evaluación intermedia al finalizar el ciclo de formación en ciencias básicas tendiente a que las pruebas Ecaes (MEN, 2003), evalúen únicamente el ciclo de formación profesional, permitan la movilidad de los estudiantes nacional e internacionalmente, y se tengan unos estándares de formación general en el ciclo básico.

### Agradecimientos

A Colciencias, a la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito y a la Pontificia Universidad Javeriana por la financiación del proyecto "Definición de estándares de competencia matemática para el ingeniero", con código 1220-11-16967.

### BIBLIOGRAFÍA

- Acofacien (2005). *Marco de fundamentación conceptual y especificaciones de la prueba. Programa de Matemáticas*. Cali: Asociación Colombiana de Facultades de Ciencias, 48 pp.
- Álvarez, C.A.; Guerrero, M.E. y Hernández, P. (2005). *Identificación de competencias matemáticas básicas del ingeniero*. El impacto de las reformas de la educación superior en la formación de ingenieros. Cartagena: Acofi, pp. 187-191.
- Bogoya, D. (2003). *Trazas y miradas. Evaluación y competencias*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, Unibiblos, 209 pp.
- Eurydice (2002). *Las competencias clave. Un concepto en expansión dentro de la educación general obligatoria*. La red europea de información en educación. Madrid, 156 pp.
- González, J. & Wagenaar, R. (2003). *Tuning educational structures in Europa. Informe final fase 1*. Madrid: Universidad de Deusto, 338 pp.
- Guerrero, M.E.; Carrillo, J.O.; Hernández, P. & Pedraza, N. (2005). *Identificación de competencias genéricas para profesionales de la ingeniería*. El impacto de las reformas de la educación superior en la formación de ingenieros. Cartagena: Acofi, pp. 183-186.
- Guerrero, M.E.; Hernández, P. & Pedraza, N. (2004). *Identificación de competencias genéricas para programas de ingeniería desde el análisis del perfil profesional*. El futuro de la educación en ingeniería. Cartagena: Acofi, pp. 147-150.
- Linn, R. & Hermanm, J. (2003). *La evaluación impulsada por estándares: problemas técnicos y políticos en la medición del progreso de la escuela y los estudiantes*. Grupo de trabajo sobre estándares y evaluación, 37 pp.
- Ministerio de Educación Nacional (1998). *Estándares para la excelencia en la educación*. Bogotá: MEN, 114 pp.
- Ministerio de Educación Nacional (1998). *Serie lineamientos curriculares*. Bogotá: MEN, p. 103.
- Ministerio de Educación Nacional (2003). *Exámenes de Calidad de la Educación Superior en Ingeniería Electrónica: Guía de Orientación*. Bogotá: MEN, p. 25.
- Ministerio de Educación Nacional (2003). *Programa de evaluación de la Educación Básica: Pruebas Saber*. Bogotá: MEN.
- Ministerio de Educación Nacional (2003). *Exámenes de estado para el ingreso a la educación superior. Cambios para el siglo XXI. Transformaciones en las pruebas para obtener resultados diferentes*. Bogotá: MEN, 44 pp.
- Ministerio de Educación Nacional, Presidencia de la República (2003). *Ley 842 del 9 de octubre de 2003*. Bogotá: MEN, 117 pp.
- Ministerio de Educación Nacional (2003). *Resolución 2773 de noviembre 13 de 2003*. Bogotá: MEN, 3 pp.
- NCTM (1991). *Estándares curriculares y de evaluación para la educación matemática*. Traducción de José María Álvarez Falcon y Jesús Casado. Madrid: Sociedad Andaluza de Educación Matemática Thales, 245 pp.
- Ocde (2000). *La medida de los conocimientos y destrezas de los alumnos. La medida de la lectura, las matemáticas y las ciencias en el proyecto de pisa 2000*. Organización para la Cooperación y Desarrollo Económicos (Ocde). Secretaría general técnica, 160 pp.
- Tuning América Latina (2005). *Lista de competencias genérica para América Latina*. <http://www.ascun.org.co/tuning/jgonzalez1.pdf>.

## Ecuaciones diferenciales lineales transformables en ecuaciones de coeficientes constantes

Néstor Raúl Pachón Rubiano<sup>1</sup>

**Abstract.** In this note we discuss about linear differential equations that are transformable in equations of constant coefficients, topic on which many references do not exist in the literature. At first we consider equations of order  $n$  in general, and then we consider the particular, and more frequent cases, in which  $n$  is 2 or 3.

Palabras claves: ecuación diferencial lineal, ecuación de Cauchy-Euler.

### Introducción.

Esta nota de clase está motivada por una pregunta que con cierta frecuencia se les escucha a alumnos, y también a profesores, del curso de ecuaciones diferenciales, sobre la ecuación de Cauchy-Euler.

Es conocido que si se hace el cambio de variable independiente  $z = \ln x$ , esa ecuación se convierte en una ecuación de coeficientes constantes, con la que es más sencillo trabajar. Lo que no siempre les queda claro a los estudiantes es el porqué de esa sustitución, y más aún, no saben si el mismo efecto se logra con otras sustituciones. Esto puede obedecer a que en un curso regular el profesor casi nunca cuenta con el tiempo suficiente para justificar detalladamente todas las explicaciones que les da a sus estudiantes, y a que en los libros de texto usuales los estudiantes no encuentran referencias o citas al respecto.

Lo que se pretende en esta nota de clase es no sólo responder las inquietudes mencionadas, sino más bien hallar condiciones para que una ecuación diferencial lineal se pueda transformar en una ecuación lineal de coeficientes constantes. En esta dirección, en la sección de ejercicios 2.4 de la referencia [1] se dan algunas indicaciones para el caso en el que la ecuación es de orden 2. En este artículo se consideran con más detalle éste y otros casos adicionales.

Buena parte del material que aquí se presenta lo expuso el autor en el ciclo de conferencias que el programa de Matemáticas de la Escuela organizó a finales del segundo semestre de 2006.

<sup>1</sup>Profesor de la Escuela Colombiana de Ingeniería, programa de Matemáticas. Magister Scientiae y Doctor en ciencias matemáticas de la Universidad Nacional de Colombia.

### Condiciones necesarias

Consideremos la ecuación diferencial lineal de orden  $n \geq 2$

$$\frac{d^n y}{dx^n} + a_{n-1}(x) \frac{d^{n-1} y}{dx^{n-1}} + \dots + a_2(x) \frac{d^2 y}{dx^2} + a_1(x) \frac{dy}{dx} + a_0(x) y = g(x), \quad (1)$$

para  $x$  en un intervalo abierto  $I$ , y en la que  $g(x), a_0(x), a_1(x), \dots, a_{n-1}(x)$  son funciones que dependen sólo de la variable independiente  $x$ , y  $a_0(x)$  es continua y no nula en el intervalo  $I$ .

Supongamos que  $u$  es una función que satisface las cuatro condiciones siguientes:

- i)  $u$  es inyectiva en el intervalo  $I$ .
- ii)  $u$  tiene derivadas hasta de orden  $n$  en  $I$ .
- iii)  $\frac{du}{dx}$  no tiene raíces en el intervalo  $I$ .
- iv) El cambio  $z = u(x)$  (de variable independiente) transforma la ecuación (1) en una ecuación lineal de coeficientes constantes.

La aplicación de la regla de la cadena nos lleva a que

$$\frac{dy}{dx} = \frac{du}{dx} \frac{dy}{du},$$

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \left(\frac{du}{dx}\right)^2 \frac{d^2 y}{du^2} + \frac{d^2 u}{dx^2} \frac{dy}{du}, \quad (2)$$

$$\frac{d^3 y}{dx^3} = \left(\frac{du}{dx}\right)^3 \frac{d^3 y}{du^3} + 3 \frac{du}{dx} \frac{d^2 u}{dx^2} \frac{d^2 y}{du^2} + \frac{d^3 u}{dx^3} \frac{dy}{du}.$$

Más generalmente, podemos demostrar por inducción matemática que para todo entero  $k \geq 3$ ,

$$\frac{d^k y}{dx^k} = \left(\frac{du}{dx}\right)^k \frac{d^k y}{du^k} + \frac{d^k u}{dx^k} \frac{dy}{du} + \sum_{j=2}^{k-1} \alpha_j \beta_j \frac{d^j y}{du^j},$$

donde cada  $\alpha_j$  es constante, y cada  $\beta_j$  es un producto de derivadas de  $u$  con respecto a  $x$ , hasta de orden  $j$ .

En consecuencia, si en la ecuación (1) reemplazamos las diferentes derivadas de  $y$  con respecto a  $x$ , obtenemos una ecuación de la forma

$$\left(\frac{du}{dx}\right)^n \frac{d^n y}{du^n} + C \left(\frac{dy}{du}, \frac{d^2 y}{du^2}, \dots, \frac{d^{n-1} y}{du^{n-1}}\right) + a_0(x) y = g(x), \quad (3)$$

donde  $C \left( \frac{dy}{du}, \frac{d^2y}{du^2}, \dots, \frac{d^{n-1}y}{du^{n-1}} \right)$  es una combinación lineal de las derivadas  $\frac{dy}{du}, \frac{d^2y}{du^2}, \dots, \frac{d^{n-1}y}{du^{n-1}}$ , en la que los coeficientes son funciones que dependen solo de  $a_{n-1}(x), \dots, a_1(x), \frac{du}{dx}, \frac{d^2u}{dx^2}, \dots, \frac{d^{n-1}u}{dx^{n-1}}$ .

Si dividimos en ambos lados de (3) por  $\left(\frac{du}{dx}\right)^n$  nos queda la ecuación diferencial lineal

$$\frac{d^n y}{du^n} + \frac{C \left( \frac{dy}{du}, \frac{d^2y}{du^2}, \dots, \frac{d^{n-1}y}{du^{n-1}} \right)}{\left(\frac{du}{dx}\right)^n} + \frac{a_0(x)}{\left(\frac{du}{dx}\right)^n} y = \frac{g(x)}{\left(\frac{du}{dx}\right)^n}. \tag{4}$$

De acuerdo con las condiciones impuestas a la función  $u(x)$ , esta ecuación es de coeficientes constantes, y en particular debe tenerse que

$$\frac{a_0(x)}{\left(\frac{du}{dx}\right)^n} = \alpha, \tag{5}$$

para alguna constante no nula  $\alpha$ , que puede elegirse a conveniencia.

Esto nos dice que en caso de que sea posible transformar la ecuación (1) en una de coeficientes constantes, los únicos remplazos posibles,  $z = u(x)$ , deben ser tales que se cumple (5). La condición (5) puede escribirse como

$$\left(\frac{du}{dx}\right)^n = \beta a_0(x), \tag{6}$$

para  $\beta = \frac{1}{\alpha}$ .

**Nota.** 1) Como  $\frac{du}{dx}$  no se anula en el intervalo  $I$ , la igualdad (6) implica que  $a_0(x)$  no puede tener raíces en  $I$ , y por la continuidad se deduce que  $a_0(x)$  no puede tener cambios de signo en  $I$ .

2) Cuando  $n$  es par,  $\beta$  debe tener el mismo signo de  $a_0(x)$  en  $I$ .

para  $x$  en un intervalo abierto  $I$ , y en la que  $Q(x)$  es una función continua y no nula en  $I$ .

Sea  $z = u(x)$  tal que  $u$  es una función inyectiva que admite derivadas hasta de orden 2 y  $\frac{du}{dx}$  no se anula en el intervalo  $I$ . Teniendo en cuenta las ecuaciones (2), podemos escribir la ecuación (8) como

$$\left(\frac{du}{dx}\right)^2 \frac{d^2y}{du^2} + \frac{d^2u}{dx^2} \frac{dy}{du} + P(x) \frac{du}{dx} \frac{dy}{du} + Q(x)y = g(x),$$

y ésta a su vez como

$$\frac{d^2y}{du^2} + \frac{\frac{d^2u}{dx^2} + P(x) \frac{du}{dx}}{\left(\frac{du}{dx}\right)^2} \frac{dy}{du} + \frac{Q(x)}{\left(\frac{du}{dx}\right)^2} y = \frac{g(x)}{\left(\frac{du}{dx}\right)^2}.$$

Esta ecuación lineal será de coeficientes constantes si y sólo si existen constantes  $\alpha$  y  $\beta$  tales que  $\alpha \neq 0$  y

$$\frac{Q(x)}{\left(\frac{du}{dx}\right)^2} = \alpha \text{ y } \frac{\frac{d^2u}{dx^2} + P(x) \frac{du}{dx}}{\left(\frac{du}{dx}\right)^2} = \beta. \quad (9)$$

La primera de estas igualdades nos dice que en el intervalo  $I$  la función  $Q(x)$  no puede tener raíces y que la constante  $\alpha_1$  debe tener el mismo signo que  $Q(x)$  en  $I$ .

Si hacemos  $\alpha_1 = \frac{1}{\alpha}$ , la primera igualdad en (9) nos conduce a

$$u(x) = \pm \int \sqrt{\alpha_1 Q(x)} dx.$$

Ahora, basta con analizar el caso en el que el signo es +, ya que es obvio que el cambio con el signo + satisfará la segunda igualdad en (9) si y sólo si el cambio con el signo - también la satisface.

Como en ese caso

$$\frac{du}{dx} = \sqrt{\alpha_1 Q(x)} \text{ y } \frac{d^2u}{dx^2} = \frac{\alpha_1 \frac{dQ}{dx}}{2\sqrt{\alpha_1 Q(x)}},$$

3) Si la ecuación (1) es una ecuación de Cauchy-Euler, digamos

$$b_n x^n \frac{d^n y}{dx^n} + b_{n-1} x^{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dx^{n-1}} + \dots + b_2 x^2 \frac{d^2 y}{dx^2} + b_1 x \frac{dy}{dx} + b_0 y = g(x), \quad (7)$$

en la que suponemos que  $x \in (0, +\infty)$ , que  $b_0, b_1, \dots, b_n$  son constantes con  $b_0 \neq 0$  y  $b_n \neq 0$ , entonces podemos escribir ésta como

$$\frac{d^n y}{dx^n} + a_{n-1}(x) \frac{d^{n-1} y}{dx^{n-1}} + \dots + a_2(x) \frac{d^2 y}{dx^2} + a_1(x) \frac{dy}{dx} + a_0(x) y = h(x),$$

con  $a_{n-1}(x) = \frac{b_{n-1}}{b_n x}, \dots, a_2(x) = \frac{b_2}{b_n x^{n-2}}, a_1(x) = \frac{b_1}{b_n x^{n-1}}, a_0(x) = \frac{b_0}{b_n x^n}$  y  $h(x) = \frac{g(x)}{b_n x^n}$ .

Si hacemos  $\gamma = \frac{\beta b_0}{b_n}$  entonces, en este caso, la ecuación (6) se convierte en

$$\left(\frac{du}{dx}\right)^n = \frac{\gamma}{x^n}$$

De aquí se deduce que, para algunas constantes  $a$  y  $b$ , con  $b \neq 0$ ,

$$u(x) = a + b \ln x.$$

Esto quiere decir que si la ecuación (7) se puede transformar en una ecuación de coeficientes constantes, sólo se puede lograr esto con una sustitución de la forma  $z = a + b \ln x$ . Además, es fácil comprobar que realmente cada una de estas sustituciones tiene ese efecto sobre la ecuación (7).

En esta forma se han resuelto las primeras inquietudes que se plantearon en la introducción de la presente nota de clase.

### Condiciones necesarias y suficientes

Vamos a considerar los casos particulares en los que el orden de la ecuación (1) es 2 o 3, y en cada uno de ellos presentaremos condiciones necesarias y suficientes para que la ecuación se convierta en otra de coeficientes constantes.

i) Supongamos que tenemos una ecuación de la forma

$$\frac{d^2 y}{dx^2} + P(x) \frac{dy}{dx} + Q(x) y = g(x), \quad (8)$$

tomando constante de integración igual a 0. De esta manera, la ecuación dada adopta la forma  $\frac{d^2y}{du^2} - \frac{1}{2} \frac{dy}{du} + y = 0$ . La ecuación característica de esta ecuación lineal de coeficientes constantes tiene por raíces a  $\frac{1 \pm i\sqrt{15}}{4}$ , por lo que la solución general de esta última es

$$y(u) = e^{\frac{1}{4}u} \left[ C_1 \cos \left( \frac{\sqrt{15}}{4}u \right) + C_2 \sin \left( \frac{\sqrt{15}}{4}u \right) \right],$$

donde  $C_1, C_2$  son constantes arbitrarias. En consecuencia, la solución general de la ecuación original es

$$y(x) = e^{\frac{\sqrt{3}}{3}v(x)} [C_1 \cos(\sqrt{5}v(x)) + C_2 \sin \sqrt{5}(v(x))],$$

con  $v(x) = \tan^{-1} \left( \frac{2x+1}{\sqrt{3}} \right)$  ■

ii) Finalmente, consideremos una ecuación lineal de orden 3 de la forma

$$\frac{d^3y}{dx^3} + P(x) \frac{d^2y}{dx^2} + Q(x) \frac{dy}{dx} + R(x)y = g(x), \quad (10)$$

para  $x$  en un intervalo abierto  $I$ , y en la que  $R$  es una función continua y no nula en  $I$ .

Si  $u$  es una función inyectiva y con derivadas hasta de orden 3, y si  $\frac{du}{dx}$  no tiene raíces en el intervalo  $I$ , entonces la sustitución  $z = u(x)$  convierte la ecuación (10) en

$$\begin{aligned} \left( \frac{du}{dx} \right)^3 \frac{d^3y}{du^3} + 3 \frac{du}{dx} \frac{d^2u}{dx^2} \frac{d^2y}{du^2} + \frac{d^3u}{dx^3} \frac{dy}{du} + P(x) \left[ \left( \frac{du}{dx} \right)^2 \frac{d^2y}{du^2} + \frac{d^2u}{dx^2} \frac{dy}{du} \right] \\ + Q(x) \frac{du}{dx} \frac{dy}{du} + R(x)y = g(x), \end{aligned}$$

y ésta a su vez se convierte en

la segunda igualdad en (9) se convierte en

$$\frac{\alpha_1 \frac{dQ}{dx} + P(x)\sqrt{\alpha_1 Q(x)}}{2\sqrt{\alpha_1 Q(x)} \alpha_1 Q(x)} = \beta,$$

es decir,

$$\frac{\alpha_1 \left[ \frac{dQ}{dx} + 2P(x)Q(x) \right]}{2(\alpha_1 Q(x))^{\frac{3}{2}}} = \beta.$$

En consecuencia, la ecuación (8) es transformable en una ecuación de coeficientes constantes si y sólo si

$$\frac{\alpha_1 \left[ \frac{dQ}{dx} + 2P(x)Q(x) \right]}{2(\alpha_1 Q(x))^{\frac{3}{2}}}$$

es constante en el intervalo  $I$ .

*Ejemplo.* Consideremos la ecuación diferencial lineal de orden 2

$$(x^2 + x + 1) \frac{d^2y}{dx^2} + 2x \frac{dy}{dx} + \frac{4}{x^2 + x + 1} y = 0.$$

Podemos escribir ésta como  $\frac{d^2y}{dx^2} + \frac{2x}{x^2 + x + 1} \frac{dy}{dx} + \frac{4}{(x^2 + x + 1)^2} y = 0$ . Como

$P(x) = \frac{2x}{x^2 + x + 1}$  y  $Q(x) = \frac{4}{(x^2 + x + 1)^2} > 0$ , entonces  $\alpha_1$  debe ser positiva.

Si tomamos  $\alpha_1 = 1$ , nos queda que

$$\frac{\alpha_1 \left[ \frac{dQ}{dx} + 2PQ \right]}{2(\alpha_1 Q)^{\frac{3}{2}}} = \frac{\frac{dQ}{dx} + 2PQ}{2(Q)^{\frac{3}{2}}} = \frac{\frac{-8(2x+1)}{(x^2+x+1)^3} + \frac{16x}{(x^2+x+1)^3}}{\frac{16}{(x^2+x+1)^3}} = \frac{-1}{2} = \beta,$$

con lo que la ecuación dada es transformable en una ecuación de coeficientes constantes, y una sustitución conveniente (de variable independiente) es

$$z = u(x) = \int \sqrt{\frac{4}{(x^2 + x + 1)^2}} dx = \frac{4\sqrt{3}}{3} \tan^{-1} \left( \frac{2x + 1}{\sqrt{3}} \right),$$



$$\frac{d^3y}{du^3} + \frac{3 \frac{du}{dx} \frac{d^2u}{dx^2} + P(x) \left(\frac{du}{dx}\right)^2}{\left(\frac{du}{dx}\right)^3} \frac{d^2y}{du^2} + \frac{\frac{d^3u}{dx^3} + P(x) \frac{d^2u}{dx^2} + Q(x) \frac{du}{dx}}{\left(\frac{du}{dx}\right)^3} \frac{dy}{du} + \frac{R(x)}{\left(\frac{du}{dx}\right)^3} y = \frac{g(x)}{\left(\frac{du}{dx}\right)^3}.$$

Esta ecuación lineal será de coeficientes constantes si y sólo si

$$\begin{aligned} \frac{R(x)}{\left(\frac{du}{dx}\right)^3} &= \alpha_1 \neq 0, \\ \frac{\frac{d^3u}{dx^3} + P(x) \frac{d^2u}{dx^2} + Q(x) \frac{du}{dx}}{\left(\frac{du}{dx}\right)^3} &= \alpha_2, \\ \frac{3 \frac{du}{dx} \frac{d^2u}{dx^2} + P(x) \left(\frac{du}{dx}\right)^2}{\left(\frac{du}{dx}\right)^3} &= \alpha_3, \end{aligned} \tag{11}$$

son constantes.

Si hacemos  $\alpha = \sqrt[3]{\frac{1}{\alpha_1}}$ , la primera de estas igualdades conduce a

$$u(x) = \alpha \int \sqrt[3]{R(x)} dx,$$

con lo que

$$\frac{du}{dx} = \alpha \sqrt[3]{R(x)}, \quad \frac{d^2u}{dx^2} = \frac{\alpha \frac{dR}{dx}}{3 \sqrt[3]{(R(x))^2}} \text{ y } \frac{d^3u}{dx^3} = \frac{\alpha \left[ 3R(x) \frac{d^2R}{dx^2} - 2 \left(\frac{dR}{dx}\right)^2 \right]}{9 \sqrt[3]{(R(x))^5}},$$

y al sustituir en la segunda y tercera igualdades de (11) queda, luego de simplificaciones, que

$$\frac{\frac{dR}{dx} + P(x) R(x)}{\alpha (R(x))^{\frac{4}{3}}}$$

y

$$\frac{3R(x) \frac{d^2R}{dx^2} - 2 \left( \frac{dR}{dx} \right)^2 + 3P(x)R(x) \frac{dR}{dx} + 9Q(x) (R(x))^2}{9\alpha^2 (R(x))^{\frac{8}{3}}}$$

deben ser constantes.

Luego, la ecuación (10) se puede transformar en una ecuación de coeficientes constantes si y sólo si estas dos últimas expresiones son constantes.

*Ejemplo.* Consideremos la ecuación lineal de orden 3

$$x^6 \frac{d^3y}{dx^3} + (6x^5 + 3x^4) \frac{d^2y}{dx^2} + (6x^4 + 6x^3 + 3x^2) \frac{dy}{dx} + y = 0, \text{ con } x > 0.$$

Ésta puede escribirse como

$$\frac{d^3y}{dx^3} + \frac{6x + 3}{x^2} \frac{d^2y}{dx^2} + \frac{6x^2 + 6x + 3}{x^4} \frac{dy}{dx} + \frac{1}{x^6} y = 0, \tag{12}$$

con lo que  $P(x) = \frac{6x + 3}{x^2}$ ,  $Q(x) = \frac{6x^2 + 6x + 3}{x^4}$  y  $R(x) = \frac{1}{x^6}$ .  
Si tomamos  $\alpha = 1$ , tenemos que

$$\frac{\frac{dR}{dx} + P(x) R(x)}{\alpha (R(x))^{\frac{4}{3}}} = 3$$

y

$$\frac{3R(x) \frac{d^2R}{dx^2} - 2 \left( \frac{dR}{dx} \right)^2 + 3P(x)R(x) \frac{dR}{dx} + 9Q(x) (R(x))^2}{9\alpha^2 (R(x))^{\frac{8}{3}}} = 3,$$

luego la ecuación (12) se puede transformar en una ecuación lineal de coeficientes constantes, y una sustitución adecuada es

$$z = u(x) = \int \sqrt[3]{\frac{1}{x^6}} dx = -\frac{1}{x},$$

tomando constante de integración igual a 0. Así las cosas, la ecuación (12) se transforma en

$$\frac{d^3y}{du^3} + 3 \frac{d^2y}{du^2} + 3 \frac{dy}{du} + y = 0, \tag{13}$$

que tiene como ecuación característica a  $r^3 + 3r^2 + 3r + 1 = 0$ . La única raíz de esta ecuación es  $r = -1$ , de multiplicidad 3, luego la solución de la ecuación (13) es

$$y(u) = d_1 e^{-u} + d_2 u e^{-u} + d_3 u^2 e^{-u},$$

donde  $d_1$ ,  $d_2$  y  $d_3$  son constantes arbitrarias. Por lo tanto, la solución general de la ecuación dada es

$$y(x) = C_1 e^{1/x} + C_2 \frac{1}{x} e^{1/x} + C_3 \frac{1}{x^2} e^{1/x},$$

donde se ha hecho  $C_1 = d_1$ ,  $C_2 = -d_2$  y  $C_3 = d_3$ .

### Referencia

- [1] Boyce W. E. & DiPrima R. C. 2002. *Ecuaciones diferenciales y problemas con valores en la frontera*. Editorial Limusa, México.

FORO

# Telecomunicaciones, convergencia e innovación. Apropiación social de las TIC como motor de desarrollo del país

## GUILLERMO TEUTA (moderador)

Ingeniero electrónico de la Universidad de Antioquia. Especialista en telecomunicaciones y magíster en ingeniería de la Universidad Pontificia Bolivariana. Es el director de la Especialización en Telemática Aplicada a Negocios por Internet de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

El 16 de agosto de 2007, en las instalaciones de la Escuela Colombiana de Ingeniería, se realizó este foro, donde se analizaron las condiciones actuales que brindan el gobierno, la empresa privada y la academia, respecto a la apropiación real de las TIC como motor de desarrollo, para mejorar el nivel de competitividad del país en el ámbito internacional.

Como introducción al tema se presentaron las ponencias de los doctores Daniel Medina, viceministro de Comunicaciones, y Marco Rodolfo Pérez, director del área de negocios de *enterprise y marketing* estratégico de Ericsson.

Los panelistas del foro respondieron a las siguientes preguntas planteadas:

- ¿Cuáles son los estándares de los servicios de televisión digital, terrestre y móvil más adecuados para Colombia?
- ¿Cómo se está dando la competencia entre los operadores de la telefonía fija, móvil, celular y televisión por cable?
- ¿Cuál es la realidad de la convergencia fijo-móvil en las redes y servicios de telecomunicaciones en Colombia?

- ¿Cómo pueden contribuir significativamente las actividades de investigación y desarrollo e innovación a la apropiación social de las TIC?

## PONENTES

### Gabriel Jurado Parra

Experto comisionado de la Comisión de Regulación de las Telecomunicaciones.

### Carlos Eduardo Casallas

Gerente de prospectiva y estrategia corporativa de la Empresa de Telecomunicaciones de Bogotá.

### Peter Romero Cruz

Gerente de proyectos del Centro de Investigación de las Telecomunicaciones.

### Joaquín Oramas Leuro

Vicerrector académico de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

**DANIEL MEDINA**

Ciertamente, se ha elevado el número de usuarios en todos los servicios, pero no el nivel de ingresos de los operadores, por lo que los inversionistas en este sector se preguntan para qué crecer si los ingresos no crecen de la misma manera. En cualquier industria, los usuarios iniciales son los que tienen más capacidad de pago y los que se enfrentan a unos precios altos al comienzo, pero a medida que se quieren masificar los servicios, los inversionistas tienen que empezar a bajar los precios y ofrecer nuevos servicios con estrategias de precios más baratas, razón por la cual el Arpu (*Average Revenue Per User* o ingreso medio por usuario) no crece en la misma proporción que el número de clientes. Por ejemplo, en telefonía móvil celular hay casi 30 millones de abonados, pero el Arpu no supera los US\$10 por usuario mensualmente. Ese es el gran reto de los inversionistas: masificar los servicios pero incrementando el ingreso medio por cliente.

El segundo punto importante es que el control de la infraestructura en este entorno se vuelve sumamente estratégico, pues quien la controla tiene en sus manos los mercados, ya que puede poner condiciones de negociación a todos los que quieran acceder a esta infraestructura.

El tercer punto es la competencia en los sectores móviles. Hay competencia, indudablemente; algunos dicen que restringida porque el número de competidores es pequeño, tres o cuatro, pero aquí se abre otro debate: la aparición de operadores virtuales y nuevos operadores de tercera generación, que en algunos casos generan presiones competitivas y en otros no, dependiendo de cuál es la decisión gubernamental sobre cómo entran estos nuevos actores a la industria.

En resumen, tenemos tres puntos: masificación sin incrementar el ingreso medio por cliente, control de infraestructura como un activo vital y competencia en los sectores móviles, en algunos casos restringida.

**Nuevos desarrollos**

Quiero hablar a continuación del tema de operadores móviles y de la convergencia fija o móvil, tecnología que vamos a ver seguramente en Colombia en los próximos dos años. Cuando uno tiene su terminal móvil y va en el carro pues está conectado a una red móvil, que aquí podríamos llamar de servicios personales, pero al llegar al hogar a descansar puede conectarlo a la red

fija y utilizarlo para aplicaciones de banda ancha, lo que nos saldría mucho más barato si las hiciéramos mediante la red móvil. Esto significa que el terminal móvil puede convertirse en terminal fijo e incluso en la oficina puede actuar como dual. Esto ya es una realidad en Asia, pero en Europa está apenas viéndose.

El otro tema que está moviéndose mucho son los estándares IP, que permiten la entrada segmentada al mercado e incluso en algunos casos permiten agregar valor; de esta manera se pueden ofrecer servicios que no están bajo un estricto control regulatorio ni de las entidades de gobierno ni de las entidades reguladoras, sino que se separan de esta limitación y se vuelven servicios de valor agregado, cuya prestación es mucho más sencilla.

Estos son unos comentarios iniciales para ambientar el tema de la convergencia. La convergencia es la posibilidad tecnológica de proveer múltiples servicios sobre múltiples redes. Se habla de convergencia de servicios, convergencia de redes, convergencia de mercados, en fin, se habla de diferentes temas. Hoy en día uno dice que hay convergencia en Colombia porque los operadores ofrecen paquetes de servicios tales como televisión, telefonía, banda ancha, internet. Sin embargo, eso realmente no es convergencia, es una etapa inicial de la misma; la convergencia real se va a presentar cuando las redes se integren y sea casi imposible distinguir a qué red nos estamos conectando y sobre qué servicio estamos funcionando.

**Cómo aprovechar estas posibilidades**

A los inversionistas les interesa que haya convergencia, fundamentalmente porque el ingreso medio por cliente no está creciendo y la convergencia lo que hace es aumentar la lealtad del cliente con un operador determinado y, por ende, incrementar de manera pequeña pero importante el ingreso medio por cliente. Así las cosas, hay que trabajar en tres entornos: normativo, institucional y regulatorio. En el normativo, me referiré a unos decretos que el gobierno ya aprobó; en el institucional, hay un gran debate sobre las instituciones que actúan sobre diferentes servicios, y en el regulatorio, más adelante se hablará sobre lo que está haciendo la Comisión de Regulación de Telecomunicaciones para que la convergencia sea una realidad en Colombia.

Esto es lo que está pasando a nivel mundial. Tenemos los operadores de telecomunicaciones, que tradi-

cionalmente se encuentran en los sectores móviles y fijos, moviéndose hacia proveedores de acceso a internet y televisión, como ocurrió en Colombia con las adquisiciones de la televisión por suscripción de parte de Telmex, o los anuncios de Telefónica de prestar televisión vía satélite, pero todos tratando de hacer lo mismo. En el ámbito europeo, la convergencia se está dando en todos los servicios, mientras que en Estados Unidos vemos también una convergencia pero hay dos industrias separadas: la industria de telecomunicaciones y la industria de televisión. La tendencia actual de operadores de contenido entrando a la industria de telecomunicaciones, y a la industria de la televisión, puede hacer que esta convergencia sea mucho más compleja y retadora para los gobiernos.

### Reto normativo

El presidente Uribe firmó hace poco el decreto de convergencia, que trae básicamente cinco decisiones. La primera es que se otorga un título para prestar cualquier servicio, es decir, que con un solo título —llamado título habilitante convergente— los operadores podrán prestar todos los servicios, excepto aquellos en los cuales por disposición legal expresa se requiere licitación pública, como el servicio de telefonía móvil celular, definido en la Ley 37, y el servicio personal de comunicaciones, definido en la Ley 555; los demás, como la telefonía local, la local extendida, la móvil rural, están liberados por la Ley 142. La otra buena noticia es que este título vale solamente tres salarios mínimos, pues el gobierno quiere que haya mucha innovación en el sector, con operadores de todos los tamaños. Obviamente, como negocio el reto es inmenso.

El segundo tema es que Colombia, en comparación con el entorno mundial, tiene un alto nivel de contribuciones, por lo que el gobierno tomó la decisión de revisar a la baja estas contribuciones, con el fin de tratar de equipararlas con el estándar internacional hacia el 2010 y facilitar así la inversión en el sector.

El tercer punto tiene que ver con la oferta mayorista. Esta oferta se hace obligatoria para los operadores que controlan ciertos mercados, lo que se llama mercado relevante, con el propósito de facilitar la entrada de inversionistas al sector y ayudar también a que haya más convergencia con los nuevos servicios.

El cuarto punto es el tema de la red de telecomunicaciones del Estado. Anteriormente había que pedir

algunos permisos para modificar las redes, pero ahora eso se elimina completamente, y en contraprestación al hecho de que se facilita la extensión de las redes, se permite su implementación en Colombia; para los operadores que tengan posición de dominio se hace obligatoria la desagregación, esto es, deberán ofrecerla a terceros, obviamente en condiciones de negocio atractivas. Vale la pena aclarar que no se trata de entregarles la infraestructura a otros a precios bajos o de manera desfavorable para quien la construyó, sino de hacerla en condiciones de negocio adecuadas.

El último punto es el referente a la creación de un mercado secundario de espectro. Hoy en día, si un operador pide un espectro se le da una licencia para un servicio específico, pero si le va mal en el negocio entonces debe devolver el espectro; por eso normalmente los operadores se quedan con él hasta que se venza el término, tratando de ver qué hacen. Ahora se da la opción de ceder ese espectro a otro inversionista, lógicamente con la autorización del gobierno, para que pueda continuar con otro negocio e incluso en otro servicio; esperamos que esto dinamice la utilización del espectro, puesto que sabemos que hay muchas partes del espectro otorgadas que no se están utilizando hoy en día.

En resumen, el decreto tiene tres medidas importantes: la primera es que elimina las barreras de entrada al otorgar un solo título, algo bastante útil para competidores que se quieran integrar verticalmente; la segunda obliga a la desagregación, lo que beneficia a competidores que estén parcialmente integrados, es decir, que tengan una infraestructura en un segmento de telecomunicaciones y en otro no, pues en aquel que no tengan pueden acceder a la desagregación.

Se dan las tres opciones, y ya cada inversionista decide cómo quiere competir. Por supuesto que a algunos les gustan mucho las medidas y a otros no, pero digamos que la decisión de país es que el sector sea muy competitivo, que sea convergente y que existan las tres opciones para poder entrar al sector a prestar servicios.

### Televisión digital

Me pidieron que hiciera una exposición sobre cuál es el estándar de televisión digital que le conviene más a Colombia, pero lamentablemente esa respuesta no la puedo dar en este momento. Tenemos una meta ya es-

tablecida para definir el estándar de televisión digital a más tardar en marzo, porque vienen las prórrogas de las concesiones a los dos canales privados y la licitación del tercer canal.

Lo que voy a tratar de dar son algunos elementos. Hay tres estándares: el norteamericano (ATCC), que se centra en la alta definición; el europeo (DVB-T), que privilegia el número de canales, y el japonés (ISDB), que prefiere la movilidad. Técnicamente, los tres estándares no son compatibles en este momento y eso lleva a un debate para definir cuál vamos a escoger en Colombia; finalmente, se escogerá el que se adecue más a las condiciones del país y a lo que, desde el punto de vista de política sectorial de televisión, queramos tener en Colombia en el futuro. No es lo mismo si queremos tener televisión de alta definición en todos los hogares o queremos hacerle énfasis a la televisión móvil o si más bien optamos por un sistema más barato.

La Comisión Nacional de Televisión, en conjunto con el Consorcio de Canales Privados, ya está haciendo pruebas con dos estándares: el americano y el europeo, y en un futuro se empezarán a hacer las pruebas con el estándar japonés.

Me voy a referir ahora a algunos elementos que inciden en la toma de decisión. El primero es que se ha hablado mucho de la disminución de la brecha digital utilizando la televisión digital y de que tenemos solamente el 16% de usuarios de internet, el 82% de los cuales está concentrado en las tres ciudades más grandes del país. Una de las cosas que hemos visto es que los servicios realmente interactivos necesitan un canal de retorno; esto es, la señal que viaja desde el usuario hacia el sistema para solicitar sus servicios interactivos se hace por un canal de retorno, pero ese canal, si se quiere que sea realmente fuerte, robusto, se tiene que hacer por un medio distinto del enlace de televisión digital, es decir, se necesita tener ADSL u otro tipo de facilidad. El comité asesor consideró este tema muy importante, porque al requerir otra infraestructura no parece tan fácil que esto en Colombia sea una realidad a corto plazo y seguramente tendremos que seguir con la política de los proyectos que se han llevado a cabo hasta ahora, que es masificar la banda ancha y hacer aportes a través de los programas del gobierno darles conectividad a los municipios más alejados del país.

### Alta definición

El segundo debate que se está dando en el comité está relacionado con la necesidad de tener alta definición en Colombia. Estados Unidos sí incluyó dentro de su objetivo de política de televisión digital tener alta definición, pero es que ellos cuentan con una industria de cable muy fuerte; en Europa, en cambio, la alta definición no es importante porque la industria de cable no es fuerte. En nuestro caso, primero tenemos que identificar qué tan fuerte es la industria de cable en Colombia, qué tan diferente debe ser el producto de televisión digital de lo que ya existe y, en ese entorno, ver si la alta definición es o no una prioridad; obviamente, esto tiene costos en términos de espectro, de transición y de los terminales que deben comprarse.

La tercera gran discusión es si se debe apoyar o no la industria de contenidos en Colombia. En la actualidad, la cadena de valor del servicio de televisión es completamente integrada, pero al ser todo digital podría abrirse la oportunidad, como ha sucedido en Japón, de que se cree una industria muy fuerte de desarrollo de contenidos. Esto estimularía la creación de una industria local de contenidos que incluso pudiera exportar, como hoy en día ocurre con las telenovelas. En lo que respecta a los nuevos servicios de interactividad la experiencia internacional nos indica que se necesita un nivel educativo de los usuarios alto, y ese no es precisamente el caso de Colombia, sobre todo en provincia; puede que tengamos este objetivo, puede que no, pero hay que tener claro si es viable o no lograrlo en un plazo razonable.

En cuanto al asunto de la movilidad y portabilidad, cabe señalar que el estándar americano no es fuerte en movilidad, el europeo más o menos y el japonés sí lo es. Hay que considerar esto también cuando se vaya a tomar la decisión sobre el estándar que más nos convenga.

El otro tema es la multicanalidad en definición estándar y alta definición. El estándar digital tiene la ventaja de que generalmente en el mismo ancho de banda en un canal analógico en digital caben cuatro canales y se prestan algunos servicios que pueden llegar a ser muy atractivos para el usuario, pero aquí también juega la alta definición que mencioné antes, pues los terminales de alta definición son muy costosos. Habrá que ver si vale o no la pena implementarlo en Colombia, pero la multicanalidad será algo que va a

existir y que va a influir en este objetivo que también se está discutiendo.

La frecuencia única es un tema muy discutido en la industria de la televisión. Hoy en día, un canal puede estar en la frecuencia nueve en Bogotá y si uno se va para Medellín le toca sintonizar el quince; desde el punto de vista de posicionamiento del canal eso es terrible, además de que los que entraron primero y los que entraron de último son los que más se mueven, dependiendo del sitio del país donde uno sintonice el canal. En televisión digital esto ya no es un problema, se puede establecer la frecuencia única.

El otro tema es la liberación del espectro que se logra con la tecnología digital, que tiene un valor muy importante como activo y que en el futuro nos podría permitir abrir un espacio de espectro para servicios móviles distintos de los que hoy en día tenemos.

El otro punto, cómo se implementa esto, es quizás uno de los temas más importantes. Resulta que hoy en día contamos con un sistema analógico y vamos a ir hacia uno digital, pero las personas tienen un televisor cuyo sintonizador está diseñado para una modulación analógica. Hemos visto que en la mayoría de los países este problema se resuelve al principio con lo que llaman un *set-top box* (STB), que vale US\$40 y que lo único que hace es modular en digital y entregar la señal de video al televisor; para eso el televisor debe tener una señal de entrada de video, pero los televisores del año 95 hacia atrás carecen de ella. Al principio con el accesorio es suficiente, pero la idea es que la gente migre finalmente a la televisión digital, porque se estima que la producción de televisores analógicos, sobre todo a partir del 2014, empezará a caer de manera dramática y no queremos un país que se quede atrás en tecnología. Creo que si nos demoramos uno o dos años en implementarla, estaremos apenas a tiempo para no quedarnos rezagados en este aspecto.

Este fue un resumen de los temas que se están revisando en el comité de televisión digital asesor, con miras a tener todo claro en marzo del año entrante para tomar la decisión del estándar. Lamento no haber podido responder la pregunta que me hizo la organización sobre cuál es el estándar que le conviene más a Colombia, pero éstos son los elementos que se están analizando.

## MARCO RODOLFO PÉREZ

Como representante de un proveedor de tecnología y de soluciones en el área de telecomunicaciones con bastante trayectoria, nos honra que nos hayan tenido en cuenta para aportar algo en el tema de convergencia e innovación.

El tema que hemos escogido es algo que Ericsson ha venido mostrando últimamente en varios foros locales, regionales e internacionales, alrededor de la banda inalámbrica, sobre todo de banda ancha móvil.

Nosotros somos unos convencidos de que la convergencia está aquí, de que la forma de que nuestros países se involucren en la globalización y disminuyan la brecha digital lógicamente es desplegando tecnología, como lo ha demostrado Corea.

Primero que todo hay que identificar el tamaño del mercado de banda ancha, especialmente sus beneficios para la sociedad. La banda ancha no debe ser una prerrogativa sólo de los niveles de más altos ingresos en una sociedad.

¿Cuáles son las fuerzas en la sociedad que van a llevarnos a masificar la banda ancha? Pues adoptadores tempranos, los que pueden pagar esos servicios porque los necesitan, pero cuando hay fuerzas en el mercado que hacen que tales servicios sean cada vez más accesibles, cuando los operadores tienen que bajar sus tarifas, eso no viene únicamente por coincidencia; lo vimos con la entrada de la telefonía móvil, que fue elitista en un principio y ahora es mucho más masiva que la telefonía fija. Lo mismo va a pasar con la banda ancha.

## Beneficios para la sociedad

Esto puede parecer algo redundante, pero son muchos. Estamos en una sociedad de la información y el conocimiento, por lo que el crecimiento industrial se produce alrededor de una infraestructura de tecnología que permita ofrecer servicios, los cuales están orientados cada vez más a servicios de información.

El crecimiento sostenible es la parte importante. El planeta se está calentando cada vez más, razón por la cual todo lo que hagamos debe estar orientado al crecimiento sostenible, pues crecimiento a través de subsidios o de caridad no existe. Colombia es un país en el que la estructura sociogeográfica está bastante distante, es una nación demasiado urbana, con un territorio de un millón doscientos mil kilómetros cuadrados, y a



largo plazo tenemos que darles acceso a los usuarios a todos los servicios, no importa dónde estén ubicados. Lógicamente, con tecnología de banda ancha tenemos investigación y desarrollo mucho más productivos; es la única manera de incorporarse a la sociedad global, como lo ha demostrado la India con sus centros de desarrollo en Bangalore. La banda ancha va a permitir que la gente no necesite desplazarse tanto, lo que reducirá bastante el uso del carro e incidirá favorablemente en la disminución del calentamiento global; adicionalmente, va a incrementar eficiencias en las empresas, en los gobiernos, en los sistemas educativos y de salud, y como estamos en un mundo muy mediático y los medios están orientados al entretenimiento y a emplear cada vez más contenidos generados por el mismo usuario, entonces el mismo consumidor también es productor, el llamado prosumidor, es decir, el consumidor que también produce. El mejor ejemplo de esto es You Tube, ya que más del 10% de internet está generado por este sitio web. Tenemos que aportar a reducir el calentamiento global, tal como lo está haciendo British Telecom; el 10% de los empleados de esta compañía de telecomunicaciones trabaja desde la casa o desde sitios con acceso remoto, lo que ha disminuido la necesidad de viajar en más de 69 millones de millas por año. Esto demuestra a las claras que la tecnología es uno de los elementos que van a ayudar a mejorar la situación ambiental.

La convergencia consiste en poder utilizar la banda ancha en cualquier lugar y de ese modo reducir la brecha digital existente entre campo, ciudad y estratos, en especial ahora que las comunicaciones se están volviendo cada vez más personales. El gran impacto que tuvo la telefonía móvil fue personalizar la telefonía, no ser la telefonía del apartamento, de la casa o de la oficina sino la del individuo, y el individuo básicamente es móvil y no tiene alambres conectados; pienso que la banda ancha va a seguir el mismo proceso.

La curva de maduración de las tecnologías es una teoría que tenemos sobre cómo masificar la banda ancha para llegar a una penetración del 100%. Lógicamente hay que comenzar por una fase inicial de adoptadores tempranos, bastante costosa, para llegar después a una fase donde las tecnologías y las tarifas se hacen más accesibles; únicamente con tecnologías y estándares globales armonizados se podrá usar el celular, por ejemplo, en cualquier sitio. Eso se llama tecno-

logías de escala, que significan que a precios menores, a mayor volumen, menor costo.

### Crecimiento

La banda ancha fija está por el orden de los 300 millones de usuarios en el mundo y la banda ancha móvil se encuentra cerca de los 150 millones de usuarios, para un total de unos 450 millones hoy en día. La banda ancha fija se está montando sobre las mismas líneas telefónicas, por lo que el único destino que tiene el cobre en la actualidad es volverse datos; las redes móviles son capaces de dar banda ancha y lograr uno de los puntos de adopción rápida, que es personalizar el servicio.

Las economías de escala se hacen con estándares globales abiertos. En el caso de las redes móviles, en este instante tenemos más de tres billones de usuarios móviles en el mundo de una población superior a los seis y medio billones, o sea que estamos acercándonos al 50% de penetración móvil en todo el planeta; ahí es donde el Estado tiene que ayudar porque no son servicios elitistas y, por ende, no es razonable gravarlos con el IVA.

Un aspecto muy importante, que va a facilitar el uso de banda ancha móvil, es que si la gente se acostumbra a utilizar un servicio y a tener acceso a él en cualquier lugar, gracias a que con un mismo dispositivo puede acceder a voz y datos, es decir, a emplear dispositivos duales compatibles con la generación anterior y con cobertura nacional, la confianza de los usuarios se disparará.

### Conectividad

La idea no es tener sólo conectividad sino también conectividad ampliada con calidad de servicio, con acceso ilimitado, seguro y contenidos que estarán al nivel de servicios de multimedia o video demanda, o lo relacionado con dispositivos de red que funcionen en todos estos ambientes.

En lo referente al tema de costos, se puede afirmar que la economía de escala permite tener costos predecibles, aspecto que es clave para adoptar una tecnología; si yo no sé cuánto voy a pagar o cuánto me va a costar es muy difícil tomar una decisión, pero ya cuando hay costos predecibles, costos competitivos, vamos a compensar la pérdida de ingresos simplemente por tener minutos más baratos.

Los gobiernos cada vez son más conscientes del valor que significa para la sociedad el incrementar la

penetración de la banda ancha, por fortuna. Corea tiene un objetivo muy claro: acceso y servicio de banda ancha para todos en el año 2010, independientemente del sitio donde estén. Si nosotros queremos mantener a la gente en los campos, que no se desplace tanto a la ciudad, hay que darle acceso a los servicios, que no sienta la diferencia de estar en el campo o en la ciudad. A eso debemos llegar.

Los servicios para la sociedad se van a lograr básicamente con tecnologías de banda ancha que soporten economías de escala, que permitan masificar el mercado haciéndolo accesible a todos. En este orden de ideas, el espectro es una parte fundamental de la banda ancha móvil, pues sin él no hay redes móviles; por eso es importante alinearse con las decisiones internacionales. Nosotros creemos que tecnologías con estándares abiertos y globales serán la principal corriente tecnológica para lograr banda ancha móvil y poder masificar el servicio, con miras a superar los 7,5 millones de líneas.

## GUILLERMO TEUTA

Para darle continuidad a nuestro programa pasamos al evento central, el panel titulado “Telecomunicaciones, convergencia e innovación. Apropiación social de las TIC como motor de desarrollo del país”; para esto me permito invitar a la mesa principal al doctor Gabriel Adolfo Jurado Parra, y a los ingenieros Carlos Eduardo Casallas Acero, Marco Rodolfo Pérez, Peter Romero Cruz y Joaquín Oramas Leuro, para que se refieran a las preguntas formuladas con anticipación, a saber:

## PREGUNTAS

- ¿Cuáles son los estándares de los servicios de televisión digital, terrestre y móvil más adecuados para Colombia?
- ¿Cómo se está dando la competencia entre los operadores de la telefonía fija, móvil, celular y televisión por cable?
- ¿Cuál es la realidad de la convergencia fijo-móvil en las redes y servicios de telecomunicaciones en Colombia?
- ¿Cómo pueden contribuir significativamente las actividades de investigación y desarrollo e innovación a la apropiación social de las TIC?

## GABRIEL JURADO PARRA

Como ustedes saben, en Colombia existen dos organismos reguladores: la Comisión de Regulación de Telecomunicaciones (CRT), que reglamenta todo lo relacionado con los servicios de telecomunicaciones, con excepción de la radiodifusión sonora y de la televisión, y la Comisión Nacional de Televisión (CNTV), que tiene la facultad legal de definir el estándar de televisión digital para Colombia.

Yo sí quiero que les enviemos un mensaje a quienes están tomando esta decisión, puesto que además de mirar lo que el país quiere, también tenemos que ser ambiciosos. Nosotros no podemos escoger el estándar digital que sea más económico para poder hacer la transición de lo analógico a lo digital, porque eso es pensar a mediano plazo, pensar que el país no va a progresar y, por tanto, tenemos que buscar algo que se adapte a una economía pequeña y poco ambiciosa.

Creo que el mensaje debe ser al revés, lo que hay que pensar es qué le sirve al país para crecer. Y es que la televisión digital tiene un gran potencial, pues seguramente allí va a generarse buena parte de la convergencia tecnológica que va a ser ese gran impulsor a nivel nacional para el desarrollo y la masificación de las tecnologías de la información, que a su vez van a apalancar el crecimiento del país. Ahí tenemos por ejemplo a Corea, que volvió la masificación de las tecnologías de la información en una política de Estado que duró más de doce años, donde todos los estamentos de ese Estado, tanto públicos como privados, creyeron en las tecnologías de información como una palanca generadora de valor. El resultado salta a la vista.

## Convergencia

En cuanto al tema de la convergencia, pienso que después de que se defina el estándar de televisión digital debemos tener en cuenta la integración de la industria. La convergencia de fijo-móvil en Colombia aún está en pañales, pero en muchos países ya se está presentando. Esa posibilidad de que puedan converger en un mismo terminal el servicio de datos, de video, de internet, de voz, bien sea a través de una red fija o de una red móvil, tiene que considerarse parte de la definición del estándar digital. Ese va a ser un punto fundamental.

La convergencia implica la integración entre los servicios de video, de televisión, de transmisión de datos,

pero aquí el tema del estándar va a desempeñar un papel importante porque en la medida en que pensemos en una red que no es solamente de televisión, vamos a tener muchas posibilidades de interactuar, pues será una herramienta en el campo, en el trabajo; el trabajador del futuro ya no va a estar en una oficina, podrá estar donde quiera, y esa libertad y esa movilidad van a ser posibles únicamente si generamos los estándares necesarios para que todas estas industrias no estén ancladas a un escritorio sino que estén en movimiento; es tener la posibilidad de que los estándares tecnológicos que se definan permitan hacer esta convergencia; cuando uno ve que operadores como Telmex o Telefónica están migrando hacia el negocio de la televisión, y operadores que tradicionalmente habían sido de televisión, como TV Cable, migraron hacia el negocio de internet y de telefonía, es porque también se está presentando una convergencia en la industria. Creo que las soluciones tecnológicas plantean un reto difícil para los gobiernos porque necesariamente el país, además de definir este tema del estándar de televisión digital, va a tener que hacer una modificación a los marcos legales porque no puede haber una convergencia en donde yo eximo a la telefonía móvil, al PCS, a la telefonía fija, y la dejo únicamente para larga distancia y para valor agregado. Así las cosas, por claridad regulatoria y por claridad institucional debe existir un solo marco normativo y un solo marco regulatorio, aparte de una unidad de autoridades que evite las trabas legales que debe enfrentar un operador actualmente.

### Investigación y desarrollo

En el tema de I+D se esperan muchos desarrollos, sobre todo en la generación de contenidos y de aplicaciones. En su gran mayoría, la gente usa internet para leer la prensa o algunas páginas de estudio, o para ver el correo, y esa no es la gracia de internet, esa no es la masificación de banda ancha. Para mirar el correo no se requiere banda ancha, la banda ancha se necesita para aplicaciones; por eso debe haber un gran esfuerzo conjunto entre la industria, el gobierno y la academia para desarrollar aplicaciones que le sean útiles a la sociedad. Me causa mucha curiosidad ver las filas en Transmilenio para comprar los pasajes, cuando una persona podría hacerlo desde el computador de su casa a través de una descarga de su cuenta de ahorros y evitarse esas filas. Ese tipo de cosas, que son elementales,

son las que tenemos que empezar a desarrollar porque al final la gran utilidad de las TIC, además de la información que nos brindan, es que nos permiten dinamizar la vida cotidiana.

### CARLOS EDUARDO CASALLAS

Espero que entiendan un poco mi sesgo como operador fijo y establecido con más de 120 años de historia y además con una visión más de negocios y de prospectiva, que de tecnología. Quiero hablar de la competencia que se está dando entre los fijos y los móviles, pero para eso hay que partir la historia en dos: desde 1993 hasta hoy y de hoy en adelante.

Definitivamente, los móviles nos pegaron muy duro en el tema de tráfico, particularmente en larga distancia. Hace dos o tres años teníamos contabilizado que el 53% de nuestro tráfico se había desplazado de larga distancia fija a los operadores móviles, tráfico que se fue y no hemos vuelto a ver.

¿Qué está pasando ahora? En general, uno ve que hay cuatro elementos que le han cambiado la cara a esta industria. Primero, los hábitos del consumidor. Hoy los usuarios han multiplicado por lo menos cien veces su tiempo de conexión, que ya no se mide ni en minutos ni en horas sino en terabytes.

Segundo, la aparición de nuevas siglas que uno no saben qué son, como HSTA, DWA, etc. Lo único cierto es que uno no puede decir que la tecnología impulsa *per se* al consumidor, también el consumidor exige sobre la tecnología.

Tercero, la estructura de la industria; una compañía de consultoría en su práctica de telecomunicaciones denomina a las empresas tecnológicas operadores parásitos, porque este tipo de compañías como Google, Sky, Yahoo no tienen infraestructura física, se montan sobre la infraestructura de firmas como la nuestra y se llevan todo el valor del negocio; típicamente eso es lo que hace un parásito.

Cuarto, la presión sobre las ofertas de operadores establecidos como nosotros, que entendimos que el tema no sólo consistía en poner el cablecito sino ir un poco más allá, es decir, estar pendiente de todo lo relacionado con la regulación. Al final, la meta es entregarle una experiencia a un consumidor.

### Operadores fijos, móviles y de cable

El futuro de los operadores fijos es definitivamente el tema de video basado en IP y hacia allá nos estamos moviendo. Así las cosas, para poder competir con los cableoperadores tuvimos que ofrecer productos novedosos, como llamadas de televisión por suscripción mediante una alianza con un cableoperador, puesto que es un paso obligado para finalmente llegar a ambientes de IPTV.

Los móviles, por su parte, tienden a hacer video móvil. Por el lado de los cableoperadores, ellos empezaron por la televisión, introdujeron la oferta de datos, están moviéndose hacia la telefonía pero definitivamente tienen una parte débil y es el tema de la movilidad. Sin embargo, lo que se ve en estos procesos de integración de la industria es que ya no se puede hablar de un operador fijo, de un operador móvil o de un operador de cable, porque a la larga todos son del mismo dueño. El tema es en qué momento cada uno de esos grupos toma la decisión de incursionar en una cosa o en otra.

### Paquetes de servicios

Uno no se explica por qué Telefónica está ofreciendo televisión satelital si el mundo no está apuntando para ese lado, no va a llegar a eso, por ahí no se llega a IP, pero tiene que hacerlo para ofrecer un paquete básico.

Precisamente esa es la primera respuesta: empaquetar servicios. Después empezamos a integrar con un estándar único, IP, y en este punto es donde está la mayoría de los operadores en el mundo.

Como les decía, el tema es crear una experiencia; en general, lo que uno encuentra es que en el negocio hay una guerra de precios, pero al final se decide crear una experiencia, que consiste por ejemplo en establecer la diferencia entre tomarse un tinto en un ambiente y tomárselo en otro ambiente.

¿Qué vemos en la convergencia de fijo-móvil en Colombia? Pues que los móviles, los fijos, los operadores de cable y los ISP estamos apuntando hacia un mismo punto y es ofrecer servicios totalmente integrados, una sola plataforma de red, una sola cara del negocio, una sola marca y esto no es sólo de tecnología. Los móviles están explorando para llegar finalmente a redes multiacceso. Los fijos ya estamos metidos en NGN, IPTV, voz IP y banda ancha. Los ISP pasaron de ser simples proveedores de acceso a enriquecer su oferta

con aplicaciones, más allá de correo electrónico, de motores de búsqueda.

Para terminar el tema de investigación, desarrollo e innovación, lo primero que hay que decir es que se debe ser consciente de cómo las TIC cumplen un papel trascendental en el tema del mejoramiento de la calidad de vida, de dinámicas de desarrollo de las empresas. El objetivo es tener unas penetraciones de banda ancha similares a las de Corea del Sur, de Estados Unidos, etc., pero todavía nos falta.

El otro tema es la consolidación e integración de redes, pero para esto se requiere tomar unas decisiones en educación, economía y gobierno. Esto no se trata de tecnología, no se trata sólo de que yo pongo los contenidos para ver quién los usa.

Tengo unos datos tomados del World Economics Forum, que es un *ranking* asociado a un indicador llamado el NRI, que es la capacidad de conectividad que tienen los países, lo cual les da una posición en el entorno económico: mientras más bajo es el número, mejor posicionamiento tienen en el escalafón. Chile, por ejemplo, está en la posición 31 en dicha clasificación, encabezada por Suecia, Corea del Sur, Dinamarca, que son los mismos que tienen los mayores PIB, los mayores niveles de vida, etc. Colombia ha mejorado un poco pero en el promedio latinoamericano sigue estando muy por debajo, porque las penetraciones de banda ancha son bastante bajas, aunque en los últimos dos años la curva ha tenido una inflexión bastante importante.

En conclusión, no podemos dejar pasar esta oportunidad, porque sería fatal para el futuro de la empresa.

### PETER ROMERO

El primer tema es televisión digital terrestre. Ya se ha dicho bastante que no es posible y por ahora no podemos concluir cuál es el mejor estándar de televisión digital terrestre. No obstante, sí podemos dar algunas guías y la primera es la ITRBT20351, que son básicamente unas guías que establecen una forma de poder comparar la operación de los tres diferentes estándares, con diversos tipos de condiciones tanto en transmisión como en recepción, para obtener resultados comparables.

En lo que concierne al nivel tecnológico, todos los estándares van a funcionar, pues todos tienen sus for-

talezas. Se debe pensar también en el modelo de negocio, en el desarrollo de negocio, en los costos. Hay dos tipos de costos: costos para usuarios y costos para operadores. Así mismo, se debe pensar en que esto servirá para reducir la brecha digital.

Con respecto al tema de la competencia, hay que tener en cuenta los ingresos de diferentes tipos de servicios en el país: la telefonía pública básica conmutada local, la de larga distancia, la telefonía móvil celular y la televisión por suscripción. Se puede observar el incremento en unos servicios y el decremento en otros, pero para analizar realmente la competencia hay que partir de un hecho evidente: hay un monopolio en la mayor parte de los servicios de telefonía pública básica conmutada en Colombia.

En el tema de telefonía móvil hay un poco más de competencia, pues gracias a la entrada del tercer operador se dinamizó el servicio y se llegó a la penetración que tenemos hoy en día.

Si entramos a analizar la competencia entre servicios, entre telefonía local y telefonía móvil, vemos que ésta es muy fuerte. La telefonía móvil le ha quitado una importante participación de ingresos a la telefonía fija, tanto local como de larga distancia, y es lo que ha hecho que no se hayan apreciado los crecimientos tan pronunciados de ingresos de la telefonía fija con la móvil.

¿Cómo pueden contribuir las actividades de investigación y desarrollo a mejorar todo este panorama? Básicamente con prototipos, con evangelización, con ideas de aplicación, con aplicaciones cotidianas; eso es lo que tiene que hacer la I+D, buscar proyectos, desarrollar formas de usar las tecnologías de información y comunicación, tanto a fijo como a móvil. Existen algunas aplicaciones con las cuales se puede prender el fogón de una estufa desde el radio de un carro con comandos de voz. Cosas como esa permitirían desarrollar y apropiarse todo el uso de estas tecnologías a nivel nacional mediante la I+D.

### JOAQUÍN ORAMAS LEURO

Como es natural, no me voy a referir a esta cantidad de siglas que representan nuevos tipos de servicios, producto de una evolución vertiginosa de esta clase de tecnologías.

Con todo, sí quiero referirme a una serie de puntos que surgen a raíz de la última pregunta del foro y es

qué podemos hacer con investigación y desarrollo para fomentar el uso de las TIC, marco en el cual supongo están incluidas todas estas nuevas tecnologías, nuevos tipos de servicios y nuevos enfoques.

En primer lugar, el problema de uso de TIC no consiste en desarrollar unas habilidades para poderlas utilizar sino en desarrollar una forma de pensar, dada su existencia, y eso hay que hacerlo desde la infancia. A esa conclusión llegaron varios países, liderados por Canadá, que hace 20 años comprendieron que para hacer un buen uso de la tecnología había que empezar a trabajar con los niños.

Lo primero que habría que decir es que no hay que buscar cómo desarrollamos la habilidad para usar la tecnología sino cómo enseñamos a actuar, a ver las cosas de un modo diferente, pues la tecnología está ahí.

Parece increíble pero hoy todavía existen colegios y universidades donde se prohíbe el uso de la calculadora; entonces, si restringimos el empleo de la tecnología en esos ámbitos, qué innovación podrá tener un estudiante de esas instituciones frente a avances tecnológicos de esta naturaleza.

En lo que respecta al tipo de estándar más apropiado para Colombia, considero que primero debemos preguntarnos cuál es el bienestar que esto le va a generar al país, cuál es el bienestar que estamos buscando con todo esto, ya que a mi juicio es el elemento fundamental para tomar la decisión.

El bienestar que hay detrás de contar con una infraestructura de comunicaciones como la que se está desarrollando es que vamos a poder tener acceso a la información, a tener movilidad de la información, lo que va a generar unas ventajas competitivas de manera individual en cada uno de nosotros; no obstante, también va a producir ventajas competitivas en las organizaciones y en las instituciones; en este orden de ideas, en la medida en que nosotros manejemos una mejor información a través de este tipo de infraestructura, el país va a tener ventajas competitivas.

Todo esto me lleva a concluir que hay que repensar el sector de las telecomunicaciones en Colombia. En la primera mitad del siglo pasado, este sector estuvo a la vanguardia de lo que debía ser el papel del Estado en ciertos sectores, y evolucionó de aquella oficina de correos y telégrafos del Murillo Toro al Ministerio de Comunicaciones. En cambio, durante la segunda mitad del siglo pasado los ministerios evolucionaron pero no

así el de las telecomunicaciones. Pasamos del fomento al desarrollo y del desarrollo a la industria y el comercio. De las obras públicas al transporte, de las minas y el petróleo a la energía, mientras que en las comunicaciones nos quedamos en la infraestructura.

Creo que hay que repensarlo porque tenemos que ver cuál es el objeto de esa infraestructura. Si nosotros armamos vías, puentes y carreteras, es para facilitar el transporte y la movilidad de las personas, de los bienes y de los servicios. Lo importante no es el petróleo o la mina sino la facilidad y la necesidad de tener energía, no importa de dónde venga. Nosotros seguimos en la infraestructura y no hemos avanzado en el objeto para el cual se requiere esa infraestructura.

Entonces, cómo fomentar el uso de TIC implica tres cosas: en primer lugar, empezar a formar desde el preescolar una mentalidad frente al uso de esa tecnología; esto es, no aprender a usarla sino aprender a pensar sabiendo que ella existe. En segundo término, debemos determinar qué es bueno para el país y, al mismo tiempo, tener criterios que permitan tomar las mejores decisiones.

Por último, tenemos que repensar el sector; creo que hay que superar el trauma que nos dejó Goebbels en el Tercer Reich con el Ministerio de Información y trabajar para que el Ministerio de Comunicaciones evolucione hacia el Ministerio de la Información.

## PREGUNTAS

### Marco Rodolfo Pérez

La telefonía fija se vio obligada a implementar innovación, segmentación, servicios avanzados y a ofrecer banda ancha mucho más rápidamente que la móvil porque la vía del cobre sólo para voz es un cubo de hielo que se está derritiendo y hay que volver a congelar; entonces, en este ambiente de consolidación de ETB y EPM frente a gigantes como Telmex y Telefónica, quiero preguntarle a Carlos Casallas cómo la oferta de valor de la ETB se va a reflejar en una oferta atractiva para los usuarios, que permita la masificación de la banda ancha.

### Carlos Eduardo Casallas

El cubo de hielo nuestro, en el que sustentábamos el modelo de negocio hace no menos de cinco años, era telefonía simple, local, a larga distancia y se nos co-

menzó a aguar, como les pasó a todos los operadores fijos en el mundo; entonces nuestra respuesta fue la misma que dieron todos los operadores fijos en el mundo: optar por sacarle todo el provecho posible a la banda ancha. Y a fe que lo logramos: en el 2003 teníamos algo así como 25 mil suscriptores de banda ancha y hoy en día estamos hablando de más o menos unos 240 mil. En general, si uno ve las estadísticas, advierte que Colombia el año pasado ocupó el décimo lugar en el mundo en crecimiento de banda ancha incluyendo a los operadores de cable, que llevan mucho más tiempo establecidos.

El ambiente de negocios que estamos tratando de crear tiene que ver con valores agregados sobre banda ancha, no sólo en temas como televisión, IPTV y todas estas cosas, sino también en lo referente a contenidos. El tema es ese: nosotros, como operadores fijos, debemos ser capaces de capturar algo de ese valor, de los contenidos, sin entrar a producir contenidos. Definitivamente, hay que migrar de esto que llamamos empaquetamiento simple a una oferta integrada basada en IP, que comprende IPTV y banda ancha; esa es nuestra apuesta por lo menos para los próximos cuatro años como operador fijo.

### Pregunta

A mí también me parece que el tema es contenidos, entre otras cosas porque con el desarrollo de las redes de nueva generación este negocio va a cambiar de una manera dramática, pues las redes de nueva generación les van a permitir a los operadores no solamente ser vendedores de accesos para usuarios sino también ser transportadores de otros proveedores de comunicaciones e incluso de proveedores de contenido. Por tal razón me place mucho oír que la ETB le está apuntando al tema de contenidos, porque ahí es donde realmente hay un desarrollo; el tema no es tener banda ancha porque sí, sino tener banda ancha acompañada de aplicaciones que modifiquen nuestras costumbres, que ayuden a mejorar la productividad, que desarrollen productos e innovaciones.

### Carlos Eduardo Casallas

Sólo una reflexión adicional: cuando se habla de aplicaciones o de usos de la cotidianidad, tenemos que pensar que somos un país con un índice de pobreza del 65% y donde la penetración de banda ancha debe

rondar el 2%. Por eso hay que pensar no sólo en soluciones de servicio universal sino también de acceso universal.

#### Guillermo Teuta

Me voy a permitir hacer una pregunta como moderador: aquí se ha planteado que se debe repensar, no sólo la forma de aprovechar la tecnología sino el mismo sector de telecomunicaciones; ¿cuál sería la idea de que una política de Estado pudiera afianzar todo este beneficio que nos da la tecnología para que efectivamente se traduzca en desarrollo?

#### Joaquín Oramas

En los esquemas de desarrollo hoy en día, uno de los elementos que más se valoran es la información. Entonces, en vez de estar pensando en regular la infraestructura, deberíamos definir políticas hacia el uso y el ejercicio real del derecho a la información. Hablar del ministerio de las TIC es seguir hablando de lo mismo, es decir, de la infraestructura y no de la razón de la infraestructura.

#### Peter Romero

El año pasado tuve la oportunidad de hablar varias veces con el propulsor del desarrollo coreano hacia tecnologías de información y telecomunicaciones y le pregunté qué fue lo que hizo Corea para alcanzar este desarrollo y me contestó dos cosas: educación y foco. Tenemos que educar a las personas, tenemos que darles acceso a aumentar su conocimiento, pero al mismo tiempo no podemos apuntarle a ser los primeros en todo.

### PREGUNTAS DEL PÚBLICO

1. ¿Cuándo se conseguirá que la parte técnica de televisión sea regulada y proyectada por entes técnicos como la CRT y no por políticos como la CNTV, que gastan en administración y burocracia recursos que se podrían utilizar para desarrollo tecnológico y posible aplicación social?

#### Gabriel Jurado

Creo que el modelo colombiano de regulación fracasó porque cuando se creó la Comisión Nacional de Tele-

visión se pensó que en un Estado social de derecho era necesario garantizar el acceso a los medios de información y a los formadores de opinión, como parte de un proceso donde la oposición y la divergencia tuvieran la posibilidad de expresar su disenso en relación con la política de un gobierno. En términos generales eso suena sano y lógico, pero el problema es que la tecnología no es la televisión.

Lo segundo es que debe haber una convergencia regulatoria, entre otras cosas porque tenemos que ser responsables con el país y con el futuro. Por ejemplo, el señor Slim habría podido montar una sola empresa en el país y prestar todos los servicios, pero resulta que no puede hacerlo porque para ser operador de telefonía local la ley le exige que tiene que ser ESP, para ser operador por suscripción tiene que ir a donde los señores de la CNTV a que le den licencia; entonces resulta que esto se vuelve una maraña jurídica y regulatoria, que está entorpeciendo el desarrollo.

2. ¿Sienten que el tema de la convergencia los está obligando a entregar sus infraestructuras a costos bajos? ¿Por qué no entrar de lleno en el tema de los contenidos?

#### Carlos Casallas

La ventaja de ser subdesarrollados es que podemos tomar referentes no sólo de otros países de la región sino del mundo. Entonces, no es tanto que la convergencia nos esté obligando a abrir las redes, sino a repensar el negocio, a entender que nosotros no somos unos operadores de redes fijas sino que tenemos que ser unos operadores de servicios convergentes.

En el tema de contenidos, no hay ningún operador que se haya metido a producirlos, no existen, no es su negocio; lo que sí hacen los operadores como nosotros es tratar de identificar cuáles son los contenidos, qué está consultando la gente y vender esa información. Es ahí donde está el valor. El valor ya no está sólo en el cable, ni mucho menos en el otro extremo, que es la producción; está en la gestión del contenido y en la gestión del tráfico.

## CONCLUSIONES

El ingeniero Guillermo Teuta, organizador del foro y moderador del panel, resaltó las siguientes conclusiones:

- Es claro que la convergencia en un país no se decreta. Para llegar a ella, como lo están haciendo los países desarrollados, se deben tener en cuenta diferentes niveles: convergencia en las redes, servicios, negocios, y lo más determinante, la convergencia institucional y regulatoria. Por eso en este momento los operadores de servicios de telecomunicaciones en el país se encuentran en el punto de partida de la competencia y consolidación de verdaderos servicios que para el usuario común y corriente les sean transparentes a las redes y a los proveedores.
- Se requiere una política de Estado a largo plazo que establezca como punta de lanza la educación en las TIC y la apropiación de su uso para apalancar el desarrollo que requiere el país. El foco principal deberá centrarse en la pequeña y mediana industria, logrando de esa manera su incorporación en los mercados internacionales.
- Se demanda al sector privado, y a las empresas multinacionales que han adquirido recientemente empresas de servicios, que apoyen decididamente las actividades de innovación y desarrollo que llevan a cabo los grupos de investigación y la academia en general, en la incorporación de soluciones a problemas críticos de la sociedad colombiana, haciendo uso de nuestra gran capacidad creativa y en virtud de su responsabilidad social.



## AUTORES EN ESTE NÚMERO

### CARLOS ALBERTO RODRÍGUEZ FLÓREZ

Ingeniero civil de la Universidad Nacional de Colombia, MIC, profesor de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

### PEDRO EDMUNDO ARIAS MATOS

Ingeniero civil de la Universidad Nacional de Colombia, especialista en diseño, construcción y conservación de puentes de la Universidad Militar Nueva Granada, candidato al título de especialista en estructuras de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

### MARIO ALBERTO RÍOS MESÍAS

Ingeniero eléctrico, profesor asistente de la Universidad de los Andes.

### ÁLVARO CHAVARRO LEAL

Ingeniero electricista, profesor de cátedra de la Universidad de los Andes.

### GIOVANNI LÓPEZ PACHÓN

Ingeniero eléctrico. Actualmente trabaja como ingeniero de diseño en Consultoría Colombiana S.A.

### HERNÁN PAZ PENAGOS

Magíster en telecomunicaciones de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Ingeniero electricista de la Universidad Nacional de Colombia, ingeniero electrónico de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas y filósofo de la Universidad Santo Tomás de Aquino. Docente del área de comunicaciones, Programa de Ingeniería Electrónica de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. hpaz@escuelaing.edu.co.

### XIMENA ACERO BRICEÑO

Ingeniera electrónica de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. ximena.acero@gmail.com.

### ROBERTO FERRO ESCOBAR

Ingeniero electrónico de la Universidad Distrital. Magíster en telecomunicaciones, profesor del Programa de Ingeniería Electrónica de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. rferro@segobdis.gov.co.

### GERMÁN GUTIÉRREZ PACHECO

Ingeniero civil de la Universidad Nacional de Colombia, maestría en ingeniería de sistemas, Master of Science in Engineering - University of Pennsylvania, Master's Certificate in Project Management - George Washington University, Project Management Professional (PMP®). Ex-gerente nacional de ingeniería de sistemas de IBM de Colombia. Exgerente

del Programa de Sistemas Mayores de IBM para Latinoamérica. Exgerente de servicios profesionales de NCR. Profesor y director de la Unidad de Proyectos de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

### CÉSAR AUGUSTO LEAL CORONADO

Ingeniero civil, especialista en recursos hidráulicos y medio ambiente de la Escuela Colombiana de Ingeniería. Master of Engineering in Construction Engineering and Management - University of Michigan Ann Arbor. Project Management Professional (PMP®). Profesor de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

### MARÍA VICTORIA AYALA DE REY

Economista del Colegio Mayor de Nuestra Señora del Rosario. Vicerrectora administrativa de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

### CARLOS ABEL ÁLVAREZ PÉREZ

Licenciado en matemáticas de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, magíster en matemáticas de la Universidad Nacional de Colombia, profesor de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito y director del proyecto de investigación "Definición de estándares de competencia matemática para el ingeniero", calvarez@escuelaing.edu.co.

### PATRICIA HERNÁNDEZ ROMERO

Matemática de la Pontificia Universidad Javeriana, magíster en matemáticas de la Universidad de Puerto Rico, profesora de la Pontificia Universidad Javeriana e investigadora principal en el proyecto de investigación *Definición de estándares de competencia matemática para el ingeniero*. phernand@javeriana.edu.co

### ÉDWARD O'BONAGA GARNICA

Licenciado en matemáticas de la Universidad Pedagógica Nacional, magíster en matemáticas de la Universidad de los Andes, profesor de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito e investigador en el proyecto de investigación "Definición de estándares de competencia matemática para el ingeniero". eobonaga@escuelaing.edu.co.

### NÉSTOR RAÚL PACHÓN RUBIANO

Profesor de la Escuela Colombiana de Ingeniería, Programa de Matemáticas. Magíster Scientiae y doctor en ciencias matemáticas de la Universidad Nacional de Colombia.

## EVALUADORES PARA ESTE NÚMERO

---

### **CARLOS MARIO JARAMILLO LÓPEZ**

Doctor en ciencias matemáticas. Docente del Departamento de Matemáticas de la Universidad de Antioquia.

### **EDUARDO CONTRERAS VILLABLANCA**

Ingeniero industrial, profesor adjunto del Departamento de Ingeniería Industrial de la Universidad de Chile.

### **HERBERT GIRALDO GÓMEZ**

Ingeniero civil, docente de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá y asesor de la vicerrectoría.

### **HERNÁN PAZ PENAGOS**

Magíster en teleinformática de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Ingeniero electricista de la Universidad Nacional de Colombia, ingeniero electrónico de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas y filósofo de la Universidad Santo Tomás de Aquino. Docente del área de comunicaciones del Programa de Ingeniería Electrónica de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

### **JOHN JAIRO POSADA HENAO**

Ingeniero civil, especialista en vías y transporte. Docente de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.

### **JULIO CÉSAR GARCÍA ÁLVAREZ**

Ingeniero electrónico, profesor asistente del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales.

### **LUZ HELENA SANTAELLA VALENCIA**

Ingeniera civil, docente de la Universidad Militar Nueva Granada.

### **PEDRO DEL CAMPO**

Ingeniero industrial de la Universidad de Buenos Aires. Profesor de la Universidad del Cema, Buenos Aires, Argentina.

### **RICARDO ARIEL PASTRÁN RAMÍREZ**

Matemático, docente de tiempo completo del Departamento de Matemáticas de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.