

REVISTA DE LA ESCUELA COLOMBIANA DE

# INGENIERIA

Año 16 N° 62

Abril - Junio de 2006

TARIFA POSTAL REDUCIDA N° 1419 DE ADPOSTAL • VENCE DICIEMBRE DE 2006

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

P.V.P. Colombia \$10.000.00 • Escuela Colombiana de Ingeniería • Av. 13 No. 205-59 (Autopista norte Km. 13) • Bogotá, Colombia • www.escuelaing.edu.co

## Foro Internacional sobre la Microzonificación Sísmica en Bogotá

*Entrevista*

Javier Botero Álvarez  
Viceministro de Educación Superior





# Foro Internacional sobre Microzonificación Sísmica de Bogotá

Jorge Enrique Durán Gutiérrez

**F**iel a su tradición, la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito convocó a los ingenieros desuelos y estructuras del país al Cuarto Encuentro Nacional para compartir tanto avances en desarrollos teóricos como enseñanzas derivadas de la construcción y del comportamiento de diverso tipo de obras civiles, en temas de beneficio mutuo para tales áreas de la ingeniería.

El Cuarto Encuentro Nacional de Ingenieros de Suelos y Estructuras, que tuvo lugar en nuestra Aula Máxima entre el 3 y el 5 de mayo de 2006, marcó la continuación de ese liderazgo que ha decidido tener la Escuela en el esfuerzo de integración académica y profesional sobre temas que les competen a unos y a otros, desde aquel ya lejano Seminario sobre Edificios de Gran Altura (1973) y los más recientes encuentros nacionales de 1991, 1993 y 2003.

Como en los certámenes pasados, acudieron al llamado destacados ingenieros geotecnistas e ingenieros estructurales, quienes expusieron sus experiencias a una audiencia compuesta por profesionales y estudiantes universitarios venidos de diferentes partes del país. En el desarrollo de los temas tratados (normatividad, cimentaciones, estructuras de contención, interacción suelo-estructura y ensayos) se combinaron acertadamente aspectos teóricos con historias de casos reales.

En esta ocasión se aprovechó la convocatoria al encuentro ya tradicional con la programación de un día completo dedicado al Foro Internacional sobre Microzonificación Sísmica de Bogotá, con el objeto de repasar el desarrollo histórico de la normatividad vigente en la ciudad sobre este tema, y destacar tanto la nueva información registrada como los enfoques metodológicos surgidos en los últimos años, desde cuando entró en vigencia la actual normatividad.

De esta manera se abrió el debate para precisar las tareas inmediatas que la ingeniería de la ciudad debería acometer con el propósito de revisar y ajustar la microzonificación sísmica local y su normatividad a la luz de la información disponible sobre señales sísmicas en los últimos cinco años, y de los conocimientos adquiridos en el ámbito mundial sobre ondas sísmicas, dinámica de suelos y estructuras y su interacción, así como sobre las nuevas tendencias en el manejo de los conceptos de amenaza, vulnerabilidad y riesgo sísmicos.

Con el fin de enriquecer el debate sobre las tendencias mundiales en trabajos de microzonificación sísmica de ciudades o regiones, la Escuela invitó a tres reconocidos investigadores, destacados a **escala internacional en aspectos relacionados con la temática tratada en el foro**. Fue así como se contó con el concurso del ingeniero mexicano Luis Esteva, quien habló acerca de los análisis de confiabilidad y optimización en el establecimiento de normas sobre microrregionalización sísmica; del ingeniero estadounidense de origen turco Mete Sozen, quien disertó sobre la sensibilidad estructural ante cargas sísmicas, y del ingeniero colombiano radicado en Estados Unidos Gabriel Fernández, quien habló acerca de la evaluación de las señales sísmicas vigentes para diseño estructural en Bogotá. La contribución de estos conferencistas fue definitiva para enaltecer el rigor académico de la discusión y buscarle una solución a la controversia que se venía registrando en los últimos años sobre el tema.

En suma, la Escuela registra orgullosa la realización de estos dos certámenes, los cuales han marcado un hito muy positivo en el avance del ejercicio profesional de la ingeniería de suelos y de estructuras en el país, y permiten avanzar en la revisión racional y coherente de la normatividad sobre la microzonificación sísmica de la ciudad.

Ingeniero civil, profesor de la Escuela Colombiana de Ingeniería.



# Privatizaciones e inequidad

## Venta de la Empresa de Energía Eléctrica de Bogotá

Eduardo Sarmiento Palacio

Comentarios a la ponencia presentada por Diego Otero para ingresar a la Academia de Ciencias Económicas.

### INTRODUCCIÓN

Es para mí muy grato comentar la ponencia de ingreso de Diego Otero a la Academia de Ciencias Económicas. Conozco a Diego de tiempo atrás y he tenido con él una amplia y cercana relación profesional en actividades en las cuales ha demostrado su capacidad y compromiso ético. Sus contribuciones a la enseñanza y la investigación ameritan plenamente su ingreso a la Academia y anticipan aportes importantes a la profesión y al país.

La ponencia de Diego Otero es una cuidadosa evaluación de la privatización de la Empresa de Energía Eléctrica de Bogotá. Esta operación, que

durante mucho tiempo apareció como la gestión estrella durante la administración Peñalosa, presenta uno de los ejemplos más sonados de entrega del patrimonio nacional a las multinacionales, y en muchos aspectos constituye un caso típico del proceso aplicado a lo ancho y largo de América Latina. Es difícil encontrar una evidencia más contundente sobre los efectos perniciosos de las privatizaciones en el bienestar general y en los intereses de la nación.

La transacción la cuestioné seriamente en mi columna de *El Espectador* y en un concepto que rendí ante el Tribunal Administrativo de Cundina-

marca, a raíz de la primera descapitalización de la empresa. Infortunadamente, este tipo de operaciones nocivas para el interés nacional son impuestas desde arriba y desbordan los poderes de las empresas y las administraciones públicas. No sobra señalar que los desaciertos no recibieron el menor comentario de la profesión. Por el contrario, la privatización y las descapitalizaciones fueron apoyadas por millonarios estudios contratados a prestigiosas instituciones académicas.

La privatización y las descapitalizaciones fueron apoyadas por millonarios estudios contratados a prestigiosas instituciones académicas.

Las privatizaciones conforman uno de los capítulos centrales del Consenso de Washington. Sobre la base del principio de Adam Smith de que el lucro individual conduce a las soluciones más eficientes, se dio por sentado que el traslado de la propiedad al sector privado mejoraría la eficiencia y el desempeño de las empresas. Así, los agentes privados movidos por la máxima ganancia están en mejores condiciones de construir y administrar las empresas que los tecnócratas motivados por el interés particular. Como de costumbre, se pasó por alto que este principio sólo es válido dentro de condiciones de competencia perfecta, que de ninguna manera constituye la regla del mundo real y mucho menos en las empresas de servicios públicos. No se advirtió que la entrega de las empresas

Ingeniero civil de la Universidad Nacional de Colombia; Ph. D. en economía de la Universidad de Minnesota. Ha sido decano de economía en la Universidad de los Andes; asesor de la Junta Monetaria; subjefe de Planeación Nacional.

Columnista del diario *El Espectador*, autor de varios libros y de múltiples ensayos y artículos. Actual director del Centro de Estudios Económicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería.



con grandes poderes monopólicos a los agentes privados induce todo tipo de prácticas que reducen la eficiencia. Es precisamente lo que ha ocurrido. Lo que se gana en eficiencia interna por la administración de las empresas de servicios públicos se pierde con creces por la ineficacia externa asociada con los procedimientos monopólicos.

### ADQUISICIÓN DE LA EMPRESA

La primera dificultad que se encuentran las privatizaciones es el enorme valor de la transacción en relación con el tamaño de la economía. En la práctica, se trata de operaciones únicamente accesibles a grandes consorcios internacionales, y a veces nacionales, que son adversos al riesgo y, en consecuencia, sólo están dispuestos a participar en el juego si obtienen elevadas ganancias. El simple anuncio constituye un estímulo para conformar alianzas entre los compradores y los vendedores para propiciar y facilitar esas condiciones. En primer lugar, se montan pomposas subastas con la participación de unos pocos agentes económicos. Así, Otero muestra que en la licitación de Codensa y Emgesa participaron apenas dos grupos, lo que de ninguna manera garantiza la competencia; por el contrario, en los cursos elementales de economía se muestra que en una operación de esa naturaleza, a todos los licitantes les conviene

que el valor de la transacción sea inferior al valor real y luego se arregla la forma de distribuirse la diferencia. Tal vez la mejor ilustración de esto son las subastas para las ventas de los derechos y las propiedades del sector telefónico. Usualmente, la operación la obtiene un licitante, que luego entra en toda clase de operaciones conjuntas con el competidor. Por lo demás, los precios en referencia se establecen con base en valoraciones fundamentadas en supuestos y condiciones que luego no se cumplen. De esta manera, en el sector eléctrico se logra que el precio de venta de las empresas por kilovatio instalado sea inferior al costo en que al mismo tiempo se incurre en su construcción.

El otro procedimiento es el de la venta por capitalización y su posterior descapitalización. En primer término, la venta por capitalización permite deformar el verdadero va-

lor del activo ante la opinión pública. El comprador experimenta de entrada un aumento en el patrimonio igual a su participación en la transacción, es decir, de entrada recupera la mitad de lo que pagó. Luego se justifica el retiro efectivo, argumentando que los recursos provenientes de la compra de la empresa no pueden movilizarse o que la empresa encuentra más rentable endeudarse que comprometer el capital propio. De este modo, el ganador obtiene la licitación por una suma virtual, a sabiendas de que en poco tiempo retorna una buena parte a la casa matriz.

La primera descapitalización se justificó por el exceso de recursos e ingreso de la empresa en relación con las necesidades. Se decía que era mejor que los socios retiraran los fondos de la empresa que dejarlos inutilizados. Las siguientes descapitalizaciones se fundamentaron en que los costos de endeudamiento eran menores que el costo de oportunidad de la inversión con recursos propios, lo cual es apenas normal en empresas con poderes monopólicos. Curiosamente, la descapitalización se justifica por su capacidad de deformar el mercado y obtener ganancias irregulares.

La contradicción no podía ser mayor. La privatización se justifica como una manera de realizar inversiones que no puede efectuar el país y luego los ingresos de la empresa se retiran porque no hay inversiones convenientes o porque los ahorros domésticos son más baratos. La eficiencia de recursos, que avala la operación, desaparece por obra y gracia. Los

que están haciendo la inversión están adquiriendo la empresa con el ahorro local. Las magnitudes son espectaculares. El consorcio pagó US\$2.177 millones por Emgesa y Codensa y ha sacado por descapitalizaciones US\$842 millones.

A lo anterior se agregan todo tipo de triangulaciones para adquirir las empresas con recursos de otros. Como bien lo ilustra Otero, Codensa y Emgesa se compraron con un crédito adquirido por la hidroeléctrica de Betania, y luego la suma fue retirada por la vía de la descapitalización. Los juegos financieros permitieron a las multinacionales adquirir las empresas en valores muy inferiores a los anuncios al público y los aportes por capitalización se retiran en buena parte o se sustituyen por ahorro doméstico.

En fin, la inversión extranjera no se realiza con recursos externos sino con ahorros domésticos obtenidos en condi-



La privatización se justifica como una manera de realizar inversiones que no puede efectuar el país y luego los ingresos de la empresa se retiran porque no hay inversiones convenientes o porque los ahorros domésticos son más baratos.



ciones de privilegio. Más aún, la ganancia de la empresa no está en su administración sino en una operación especulativa en que se captan recursos domésticos a tasas inferiores a la rentabilidad monopólica de la empresa.

## ORGANIZACIÓN

### ADMINISTRATIVA

Aquí no termina la historia. Como ocurre con la inversión extranjera, lo primero es reducir al mínimo el valor agregado nacional adquiriendo las materias primas en las casas matrices y contratando al personal en el exterior. Adicionalmente, se procede a recortar el personal de planta y sustituirlo por la subcontratación. Lo más grave es que la empresa queda en condiciones de adquirir los servicios de estas actividades con un claro poder monopólico. Las empresas contratistas quedan ante un solo comprador que les impone el precio de los productos y, finalmente, la remuneración. Los costos laborales se reducen a expensas de la informalidad.

Las tarifas son cuenta aparte. En un estudio de la Agencia de Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (Usaid), se estima que los costos de comercialización de la energía, un componente de la tarifa, han subido 75% en términos reales entre 1998 y 2005 para los usuarios de menores estratos, lo cual les ha significado un sobrecosto de \$1,23 billones.

El exabrupto de cargarles mayores precios a los sectores más necesitados por el mismo servicio es una práctica usual que se impuso durante la era neoliberal, y en el lenguaje especializado se denomina desceme. No se trata tanto de un acto de perversidad huma-

na sino de un incentivo legítimo del modelo de libre mercado. Como la demanda de los estratos bajos es menos elástica, el alza de precios reduce más el consumo de los grupos altos. Las empresas, que disponen de un claro poder monopólico, avalado por las comisiones de regulación, encuentran que sus ganancias aumentan cuando las tarifas de los pobres suben en relación con las de los ricos, y sin mayor recato proceden a materializarlas.

Lo mismo se observa en la telefonía. Una de las características de la privatización de las telecomunicaciones ha sido la reducción de las tarifas de larga distancia, que recaen en los sectores altos, y un alza descomunal en las llamadas locales, que recaen en el ciudadano raso. La situación más aberrante se presenta en el agua. Las administraciones distritales se ufanan de haber subido las tarifas de agua y de esa manera disminuir el desperdicio, pero nunca dicen que la mayor eficiencia se logró a expensas de aumentar la pobreza.

El criterio se ha aplicado reiteradamente en materia tributaria. Los gravá-

menes a los bienes de primera necesidad y a los ingresos del trabajo se justifican porque reducen menos el consumo y, en consecuencia, redundan en mayores recaudos. A diario, el gobierno anuncia reformas tributarias orientadas a elevar el IVA y extenderlo a los bienes más necesarios, y bajar las tarifas del impuesto a la renta.

En la práctica, se ha configurado una criatura diabólica que resulta en mayores precios de los mismos servicios para los pobres que para los ricos. No es una exageración. En los últimos ocho años, el índice de precios al consumidor de los estratos bajos, en especial en vivienda, subió sistemáticamente por encima del de los estratos altos, algo así como 15% más.

## LUCRO INDIVIDUAL E INTERÉS SOCIAL

Todo esto ha resultado en ganancias espectaculares para el consorcio. En el cuadro 1 se muestra que la rentabilidad promedio de Emgesa y Endesa entre 1999-2005 fluctuó alrededor de 20%. En ambos casos se trata de cifras que superan en varias veces la rentabilidad de las operaciones del sector privado y, lo más grave, las que sirvieron de base para valorar la empresa. Es un bello ejemplo de cómo la influencia de las multinacionales puede alterar las condiciones de los estudios

Una de las características de la privatización de las telecomunicaciones ha sido la reducción de las tarifas de larga distancia, que recaen en los sectores altos, y un alza descomunal en las llamadas locales, que recaen en el ciudadano raso.

empresas, que disponen de un claro poder monopólico, avalado por las comisiones de regulación, encuentran que sus ganancias aumentan cuando las tarifas de los pobres suben en relación con las de los ricos, y sin mayor recato proceden a materializarlas.

**Cuadro 1**

Rentabilidades de Emgesa, Codensa y EEB

	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
<b>Sobre patrimonio</b>								
Emgesa	5,84	28,76	2,22	2,66	3,23	4,31	4,87	14,2
Codensa	1,89	37,07	3,4	2,52	19,39	3,93	5,17	31
EEB	0,61	19,89	1,98	2,86	9,75	4,42	3,08	9,36
<b>Sobre capital suscrito</b>								
Emgesa	7,31	45,5	5,88	7,14	8,35	12,67	15,91	43,6
Codensa	3,35	80,46	8,98	7,31	52,13	11,17	17,61	89,3
EEB	1,06	55,94	7,46	11,41	38,06	18,88	14,25	37,7

Fuente: Otero (2006). Cálculos con base en memorias anuales de las empresas.



de valoración que sirven de referencia para los estimativos y las supuestas reglas de referencia. Su poder no sólo desborda el mercado sino las condiciones de los contratos y de las reglas de negociación.

Los buenos resultados financieros no contribuyeron al fortalecimiento del sistema eléctrico. Emgesa no ha invertido en nuevos proyectos de generación y se conoce que no lo va a intentar en el futuro. La inversión aumentó a razón de US\$100 millones anuales, cuando en los estudios que justificaban la capitalización anunciaban necesidades de US\$200 millones. ¿Qué otra cosa se podía esperar? Como las transacciones se efectúan a menos de la mitad del costo de oportunidad, como ha ocurrido en Colombia y en la mayor parte de los países de América Latina, se introduce una distorsión que obstaculiza la inversión. Las empresas se ven inmersas en un ambiente en el que el costo de la reposición excede el precio del mercado; el Q

de Tobin es menor que 1. Los consorcios prefieren dejar que el gobierno construya las plantas, por ejemplo las Empresas Públicas de Medellín, y adquirirlas posteriormente a la tercera parte. En el fondo, los compradores no tienen mayor interés en mejorar la administración del desarrollo de las organizaciones. Su prioridad es realizar una jugosa operación especulativa y repartir lo más pronto posible la totalidad de las utilidades. Se configura una estructura en que el sector público hace las inversiones y el privado percibe las ganancias. Si a esto se agrega que los ingresos de las ventas se emplean por la vía de déficit fiscales que están representados en su mayor parte en consumo,



resulta una operación destructiva del ahorro nacional.

Mal podría suponerse que las elevadas rentabilidades provienen de la administración de la empresa con criterios de maximización de ganancias, es decir, de la eficiencia interna. Se originan, más bien, en la aplicación de claros poderes monopólicos para adquirir las empresas por debajo del costo de oportunidad y en buena parte con ahorros domésticos obtenidos en condiciones de privilegios, la fijación de las tarifas muy por encima de la inflación y el recorte de la nómina y su contratación por la

vía de la informalidad. Los posibles beneficios de la eficiencia privada se compensaron con creces con las monumentales ineficiencias de la práctica monopólica.

Los resultados más graves se ven en materia distributiva. La venta por debajo del costo de oportunidad significa la transferencia del patrimonio de las empresas públicas, conformado con las apropiaciones de los usuarios de todos los estratos sociales, a los gran-

des consorcios, que corresponden al 1% más rico de la población. Por lo demás, propicia el aumento de las tarifas de los servicios más necesarios (más inelásticos), que afectan en mayor grado a los estratos más pobres. Por otra parte, el traslado de la administración de las empresas y los servicios sociales ha debilitado la capacidad del Estado para llevar los servicios básicos a los sectores más desfavorecidos. Como el sector privado tiene una clara preferencia por atender a los sectores de mayores ingresos, en la práctica implica crear actividades altamente lucrativas a cambio de reducir el acceso de los sectores más necesitados

### CONCLUSIONES

Las privatizaciones representan una de las reformas centrales del Consenso de Washington. Se consideraba que el traslado de la propiedad al sector privado llevaba a una mayor eficiencia y desempeño de las empresas. Como bien lo demuestran los hechos, también significa un poder monopólico que redunde en altos costos de eficiencia. El balance plantea un problema empírico que está bien ilustrado en la evaluación de la Empresa de Energía Eléctrica de Bogotá. Allí se

Los posibles beneficios de la eficiencia privada se compensaron con creces con las monumentales ineficiencias de la práctica monopólica.



observa que las ineficiencias externas predominan sobre las eficiencias internas.

Los efectos de la práctica monopolística no podían ser más dañinos para los intereses nacionales. Significaron la duplicación de las tarifas en términos reales, la eliminación de los subsidios para los estratos uno, dos y tres, el despido de las cuatro quintas partes de la nómina y su desplazamiento a la informalidad y a la venta del producto a un solo comprador. Por lo demás, esta práctica no ha traído un estímulo a la capitalización. La inversión ha aumentado mucho menos de lo anunciado en los

arreglos. En el caso de la generación eléctrica el estancamiento es total, lo cual es normal si se tiene en cuenta que el gobierno está comprometido en construir hidroeléctricas y venderlas por debajo del costo. Frente a esto, mal podría decirse que los beneficios de una buena administración privada superan los costos del poder monopolístico con intereses individuales. Estamos ante el típico expediente que redunde en ganancias excesivas del capital, desformaliza la mano de obra, deprime el salario real y en mayor grado el de los sectores pobres, reduce la inversión y traslada el ahorro doméstico a las transnacionales.

Es difícil encontrar una evidencia más contundente sobre la inconveniencia social de las privatizaciones. En la práctica, significan la entrega del poder monopolístico a las multinacionales y su empleo con propósitos individuales determina costos mucho mayores que los beneficios de la administración privada. Lo más grave es que se han convertido en medios para ampliar los privilegios y la exclusión. En la realidad, contribuyen a propiciar transferencias de los estratos medios y bajos a los grupos nacionales e internacionales más poderosos y a reducir el acceso de los grupos

más necesitados a los servicios básicos. Logran el lucro individual a cambio de lesionar a las grandes mayorías.

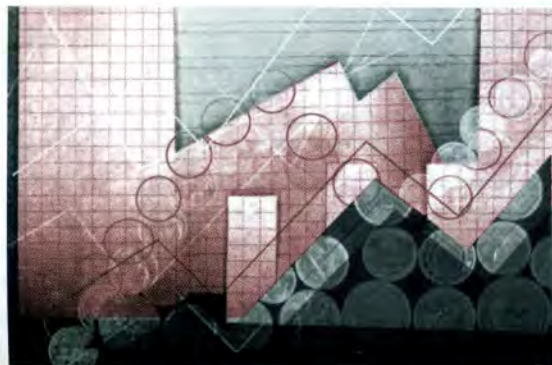
Las privatizaciones están inspiradas en las dos proposiciones fundamentales de la teoría neoclásica, que presumen que las soluciones de libre mercado aumentan la eficiencia y no tienen mayor efecto sobre la distribución. La doctrina, aplicada sin consideración en la privatización de las empresas públicas y de la administración de las necesidades básicas, las tarifas de servicios públicos y la tributación, hoy en día aparece como una de las principales responsables del deterioro de la distribución del ingreso y de la pobreza.

Si la sociedad colombiana de verdad pretende avanzar en la distribución del ingreso, lo primero que debe hacer es abandonar la falsa doctrina, reconociendo que la eficiencia y la equidad no son separables y que en muchos campos existen abiertos conflictos. A diferencia de los últimos quince años, en que se les dio prioridad a la eficiencia y al mercado sobre la equidad, ahora habría que conciliar los dos propósitos y, en casos extremos, favorecer la equidad. De hecho, se plantean reformas fundamentales en los derechos de propiedad, las tarifas de los servicios públicos, las privatizaciones, la tributación y la política laboral.

En la práctica, las privatizaciones significan la entrega del poder monopolístico a las multinacionales y su empleo con propósitos individuales determina costos mucho mayores que los beneficios de la administración privada.

#### BIBLIOGRAFÍA

1. Otero, Diego (1996). La capitalización de la Empresa de Energía de Bogotá.
2. Stiglitz, Joseph (1994). *Whiter, Socialism?* Cambridge, Londres: The MIT Press.
3. Stiglitz, Joseph (1988). *La economía del sector público*, 2a. ed. Antoni Bosh Editor.
4. Sarmiento, Eduardo (2000). *Cómo construir una nueva organización económica*, Bogotá: Ediciones Oveja Negra, Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, Academia Colombiana de Ciencias Económicas.
5. Vichers, S. & Yarrow, G. (1958). *Privatization and Economic Analysis*. Cambridge, Londres: The MIT Press.
6. World Bank (1991). *The Challenge of Development. Report 1991*, Oxford University Press.



En el caso de la generación eléctrica el estancamiento es total, lo cual es normal si se tiene en cuenta que el gobierno está comprometido en construir hidroeléctricas y venderlas por debajo del costo.



# Análisis de un floculador hidráulico de flujo horizontal<sup>(26)</sup>

Luz Stella Bautista\* y Jairo Alberto Romero Rojas\*\*

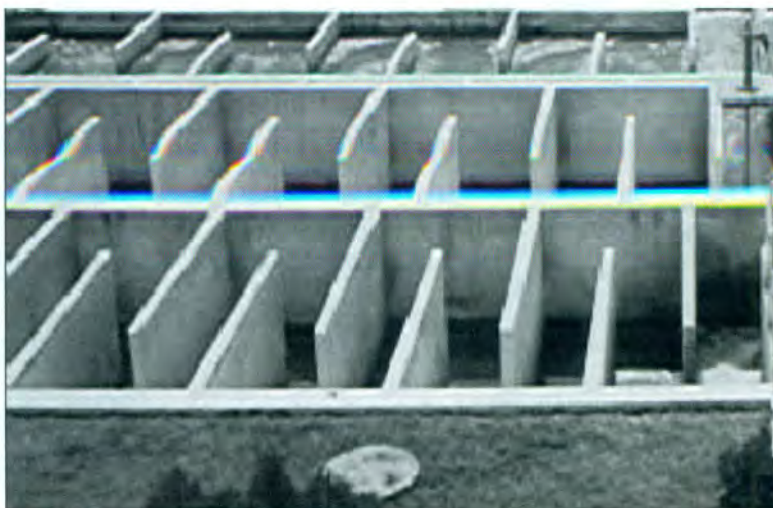
En el diseño de floculadores hidráulicos de flujo horizontal para el tratamiento del agua se requiere determinar el número de Camp y el gradiente de velocidad, para lo cual se necesita conocer la pérdida de energía y el tiempo de retención en el tanque de floculación. El cálculo de las pérdidas de carga, a través de los canales formados por los tabiques del tanque, se realiza mediante ecuaciones de cálculo que difieren considerablemente en su magnitud. En este artículo se presenta la evaluación experimental de las pérdidas de energía en un floculador hidráulico de flujo horizontal y su correlación con las pérdidas calculadas a partir de las ecuaciones de diseño.

## DESCRIPCIÓN

Un floculador hidráulico de flujo horizontal está conformado por un tanque, generalmente en concreto, con pendiente longitudinal; dentro de él, hay un conjunto de tabiques o baffles transversales fijos o removibles en concreto, asbesto-cemento, madera u otro material liviano, adheridos o fijados al fondo del tanque y a uno de los muros laterales, en tal forma que se crea entre ellos, alternando entre uno y otro tabiques a un lado y al otro, canales con flujo en zigzag (figuras 1 y 2).

El cálculo de las pérdidas de carga, a través de los canales formados por los tabiques del tanque, se realiza mediante ecuaciones de cálculo que difieren considerablemente en su magnitud.

El ensayo de tratabilidad del agua, mediante el ensayo de jarras, realizado en cierto tipo de equipo (figura 3), permite determinar las condiciones de operación del floculador y se utiliza para optimizar la coagulación y evaluar diferentes parámetros de diseño del proceso de coagulación-floculación-sedimentación, como el gradiente de velocidad, el tiempo de retención y el número de Camp. Detalles del ensayo se pueden consultar en la referencia 3 y en la Norma Técnica Colombiana NTC 3903.



**Figura 1.** Floculador hidráulico de flujo horizontal con tabiques en concreto<sup>(1)</sup>.

\* Ingeniera civil, especialista en recursos hidráulicos y medio ambiente.

\*\* Ingeniero civil, MEEE, profesor titular de la Escuela Colombiana de Ingeniería.





**Figura 2.** Floculador hidráulico de flujo horizontal con tabiques en asbesto-cemento (2).

### PARÁMETROS DE DISEÑO DE UN FLOCULADOR HIDRÁULICO

Desde 1917, Von Smoluchowski demostró que la floculación ortocinética está representada por la ecuación 1. Camp y Stein consideran que la relación básica para el proceso de floculación está dada por la ecuación 2.

$$\frac{dN}{dt} = \frac{G}{6} n_1 n_2 (d_1 + d_2)^3 \quad (1)$$

$$N = \frac{G n_1 n_2 (d_1 + d_2)^3}{6} \quad (2)$$

Donde:

$dN/dt$  = variación del número de colisiones entre las partículas 1 y 2 con respecto al tiempo.

$N$  = número de colisiones.

$G$  = gradiente de velocidad promedio.

$n_1$  y  $n_2$  = número de partículas de diámetro  $d_1$  y  $d_2$ , respectivamente.

$d_1$  y  $d_2$  = diámetro de las partículas 1 y 2, respectivamente.

Camp y Stein, en 1943, expresaron el gradiente de velocidad promedio según la ecuación 3.

$$G = \left[ \frac{P}{\mu V} \right]^{1/2} \quad (3)$$

Donde:

$G$  = gradiente de velocidad promedio,  $s^{-1}$

$P$  = potencia inducida al fluido,  $W$

$\mu$  = viscosidad dinámica del fluido,  $N \cdot s/m^2$ ,  $kg/m \cdot s$

$V$  = volumen útil,  $m^3$

El gradiente de velocidad describe la intensidad de la mezcla y la ecuación 3 ha sido la más usada para evaluar el valor de  $G$  en un sistema de floculación (4). En floculadores hidráulicos, el cálculo del gradiente de velocidad se hace teniendo en cuenta la pérdida de carga total en el tanque, expresando la potencia en términos del caudal, como se indica en las ecuaciones 4 a 7.

$$P = \gamma Q h \quad (4)$$

$$P = \frac{\gamma V h}{t} \quad (5)$$

$$\frac{P}{V} = \frac{\gamma h}{t} = \frac{\rho g h}{t} \quad (6)$$

$$G = \left[ \frac{\rho g h}{\mu t} \right]^{1/2} = \left[ \frac{g h}{\nu t} \right]^{1/2} = \sqrt{\frac{\gamma h}{\mu t}} \quad (7)$$

Donde:

$\gamma$  = peso específico del fluido,  $N/m^3$

$Q$  = caudal,  $m^3/s$

$h$  = pérdida de carga,  $m$

$t$  = período de mezcla,  $s$

$G$  = gradiente de velocidad,  $s^{-1}$

$\rho$  = densidad del fluido,  $kg/m^3$

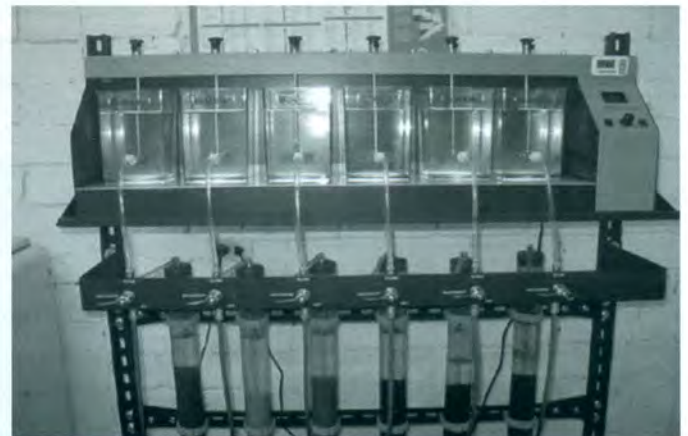
$g$  = aceleración de la gravedad,  $m/s^2$

$\mu$  = viscosidad dinámica del fluido,  $N \cdot s/m^2$ ,  $kg/m \cdot s$

$V$  = volumen,  $m^3$

$\nu$  = viscosidad cinemática del fluido,  $m^2/s$

La floculación está controlada por el gradiente de velocidad o intensidad de la mezcla, así como por el período de mezcla lenta; las normas de diseño tienen en cuenta que un gradiente de velocidad alto puede romper el floc y que un



**Figura 3.** Equipo de jarras del Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Escuela Colombiana de Ingeniería.



gradiente de velocidad bajo puede no producir suficiente agitación para generar bastante número de contactos y compactación óptima del floc. Los principales criterios para el diseño de floculadores hidráulicos se presentan en la tabla 1.

En general, el valor de  $G$  recomendado es de 5 a  $100 \text{ s}^{-1}$ ; el número de Camp,  $Gt$ , o producto del gradiente de velocidad por el período de retención de 10.000 a 150.000, y el período de floculación entre 10 y 90 minutos.

El cálculo de la pérdida de carga corresponde a un problema netamente hidráulico, que depende sobre todo de las características geométricas de los canales, del tipo de material de los baffles y de las características de la curva de  $180^\circ$  en el cambio de dirección de un canal a otro.

La pérdida de carga en el floculador hidráulico de flujo horizontal se presenta de manera distinta en dos zonas del floculador: una en los tramos rectos y otra en los giros de  $180^\circ$ . Diferentes autores han propuesto expresiones que determinan estos valores, pero todos coinciden en que la pérdida de carga en las curvas corresponde al producto de un factor por la altura de velocidad del flujo en el canal, como se indica en la ecuación 8.

$$h_v = K \frac{V^2}{2g} \quad (8)$$

**Tabla 1**

Parámetros de diseño de floculadores hidráulicos

$G, \text{ s}^{-1}$	$t, \text{ min}$	Número de Camp, $Gt$	Referencia
20 a 70	-	-	5
5 a 100	10 a 60	20.000 a 150.000	6
30 a 60	-	10.000 a 100.000	7
10 a 100	15 a 20	-	8
20 a 100	10 a 60	20.000 a 150.000	9
20 a 70	10 a 30	-	10
15 a 60	-	10.000 a 150.000	11
30 a 60	10 a 90	10.000 a 100.000	12
25 a 65	20 a 30	-	13
-	15 a 60	-	14
-	20 a 50	-	15
-	10 a 90	-	16
-	20 a 45	-	17
5 a 100	10 a 90	10.000 a 150.000	Resumen
20 a 70	10 a 60	10.000 a 150.000	Valor típico

Donde  $h_v$  es la pérdida en cada vuelta de  $180^\circ$  expresada en metros,  $g$  es la aceleración de la gravedad en  $\text{m/s}^2$ ,  $V$  es la velocidad de flujo en  $\text{m/s}$  y  $K$  es un valor empírico que tiene en cuenta la turbulencia y la fricción en la curva.

La ecuación anterior tiene diferentes versiones, según distintos autores.

• Según Sánchez<sup>(17)</sup>:

$$h_v = K \frac{V^2}{2g}, \quad \text{con } K = 0,124 + 3,104 \left( \frac{p}{a} \right)^{3,5} \quad (9)$$

Donde:

- $h_v$  = pérdida de carga en cada vuelta, m
- $V$  = velocidad media en el canal,  $\text{m/s}$
- $g$  = aceleración de la gravedad,  $\text{m/s}^2$
- $K$  = coeficiente que depende de la relación entre el ancho del canal y el ancho de la vuelta
- $p$  = separación entre tabiques, m
- $a$  = ancho de la vuelta, m

• Según Babbitt y Donald<sup>(18)</sup>:

$$h_v = 3,22 \frac{V^2}{2g} \quad (10)$$

Donde:

- $h_v$  = pérdida de carga en cada vuelta, m
- $V$  = velocidad promedio de flujo en el canal,  $\text{m/s}$
- $g$  = aceleración de la gravedad,  $\text{m/s}^2$

• Según Bhargava y Ojha<sup>(19)</sup>, menor valor del intervalo adoptado por estos autores:

$$h_v = 1,5 \frac{V^2}{2g} \quad (11)$$

Donde:

- $h_v$  = pérdida de carga en cada vuelta, m
- $V$  = velocidad promedio de flujo en el canal,  $\text{m/s}$
- $g$  = aceleración de la gravedad,  $\text{m/s}^2$

• Según Bhargava y Ojha<sup>(19)</sup>, mayor valor del intervalo adoptado por estos autores:

$$h_v = 2 \frac{V^2}{2g} \quad (12)$$

Donde:

- $h_v$  = pérdida de carga en cada vuelta, m
- $V$  = velocidad promedio de flujo en el canal,  $\text{m/s}$
- $g$  = aceleración de la gravedad en  $\text{m/s}^2$



El cálculo de la pérdida de energía en los tramos rectos se hace mediante las ecuaciones convencionales para pérdidas por fricción en canales con flujo laminar:

- Ecuación de Manning o Strickler:

$$h_f = \frac{V^2 n^2 L}{R^{4/3}} \quad (13)$$

Donde:

$V$  = velocidad media en el tramo recto, m/s

$n$  = coeficiente de rugosidad de Manning, según tabla 2

$R$  = radio hidráulico, m

$L$  = longitud de canal, m

La ecuación de Manning es la más utilizada en el cálculo de flujo uniforme en canales abiertos. Los valores de  $n$  dependen de la rugosidad del canal, la cual cambia con la edad y con la condición del canal. Los valores de rugosidad tabulados hasta el momento son aplicables en flujo turbulento completamente desarrollado<sup>(20)</sup>.

- Ecuación de Hazen - Williams:

$$h_f = \left[ \frac{V}{0,85CR^{0,63}} \right]^{1,85} L \quad (14)$$

Donde:

$h_f$  = pérdida por fricción, m

$V$  = velocidad media de flujo en el tramo recto, m/s

$C$  = coeficiente de rugosidad de Hazen-Williams, según tabla 3

$R$  = radio hidráulico, m

$L$  = longitud de canal, m

## METODOLOGÍA

### Aforo

Para el aforo fue necesario diseñar un elemento de fácil instalación, flexibilidad en su manejo y confiabilidad en sus lecturas. Se optó por la instalación de un vertedero rectangular de pared delgada colocado en el canal de entrada de agua cruda. El vertedero fue calibrado en el sitio de instalación y diseñado de acuerdo con las normas británicas para vertederos en canales abiertos<sup>(25)</sup>.

La ecuación utilizada es la ecuación 15.

$$Q = C \frac{2}{3} \sqrt{2g} * b * h^{3/2} \quad (15)$$

Donde:

$Q$  = caudal, m<sup>3</sup>/s.

$C$  = coeficiente de descarga (adimensional)

$g$  = aceleración de la gravedad, m/s<sup>2</sup>

$b$  = ancho efectivo del vertedero, m

$h$  = cabeza efectiva de la lámina de agua, m

El ancho efectivo del vertedero rectangular construido en acrílico biselado es de 0,25 m. Los resultados de la calibración del vertedero se muestran en la figura 3.

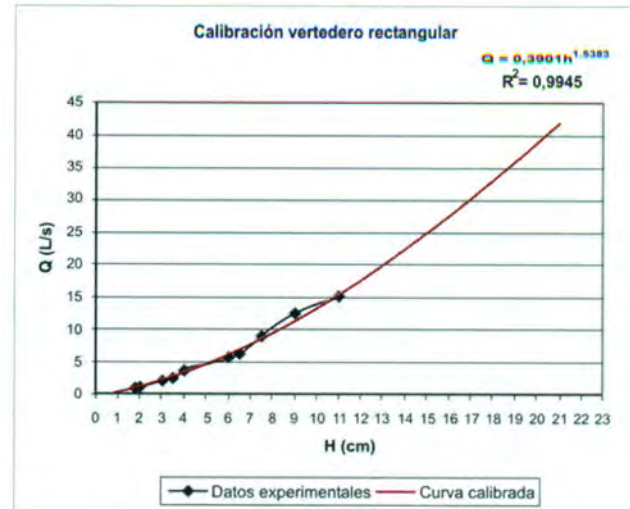


Figura 3. Curva de calibración del vertedero instalado.

### Nivelación y medida de pérdidas

La nivelación del fondo de los canales se realizó con un nivel digital, de precisión igual a 1 mm y mira convencional de precisión de 1 cm, tomando como referencia un punto arbitrario fijo en la planta, adoptando dos ejes principales de medición (figura 4). Para la medición de las profundidades de lámina de agua se hizo una limpieza del floculador



Figura 4. Nivelación del floculador.



con el fin de garantizar que el fondo de los canales estuviera libre de sedimentos; la medición de las profundidades se leyó en los mismos puntos donde se hizo la nivelación, para cinco caudales diferentes (figura 5).

La velocidad en cada uno de los puntos de los ejes adoptados, para los diferentes caudales, se determina de acuerdo con la ecuación de continuidad.

$$V = \frac{Q}{A * 1000} \quad (16)$$

Donde:

$V$  = velocidad de flujo, m/s

$Q$  = caudal, L/s

$A$  = área mojada, m<sup>2</sup>

Para el cálculo de la energía se tiene en cuenta la altura de la lámina de agua y las energías de velocidad determinadas en terreno. Para el cálculo del coeficiente de pérdida de energía en las curvas del floculador se utiliza la ecuación 17.

$$h_v = K \frac{V^2}{2g} \quad (17)$$

Donde:

$h_v$  = pérdida en cada curva, m

$V$  = velocidad de flujo en el canal, m/s

$g$  = aceleración de la gravedad, m/s<sup>2</sup>

$K$  = constante adimensional

**Tabla 2**

Coefficiente de rugosidad de Manning para canales en concreto<sup>(21)</sup>

Tipo de canal y descripción	Mínimo	Promedio	Máximo
<b>B. Canales prefabricados o contruidos</b>			
<b>1. Concreto</b>			
a) Troquelado	0,011	0,013	0,015
b) Sobrepuesto	0,013	0,015	0,016
c) Alistado con fondo de grava	0,015	0,017	0,020
d) Sin alistar	0,014	0,017	0,020
e) Sección uniforme	0,016	0,019	0,023
f) Sección irregular	0,018	0,022	0,025
g) Excavado sobre roca uniforme	0,017	0,020	-
h) Excavado sobre roca irregular	0,022	0,027	-
<b>2. Fondo de concreto alistado con lados de:</b>			
a) Piedra revestida en mortero	0,015	0,017	0,020
b) Piedra incrustada en mortero	0,017	0,020	0,024
c) Pañete de cemento alistado	0,016	0,020	0,024
d) Pañete de cemento sin alistar	0,020	0,025	0,030
e) Escombros sobre riprap	0,020	0,030	0,035
<b>3. Fondo de grava con lados de:</b>			
a) Concreto formateado	0,017	0,020	0,025
b) Piedra incrustada en mortero	0,020	0,023	0,026
c) Escombros o riprap	0,023	0,033	0,036
<b>4. Ladrillo o bloque</b>			
a) Barnizado	0,011	0,013	0,015
b) En mortero	0,012	0,015	0,018
<b>5. Metal</b>			
a) Acero con superficie lisa	0,011	0,012	0,014
b) Metal corrugado	0,021	0,025	0,030
<b>6. Asfalto</b>			
a) Liso	0,013	0,013	-
b) Rugoso	0,016	0,016	-
<b>7. Cubierta vegetal</b>			
	0,030	-	0,500

## ANÁLISIS DE RESULTADOS

### Pérdidas por fricción

En la tabla 4 se presentan las pérdidas promedio por fricción obtenidas para cada uno de los caudales analizados. En dicha tabla se observa que a medida que aumenta el caudal en el floculador desde 1,4 L/s hasta 18,1 L/s, las pérdidas por fricción en los canales también aumentan; pero para caudales superiores a 18,1 L/s, hasta 25,4 L/s, las pérdidas por fricción permanecen constantes. Los valores de pérdida por fricción medida en cada uno de los canales del floculador varían ampliamente, con desviaciones estándar de 4 a 6 mm. Esta amplia variación puede ser el resultado de la existencia de canales con poca uniformidad en sus condiciones geométricas y en su pendiente longitudinal, lo cual produce diferentes condiciones de flujo. Otra causa de la variación de los resultados de pérdida puede obedecer al remanso producido en los canales debido a las contrapendientes longitudinales de algunos de ellos.

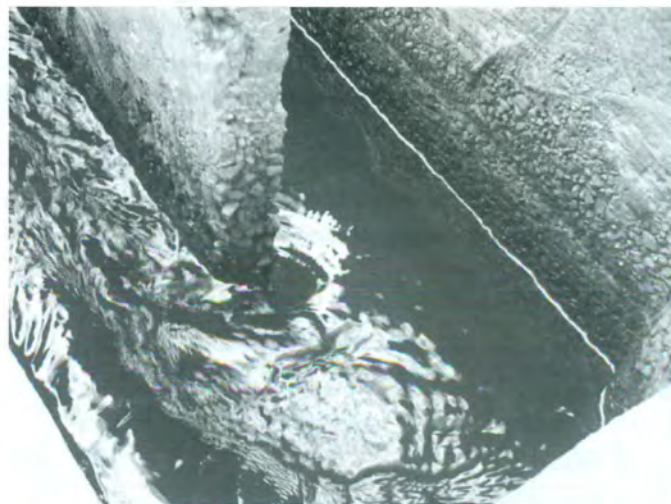
En la tabla 5 se presentan los valores de los coeficientes de pérdida para las ecuaciones de Manning y Hazen-Williams, con base en la pérdida experimental promedio (tabla 4) y adoptando para el cálculo del coeficiente un área constante igual al área promedio para cada caudal observado.



**Tabla 3**Coeficientes de rugosidad típicos de Hazen - Williams<sup>(22,23,24)</sup>

Material de la tubería	C	n*
Acero remachado (nuevo)	110	0,012
Acero remachado (usado)	85	0,015
Acero soldado (nuevo)	130	0,010
Acero soldado (usado)	90	0,014
Hierro fundido (nuevo)	130	0,010
Hierro fundido (usado)	100	0,013
Hierro fundido (nuevo)	90	0,014
Concreto (buena terminación)	130	0,010
Concreto (terminación común)	120	0,011
Asbesto - cemento	140	0,009
Plástico (PVC)	150	0,008
Acero ondulado (chapa ondulada)	60	0,021
Canal en concreto con paredes en riprap o en concreto ciclópeo	40	0,031

\* Correspondencia aproximada de  $n$  de Manning con  $C$  de Hazen - Williams.

**Figura 5.** Medición de profundidad de lámina de agua.**Figura 6.** Detalle de las características de las curvas del floculador.

El coeficiente de rugosidad de Manning encontrado,  $n = 0,031$  a  $0,035$ ;  $0,032$  en promedio, es comparable con el valor para un canal en concreto, prefabricado o construido *in situ*, con fondo de grava y lados de escombro o riprap, cuyo valor es  $0,033$  (tabla 2). Este valor es muy representativo de las condiciones del floculador (figura 6), el cual presenta superficies laterales y fondo con grava a la vista.

El coeficiente de rugosidad de Hazen-Williams observado varía entre 38 y 43; en promedio 41, indicativo de canales de alta rugosidad como los existentes en el prototipo y comparable con el valor de la tabla 3 para canal en concreto con paredes en riprap o en concreto ciclópeo.

### PÉRDIDAS EN CURVAS

En la tabla 6 se presentan las pérdidas promedio en las curvas, para cada uno de los caudales analizados.

**Tabla 4**  
Pérdidas por fricción en los canales

Caudal, L/s		1,4	6,0	18,1	22,9	25,4
Intervalo	mm	1 a 17	1 a 19	0 a 23	4 a 22	3 a 22
Promedio aritmético	mm	9	11	13	13	13
Desviación estándar	mm	4	5	6	5	5



**Tabla 5**  
Coeficientes de pérdida por fricción en el floculador

Caudal (L/s)	Pérdida (mm)	V (m/s)	A (m <sup>2</sup> )	Y (m)	P (m)	R (m)	Manning	Hazen-Williams
1,4	9	0,19	0,014	0,096	0,342	0,042	0,035	38
6,0	11	0,27	0,024	0,163	0,476	0,051	0,031	43
18,1	13	0,31	0,059	0,391	0,932	0,063	0,034	39
22,9	13	0,34	0,069	0,459	1,067	0,064	0,032	41
25,4	13	0,36	0,071	0,473	1,096	0,065	0,031	43
<b>Promedio</b>							<b>0,032</b>	<b>41</b>
Desviación estándar							0,002	2

**Tabla 6**  
Pérdidas promedio en curvas

Caudal	L/s	1,4	6,0	18,1	22,9	25,4
Intervalo	mm	1 a 32	0 a 33	0 a 26	0 a 37	0 a 32
Promedio aritmético	mm	12	11	11	12	11
Desviación estándar	mm	9	8	7	8	7

De la tabla 6 se deduce que las pérdidas en cada curva oscilan entre 11 y 12 mm, manteniéndose relativamente constantes para todos los caudales observados. Los intervalos de pérdida medida en cada una de las curvas del floculador presentan rangos muy amplios de variación con desviación estándar de 7 a 9 mm, valores indicativos de las diferentes condiciones de rugosidad en las curvas del floculador. También se puede considerar como causa de la amplia variación de los resultados de pérdida en las curvas el remanso producido en los canales debi-

do a las contrapendientes longitudinales de algunos de ellos.

En la tabla 7 se muestran los valores experimentales del coeficiente de pérdida de energía en las curvas.

En la tabla 8 se presentan los valores del coeficiente de pérdida en curvas,  $K$ , calculados con las ecuaciones convencionales de diseño.

Los valores experimentales de  $K$  (tabla 7) oscilan entre 1,9 y 3,5; comparables con los coeficientes propuestos por Babbitt y Donald, y Bhargava y Ojha. Sin embargo, el valor calculado por la ecuación de Sánchez no es com-

**Tabla 7**  
Coeficientes de pérdida promedio en curvas

Caudal (L/s)	Pérdida (mm)	V (m/s)	K experimental
1,4	12	0,26	1,9
6,0	11	0,27	2,0
18,1	11	0,33	3,0
22,9	12	0,34	3,3
25,4	11	0,35	3,5
<b>Promedio</b>			<b>2,4</b>

**Tabla 8**  
Coeficientes de cálculo de pérdidas en curvas

Autor	K
Sánchez (ecuación 9)	0,55
Babbitt y Donald	3,22
Bhargava y Ojha (menor valor)	1,5
Bhargava y Ojha (mayor valor)	2

parable con el valor experimental. El valor promedio experimental de  $K$  igual a 2,4; es inferior al valor recomendado por Babbitt y Donald, pero superior al sugerido por Bhargava y Ojha.

Los valores experimentales del coeficiente de pérdida en curvas aumentan a medida que se incrementa el caudal, debido tal vez a que el valor de  $K$  no es estrictamente constante como se supone en el cálculo convencional de pérdidas en curvas.

### Gradiente de velocidad y número de Camp

En la tabla 9 se presentan los valores experimentales del gradiente de velocidad y del número de Camp, para una temperatura de 20 °C, peso específico del agua igual a 9.792 N/m<sup>3</sup>, viscosidad dinámica de  $1,005 \times 10^{-3}$  N s/m<sup>2</sup> y longitud total de canales de 265,65 m.

Los resultados de la tabla 9 indican lo siguiente:

- El tiempo de floculación oscila entre 12 y 23 minutos.
- El gradiente de velocidad varía entre 70 y 126 s<sup>-1</sup>.
- El número de Camp fluctúa entre 84.000 y 97.000.

Para caudales mayores de 6 L/s, el tiempo de floculación es relativamente corto (preferible > 20 minutos), aunque se encuentra dentro de los rangos típicos citados en la literatura (tabla 1). De la misma manera, para caudales mayores de 18 L/s el gradiente de velocidad **excede el valor máximo típico de 100 s<sup>-1</sup> (tabla 1)**,

El prototipo se diseñó para tratar 20 L/s con un período de retención de 20 minutos. Se puede observar que el gradiente de velocidad, en las condiciones actuales, para el caudal de diseño es mayor que los valores recomendados; además, puede conducir a esfuerzos cortantes excesivos sobre el floc y a una coagulación y sedimentación deficientes.



**Tabla 9**  
Gradiente de velocidad y número de Camp

Caudal (L/s)	Pérdida total (m)	V (m/s)	t (min)	G (s <sup>-1</sup> )	Gt
1,4	0,688	0,19	23	70	96.600
6,0	0,766	0,27	16	88	84.480
18,1	1,059	0,31	14	111	93.240
22,9	1,157	0,34	13	120	93.600
25,4	1,166	0,36	12	126	90.720
<b>Promedio</b>			<b>16</b>	<b>103</b>	<b>91.728</b>

## CONCLUSIONES

- La realización de un trabajo experimental sobre prototipos en servicio tiene muchos inconvenientes debido a la restricción en el manejo de caudales impuesto por la operación necesaria de la planta para satisfacer el consumo de la población.

- El floculador hidráulico evaluado no ha recibido el mantenimiento adecuado en 32 años de funcionamiento, no trabaja en condiciones estrictas de flujo uniforme y requiere conservación del concreto en los canales y en las curvas, al igual que eliminación de las contrapendientes y de los niveles de control inapropiados que producen remanso en el flujo del agua.

- De acuerdo con los resultados experimentales obtenidos para los coeficientes de pérdidas por fricción, la ecuación que cumple mejor con dichos valores es la ecuación de Manning. El valor promedio observado de dicho coeficiente es de 0,032, el cual corresponde a canales con fondo de grava y lados de escombros o riprap.

- Para diseño de floculadores hidráulicos de flujo horizontal, es recomendable utilizar para el cálculo de pérdidas por fricción la ecuación de Manning, con un coeficiente de rugosidad adecuado de acuerdo con el tipo de material con el que se pretende construir el floculador.

- Para el cálculo de pérdidas en curvas, en función de la altura de veloci-

dad, el valor promedio observado de  $K$  fue de 2,4.

- Para diseño de floculadores hidráulicos de flujo horizontal es razonable sugerir, para pérdidas en curvas, un valor de  $K$  igual a 2, semejante al propuesto por Bhargava y Ojha, siempre y cuando se construya el floculador con acabados adecuados.

- El gradiente de velocidad observado oscila entre 70 y 126 s<sup>-1</sup>, con un valor promedio de 103 s<sup>-1</sup> para caudales de 1,4 a 25,4 L/s.

- Es recomendable establecer un programa de mantenimiento preventivo y correctivo de las condiciones físicas y operativas del floculador. De esta manera se pueden disminuir las pérdidas, con el consecuente mejoramiento del gradiente de velocidad y, por tanto, de una mejor floculación.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Douglas Aguilar, Félix (2003). Seminario internacional "Mejoramiento de calidad de agua para consumo humano". Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria, Universidad de San Carlos de Guatemala. 24 de agosto.
2. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (Cepis)/OPS, <http://www.cepis.opsoms.org/eswww/fulltext/tratagua/rapida/rapida1.html>.
3. RAS 2000. C.2.5.1.1 y C.2.5.1.2. Ministerio de Desarrollo Económico, Resolución 1096 del 17 de noviembre de 2000.
4. Romero Rojas, Jairo Alberto (2000). *Purificación del agua*. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
5. RAS 2000. A.2.5.1.1. Ministerio de Desarrollo Económico, Resolución 1096 del 17 de noviembre de 2000.

6. American Water Works Association (Asce, AWWA) (1998). *Water Treatment Plant Design*. AWWA, 806 pp.

7. Barghava, D.S. & Ojha, C.S.P. (1993). *Models for Design of Flocculating Baffled Channels*. *Wat. Res.*, Vol. 27, No. 3, pp. 465-475.

8. Arboleda, V.J. (1992). *Teoría y práctica de la purificación del agua*. Acodal.

9. Smethurst, G. (1979). *Basic Water Treatment*. Thomas Telford Ltda.

10. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (Cepis)/OPS. <http://www.cepis.ops-oms.org/eswww/fulltext/tratagua/rapida/rapida1.html>.

11. Qasim, Syed, R., Mothey, Eduard, M. & Zhu, Guang (2000). *Water Works Engineering, Planning, Design and Operation*.

12. Clark, J.W., Viessman, W. & Hammer, M.J. (1971). *Water Supply and Pollution Control*. Int. Textbook Co.

13. Steel, E.W. & McGhee, T.J. (1979). *Water Supply and Sewerage*, 5ª ed. McGraw Hill Book Co.

14. Instituto de Fomento Municipal (Infopal). *Especificaciones para diseño de plantas potabilizadoras de agua*.

15. Hardenbergh, W.A. & Rodie, E.R. (1961). *Water Supply and Waste Disposal*. International Textbook Co.

16. Fair, G.M. & Geyer, J.C. (1954). *Water Supply and Waste Disposal*. Wiley.

17. Sánchez, M.H. (1970). *Ingeniería de acueductos y tratamiento de aguas*. U.N.

18. Babbitt, H.E., Donald, J.J. & Cleasby, J.L. (1962). *Water Supply Engineering*. McGraw Hill.

19. Barghava, D.S. & Ojha, C.S.P. (1993). *Models for Design of Flocculating Baffled Channels*. *Wat. Res.*, Vol. 27, No. 3, pp. 465-475.

20. Rodríguez Díaz, Héctor Alfonso (2001). *Hidráulica experimental*. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.

21. Hydrologic Engineering Center US Army Corps of Engineers (2004). *HEC-RAS River Analysis System Version 3.1.2*. Mannings in Information Table. April.

22. López Cualla, Ricardo Alfredo (1995). *Elementos de diseño para acueductos y alcantarillados*. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.

23. Azevedo Netto J.M. & Acosta Álvarez, G. (1976). *Manual de hidráulica*. Harla.

24. Jonson, H.E. & Froehlich, D.C. (1988). *Basic Hydraulic Principles of Open Channel Flow*. WRP, USGS.

25. BSI. British Standard (1981). *Measurement of Liquid Flow in Open Channels*. BS 3680. Part 4A.

26. Bautista Tibaquirá, Luz Stella (2006). Análisis experimental de un floculador hidráulico de flujo horizontal. Trabajo de grado, Especialización en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente. Escuela Colombiana de Ingeniería.



# Realidades del biocombustible

Sylian Rodríguez Lattuada

Con la introducción al mercado colombiano del etanol, aditivo oxigenante de la gasolina, con el objetivo de empezar la sustitución de los combustibles de origen fósil, se ha abierto una amplia discusión acerca de las verdaderas bondades de dicho compuesto. En este artículo se presentan el origen, el uso de los biocombustibles en el mundo y su introducción reciente en Colombia; se exponen también diversas consideraciones sobre el ambiente y la salud humana, así como nuestra realidad ambiental, que llevan a hacer un verdadero balance del uso del etanol como "biocombustible".

**Palabras claves:** biocombustible, etanol, biodiésel, contaminación del aire, monóxido de carbono, hidrocarburos, aldehídos, nitratos orgánicos, salud humana.

The introduction into the Colombian market of ethanol, an oxygenant fuel additive, with the purpose of starting the substitution of fossil fuels, has opened a broad discussion about the true goodness of the compound. The origin, the use of biofuels worldwide and its recent introduction in Colombia are presented in this paper, and several considerations concerning the environment, the human health and our specific environmental reality are also discussed, so that a true balance of the use of ethanol as a "biofuel" can be inferred.

**Keywords:** biofuel, ethanol, biodiesel, air pollution, carbon monoxide, hydrocarbons, aldehydes, organic nitrates, human health.

Ingeniera civil, especialista en saneamiento ambiental de la Escuela Colombiana de Ingeniería; máster y Ph.D en ingeniería ambiental de la Universidad de Cincinnati (Estados Unidos). Profesora asistente e investigadora del Centro de Estudios Ambientales de la Escuela Colombiana de Ingeniería. srodriguez@escuelaing.edu.co

## INTRODUCCIÓN

A finales del 2005 el gobierno nacional, a través de la entrada en vigencia de la Ley 693 del 2001, aprobó la entrada al mercado del etanol para su utilización como alcohol carburante mezclado con la gasolina corriente. Los biocombustibles se han promocionado en nuestro país como una alternativa segura de utilización por varias razones fundamentales: provienen de fuentes renovables que pueden desarrollarse de manera sostenible por largos períodos de tiempo; poseen propiedades que reducen las emisiones de contaminantes ambientales; disminuyen la dependencia de los combustibles fósiles, altamente costosos; mejoran la combustión y la eficiencia de los motores y, por último, generan gran cantidad de empleos, sobre todo en el área rural, impulsando la agricultura. No obstante, la experiencia de los países desarrollados, los cuales llevan trabajando e investigando el impacto de los biocombustibles sobre la calidad del aire y la salud humana por más de 25 años, revela hechos que se deberían tener en cuenta antes de afirmar las numerosas bondades del etanol en la gasolina.

## QUÉ SON LOS BIOCOMBUSTIBLES

Biocombustible es el término que se utiliza para denominar en forma gené-

rica todos aquellos combustibles con origen en la biomasa. Los biocombustibles se pueden clasificar como aceites vegetales, alcoholes y compuestos oxigenados (1). Los aceites vegetales puros se pueden utilizar en cantidades mínimas en una mezcla con combustibles para motores diésel, en lubricantes y en aceites hidráulicos, o si son más refinados (en forma esterificada) reducen la combustión incom-

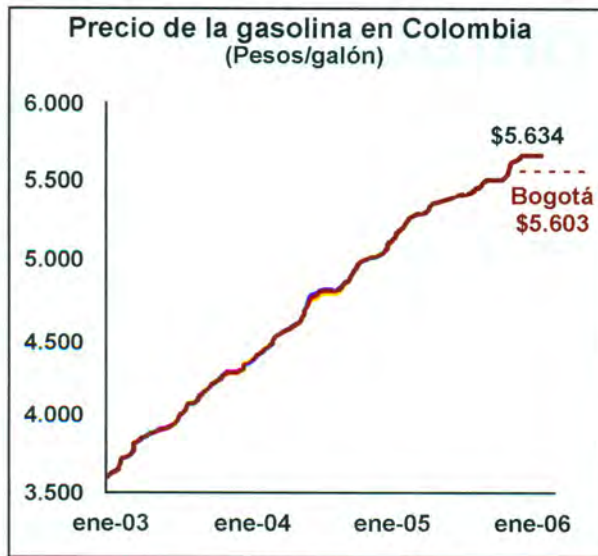
Biocombustible es el término que se utiliza para denominar en forma genérica todos aquellos combustibles con origen en la biomasa. Los biocombustibles se pueden clasificar como aceites vegetales, alcoholes y compuestos oxigenados.

pleta de carbono y son materia prima para el llamado biodiésel. Sin embargo, los aceites vegetales son altamente viscosos, tienden a depositar partículas que interfieren con la presión de inyección del combustible y con la iniciación de la combustión, cau-

sando, por tanto, emisiones contaminantes (2). Se pueden obtener de 300 especies de plantas diferentes, como el girasol, la palma, la canola, la soya, el coco, las aceitunas, etc.

Los alcoholes más comunes son el etanol y el metanol (1). Por un lado, el etanol, combustible líquido volátil, proviene de la destilación de los residuos de la fermentación de la biomasa de maíz, sorgo, trigo, caña de azúcar, remolacha y tubérculos varios, así como también de la madera y de residuos vegetales. Este alcohol tiene ventajas como el elevado contenido de oxígeno y la mayor capacidad antidetonante (octanaje) en los motores, logrando una





Fuente: Resoluciones del Ministerio de Minas y Energía y cálculos de Anif.

**Figura 1.** Incremento del precio de la gasolina en los últimos tres años en Colombia (fuentes: <http://www.anif.org> y <http://www.minminas.gov.co>).

baja producción de compuestos aromáticos y de monóxido de carbono. Por otro lado, el metanol es un compuesto menos volátil, menos costoso y menos contaminante que el etanol; se puede obtener de varios materiales, como la madera y la biomasa seca, de cuya celulosa se obtiene un gas de síntesis. Con todo, todavía no existe la tecnología adecuada para que la utilización directa de metanol en motores sea efectiva.

Los compuestos oxigenados son aditivos de origen mineral que se están investigando para producir combustibles de mayor octanaje, debido a la eliminación del plomo en la gasolina. Para compensar la alta volatilidad de estos compuestos, comparada con la de la gasolina, ha sido necesario eliminar el butano de la mezcla oxigenada; esto se traduce en costos adicionales para las refinerías, las que se han visto obligadas a vender el butano a menor precio y en mercados diferentes (1).

### LA EXPERIENCIA EN EL MUNDO

La producción mundial de etanol ascendió en 2003 a 32 Mm<sup>3</sup> (3), de los cuales el 80% provienen del Brasil y de Estados Unidos. Brasil es el único país del mundo donde un programa nacional de etanol a gran escala se ha implementado con éxito desde sus inicios; el etanol se introdujo en 1979 y su uso se ha incrementado desde entonces. En 1997, aproximadamente nueve millones de vehículos en Brasil funcionaron con gasohol (combustible con 22% de

etanol) y otros cuatro millones con etanol puro (4); actualmente, unos 43 millones de vehículos utilizan la mezcla. Este país cuenta con seis millones de hectáreas sembradas con caña de azúcar, de las cuales la mitad se destinan a la producción del alcohol, aproximadamente unos 18 Mm<sup>3</sup>. Además, Brasil se ha convertido en una potencia exportadora de alcoholes carburantes, con exportaciones de más de 930 millones de litros, constituyéndose en uno de sus principales renglones de exportación (5).

Estados Unidos, por su parte, empezó en 1988 un programa de reducción de emisiones al ambiente, a través del uso de combustibles oxigenantes; estados como Arizona, Colorado, California, Alaska y Nuevo México adoptaron rápidamente combustibles con 8% de MTBE (*methyl tert-butyl ether*) o 10% de etanol. Sin embargo, mediante diversos estudios se comprobó que, en pocos años, el compuesto MTBE causó un gran impacto ambiental en las aguas subterráneas y superficiales, debido a su gran solubilidad, difícil degradabilidad y efectos sobre la salud humana, así que el MTBE fue prohibido en 1999 y remplazado en su totalidad por el etanol, como principal oxigenante en la gasolina (6). El maíz y otros cereales son las fuentes de etanol en Estados Unidos; aproximadamente unos 12 Mm<sup>3</sup> al año.

La Comunidad Europea ha contribuido, en menor escala, a la producción mundial de bioetanol desde 1993 (7); países como Francia, Suecia, España, Alemania y el Reino Unido utilizan actualmente los cultivos de remolacha, sorgo y biomasa lignocelulósica, con una producción anual de 8 Mm<sup>3</sup>. No obstante, la Comunidad Europea ha logrado mejorar (y de hecho es el líder mundial) la producción de biodiésel, gracias a su avanzada tecnología en la extracción de ésteres a partir de aceites vegetales (8).

### LOS BIOCOMBUSTIBLES EN COLOMBIA

Como es bien sabido, el precio de la gasolina en Colombia ha aumentado 60% en los últimos tres años, según un reporte del Ministerio de Minas y Energía (9) y la Anif (10) (figura 1). La introducción de 10% de etanol como aditivo oxigenante a la gasolina tradicional ha logrado, en menos de un mes, un descenso de aproximadamente \$70 en el precio por galón en la ciudad de Bogotá. Ecopetrol (11) y los ministerios de Minas y Energía y del Medio Ambiente han prometido una reducción de al menos 27% de las emisiones de monóxido de carbono provenientes de carros nuevos y 45% de carros con ocho años de vida y, además, 20% de hidrocarburos no quemados, gracias al uso del etanol en la gasolina corriente (9).

La caña de azúcar es la materia prima por excelencia en Colombia. En la actualidad, se ha empezado la producción



de 300 mil galones por día de etanol, pero se espera que en menos de un año la capacidad productora aumente a un millón de galones diarios, a través de doce plantas alcohólicas en los principales departamentos del país. En el Valle del Cauca, Cauca y Risaralda, se están desarrollando proyectos con una inversión de más de US\$80 millones para la producción de alcohol carburante, merced a la cooperación e interés de los principales ingenios azucareros. La cobertura de los cultivos de caña y yuca deberá, por tanto, ampliarse hasta 103 mil hectáreas, adicionales a las 430 mil hectáreas sembradas de cañas de azúcar (figura 2). Otras fuentes innovadoras de materia prima para la producción de alcohol se están evaluando, como el banano, la yuca, la remolacha, la palma de aceite y el maíz, aunque por el momento el uso de estos materiales está en etapas preliminares.

### CONSIDERACIONES SOBRE EL AMBIENTE Y LA SALUD HUMANA

Por ser un aditivo oxigenante de la gasolina, el etanol ayuda a la combustión del motor, aumentando el octanaje, mejorando su eficiencia y reduciendo, por tanto, la cantidad emitida a la atmósfera de monóxido de carbono (CO) en un 40-50% e hidrocarburos totales (THC) en un 15-30% (12, 13, 14, 15); sin embargo, en un proceso de combustión con un aditivo como el etanol, habrá siempre un exceso de oxígeno, generando óxidos de nitrógeno (NOx), contaminantes primarios del aire. Además, estudios que han evaluado el impacto del etanol en las emisiones atmosféricas han determinado que se producen otros compuestos secundarios y, en ocasiones más tóxicos, como los aldehídos (formaldehídos -HCHO-, acetaldehídos -CH<sub>3</sub>CHO-), los nitratos orgánicos (PAN -nitratos peroxiacetilos-, PPN -nitra-

tos peroxipropionilos-, PBN -nitratos peroxibutrilos-), el ozono (O<sub>3</sub>) y, en menor proporción, algunos hidrocarburos no quemados durante la combustión (benceno, 1,3 butadieno, n-hexano, acetona). Los aldehídos se forman a partir de las reacciones de fotooxidación de los alcanos y alquenos (productos de las emisiones de motores vehiculares) durante los cambios de noche-día, debido a la presencia en la atmósfera del O<sub>3</sub> y otros radicales (NO<sub>3</sub>• y OH•). Los PAN, por su par-

te, son contaminantes secundarios que se generan por la reacción de los radicales de peróxido con el dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) y gracias a precursores como los aldehídos y a condiciones climáticas específicas.

Es de anotar también que los contaminantes antes mencionados forman parte de una lista de 21 tóxicos del aire producidos por fuentes móviles (publicada por la Agencia Ambiental de Estados Unidos, EPA) y representan riesgos muy altos para la salud pública



Figura 2. Localización de las plantas procesadoras, capacidad de producción de etanol y cobertura de áreas de cultivo de caña de azúcar a escala nacional (Fuente: <http://www.corpodib.com>).



(16). Los compuestos de nitratos orgánicos y los aldehídos, por ejemplo, son irritantes potentes de las vías respiratorias, los ojos y la piel, y luego de largas exposiciones a estos contaminantes, se ha reportado que causan tumores en las cavidades nasofaríngeas. Los hidrocarburos no quemados (como el benceno, el 1,3 butadieno y el n-hexano) son conocidos potenciales cancerígenos en los humanos, siendo los tóxicos de mayor riesgo dentro de los emitidos por los vehículos; el primero ha sido vinculado a la aparición de linfomas, leucemia y otro tipo de tumores, mientras que el segundo causa efectos sobre la reproducción y desarrollo en los fetos. Se ha demostrado además que inhalaciones prolongadas de n-hexano en los humanos han producido depresión del sistema nervioso central con síntomas varios (mareo, visión borrosa, debilidad muscular, etc.) (16).

En el 2005, el estado de California (Estados Unidos), a través del Consejo para los Recursos del Aire (Air Resources Board, ARB), realizó un estudio cuantitativo de estos contaminantes en el aire (6), en el cual se concluyó que en sólo cinco años de uso de la mezcla gasolina-etanol (con apenas 3% del oxigenante), la concentración de aldehídos aumentó en proporciones considerables (formaldehído en un 18% y acetaldehído en un 190%), al igual que los PAN en un 50%. Esto mismo ha sido confirmado por varios investigadores (13,17,18,19), quienes han reportado en ciudades como Albuquerque, Denver y Los Ángeles un incremento grande en la emisión de contaminantes atmosféricos secundarios, sobre todo durante los meses de invierno, como consecuen-

cia del uso del etanol como alcohol carburante.

Además, se ha encontrado que las mezclas gasolina-etanol incrementan la producción de gases de efecto invernadero; se ha reportado un aumento en el ambiente del 5-25% de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y de metano ( $\text{CH}_4$ ) (13). El etanol, por su vida atmosférica de aproximadamente 53 horas, aumenta la reactividad en fase gaseosa con los radicales peróxido, formando grandes cantidades de ozono; en Estados Unidos el aumento del ozono en un período de siete años (1988-1995)



El etanol, combustible líquido volátil, proviene de la destilación de los residuos de la fermentación de la biomasa de maíz, sorgo, trigo, caña de azúcar, remolacha y tubérculos varios, así como también de la madera y de residuos vegetales.

los países líderes en programas de biocombustibles, también ha sido fundamental en la evaluación de las emisiones contaminantes debidas a la mezcla gasolina-etanol. Grosjean *et al.* (20) reportaron en un estudio realizado entre 1986 y 1988 que en ciudades como São Paulo, Salvador y Río de Janeiro el acetaldehído fue el compuesto carbonilo más abundante, con concentraciones máximas de 35 ppb, seguido por el formaldehído con 34 ppb. Tales resultados, medidos solamente en las zonas urbanas de estas ciudades, mostraron las concentraciones más altas

registradas en el mundo, muy probablemente debidas al alto porcentaje de etanol como combustible vehicular usado en el Brasil. Otros estudios más recientes (21,22) han reportado datos mucho más desalentadores: aumentos en las concentraciones de formaldehídos (de 0,20 a 80 ppb) y de acetaldehídos (de 0,40 a 93 ppb), los cuales representan incrementos del 400 y 233%, respectivamente. Además, debido a los altos niveles de este último compuesto, más de 5 ppb de PAN se registraron en la atmósfera (23).

### NUESTRA REALIDAD AMBIENTAL

Está claro que el programa de uso del etanol es multipropósito, puesto que brinda diferentes beneficios en los planos sociales, económicos e industriales, representados en un mayor desarrollo local y regional, aumento de las áreas cultivadas, gran generación de empleo y fortalecimiento del mercado doméstico. Ambientalmente es de gran importancia la reducción de las emisiones de monóxido de carbono e hidrocarburos, gracias a la introducción de la biogasolina; sin embargo, el problema crítico de contaminación atmosférica en nuestro país, y en particular en las grandes ciudades como Bogotá, está en el material particulado ( $\text{PM}_{10}$ , partículas de tamaño inferior a 10 micras). La deposición de partículas gruesas y finas en las regiones nasofaríngeas, traqueobronquiales y pulmonares causa enfermedades severas en la salud humana, como por ejemplo cáncer de pulmón, enfermedades cardiopulmonares y respiratorias agudas y crónicas (24).

El hollín lo emiten predominantemente los vehículos de transporte público (buses, busetas) y carga (camiones y tractomulas), debido a que tra-

fue de 2-5% (6).

La experiencia del Brasil, por ser uno de



bajan con combustible diésel; se estima que en la ciudad de Bogotá cada día se descargan aproximadamente 1.616 toneladas de material particulado a la atmósfera (25). En un estudio de la Unidad de Asistencia Técnica Ambiental para el Sector Transporte (26) se determinó que en Bogotá circulan 1.042.000 vehículos (matriculados y no matriculados), de los cuales el transporte público constituye una porción importante (34,6%) de la totalidad de vehículos y que, además, el parque automotor colombiano está distribuido en un 79,4% por vehículos de dos ejes, en un 6,5% por camiones rígidos de tres y cuatro ejes y el 14,1% restante por tractomulas. Estos números se ven agravados por el promedio de edad del parque automotor, el cual es 25 años para los vehículos de servicio público y 15 para los particulares.

El Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo empezó a hacer cada vez más exigentes las normas de calidad del aire y, en especial, del material particulado, a través de la expedición reciente del Decreto 601 de 2006, en el cual se redujo el nivel máximo permisible del PM10 de 100  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (Decreto 02 de 1982) a 70  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , y el cual se espera establecer en 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en menos de cinco años. No obstante, éste es un estándar todavía muy lejano de las verdaderas necesidades ambientales y sociales, ya que la calidad del aire y la salud humana no pueden esperar a que se produzcan cambios más trascendentales.

Por tanto, es necesario enfatizar que la introducción del etanol como alcohol combustible es sólo una de las tantas medidas que se deben tomar para mejorar la calidad del aire en nuestras ciudades. La modernización del parque automotor, el mejoramiento de la calidad de los combustibles, la sustitución por combustibles más limpios (en especial el biodiésel) y la inversión en programas y equipos de monitoreo,

seguimiento y caracterización de las emisiones atmosféricas, son las estrategias que hay que seguir para el control y para la prevención de la contaminación del aire.

## BIBLIOGRAFÍA

- (1) Cadenas, A. & Cabezedo, S. (1998). *Biofuels as Sustainable Technologies: Perspectives for Less Developed Countries*. Technological Forecasting and Social Change, **58**, pp. 83-103.
- (2) Crookes, R., Kiannejad, F. & Nazha, M. (1997). *Systematic Assessment of Combustion Characteristics of Biofuels and Emulsions with Water for Use as Diesel Engine Fuels*. Energy Convers. Mgmt., **38**, n.15-17, pp. 1785-1795.
- (3) Bert, C. (2004). *World Fuel Ethanol Analysis and Outlook: the Online Distillery Network for Distilleries and Fuel Ethanol for Plants Worldwide*. <http://www.distill.com/World-Fuel-Ethanol-A&O-2004.html>.
- (4) Grosjean, D. (1997). Atmospheric Chemistry of Alcohols. *Journal of Brazilian Chemical Society*, **8**, 433-442.
- (5) Amylkar, D. & Acosta, M. (2004). *El gran desafío: a propósito de los alcoholes carburantes*. <http://www.amylkaracosta.com/index>
- (6) Air Resources Board (Stationary Source Division, Criteria Pollutants Branch, Fuels Section). (2005). *A Summary of the Staff's Assessment Regarding the Effect of Ethanol in California Gasoline on Emissions*. <http://www.arb.ca.gov/homepage.html>.
- (7) Faaij, A. (2006). Bioenergy in Europe: changing technology choices. *Energy Policy*, **34**, pp. 322-342.
- (8) Van Thuijil, E., Roos, C. & Beurkens, L. (2003). *An Overview of Biofuel Technologies, Markets and Policies in Europe*. Energy Research Foundation of the Netherlands, Report ECN-C03-008, pp.64, <http://www.ecn.nl/main.html>.
- (9) Ministerio de Minas y Energía, <http://www.minminas.gov.co>.
- (10) Asociación Nacional de Instituciones Financieras (Anif), <http://www.anif.org>.
- (11) Empresa Colombiana de Petróleos (Ecopetrol) (2005), [http://www.ecopetrol.com.co/especiales/carta\\_petrolera2005/portada.htm](http://www.ecopetrol.com.co/especiales/carta_petrolera2005/portada.htm).
- (12) Hsieh, W., Chen, R., Wu, T. & Lin T. (2002). Engine Performance and Pollutant Emission of an SI engine using Ethanol-Gasoline Blended Fuels, *Atmospheric Environment*, **36**, pp. 403-410.
- (13) Pouloupoulos, S., Samaras, D. & Philippopoulos C. (2001). Regulated and Unregulated Emissions from an Internal combustion Engine Operating on Ethanol-Containing Fuels. *Atmospheric Environment*, **35**, pp. 4399-4406.
- (14) Stump, F., Knapp, K., Ray, W., Siudak, P. & Snow, R. (1996). Influence of Ethanol-Blended Fuels on Emissions from Three Pre-1985 Light-Duty Passenger Vehicles. *Journal of Air & Waste Management Association*, **46**, 1149-1161.
- (15) He, B., Wang, J., Hao, J., Yan, X. & Xiao, J. (2003). A Study on Emissions Characteristics of a EFI Engine with Ethanol Blended Gasoline Fuels. *Atmospheric Environment*, **37**, pp. 949-957.
- (16) U.S. Environmental Protection Agency (US EPA). (2000). *Control of Emissions of Hazardous Air Pollutants from Motor Vehicles and from Motor Vehicle Fuels*. EPA-420-R-00-023, <http://www.epa.gov/otaq/regs/toxics/r00023.pdf>.
- (17) Gaffney, J., Marley, N., Martin, R., Dixon, R., Reyes, L. & Popp, C. (1997). Potential Air Quality Effects of Using Ethanol-Gasoline Fuel Blends: A Field Study in Albuquerque, New Mexico. *Environm. Sci. & Technol.*, **31**(11), pp. 3053-3061.
- (18) Anderson, L., Lanning, J., Barrell, L., Miyagishima, J., Jones, R. & Wolfe, P. (1996). Sources and Sinks of Formaldehyde and Acetaldehyde: An Analysis of Denver's Ambient Concentration Data, *Atmospheric Environment*, **30**(12), pp. 2113-2123.
- (19) Anderson, L., Lanning, J., Wilkes, E., Jones, R. & Wolfe, P. (1997). *Effects of Using Oxygenated Fuels on Carbon Monoxide, Formaldehyde and Acetaldehyde Concentrations in Denver*, Paper 97-RP139.05, AWMA 90<sup>th</sup> Meeting & Exhibition, Ontario (Canadá).
- (20) Grosjean, D., Miguel, H. & Tavares T. (1990). Urban Air Pollution in Brazil: Acetaldehyde and Other Carbonyls. *Atmospheric Environment*, **24**, pp. 101-106.
- (21) Grosjean, E., Grosjean, D., Gunawardena, R. & Rasmussen, R. (1998). Ambient Concentrations of Ethanol and Methyl Tert-Butyl Ether in Porto Alegre, Brazil. *Environm. Science & Technology*, **32**, 736-742.
- (22) Andrade, J. de, Andrade, M. & Pinheiro, H. (1998). Atmospheric Levels of Formaldehyde and Acetaldehyde and their Relationship with the Vehicular Fleet Composition in Salvador-Bahia, Brazil. *Journal of Brazilian Chemical Society*, **3**, 219-223.
- (23) Tanner, R., Miguel, A., Andrade, J. de, Gaffney, J. & Streit, G. (1988). Atmospheric Chemistry of Aldehydes: Enhanced Peroxyacetyl Nitrate Formation from Ethanol-Fueled Vehicular Emissions. *Environm. Sci. & Technol.*, **22**, pp. 1026-1034.
- (24) Godish, T. (2004). *Air Quality*, 4th ed. USA: Lewis Publishers, CRC Press.
- (25) Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente (Dama), <http://www.dama.gov.co/sinmi1/sinmired.htm>
- (26) Unidad de Asistencia Técnica Ambiental para el Sector Transporte (2004), [http://www.prof.uniandes.edu.co/~nrojias/Dia\\_5\\_Emisiones\\_por\\_fuentes\\_moviles/Jose\\_Alejandro\\_Martinez.ppt#394,8,Diapositiva\\_8](http://www.prof.uniandes.edu.co/~nrojias/Dia_5_Emisiones_por_fuentes_moviles/Jose_Alejandro_Martinez.ppt#394,8,Diapositiva_8)



# Obtención de parámetros del generador sincrónico bajo régimen dinámico

Jaime Alonso Castillo Marín\*, José Ómar Trujillo Gómez\*\*, Adriana Marcela Montaña Bejarano\*\*\* y Emmy Yadira Ruiz Vargas\*\*\*\*

En este artículo (escrito el 20 de agosto de 2004) se explican los principales parámetros del generador sincrónico, se realiza una breve descripción de las pruebas de laboratorio para su medición, se presentan los resultados obtenidos para una máquina de baja potencia y finalmente se hace una comparación de éstos con los valores estándar de máquinas de características similares.

This article explains the main parameters of the synchronous generator, it also carries out a brief description of the laboratory tests for their measure. The obtained results for a low power machine are displayed. Finally it shows a comparison between these results and the standard values of machines with similar characteristics.

**Palabras claves:** análisis transitorio del generador sincrónico, corrientes de cortocircuito, estimación de parámetros, generador sincrónico, medida de variables eléctricas.

\* Estudiante de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Actualmente trabaja como auxiliar de investigación del Centro de Estudios de Energía.

\*\* Profesor de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, especialista en máquinas eléctricas y alta tensión, magíster en ingeniería de sistemas. Actualmente trabaja como coinvestigador en el Centro de Estudios de Energía.

\*\*\* Profesora de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, magíster en ingeniería eléctrica. Actualmente trabaja como investigadora en el Centro de Estudios de Energía.

\*\*\*\* Profesora de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, magíster en ingeniería eléctrica. Actualmente trabaja como investigadora en el Centro de Estudios de Energía.

## INTRODUCCIÓN

En los estudios para el planeamiento operativo y de expansión de los sistemas de potencia es de suma importancia conocer el comportamiento dinámico de la red. Parte de estos estudios se centra en el funcionamiento y respuesta de los generadores sincrónicos a los cambios del sistema. Por tal razón, es importante conocer el procedimiento para la obtención de los parámetros dinámicos del generador sincrónico mediante un análisis matemático sencillo que arroje resultados confiables.

## GENERADOR SINCRÓNICO

Para generar potencia eléctrica, el generador sincrónico es el más utilizado en los sistemas de potencia, los cuales constructivamente son de polos salientes o de polos cilíndricos.

El devanado de la armadura generalmente se coloca en el estator de la máquina para lograr la señal trifásica al nivel de tensión y potencia deseados.

En el rotor se tiene el devanado de campo, también llamado de excitación, colocado en ranuras sobre su periferia. Para el caso de polos cilíndricos utilizados para máquinas de alta velocidad, se emplean por lo regular dos o cuatro polos; por el contrario, en máquinas de baja velocidad más de cuatro polos van configurados en bobinas prefabricadas que se colocan en los

polos. Lo anterior predetermina el comportamiento tanto en estado estacionario como en condición transitoria, debido a la variación del entrehierro que modifica los valores de reactancia de la máquina sincrónica.

## Estado estable

Para el estudio del comportamiento del generador sincrónico en estado estable se toma un generador de rotor cilíndrico de dos polos y se estudia operando en vacío. La corriente que circula por el devanado del campo crea una fuerza magnetomotriz ( $f_{mm_f}$ ), la cual da origen a un flujo ( $\Phi_f$ ) que a su vez crea un flujo ligado con cada uno de los devanados del estator ( $\Psi_{fA}$ ,  $\Psi_{fB}$ ,  $\Psi_{fC}$ ). La tensión generada en los bornes del estator está dada para la fase A por (1)

$$E_{fA} = \frac{-d\Psi_{fA}}{dt} = \omega M_f I_f \sin(\omega t) \quad (1)$$

donde  $M_f$  es la inductancia mutua de los devanados del estator respecto al devanado del campo y  $\omega$  es la velocidad angular sincrónica de la máquina.

Cuando al generador se conecta una carga en sus terminales, circulan corrientes por el bobinado de armadura, que dan origen a una nueva fuerza magnetomotriz llamada reacción de armadura, la cual, dependiendo del factor de potencia, en adelanto, atraso o unitario, afecta la fuerza magnetomotriz del campo en forma diferente; para el caso de una carga en adelanto



la nueva fuerza magnetomotriz refuerza la existente, el caso contrario se tiene para cargas en atraso.

La fuerza magnetomotriz de armadura ( $fmm_a$ ), constituida por tres componentes debido a la diferencia de fase entre las corrientes, es constante en su magnitud y gira a velocidad sincrónica. Por consiguiente, se tiene una fuerza magnetomotriz resultante ( $fmm_r$ ) como la suma de la  $fmm_f$  y la  $fmm_a$ , la cual da origen a flujos ligados ( $\Psi_{rA}$ ,  $\Psi_{rB}$ ,  $\Psi_{rC}$ ) generando una tensión en bornes, dada para la fase A por (2)

$$E_{rA} = -\frac{d\Psi_{rA}}{dt} = \omega M_f I_f \sin(\omega t) + \omega L_A I_m \sin(\omega t - \alpha) \quad (2)$$

donde  $L_A$  es la inductancia por fase del estator y  $\alpha$  es el ángulo de atraso de  $fmm_a$  con respecto a  $fmm_f$ .

La componente de la tensión por efecto de reacción de armadura está  $\pi/2$  atrasada con respecto a la corriente que le da origen, y si se suman los efectos físicos propios de la armadura, una reactancia de dispersión ( $\chi_{dis}$ ) y una resistencia propia del devanado ( $R_a$ ), se tiene (3)

$$\begin{aligned} V_T &= E_g - j\chi_a I - j\chi_{dis} I - R_a I \\ V_T &= E_g - j\chi_s I - R_a I \end{aligned} \quad (3)$$

donde  $\chi_s$  es la suma de reactancias y es llamada reactancia sincrónica.

Si se considera un rotor de polos salientes, el análisis es distinto debido a que el entrehierro no es constante. Para hacer notar esta diferencia el análisis se realiza por el método de las dos componentes, el eje directo y el eje en cuadratura. El primero está en sentido de la cara polar del rotor y el segundo en sentido transversal; el eje directo está en la dirección donde se tiene menos entrehierro –por consiguiente, mayor flujo– y el eje en cuadratura coincide con la dirección de mayor entrehierro –por tanto, menor flujo–.

Esta reluctancia variable afecta la fuerza magnetomotriz de reacción de armadura. Por tanto, la fuerza magnetomotriz resultante ( $fmm_r$ ) se divide en dos componentes: una en sentido del eje de directo ( $fmm_d$ ) y otra en cuadratura ( $fmm_q$ ). La  $fmm_d$  se conforma por la fuerza magnetomotriz del campo ( $fmm_f$ ) y de reacción de armadura ( $fmm_{ad}$ ) y la  $fmm_q$  se conforma por la fuerza magnetomotriz de reacción de armadura en ese sentido ( $fmm_{aq}$ ) [4], [5].

Las fuerzas magnetomotrices de reacción de armadura en el eje directo y de cuadratura son producidas por las com-

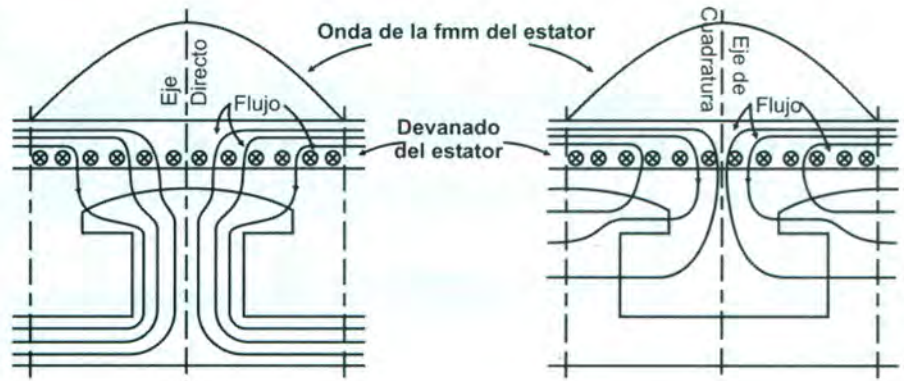


Figura 1. Efecto de reacción de armadura en eje directo y de cuadratura en estado estable [1].

ponentes de corriente de armadura en estos ejes. En la misma forma que en el caso del rotor de polos cilíndricos, se tienen dos tensiones atrasadas  $\pi/2$  con respecto a las corrientes que las generan; de esta manera, si se consideran un conjunto y se suman los efectos físicos, se tiene (4)

$$\begin{aligned} V_T &= E_g - j\chi_{aq} I_q - j\chi_{ad} I_d - j\chi_{dis} I - R_a I \\ V_T &= E_g - j\chi_q I_q - j\chi_d I_d - R_a I \end{aligned} \quad (4)$$

donde  $\chi_q$  es la reactancia sincrónica en el eje de cuadratura y  $\chi_d$  es la reactancia sincrónica en el eje directo.

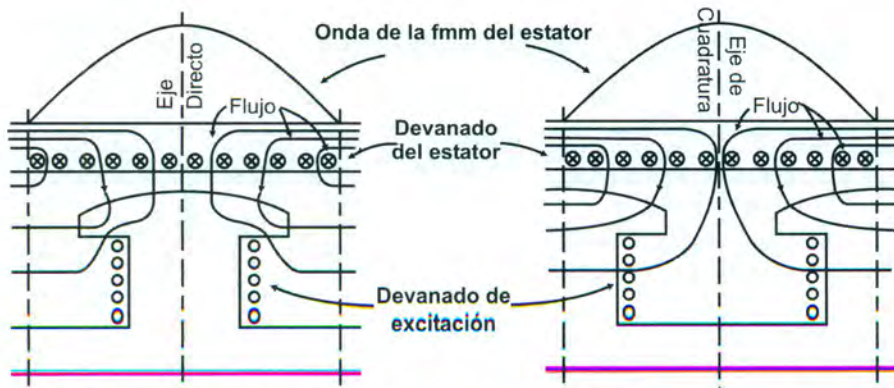
Aunque el método de las dos componentes se desarrolló para máquinas de polos salientes también se utiliza en máquinas de rotor cilíndrico, debido a que su entrehierro no es del todo constante por las ranuras que se encuentran en el rotor y el estator.

En la figura 1 se muestra la distribución de flujo de reacción de armadura en el eje directo y en cuadratura para estado estable.

### Estado transitorio

Si se supone que ocurre una falla cuando el generador opera en vacío, y se desprecia la resistencia de armadura, el flujo que se presenta es el flujo de excitación producido en el rotor, el cual da origen a unos flujos en los devanados de la armadura cortocircuitados ( $\Psi_{fA0}$ ,  $\Psi_{fB0}$ ,  $\Psi_{fC0}$ ). Los flujos ligados deben permanecer constantes aun después de la falla [1], por lo que durante ésta se producen flujos sinusoidales diferentes, los cuales hacen que circulen corrientes que crean flujos adicionales ( $\Psi_{fA}$ ,  $\Psi_{fB}$ ,  $\Psi_{fC}$ ), haciendo que los flujos ligados tengan entonces dos componentes: un flujo ( $\Psi_{fA}$ ) proporcional a corrientes alternas ( $I_{Aa}$ ,  $I_{Ba}$ ,  $I_{Ca}$ ) y un flujo ( $\Psi_{fA0}$ ) proporcional a corrientes directas ( $I_{Ac}$ ,  $I_{Bc}$ ,  $I_{Cc}$ ) [2].





**Figura 2.** Efecto de reacción de armadura en eje directo y de cuadratura en estado transitorio [1].

El efecto combinado de las componentes  $ac$  y  $\alpha$  de la corriente en las tres fases produce una fuerza magnetomotriz de reacción de armadura que lleva a un flujo de reacción de armadura a través del entrehierro que se enlaza con los bobinados del rotor y crea corrientes en él. Las corrientes de fase  $ac$  producen una fuerza magnetomotriz de reacción de armadura  $ac$  ( $fmm_{a,ac}$ ) que se comporta en forma similar a la  $fmm_a$  de estado estable, la cual rota a la misma velocidad que el rotor y, por consiguiente, a la misma velocidad que la  $fmm$ . Esta fuerza magnetomotriz de reacción de armadura desmagnetiza la máquina, por tanto los flujos ligados del rotor producidos por  $fmm_{a,ac}$  serán constantes y negativos.

Las corrientes  $\alpha$  en cada fase producen una fuerza magnetomotriz estacionaria  $fmm_{a,\alpha}$  que genera un flujo de armadura estacionario ( $\Phi_{a,\alpha}$ ). La  $fmm_{a,\alpha}$  en el momento de la falla se encuentra alineada con el eje directo del rotor y gira en sentido contrario a él. El significado de este fenómeno es que el flujo ligado del rotor  $\Psi_{af,\alpha}$  producido por  $\Phi_{a,\alpha}$  es inicialmente positivo, magnetizando la máquina y luego al girar el rotor varía cosenoidalmente.

En el instante de la falla, tanto las fuerzas magnetomotrices de la armadura  $ac$  como  $\alpha$  están dirigidas a través del eje directo del rotor. Al girar el rotor las  $fmm$  de armadura  $ac$  giran, induciendo corrientes adicionales  $\alpha$  en el rotor, y las  $fmm$  de armadura  $\alpha$ , que son estacionarias, inducen corrientes  $ac$  adicionales en él [2].

La energía magnética almacenada tanto en el rotor como en el estator decae con el tiempo debido a las resisten-

cias propias de los devanados, y las corrientes  $\alpha$  inducidas que mantienen los flujos decaen exponencialmente a cero en un período determinado por una constante de tiempo del circuito  $\tau = L/R$ . La componente  $cc$  de la corriente de fase de la armadura decae con una constante de tiempo de armadura  $\tau_a$  y la componente  $\alpha$  de la corriente de campo disminuye con la constante de tiempo del bobinado de campo, llamada constante de tiempo de cortocircuito transitoria de eje directo  $\tau'_d$ . Las corrientes  $cc$  del rotor inducen corrientes  $ac$  en el estator y la magnitud de la componente  $ac$  de la corriente del estator llega a un estado estacionario con la misma constante de tiempo  $\tau'_d$ .

En la figura 2 se puede observar la distribución de flujo de reacción de armadura para el período transitorio en el eje directo y de cuadratura.

Dado que la inductancia depende del flujo ligado y la corriente, se observa que ante una disminución de flujo existe una disminución de inductancia y, por consiguiente, de reactancia. De acuerdo con lo anterior y observando las figuras 1 y 2, se puede concluir que la reactancia sincrónica de eje directo ( $\chi_d$ ) es mayor que la reactancia transitoria de eje directo ( $\chi'_d$ ) y que al no tener componente del devanado de campo en el eje de cuadratura la distribución de flujo en estado transitorio es muy parecida a la de estado estable, con una pequeña diferencia debido a la influencia del devanado de campo en el eje directo; por esta razón, usualmente se asume  $\chi_q \approx \chi'_q$  [1].



**Figura 3.** Efecto de reacción de armadura en eje directo y de cuadratura en estado subtransitorio [1].



**Estado subtransitorio**

Un instante después de ocurrida una falla se tiene un estado subtransitorio, el cual se caracteriza porque el rotor pierde o gana un poco de velocidad y por ende tiende a salir de sincronismo. El primer efecto que se observa en ambos ejes es la inducción de tensión en los devanados de amortiguamiento o jaula de ardilla, ya que existe una velocidad relativa entre las barras del devanado y el campo giratorio de la armadura según la ecuación (5)

$$E = (\vec{V} \times \vec{B}) \cdot \vec{I} \quad (5)$$

Debido a esta tensión, circula una corriente por el devanado de amortiguamiento y se crea un flujo en sentido opuesto cumpliendo con el teorema del flujo ligado constante [1]; estas corrientes también dan origen a un par de amortiguamiento, el cual lleva el rotor de nuevo a la velocidad sincrónica, poniendo fin al estado subtransitorio.

La componente de la corriente continua del devanado de amortiguamiento decae con una constante de tiempo del bobinado de amortiguamiento llamada la constante de tiempo de cortocircuito subtransitoria de eje directo  $\tau''_d$ . Debido a la magnitud de la resistencia del bobinado de campo y del devanado de amortiguamiento se tiene que  $\tau''_d \ll \tau'_p$  por lo tanto la componente  $\alpha$  de la corriente del bobinado de amortiguamiento decae con mayor rapidez que la componente  $\alpha$  de la corriente de campo.

En la figura 3 se observa la distribución de flujos de reacción de armadura en estado subtransitorio.

De la relación entre flujo y la reactancia establecida anteriormente y teniendo en cuenta las figuras 1 y 3 se puede concluir que  $\chi''_d$  es muy pequeña respecto a  $\chi_d$ . En el período subtransitorio se tiene una distribución de flujo muy parecida en el eje directo y el eje de cuadratura, con un poco más de reluctancia en este último; esto hace que la reactancia  $\chi''_q$  sea un poco mayor que  $\chi''_d$  pero en la práctica se puede afirmar que  $\chi''_d \approx \chi''_q$  [1].

Por todo lo anterior, la componente  $\alpha$  de la armadura es de forma sinusoidal con dos envolventes; la primera envolvente de estado subtransitorio con una constante de tiempo  $\tau''_p$  la segunda envolvente de estado transitorio que se amortigua con una constante de tiempo  $\tau'_d$  y posterior a ésta se encuentra una corriente duradera de cortocircuito;

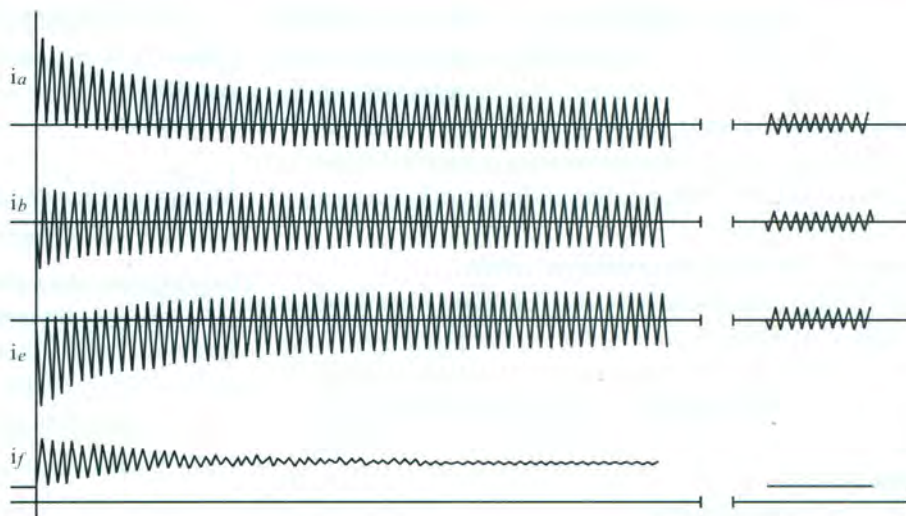


Figura 4. Oscilograma de cortocircuito [1].

de este modo, la ecuación de la corriente  $\alpha$  de armadura está dada por (6).

$$I_{\alpha} = I_s + I_0 e^{-t/\tau'_d} + I_0'' e^{-t/\tau''_d} \quad (6)$$

La componente de corriente  $\alpha$  en el campo también se amortigua con estas constantes de tiempo.

La componente  $\alpha$  en la armadura y la componente  $\alpha$  en el campo son corrientes inducidas y se amortiguan con la constante de tiempo de armadura  $\tau'_d$ .

**PRUEBAS DE LABORATORIO**

Las pruebas de laboratorio se llevaron a cabo según la norma IEC 34-4 de 1967, "Recommendations for Rotating Electrical Machinery (excluding machines for traction vehicles). Part 4: Methods for Determining Synchronous Machine Quantities from Test".

**Prueba de vacío**

Para realizar esta prueba se debe conducir la máquina a velocidad sincrónica; la corriente de campo, el voltaje de línea y la frecuencia se deben medir simultáneamente. Se comienza desde una tensión superior a la nominal,  $1,3V_n$ , y se baja en pasos iguales hasta  $0,2V_n$  si el voltaje residual así lo permite (cuando  $I_f = 0$  se obtiene la tensión residual). Se grafica  $V_t$  vs.  $I_f$  y se corrige la curva cuando existen voltajes residuales, moviendo con la línea del entrehierro toda la gráfica al origen o por medio del corte de la corriente [3].

**Prueba de cortocircuito trifásico sostenido**

La corriente de línea y la corriente de campo se deben medir simultáneamente. La velocidad de rotación puede diferir



de la velocidad sincrónica ( $\omega_s$ ) pero esta diferencia no debe ser mayor de  $0,2\omega_s$ . Se cortocircuitan las terminales de la armadura y luego se aplica la corriente de excitación; se encuentra la relación entre la corriente de cortocircuito de la armadura y la corriente de excitación, y por último la característica se obtiene realizando la gráfica  $I_f$  vs.  $I_f$  [3].

**Prueba de cortocircuito trifásico súbito**

Esta prueba se realiza a velocidad sincrónica: se hace un cortocircuito trifásico en los terminales de la armadura con la máquina en vacío. Es importante que la excitación de la máquina sea independiente, es decir, no puede ser auto-excitada. El voltaje en terminales de la máquina, la corriente de excitación y la temperatura de los devanados de campo deben medirse inmediatamente antes de realizar el cortocircuito. Para obtener valores no saturados es recomendable que la prueba se lleve a cabo a diferentes tensiones de armadura entre 0,1 y 0,4 del valor nominal; para obtener valores de saturación la tensión en los terminales de la armadura antes del cortocircuito debe estar en un rango entre 0,6 y 1 del valor de tensión nominal.

Se obtienen el oscilograma de la corriente de armadura de cada fase y la corriente de excitación; los valores estacionarios se pueden medir con instrumentos no muy precisos [3].

**Prueba para la determinación de la reactancia de secuencia cero**

Para la medida de la reactancia de secuencia cero los tres devanados de la armadura son puestos en serie y se cierra el circuito de tal modo que circule corriente nominal a través de ellos. La relación entre el voltaje en uno de los devanados y la corriente que circula por él da como resultado la impedancia de secuencia cero, debido a que la resistencia de secuencia cero es despreciable; la reactancia de secuencia cero está dada como (7) [1].

$$\chi_0 \approx \bar{V}_{id} / I_{3s} \tag{7}$$

**Obtención de parámetros a partir de valores conocidos**

La referencia [3] enuncia algunas relaciones que permiten obtener parámetros por medio de valores conocidos; en esta forma se puede determinar la reactancia de secuencia positiva  $\chi_1$  y negativa  $\chi_2$ .

$$\chi_1 \approx \chi_d \tag{8}$$

$$\chi_2 \approx \frac{\chi_d + \chi_q}{2} \tag{9}$$

En las máquinas de rotor cilíndrico los valores de los parámetros en eje de cuadratura son semejantes a los parámetros en eje directo debido a la uniformidad del entrehierro.

**MÁQUINA SELECCIONADA PARA LA OBTENCIÓN DE PARÁMETROS Y PRUEBAS REALIZADAS**

La máquina sincrónica utilizada para la medición de los parámetros es un generador sincrónico del Laboratorio de Ingeniería Eléctrica de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Esta máquina es de rotor cilíndrico y posee las características que aparecen en la tabla 1.

**Tabla 1**  
Características de la máquina

S	3,53 kVA
V	208/120 V
I	9,8/16,4 A
f	60 Hz
n	1.800 r.p.m.
No. de fases	3

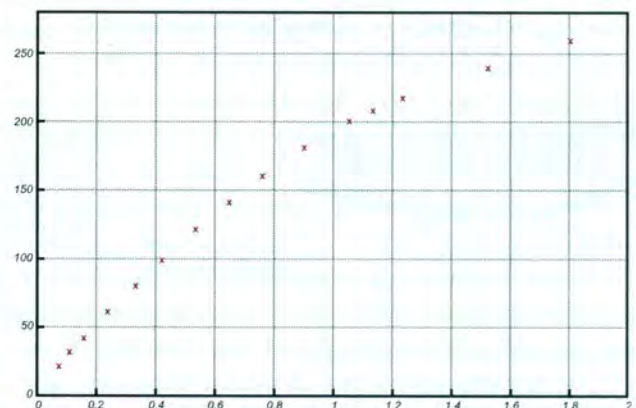
**Prueba de vacío**

Los datos obtenidos de la prueba se muestran en la nube de puntos de la figura 5.

Se realizó una regresión polinómica de tercer orden, ya que ésta da el mejor ajuste para valores cerca de la tensión nominal; se hizo la corrección de la curva por medio del corte de la corriente y se encontraron la tensión monofásica y la línea del entrehierro, cuya característica se muestra en la figura 6 y se describe como (10).

$$V_{1\phi} = \frac{9,66(I_f - 0,0085)^3 - 86,89(I_f - 0,0085)^2 + 267,66(I_f - 0,0085) + 2,28}{\sqrt{3}} \tag{10}$$

$$V_{ag} = 131,182656I_f$$



**Figura 5.** Prueba de vacío (nube de puntos).



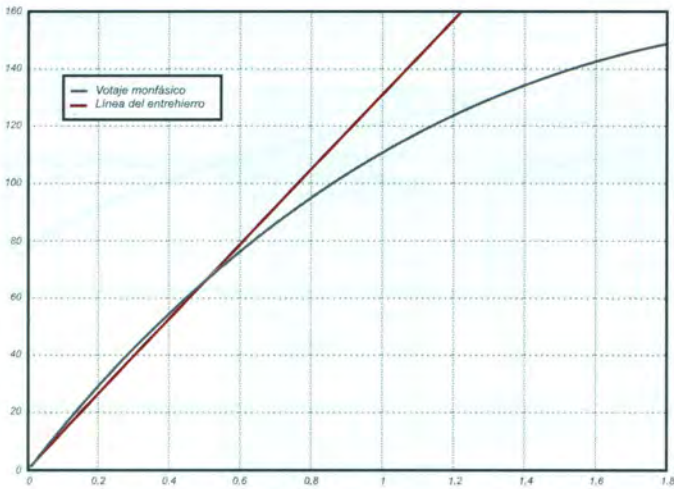


Figura 6. Prueba de vacío.

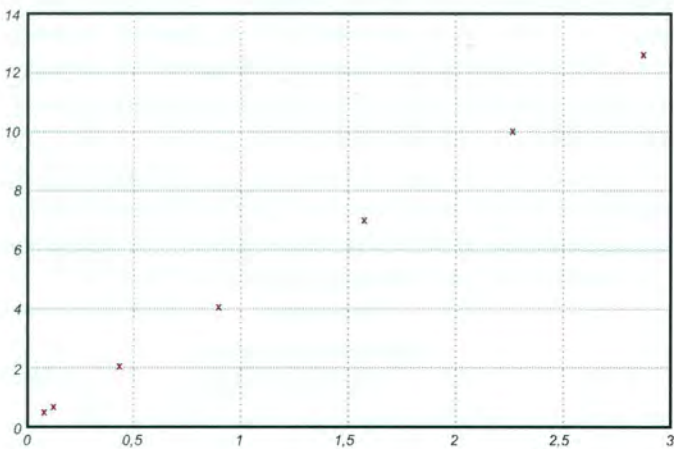


Figura 7. Prueba de cortocircuito sostenido (nube de puntos).

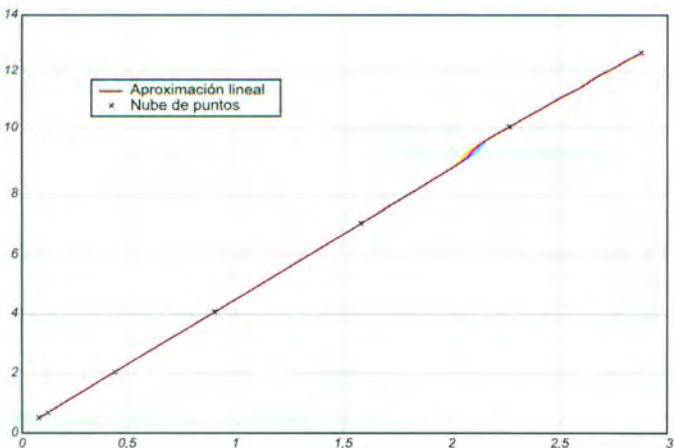


Figura 8. Prueba de cortocircuito sostenido.

**Prueba de cortocircuito trifásico sostenido**

Los datos obtenidos de la prueba se muestran en la nube de puntos de la figura 7.

Se realizó una regresión lineal, se hizo la corrección de la curva por medio del corte de la corriente y se encontró la característica de la figura 8, donde

$$I_a = 4,351I_f \tag{11}$$

**Determinación de la reactancia sincrónica de eje directo**

Una vez conocidas las características de vacío y de cortocircuito sostenido se encuentra la reactancia sincrónica de eje directo, como la relación de la tensión nominal y la corriente de cortocircuito correspondiente al mismo valor de la corriente de excitación. La tensión en el caso de reactancia de eje directo saturada se toma de la característica de tensión monofásica y para el caso no saturado corresponde a la tensión sobre la línea del entrehierro.

**Prueba de cortocircuito súbito**

El oscilograma obtenido para la prueba de cortocircuito súbito se muestra en la figura 9.

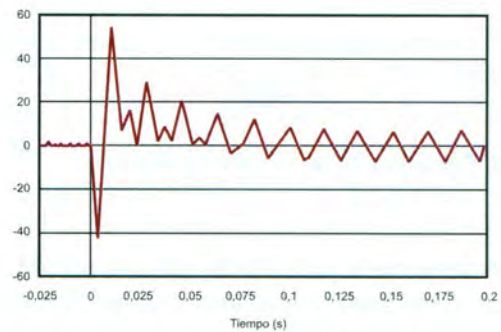


Figura 9. Oscilograma de cortocircuito.

Al analizar este oscilograma se puede observar que existen la **componente alterna** y la **componente continua** para la corriente de armadura, lo que indica que el cortocircuito se realizó en un instante en el cual la tensión no era máxima ni mínima; por consiguiente, en la corriente de armadura se indujo una componente de corriente continua. También se puede observar que en los primeros ciclos negativos se tiene una inversión de la señal, problema que puede atribuirse a la influencia de la jaula de ardilla, la cual se adaptó de manera superficial en el rotor, ya que no existía en el diseño original de la máquina. La jaula, al tratar de llevar de nuevo el generador a la velocidad sincrónica, produce un par de



aceleración muy grande, el cual hace que la velocidad del rotor sea superior a la velocidad sincrónica; posterior a éste, se produce un par de frenado y así continúa el ciclo hasta llevar el generador a la velocidad sincrónica.

**Determinación de la constante de tiempo de armadura**

Para la determinación de la constante de tiempo de armadura se busca la componente  $\alpha$  del oscilograma de cortocircuito, cuya característica lineal se obtiene al utilizar una escala logarítmica en el eje de corriente, como se muestra en la figura 10; la constante de tiempo se define como el período de tiempo necesario para que el valor inicial se reduzca al 36,8%.

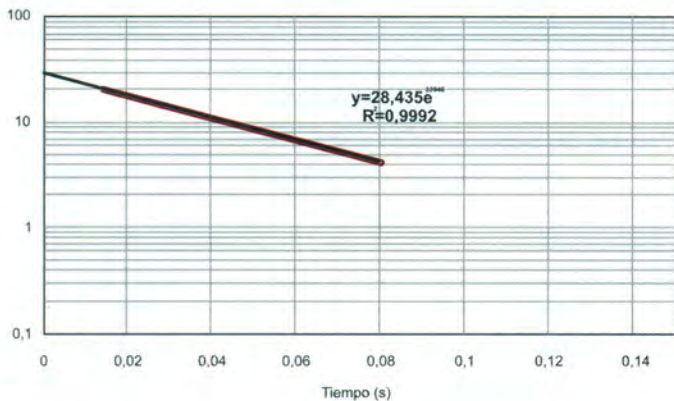


Figura 10. Componente de corriente continua.

**Determinación de la reactancia y constante de tiempo de cortocircuito transitoria de eje directo**

Siguiendo el análisis del oscilograma, se encuentran tanto la corriente duradera de cortocircuito ( $I_0$ ) como su envolvente. Esta última gráfica se realiza en escala semilogarítmica (figura 11), y se determina el aporte de corriente del período transitorio ( $I''_0$ ) como la extrapolación de la parte lineal de la curva en el corte del eje vertical. La constante de tiempo de cortocircuito transitoria de eje directo se determina como el tiempo en que la magnitud cae al 36,8% del valor inicial; la reactancia transitoria de eje directo se define como (12).

$$\chi'_d = \frac{E}{I''_0/\sqrt{2} + I_0/\sqrt{2}} \tag{12}$$

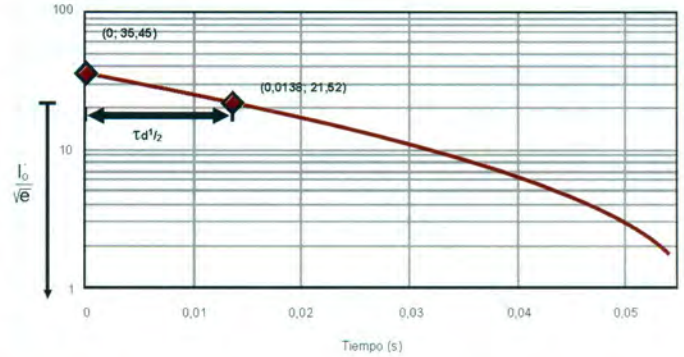


Figura 11. Envolvente de la corriente del período transitorio.

**Determinación de la reactancia y constante de tiempo de cortocircuito subtransitoria de eje directo**

Para la determinación de los parámetros subtransitorios se realiza la gráfica de la resta del valor no lineal de la envolvente del oscilograma con la extrapolación hecha del período transitorio (figura 12). El corte con el eje vertical determina el aporte de corriente del período subtransitorio ( $I''_0$ ), la constante de tiempo de cortocircuito subtransitoria de eje directo se determina como el período de tiempo en que la magnitud cae al 36,8% del valor inicial y la reactancia subtransitoria de eje directo está dada por (13).

$$\chi''_d = \frac{E}{I''_0/\sqrt{2} + I'_0/\sqrt{2} + I_0/\sqrt{2}} \tag{13}$$

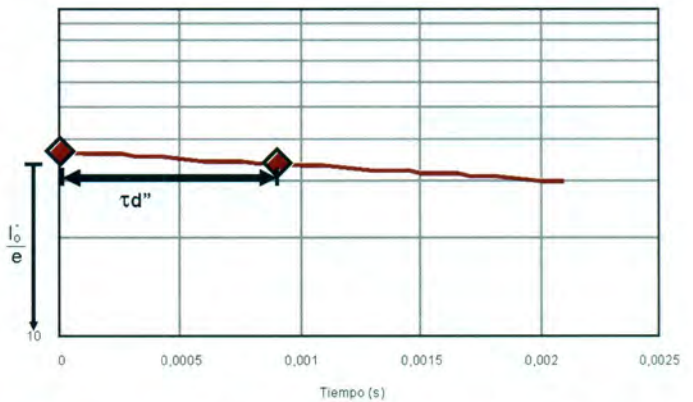


Figura 12. Envolvente de la corriente del período subtransitorio.



**Tabla 2**  
Comparación de los parámetros con valores estándar

Potencia	Turbo generador - Rotor sólido (p.u.)			Generador ECI (*)		Generador ECI (p.u.)	
	Baja	Media	Alta	$X_{d\ nsat}$	$X_{d\ sat}$	$X_{d\ nsat}$	$X_{d\ sat}$
$\chi_d$	0,95	1,1	1,45	30,15	24,19	2,46002	1,97373
$\chi'_d$	0,12	0,23	0,28		3,979		0,325
$\chi''_d$	0,07	0,12	0,17		2,145		0,175
$\chi_0$	0,01	-	0,1		0,014		0,001
$\chi_2$	0,07	0,12	0,17		2,145		0,175
$\tau^d$	0,4	1,1	1,8		0,028		0,028
$\tau''_d$	0,02	0,035	0,05		0,009		0,009
$\tau_a$	0,04	0,16	0,35		0,042		0,042
$\chi_d/\chi'_d$	7,92	4,78	5,18		7,577		7,577
$\chi_d/\chi''_d$	13,57	9,17	8,53		14,056		14,056
$\chi'_d/\chi''_d$	1,71	1,92	1,65		1,855		1,855

(\*) Todas las unidades están en S.I.

## RESULTADOS OBTENIDOS

En la tabla 2 se muestran los valores estándar presentados en [1], junto con los valores obtenidos de las pruebas realizadas y las relaciones establecidas.

Se hace la comparación de las reactancias obtenidas bajo la premisa de que en el sistema por unidad se puede efectuar la comparación sin importar la potencia o el nivel de las máquinas comparadas.

## CONCLUSIONES

Se observa que los valores de reactancias obtenidos de la máquina seleccionada para el estudio son muy cercanos a los valores estándar para máquinas de rotor cilíndrico.

Se encuentra una estrecha similitud en las relaciones de reactancias, lo cual confirma que se está comparando con respecto al tipo de máquina adecuado.

Se puede observar que las constantes de tiempo son muy pequeñas respecto a las constantes de tiempo estándar. Esto se atribuye a la diferencia de las inercias mecánicas que presentan la máquina bajo prueba y la máquina estándar, independientemente de la inercia mecánica del rotor; la constante de tiempo de la armadura es igual entre la máquina estándar y la máquina bajo prueba.

Se deja establecido un procedimiento para la obtención de los parámetros dinámicos del generador sincrónico me-

diante un análisis matemático sencillo que arroje resultados confiables.

## NOTA

Para realizar este trabajo los autores contaron con el apoyo del Centro de Estudios de Energía de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, como trabajo dirigido adjunto al proyecto "Análisis del comportamiento dinámico de los sistemas de potencia. Aplicación caso interconexión de Colombia con países vecinos".

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Centro de Estudios de Energía de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, especialmente a los profesores J. Barona y A. Marín.

## BIBLIOGRAFÍA

- Kimbarck, E.W. (1968). *Power System Stability: Synchronous Machines*, cap. 12. Nueva York: Dover Publications, Inc.
- Machowski, J. (1998). *Power System Dynamics and Stability*, caps. 3-4, J. Peters, Ed. Baffins Lane: John Wiley & Sons.
- Recommendations for rotating electrical machinery (excluding machines for traction vehicles). Part 4: Methods for determining synchronous machine quantities from test.* (1967). IEC 34-4.
- Anderson, P.M. & Fouad, A.A. (1977). *Power System Control and Stability*, cap. 4. Ed. Iowa: The Iowa State University Press.
- Saadat, H. (1999). *Power Systems Analysis*, cap. 8. McGraw Hill.
- Grainger, J.J. & Stevenson, W.D. (1996). *Análisis de sistemas de potencia*, cap. 3. McGraw Hill.



# ¿Son relevantes los costos marginales del MPODE para el mercado de energía eléctrica colombiano?

Rafael Campo\*, Roberto Ríos\*\*, Iván Forero\*\*, Paula Ríos\*\*, Héctor Hernández\*\* y Fernando Ortiz\*\*

El mercado de energía eléctrica colombiano inició su operación en 1995 con una estructura descentralizada: despacho basado en la oferta de los generadores (precio, MW) para cada hora del día siguiente. Por otro lado, un popular programa de despacho centralizado de mínimo costo, llamado MPODE, ampliamente utilizado en estudios por el ISO y muchos generadores. Este programa se usa también en el estudio y valoración de bienes de generación que se van a vender y en el análisis financiero de valores esperados de plantas de generación. En este artículo se efectúa un análisis estadístico de los precios de bolsa históricos mensuales contra los costos marginales promedios del MPODE, para determinar qué tan buen predictor de los precios de bolsa resulta ser el programa MPODE, así como la relación entre los precios de bolsa y los precios de contratos a largo plazo. Se encontró que para valores bajos se debe adicionar una prima de riesgo al valor del MPODE para producir el precio de bolsa. Esta prima de riesgo es pequeña (algunas veces negativa) para valores altos, reflejando posiblemente la competencia entre generadores. Los precios de bolsa, por otra parte, son un buen predictor de los precios de los contratos a largo plazo. Una ecuación cuadrática suministra una adecuada relación entre los precios de contratos a largo plazo y los costos marginales del MPODE.

**Palabras claves:** precios de bolsa, precios de contratos a largo plazo, costos marginales del MPODE, prima de riesgo.

\* Consultor independiente.

\*\* Escuela Colombiana de Ingeniería.

The Colombian electric market started functioning in 1995 with a fairly decentralized structure: dispatch is based on bids by generators (price and MW) for each hour of the following day. On the other hand, a popular centralized minimum cost dispatch program, called MPODE, is widely used in studies by the ISO (Independent System Operator) and many generators. This program has also been utilized in valuation studies of generation assets to be sold and in financial analysis of prospective generating plants.

This paper performs a statistical analysis of historical monthly spot prices vs. MPODE average marginal costs, to determine how good predictors of spot prices the results of program MPODE are, as well as the relation between spot prices and prices of long term contracts. It is found that, for low values, a "risk premium" has to be added to the results of MPODE to produce spot prices. The premium is small (even negative) for larger values, possibly reflecting competition among generators. Spot prices, on the other hand, are good predictors of prices of long term contracts. A quadratic curve provides a good fit of long term contract prices vs. MPODE marginal costs.

## INTRODUCCIÓN

El precio del mercado *spot* (bolsa) en el mercado de energía eléctrica colombiano es el resultado de una subasta entre los generadores para satisfacer la demanda horaria del día siguiente, administrada por el Sistema de Intercambios Comerciales (SIC), de acuerdo con las reglas establecidas por la Comisión de Regulación de Energía y Gas (Creg).

Adicional al mercado *spot*, existe un mercado de contratos a largo plazo (plazos de un día o más), negociados libremente entre generadores y comercializadores.

Por otra parte, ISA y la mayoría de los agentes del mercado corren en forma periódica el programa MPODE, de despacho centralizado de mínimo costo. Se supone que los resultados de este programa constituyen una guía para los agentes y que les proporciona información útil para hacer sus ofertas y elaborar sus contratos. Por otra parte, es de esperarse que en el establecimiento de las condiciones de los contratos pesen los resultados observados en la bolsa.

En el presente artículo se explora en forma *cuantitativa* la relación entre los costos marginales mensuales promedios producidos por el programa MPODE y los precios mensuales observados posteriormente en los mercados de bolsa y de contratos. Con este propósito se utilizaron datos entre enero de 1999 y diciembre de 2004. Para asegurar la consistencia de los mismos, se llevaron a valores constantes de enero de 2005. Cabe anotar que a los valores del MPODE se les añadió el correspondiente Cargo por Capacidad (CEE), ya incluido en los precios de bolsa y de contratos.

## INFORMACIÓN HISTÓRICA

Los datos utilizados (proporcionados por ISA) se presentan a continuación



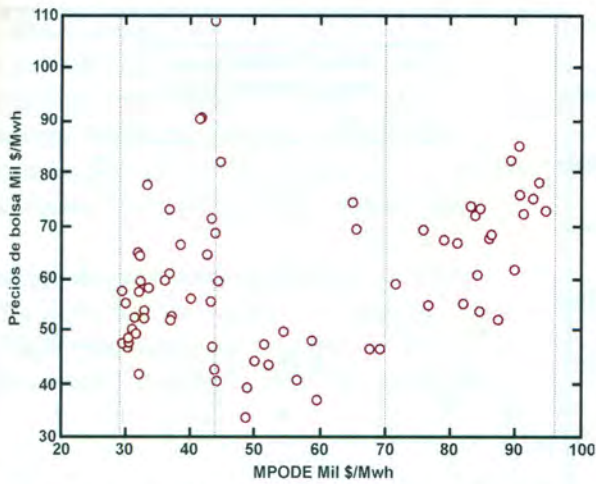


Figura 1. Precios de bolsa vs. Costos marginales del MPODE.

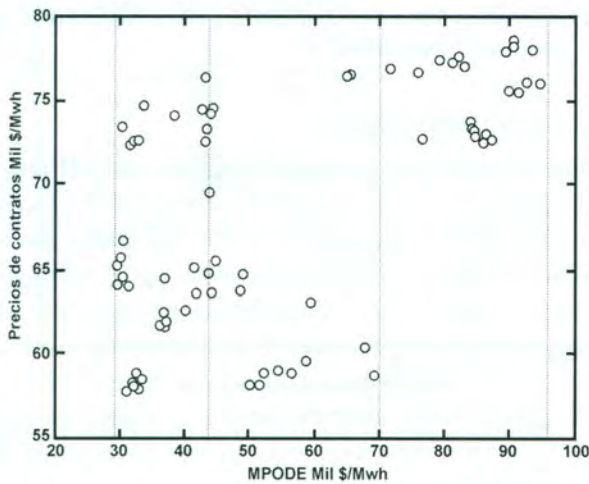


Figura 2. Precios de contratos vs. Costos marginales del MPODE.

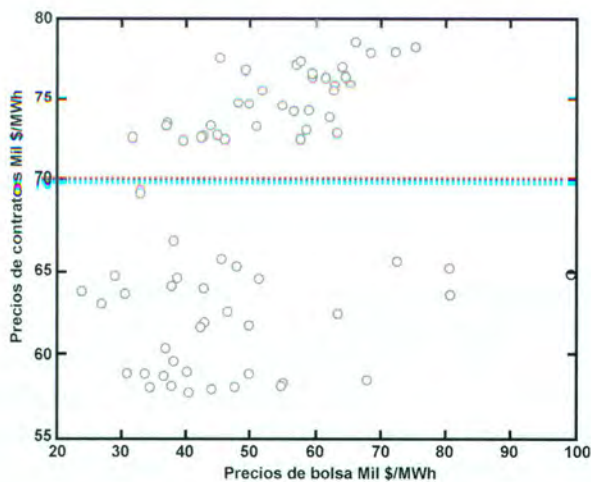


Figura 3. Precios de contratos vs. Precios de bolsa.

en forma gráfica en las figuras 1 a 3. Las unidades empleadas son miles de pesos por MWh (Mil\$/MWh) (pesos en valores constantes de enero de 2005).

En la figura 1 pueden observarse tres tramos, correspondientes a valores del MPODE entre 30 y 45, 46 y 70 y 71 y 95 Mil \$/MWh, respectivamente, que se identifican como tramos 1, 2 y 3. Parece que para cada uno de estos tramos pudiera ajustarse una recta. Los mismos tramos se definieron para la figura 2. Para la figura 3, sin embargo, se definieron dos tramos, según los precios de contratos estén por encima o por debajo de 70 Mil \$/MWh.

**AJUSTE DE MODELOS [2]**

A continuación se presentan los modelos ajustados. Se utilizaron únicamente modelos lineales y cuadráticos, para facilitar la interpretación de los resultados. Como criterio de bondad del ajuste se usó el coeficiente de determinación (R-cuadrado)<sup>1</sup>. Se presentan sólo modelos para los que este coeficiente esté por encima de 0,5. La ecuación lineal (modelo lineal) ajustada tiene la forma genérica:

$$Y = a_1 * X + a_2$$

y la ecuación cuadrática (modelo cuadrático):

$$Y = a_1 * X^2 + a_2 * X + a_3$$

En todos los casos se proporcionan para los valores estimados bandas de confianza del 95%<sup>2</sup> y el valor de R-cuadrado.

**Según el modelo lineal**

(1) Tramo 1 de Precios de bolsa vs. Costos marginales del MPODE (figura 1).

Parámetro	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	R-cuadrado
Valor	0,91	26,15	0,71
intervalo de confianza	[0,61 1,20]	[15,09 37,22]	

(2) Tramo 3 de Precios de bolsa vs. Costos marginales del MPODE (figura 1).

Parámetro	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	R-cuadrado
Valor	0,81	-0,92	0,74
intervalo de confianza	[0,59 1,04]	[-20,17 18,32]	



(3) Tramo 2 de Precios de contratos vs. Costos marginales del MPODE (figura 2).

Parámetro	$a_1$	$a_2$	R-cuadrado
Valor	0,064	55,60	0,75
intervalo de confianza	[-0,40 0,52]	[27,82 83,37]	

(4) Precios de contratos vs. Precios de bolsa (toda la serie) (figura 3).

Parámetro	$a_1$	$a_2$	R-cuadrado
Valor	0,29	51,45	0,70
intervalo de confianza	[0,25 0,33]	[49,15 53,75]	

#### Según el modelo cuadrático

(5) Precios de contratos vs. Costos marginales del MPODE (toda la serie) (figura 2).

Parámetro	$a_1$	$a_2$	$a_3$	R-cuadrado
Valor	0,0017	-0,018	63,58	0,69
intervalo de confianza	[-0,00053 0,0040]	[-0,29 0,26]	[56,24 70,93]	

En todos los casos, salvo en el primer tramo de Bolsa vs. MPODE, se suavizaron los datos antes de proceder al ajuste por mínimos cuadrados, mediante el método de Loess (ajuste cuadrático). La suavización utilizada para el primer tramo de Bolsa Vs. MPODE fue la robusta de Loess con ajuste lineal, que produjo mejor ajuste del modelo a los datos. Adicionalmente, se hizo una regresión robusta. El objeto de estos procedimientos fue eliminar los puntos alejados (*outliers*), que de otra manera podrían alterar considerablemente el ajuste y la calidad de los modelos. En efecto, en un ajuste por mínimos cuadrados se da mayor peso a las observaciones que más se desvían del promedio. De no prescindirse de los puntos alejados al ajustar los modelos, entonces, su influencia sobre los estimativos de los parámetros de los mismos es considerable, con lo que se afecta su calidad.

Por ejemplo, en la figura 4 se presentan los datos originales (puntos en gris - Tramo 1), los que permanecen luego de la suavización (puntos en negro - Tramo 1<sub>s</sub>) y la recta ajustada a los datos suavizados (en rojo).

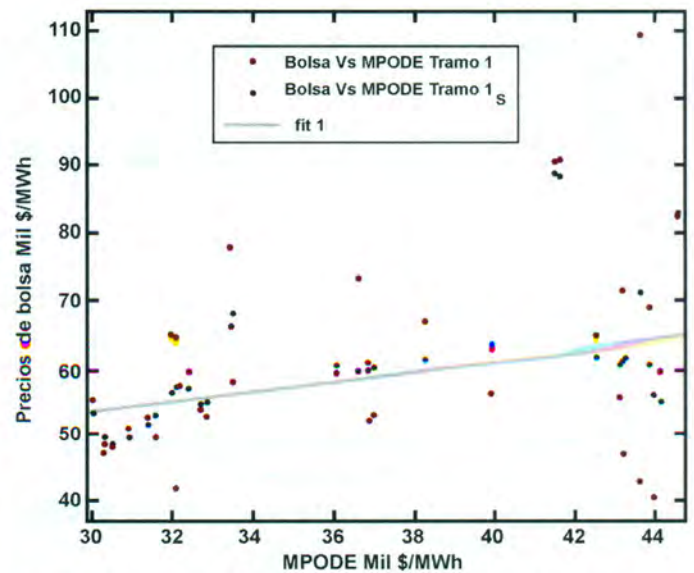


Figura 4. Precios Bolsa Vs. Costos Marginales del MPODE. Tramo 1, con y sin suavización.

#### ANÁLISIS DE RESULTADOS

##### Precios de bolsa vs. Costos marginales del MPODE

Puede esperarse que, en general, los precios de bolsa estén por encima de los resultados del MPODE, dado que este programa asume un total conocimiento hacia el futuro de demandas y precios de combustible, así como una coordinación perfecta entre los generadores para producir un despacho centralizado de mínimo costo. Se asume, adicionalmente, que no existe poder de mercado por parte de los generadores o, en forma más precisa, abuso de un posible poder de mercado.

La diferencia entre los precios de bolsa y los costos marginales producidos por el MPODE representa una “prima de riesgo” que “cobran” los generadores al mercado, para protegerse contra la ocurrencia de imprevistos (demandas superiores o inferiores a las previstas, hidrologías más secas o más húmedas de las esperadas, acciones de la competencia, fallas aleatorias de equipos, fluctuaciones de precios de combustible, etc). Si las rectas ajustadas fueran líneas de 45 grados (es decir, si el parámetro  $a_1$  fuera igual a 1), la constante  $a_2$  proporcionaría directamente el valor de la “prima”.

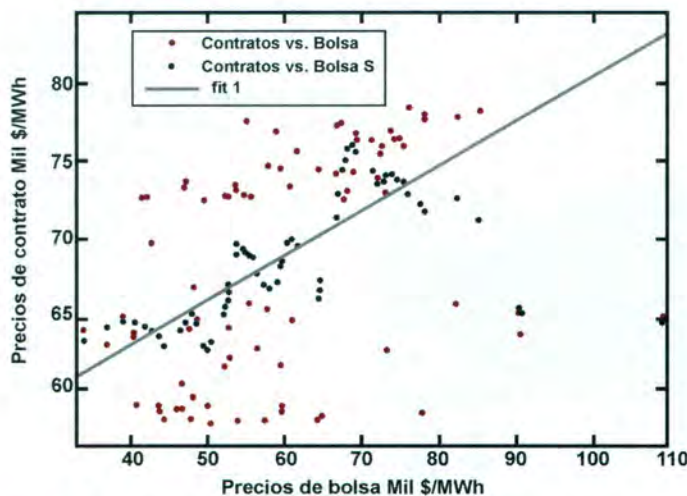
El parámetro  $a_1$  del tramo 1, de Precios de bolsa vs. Costos marginales del MPODE, incluye la unidad en su intervalo de confianza. Por consiguiente, de manera aproximada, puede asegurarse que la “prima de riesgo” para dicho tramo es 24 Mil \$/MWh (valor del precio de bolsa, 54 Mil \$/MWh, para un costo marginal del MPODE igual a 30 Mil \$/MWh según la recta ajustada por mínimos cuadrados, menos 30 Mil \$/MWh, figura 4).



Para el tramo 3 de Precios de bolsa vs. Costos marginales del MPODE se obtiene, sin embargo, una “prima de riesgo” negativa (aproximadamente igual a  $-18$  Mil \$/MWh), valor que puede interpretarse como resultado de la competencia entre los generadores que los lleva a proporcionar un “descuento” para precios relativamente altos.

### Precios de contratos vs. Precios de bolsa

En la figura 5 se presenta la recta ajustada a toda la serie de datos de precios de contratos frente a precios de bolsa, mediante regresión robusta, luego de suavización de los datos.



**Figura 5.** Precios de contratos vs. Precios de bolsa con suavización (negro) y sin ella (rojo).

Como se indicó anteriormente, la ecuación de la recta de ajuste es:

$$C = 0,29 * B + 51,45$$

En donde  $C$  representa precios de contratos y  $B$  precios de bolsa.

La prima de riesgo sería entonces:

$$P = 51,45 - 0,71*B$$

Como se ve, en este caso la prima de riesgo es alta para valores pequeños de precios de bolsa (alrededor de  $26,6$  Mil \$/MWh para precio de bolsa igual a  $35$  Mil \$/MWh), pero disminuye a medida que los precios de bolsa aumentan (es igual a cero para precio de bolsa igual a  $72,46$  Mil \$/MWh). Se vuelve negativa para precios altos de bolsa (superiores a  $72,46$  Mil \$/MWh), en forma similar a lo que ocurre para precios altos de bolsa.

### CONCLUSIONES

- Puesto que los agentes del mercado de energía eléctrica colombiano tienen acceso a los costos marginales producidos por el programa MPODE, ya sea a través de ISA o de corridas internas, no sorprende que estos costos produzcan información relevante para los precios de bolsa.

- Para costos marginales del MPODE con valores bajos, puede identificarse una “prima de riesgo” que, sumada a los costos marginales producidos por el mismo programa, produce los precios de bolsa. Esta prima es prácticamente cero (e incluso negativa) para valores medios y altos de costos marginales, lo que puede interpretarse como resultado de la competencia entre los generadores.

- Los precios de bolsa son un buen indicador de los precios de contratos. Similar a lo que ocurre entre precios de bolsa y costos marginales del MPODE, existe una prima de riesgo con valores decrecientes con el precio de bolsa, que se vuelve cero y aun negativa para valores medios y altos de los precios de bolsa.

- Una curva cuadrática proporciona un buen ajuste a los precios de contratos en términos de los costos marginales del MPODE.

### BIBLIOGRAFÍA

- [1] Hull, John. *Options, futures and other derivatives*, 5<sup>th</sup> ed. Prentice Hall.
- [2] Documentación del Garch Tool Box de MatLab.
- [3] Mantegna, R. & Eugene H., Stanley. (2001). *Introduction to Econophysics*. Cambridge University Press.
- [4] <http://escuela.med.puc.cl/recursos/recepidem/EPIANAL9.HTM>
- [5] <http://help.yahoo.com/help/es/fin/treport/treport-11.htm/>

### RECONOCIMIENTO

El presente trabajo forma parte del proyecto de investigación “Opciones de cubrimiento del riesgo por subida fuerte en los precios del mercado en bolsa de energía y su relación con el cargo por capacidad”, financiado por Colciencias, Interconexión Eléctrica S.A. y la Escuela Colombiana de Ingeniería. Los conceptos emitidos no comprometen a ninguna de estas instituciones y son responsabilidad exclusiva de los autores.

### NOTAS

1. R Cuadrado [5]: medida de correlación respecto a una referencia y fluctúa entre cero y uno. El valor próximo a cero muestra que no existe comportamiento similar entre ellos y si es próximo a uno nos indica que tienen comportamiento paralelo.
2. La probabilidad de que el verdadero valor del parámetro se encuentre en el intervalo construido se denomina nivel de confianza y se denota  $1 - \alpha$ . La probabilidad de equivocarnos se llama nivel de significancia y se simboliza  $\alpha$ . Generalmente se construyen intervalos con confianza  $1 - \alpha = 95\%$  (o significancia  $\alpha = 5\%$ ) [4]



# Factores asociados para determinar la calidad de la educación superior: Programa de Economía de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Beatriz Adalgiza Torres Alayón

El currículo y las destrezas de aprendizaje son factores convencionales que determinan la calidad de la educación, y ésta es factor importante en la consolidación de la senda de crecimiento económico y mejoramiento en la distribución del ingreso. Desde esta perspectiva, la medición de la calidad de la educación se traduce en factor sustancial para el logro de ambos propósitos socioeconómicos. En el ámbito de la educación superior, la calidad se entiende como el compendio de aspectos que presenta un programa académico y su distancia relativa al prototipo ideal de lo que socialmente éste debería ser.

La presente investigación incorpora un concepto de calidad formal, es decir, aquel que es medible y cuantificable a partir de pruebas formales que auscultan el valor agregado en el conocimiento del estudiante de último año. Así mismo, desarrolla una metodología mediante la cual el proceso de generar calidad es afectado por factores tanto directos (capital y trabajo) como indirectos (condiciones de entrada para el ingreso del estudiante a la universidad, la afección que en él tiene la infraestructura locativa y tecnológica de la institución y la incidencia que ejerce sobre él el proceso de enseñanza-aprendizaje, factor convencional que determina la calidad). Los factores referidos incorporan dentro del concepto de calidad aquí trabajado variables categóricas y no

categóricas, las cuales se administran con la herramienta que provee el análisis multivariante, el cual potencializa la calidad y el espectro de la información así derivada.

**Palabras claves:** economía de la educación, calidad de la educación, análisis de homogeneidad, evaluación de la calidad.

*Clasificación Journal of Economics Literature (JEL)* A22, C19, I21.

Academic programs and learning skills are conventional factors that determine the quality of education, which is an important factor in the consolidation of the economic growth path and the improvement of income distribution. Since this perspective, the measurement of the quality in education has become a substantial factor for these socioeconomic purposes. Quality in higher education is understood as a compendium of aspects that an academic program presents and its relative distance to the ideal prototype of what, socially, this should be. The present investigation incorporates a concept of formal quality; specifically, that which is measurable and quantifiable from formal tests that research the aggregate value in the knowledge of a senior student. Likewise, it develops a methodology by which, the process to generate quality is affected by both direct factors (capital and labor) and indirect factors (conditions for the student to enter the university, the affection that the local and technological infrastructure of the institution have on him and how the process of teaching - learning impinge on him, viewed as a conventional factor that determines the quality). These factors, working together, integrates categorical and no categorical variables administered with the tool that provides the multivariate analysis, which enhance the quality and the spectrum of the information thus derived.

**Key words:** economics education, quality of education, homogeneity analysis, evaluation of the quality.

“Todo pueblo que alcanza un cierto grado de desarrollo se haya inclinado por naturaleza a practicar la educación, por ser ella el principio mediante el cual el grupo humano conserva y transmite su peculiaridad física y espiritual” (Werner Jaeger, citado en A. Borrero, 1999)<sup>1</sup>.

“Una población educada con calidad genera escenarios de discusión y pensamiento que se traducen finalmente en elementos creadores de riqueza en todas sus facetas”.

Beatriz A. Torres Alayón

## INTRODUCCIÓN

La educación superior ha sido entendida desde la antigüedad como aquella destinada a formar al hombre para lo más grande, para lo novedoso, para lo que le diera más sentido y nuevos horizontes a la organización social y política en donde se ubicara. Dado que la teoría del crecimiento evidencia la importancia que tiene la inversión en capital humano como factor de producción, como base del desarrollo tecnológico sobre el crecimiento a largo plazo, y como construcción de mejores personas y mejores ciudadanos, diversos países han dirigido parte del gasto social hacia el sector de la educación, ampliando su cobertura. Pese a ello, no se ha percibido notoria mejora en los estándares mínimos requeridos para la internacionalización de la economía. De aquí que los países desarrollados

Economista, especialista en administración y magister en economía (programa PEG) de la Universidad de los Andes. Ha sido profesora de las universidades Piloto y de los Andes, y decana de la Facultad de Economía de la Escuela Colombiana de Ingeniería. Actualmente es profesora asistente y coordinadora de la especialización en Economía para Ingenieros [btorres@escuelaing.edu.co](mailto:btorres@escuelaing.edu.co)



motiven a los países en desarrollo para mejorar la calidad, tanto como la cobertura.

En las décadas recientes, el mundo desarrollado ha enfatizado en especial sobre la calidad de la educación a través del fomento de una cultura de la evaluación y la revisión permanente de la competitividad, la coherencia y la pertinencia de los currículos (esta última conocida también como cultura de la autoevaluación). Uno de los instrumentos aplicados para la verificación y medición de la calidad aquí referida es la denominada *prueba estándar objetiva*<sup>2</sup>, la cual propende a la construcción de un hombre cultural, espiritual, económico y social.

### EXPERIENCIAS DE LA EVALUACIÓN DE LA CALIDAD FORMAL

La primera era de trabajo sobre evaluación de logros tanto de estudiantes como de instituciones de educación superior se produjo en Estados Unidos hacia 1960 y 1970. Fue a mediados de esta última década cuando se hizo distinción entre *evaluación formativa* y *evaluación sumativa*, las cuales se realizan para ayudar a mejorar la calidad de los programas de pregrado y, en general, de la institución, a través de la valoración de sus impactos tanto internos<sup>3</sup> como externos<sup>4</sup>, respectivamente. Estos dos tipos de evaluación han sido factores decisivos para mantener las pruebas académicas estandarizadas como elementos de evaluación de la calidad en el “producto final” de la educación superior (un ser más complejo y pertinente respecto al espacio y el tiempo en que se desenvuelve)<sup>5</sup>.

En Colombia, el primer paso de fomento a la educación superior y a la valoración de la calidad de la educación se dio a mediados de 1960 con el nacimiento de la Ascun<sup>6</sup>, entidad que debía propender a la inspección y vigilancia de la educación superior a través del diseño del marco de acreditación universitario en el país. Dicha labor se le delegó al Icfes en 1968<sup>7</sup>. Posteriormente, la Ley 30 de 1992 buscó fomentar la *autonomía* y la *libertad* por parte de las instituciones de educación para garantizar el alcance de la tan anhelada calidad educativa. Sin embargo, en el afán de *ampliar la cobertura*, se dificultó aún más el logro de la *calidad*, pues los

programas creados carecieron de coherencia frente las apremiantes necesidades para el desarrollo regional y nacional.

### LA CALIDAD FORMAL

La calidad puede definirse como la correspondencia entre la educación producida y las expectativas de la sociedad donde ésta se imparte. De la misma manera, pero de un modo más concreto, la calidad formal hace referencia a las características del producto integral: el *estudiante*<sup>8</sup>, que forma y genera la institución. Es así como se concibe la calidad formal en el contexto de la presente investigación: en el proceso de alcanzar calidad formal, los actores principales son los alumnos y el cuerpo docente, cuyo propósito es lograr niveles de conocimiento ligados a destrezas, habilidades y aptitudes que la sociedad espera aprovechar para su permanente avance en los ámbitos social, político, cultural, económico y tecnológico, y en la generación de mayor sabiduría y conocimiento.

Con el propósito de medir la calidad formal en las diferentes instituciones de educación superior en Colombia y en el marco de la Ley 30 de 1992, emergen los Exámenes de Calidad de la Educación Superior (Ecaes), como pruebas estándar. La presente investigación toma como base el Major Field Test (MFT), ante la ausencia del Ecaes para economía en el momento de

su realización, ya que es un examen que evalúa *habilidades* como el análisis y la solución de problemas, el *entendimiento* de relaciones y la *interpretación*.

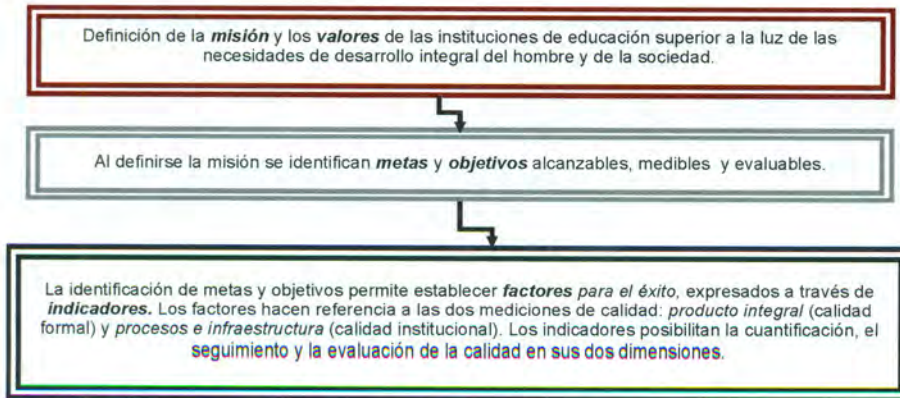
### Calidad en el sistema de acreditación colombiano

El Consejo Nacional de Acreditación (CNA) se encarga de *valorar ante la sociedad colombiana la dignidad de los programas de educación superior; para ello, aplica en su modelo un concepto de calidad definido como el compendio de aspectos que presenta un programa académico y su distancia relativa al prototipo ideal de lo que socialmente debiera ser. De esta manera, la definición de calidad formal en la educación superior de la que parte la presente investigación coincide con la que el CNA ha formalizado, al identificar una serie de factores esenciales en el servicio educativo de la excelencia. Dichos factores coinciden en el proceso de alcance y medición de la calidad de la educación y se muestran en el diagrama 1. Con base en este modelo, la calidad en*



La primera era de trabajo sobre evaluación de logros tanto de estudiantes como de instituciones de educación superior se produjo en Estados Unidos hacia 1960 y 1970.





**Diagrama 1.** Proceso de alcance y medición de la calidad de la educación.

la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, particularmente en su Programa de Economía, se entiende como la estructura y procesos de aprendizaje empleados en el proceso educativo formal, ideados y perfeccionados por la experiencia y sabiduría de su cuerpo docente, y potencializados por la infraestructura física y tecnológica institucional. De igual manera, en el Programa de Economía de la Escuela la calidad se define en términos del proceso enseñanza - aprendizaje (proceso de creación) y del egresado (resultado o producto final).

Partiendo de este enfoque preliminar, el objetivo de la investigación realizada es *evaluar la calidad de la educación en el Programa de Economía de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito*, para lo cual se definieron y cuantificaron indicadores de calidad de la educación superior, así como identificaron los principales factores que determinan la calidad en el programa.

**Función de calidad del modelo desarrollado<sup>9</sup>**

Con miras a alcanzar el objetivo expuesto en el párrafo anterior, se propone la siguiente función de producción de la educación, la cual se basa en el modelo integrativo para la evaluación de la calidad de la educación superior desarrollado por George Kuh<sup>10</sup>, al cual también se incorpora el modelo de los siete principios en acción de Arthur Chickering, a saber:

1. Contacto profesor-alumno.
2. Cooperación entre alumnos.
3. Aprendizaje activo (aquél motivado por el propio estudiante).
4. Manejo del tiempo (destreza en la organización de actividades según intensidad de tiempo requerida).
5. *Feedback* o alimentación de vuelta a tiempo desde el profesor hacia el estudiante, sobre procesos de aprendizaje y resultados de evaluación.

6. Diversidad de talentos y estilos de aprendizaje.

7. Enseñanza basada en las altas expectativas (motivadas tanto por los profesores como por los estudiantes).

Para un mejor panorama sobre la relación entre el modelo de calidad trabajado por el CNA y el desarrollado en el presente estudio, ver la tabla 1.

Dichos modelos han servido como referentes teóricos y como restricción macroinstitucional en los lineamientos para la acreditación de los programas del CNA, pues representan la sabiduría colectiva de las facultades de educación superior reconocidas por su trabajo en pos de la calidad en el gremio, e identifican de manera simultánea el proceso de enseñanza - aprendizaje desarrollado por los actores involucrados. Con base en esto, la ecuación de la calidad de la educación superior se puede expresar como sigue:

$$E_d \equiv Q_c \equiv f(D(K,L), I(E_m, C_{nr}, C_{mp}))$$

Donde:

$E_d$  = Bien “educación”

$Q_c$  = Calidad de la educación incorporada en el “bien educación” producido:

La cantidad de educación producida en un tiempo determinado ( $E_d$ ) incorpora insumos y procesos que definen simultáneamente su calidad ( $Q_c$ ); su diferencia con respecto a los demás bienes estriba en que los insumos que se utilizan para su producción no desaparecen en el proceso productivo sino que se enriquecen y generan nuevos productos. Como ya se dijo, esta variable es medida por el MFT.

• **D = factores directos**

– **K: características de infraestructura física y tecnológica de la institución**

Es medida a través de la relación de estudiantes por computador y de estudiantes por profesor en el período 2003-1. Estos valores se consideran fijos a corto plazo.

– **L: características de los docentes**

Los docentes conforman la mano de obra de la función de producción analizada. Para su medición se han de tener en cuenta aspectos como el sexo, la edad, la condición laboral<sup>11</sup>, el nivel educativo, los años de experiencia en la Escuela<sup>12</sup>, el área académica y la formación de pregrado de los docentes. Para observar la estructura y características obtenidas en esta variable en el momento de realización de la investigación, ver la tabla 2.



**Tabla 1**  
Relación entre el modelo de calidad del CNA y el modelo integrativo Kuh-Chickering

Factores CNA	Factores de la función de producción modelo	Variable del modelo integrativo con el de los siete principios en acción
Misión y proyecto institucional:	n.a. <sup>1</sup>	n.a. <sup>1</sup>
Estudiantes	Directos (cuando se aborda infraestructura física y tecnológica para su atención) Indirectos (cuando se abordan aspectos de la metodología de la enseñanza - aprendizaje)	<b>Entrada, contexto</b> (valoración sobre el medio externo para educación con calidad) <b>Compromiso</b> (valoración sobre el proceso de enseñanza - aprendizaje para educación con calidad)
Profesores	Directos	<b>Compromiso</b> (valoración sobre el proceso de enseñanza - aprendizaje para educación con calidad)
Procesos académicos	Directos	<b>Compromiso</b> (valoración sobre el proceso de enseñanza - aprendizaje para educación con calidad)
Investigación	Directos (a través de los docentes)	<b>Compromiso</b> (valoración sobre el proceso de enseñanza - aprendizaje para educación con calidad)
Bienestar institucional	Indirectos	<b>Contexto</b>
Internacionalización	Indirectos	n.a. <sup>2</sup>
Organización, administración y gestión	n.a. <sup>2</sup>	n.a. <sup>2</sup>

Fuente: Análisis de la autora

1. Si bien el modelo integrativo Kuh - Chickering no explicita este factor en forma independiente, lo incorpora y explicita en la medida en que se evidencia coherencia entre el modelo de enseñanza - aprendizaje, la práctica evaluativa de dicho proceso y sus efectos en la organización y gestión institucional.  
2. Ídem al anterior.

• *I: factores indirectos*<sup>13</sup>

– *E<sub>nt</sub>: variable entrada*

Para su medición, esta variable involucra las variables cuantitativas de aceptación e ingreso de los estudiantes a la institución. De esta manera, se considera pertinente considerar la siguiente información para cada estudiante de octavo y noveno semestres en el período académico 2003-1: el puntaje obtenido en el Icfes, el sexo, la edad, el estrato socioeconómico, el carácter público o privado del colegio donde se graduó, el ingreso familiar promedio y los años de educación de la madre. Para observar la estructura y características obtenidas en esta variable en el momento de realización de la investigación, ver la tabla 3.

– *C<sub>nt</sub>: variable contexto*

Proporciona información sobre la claridad conceptual con que trabaja y ofrece sus servicios la institución en busca de una mayor calidad, reflejando así las características asociadas al contexto: recursos físicos, humanos e informáticos. Esta variable se encuentra en función de una matriz de percepción de los estudiantes sobre las condiciones físicas de la institución. Para observar la estructura y características obtenidas en esta variable en el momento de realización de la investigación, ver la tabla 4.

**Tabla 2**

Estructura de la población de docentes. Programa de Economía de la Escuela Colombiana de Ingeniería, 2004

Carrera en que obtuvo su título profesional			Nivel de formación		Tipo de contratación en la Escuela						
					Programa de Economía						
Ingeniería	14	27,4%	Pregrado	17	33,2%	Planta programa	9	17,6%	Tiempo completo	6	66,7%
									Medio tiempo	3	33,3%
Economía	27	52,8%	Especialización	16	31,4%	Planta otras unidades académicas	6	11,8%	Tiempo completo	5	83,3%
									Medio tiempo	1	16,7%
Contaduría	3	6,0%	Maestría	16	31,4%	Cátedra	36	70,6%			
Administración	3	6,0%									
Otras	4	7,8%	Doctorado	2	4,0%						

Fuente: Datos obtenidos por la autora a través de la Encuesta a docentes 2004-1. En este cuadro no se incorpora la estructura etérea de los docentes.



**Tabla 3**  
Comparativo entre el resultado total del MFT y el promedio con las variables de entrada

MFT	Promedio	Icfes	Estrato	Ingreso promedio familiar	Educación de la madre	Edad
170	4,2	316	6	12	16	23
141	3,7	331	4	9	16	24
137	3,9	357	4	2	10	25
137	3,5	296	4	4	14	25
135	3,9	326	4	9	5	24
135	3,7	305	3	4	16	21
135	3,5	299	3	5	11	24
134	3,4	335	4	5	16	27
134	3,3	313	5	12	19	24
133	3,4	344	4	3	11	23
130	3,5	282	4	2	7	26
130	3,5	263	3	7	5	22
126	3,4	296	3	3	11	28
124	3,8	313	4	9	17	29
124	3,4	287	3	2	11	25
124	3,1	271	4	11	18	27
123	3,3	268	3	3	13	25
120	3,7	330	6	12	9	24
120	3,4	290	4	7	14	24
120	3,3	300	5	5	11	26

( $\rho=0,586$ ) MFT-Promedio  
 ( $\rho=0,505$ ) MFT-Icfes  
 ( $\rho=0,60$ ) Icfes-Prom.  
 ( $\rho=0$ ) MFT=Estrato  
 ( $\rho=0,546$ ) Est.-Ing. Fliar.  
 ( $\rho=0,1085$ ) MFT=Ing. Fliar.  
 Promedio  
 ( $\rho=0,0329$ ) MFT-Años  
 Estudio madre

**Nota:** Se emplea la equivalencia del ingreso familiar promedio en pesos corrientes de 2003. A continuación se lista la equivalencia del ingreso familiar promedio en pesos corrientes de 2003: 1) Menos de 800.000; 2) Entre 801.000 y 1.300.000; 3) Entre 1.301.000 y 1.800.000; 4) Entre 1.801.000 y 2.800.000; 5) Entre 2.801.000 y 3.300.000; 6) Entre 3.301.000 y 3.800.000; 7) Entre 3.801.000 y 4.800.000; 8) Entre 4.801.000 y 5.800.000; 9) Entre 5.801.000 y 6.800.000; 10) Entre 6.801.000 y 7.800.000; 11) Entre 7.801.000 y 8.800.000; 12) Más de 8.801.000.  
**Fuente:** Cálculos del autor.

–  $C_{mp}$ : *variable compromiso*  
 Permite medir la calidad formal, informal y de tendencia de las relaciones profesor-alumno, determinando así el mejoramiento en la formación desde los actores. Esta variable se encuentra en función de dos matrices: una matriz de percepción de los estudiantes matriculados en el Programa de Economía y otra de percepción de los docentes adscritos al Programa de Economía de la Escuela sobre el proceso enseñanza - aprendizaje experimentado en la institución a través del programa. Es esta variable la más novedosa y enriquecedora del modelo desarrollado en la investigación, así como la variable diferencial respecto al modelo de calidad administrado por el CNA. Para observar la estructura y caracte-

rísticas obtenidas en esta variable en el momento de realización de la investigación, ver la tabla 5.

**METODOLOGÍA APLICADA PARA LA EVALUACIÓN DE LA CALIDAD FORMAL DEL PROGRAMA**

Para realizar una medición óptima de las variables enunciadas y actuando con dos grandes restricciones (el carácter cualitativo de la mayor parte de ellas y el tamaño reducido tanto de la población objetivo –estudiantes de octavo y noveno semestres del 2003-1 y profesores durante el período académico 2004-1– como de la población complementaria –estudiantes de primero a séptimo semestres durante el periodo académico 2003-1 y egresados a julio de 2003–), se han utilizado dos herramientas. Una de ellas es el *Análisis de homogeneidad* (Homals), cuyo objetivo principal es cuantificar la información nominal (categorías) mediante la asignación de valores numéricos tanto a los casos (objetos) como a las categorías, logrando la homogeneidad mediante el método de mínimos cuadrados

**Tabla 4**  
Medidas de discriminación y valor absoluto de sus diferencias en las características del factor indirecto, variable contexto ( $C_{NT}$ )

Objeto		Medidas de discriminación		Diferencia <sup>1</sup>
		1	2	
Sitios de estudio	d7	1,1604	0,1172	1,0432
	d9	0,8744	0,0910	0,7834
Oficina de docentes	f5	1,1464	0,4471	0,6993
	f9	1,1286	0,3323	0,7964
Servicio de Internet	h3	1,1986	0,0422	1,1564
	h4	1,2206	0,0784	1,1423
Ambiente exterior	p5	1,2673	0,3059	0,9613
	p6	1,1706	0,3471	0,8235
	p7	1,2217	0,2009	1,0208
	p8	1,2232	0,1999	1,0232
	p9	1,2182	0,1317	1,0864
Campus deportivos	r4	1,1685	0,1069	1,0616
	r9	1,2031	0,0516	1,1515
Bienestar Universitario	t9	1,1706	0,0863	1,0844

1. Mientras más amplio el valor absoluto de la diferencia se entiende que la variable presenta mayor incidencia. **Fuente:** Cálculos del autor. Resultados del modelo. Es de destacar que estos seis contextos fueron los percibidos como los de más alto rango de incidencia en el favorecimiento de la calidad de la educación por parte de los estudiantes, entre un total de 20 calificados en término de nueve características.



alternantes. Las cuantificaciones encontradas son óptimas en el sentido de que las categorías son separadas lo máximo posible, lo cual significa que los objetos de una misma categoría se colocan muy juntos entre sí, mientras que los objetos de diferentes categorías se ubican tan lejos como sea posible.

Por otra parte, se aplica el *análisis de correlación*<sup>14</sup> en la variable de docentes ( $L$ ) dentro del factor directo de la función de calidad de la educación, así como en la variable de entrada ( $E_{mp}$ ) dentro del factor indirecto. Su objetivo es identificar las variables que agrupan a otras y que explican más el comportamiento de la función de calidad de la educación. Una vez que se identifique el grado de asociación, las variables más relevantes son categorizadas para la aplicación del Homals, con el fin de reducir la dimensionalidad de las variables que más afectan el modelo integrativo de Kuh e identificar los factores que presentan mayor incidencia en la calidad formal.

### PRINCIPALES HALLAZGOS

Los resultados derivados de la aplicación del modelo muestran la siguiente ecuación final:

$$Q = fD(L(K, Fn, Cl, Aa, Ae, T), E(T, C_s), C_{nr}(A_{ex}, D, B, I_s), C_{mp}(P_1(P_{14}), P_3(P_{34}, P_{310}), P_5(P_{50}, P_{54}, P_{52})))$$

(7,8) (8,3) (7,8) (7,6) (7,1) (6,7) (0,05) (0,12) (0,97) (0,9) ((0,9)(0,9) (0,98) (0,99) (0,99) (0,99) (0,97) (0,54)

**Tabla 5**

Ordenamiento según valor absoluto de la diferencia en las medidas de discriminación de las características más relevantes del factor indirecto, variable compromiso ( $C_{MP}$ ) en los grupos poblacionales: estudiantes, docentes y egresados

Principio	Grupo de estudiantes		Grupo de docentes		Grupo de egresados		Resultado para el modelo
	Alta percepción	Baja percepción	Alta percepción	Baja percepción	Alta percepción	Baja percepción	
Nº 1: Contacto profesor-alumno	Tercer y cuarto niveles (0,66 y 0,54)		Primer nivel (0,67)		Segundo nivel (0,65)		Se mantiene
Nº 2: Cooperación entre estudiantes	Segundo nivel (0,76)		Cuarto nivel (0,49)				Se elimina
Nº 3: Aprendizaje activo		Segundo y tercer niveles (0,02 y 0,03)	Tercer nivel (0,51)	Tercer nivel (0,06)	Tercer y quinto niveles (0,59 y 0,52))		Se mantiene
Nº 4: Retroalimentación oportuna			Segundo nivel (0,63)			Segundo y tercer niveles (0 y 0,06)	Se elimina
Nº 5: Manejo del tiempo	Primer nivel (0,97)			Primer nivel (0,03)	Cuarto nivel (0,54)		Se mantiene
Nº 6: Altas expectativas y estilos de aprendizaje	Quinto nivel (0,42)	Primer nivel (0,004)	Quinto nivel ((0,48)	Segundo nivel (0,04)	Primer nivel (0,65)	Primer nivel (0,02)	Se elimina

Fuente: Resultados del modelo.

La interpretación de esta ecuación, sustentada en la metodología Homals, cuya información se basa en las encuestas aplicadas a docentes, egresados y estudiantes<sup>15</sup> de la Facultad de Economía de la Escuela y en diversas fuentes de información secundaria otorgadas por la Oficina de Registro de la Escuela mediante el Siec<sup>16</sup>, destaca como resultados más relevantes los siguientes:

1. La prueba de logro MFT aplicada sobre la población de estudiantes de últimos semestres (octavo y noveno) permite observar que un 10% de los estudiantes logró puntajes de nivel alto, 50% de la población puntajes de nivel medio y el 40% de la población obtuvo puntajes bajos. Si se tiene en cuenta que tan sólo 10% de estudiantes eran bilingües, la presencia de madres con estudio de bachillerato incompleto, un índice de 4,3% de desempleo en los padres y la ausencia total de preparación para el examen, los resultados se muestran halagadores. De acuerdo con lo anterior, el Programa de Economía de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito presenta resultados de nivel medio de calidad formal<sup>17</sup>.

2. El modelo integrativo muestra que entre los factores (directos e indirectos) de la calidad de la educación, el insumo



docente (factor directo) es el más importante, con las características que lo definen. En tal sentido, si el programa y la institución aspiran mejorar sus niveles de calidad, es altamente recomendable una política de incentivo y apoyo al desarrollo profesoral que facilite incorporar o mejorar las cualidades académicas y formativas de los docentes, esto es, contar con más doctorados y magísteres en el área de economía. Adicionalmente, es recomendable revisar las políticas de contratación con el propósito de incentivar la incorporación de más docentes a la planta del programa.

3. Las relaciones halladas de alumnos - aula de clase y estudiantes - computador favorecen el trabajo docente para el alcance de una educación de calidad en el programa, y dado que el contacto profesor - alumno resulta ser la segunda variable en importancia en la determinación de la calidad formal, la recomendación para la institución y el programa es propender a unas condiciones físicas y tecnológicas en las oficinas de los profesores que no sólo faciliten sino que promuevan su labor y fortalezcan las cualidades que hasta el momento ha presentado el proceso de enseñanza - aprendizaje.

---

La recomendación para la institución y el programa es propender a unas condiciones físicas y tecnológicas en las oficinas de los profesores que no sólo faciliten sino que promuevan su labor y fortalezcan las cualidades que hasta el momento ha presentado el proceso de enseñanza-aprendizaje.

---

4. Se evidencia la interacción del ejercicio de Bienestar Universitario con la dotación y disponibilidad de campus deportivos y un ambiente exterior estimulante para el ejercicio de la docencia y la tarea del aprendizaje, lo cual invita a la institución a fortalecer las políticas de Bienestar Universitario.

5. Si bien se reitera una relación directa que sobre los niveles de calidad formal presentan los mejores puntajes en el examen de Estado y unas condiciones socioeconómicas favorables, la primera variable no resultó ser significativa para el alcance de la calidad formal, resaltándose los aportes y el valor agregado del proceso de enseñanza - aprendizaje otorgado por el Programa de Economía de la Escuela.

### ALGUNAS CONCLUSIONES

Con base en lo expuesto anteriormente, se concluye que resulta de suma importancia la continuidad de ejercicios como el presente con el objeto de contar con resultados que permitan el análisis comparativo intertemporalmente (tanto a escala local como internacional) de los logros del programa en términos de calidad formal. En tal sentido,

más allá de efectuar reflexiones sobre los resultados de los Ecaes en un momento de tiempo específico, se recomienda involucrar a dichos resultados información complementaria y de la calidad obtenida y expuesta para la presente investigación, específicamente la atinente a la medición de la percepción de la calidad del proceso de enseñanza - aprendizaje por parte de los actores principales del proceso: estudiantes y docentes. Así los resultados serán más integrativos e integradores, como el nombre del modelo aquí desarrollado lo indica.

Aun cuando el desarrollo y la puesta en funcionamiento de los Ecaes agilizan esta tarea, puesto que facilitan el acceso a la presentación de pruebas de logro y amplían la cobertura por la restricción que impone el costo de las pruebas internacionales, la aplicación de éstas redundaría en altos beneficios de conocimiento y avance sobre el tema de la calidad formal, así como en enriquecimiento en la cantidad y calidad de la información requerida por el modelo.

De igual manera, favorecería los estudios comparativos no sólo en el ámbito nacional sino internacional. Únicamente de esta manera se evidenciarán cambios que dinamicen y favorezcan su propósito para darle coherencia a la relación entre sus políticas y sus objetivos de formación con calidad. Tal conclusión se hace extensiva a la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito para el agregado de sus programas académicos.

### AGRADECIMIENTO

El presente artículo involucra trabajo tanto personal como conjunto del grupo de docentes que creyó en el proyecto de formación de un nuevo programa de economía en Colombia. A ellos y los estudiantes que con entusiasmo se unieron a ese sueño, mis agradecimientos tanto por su confianza como por sus aportes.

Deseo finalmente destacar que el tema de este trabajo emergió por mi constante preocupación como primera administradora académica del Programa de Economía en la Escuela, de evidenciar sobre bases científicas la coherencia y pertinencia del modelo pedagógico y la orientación de formación que éste propuso, con la firme convicción de estar posicionados entre los primeros cinco programas de economía nacionales en sus diez años de funcionamiento.

Hoy, la realidad nos lo confirma: el modelo pedagógico ha sido acertado no sólo en obtener los primeros puestos en los Ecaes; también lo evidencian los excelentes resultados que han mostrado los egresados del programa en el ámbito académico nacional e internacional mediante sus aceptaciones a programas de doctorado en instituciones con



reconocida calidad, su selección como becarios para efectuar investigaciones patrocinadas por Colciencias, y su activa y lucida labor en maestrías, y cargos profesionales y de asesoría en agremiaciones sectoriales, ministerios, direcciones generales nacionales, regionales y distritales, y en instituciones privadas.

## NOTAS

1. Borrero, A. (1999). "Simposio permanente sobre la universidad: XV Seminario general nacional 1998 - 1999". Bogotá: Universidad Javeriana, Programa de Ciencias Religiosas, vol. 6.
2. Los procesos de evaluación como el Ecaes (Exámenes de Calidad de la Educación Superior) a escala nacional, y el MFT (*Major Field Test*) en el ámbito internacional.
3. Alcance o logro misional de la institución, de los objetivos de formación del programa, de las funciones de los docentes y del desempeño académico de los estudiantes.
4. Formación de profesionales que atiendan las necesidades del entorno y apoyen el desarrollo social y material a escalas local, regional y nacional.
5. Durante la década de los setenta, el National Center for Higher Education Management Systems (NCHEMS) colaboró ampliamente en la conceptualización de las pruebas estándar de logro, brindándole una nueva envergadura a *Grade Point Average* (GPA) a través de sus posibilidades de trabajar sobre habilidades, capacidades y aptitudes de los estudiantes. Igualmente, instituciones como la American Association of Higher Education desarrollaron modelos de evaluación de la calidad de programas de educación superior, pero orientándolos principalmente hacia programas no tradicionales (Kuh, G.D. *et al.*, cap. 11).
6. Asociación Colombiana de Universidades.
7. Instituto Colombiano de Fomento para la Educación Superior.
8. Bien social de tipo moral e intelectual que involucra ideas, valores, actitudes, conocimientos, destrezas, habilidades, hábitos, formas de pensar, de actuar, de estar y de tener (Flórez, C., Melguizo, T. & Valderrama, D. (2000); Villa, L. (2001)).
9. Aquí denominado modelo Kuh - Chickering, novedoso en cuanto a que es la primera vez que se mezclan para la identificación de la evaluación de la tendencia en la calidad formal de la educación superior.
10. Incorpora y asocia factores directos (capital y trabajo) e indirectos (metodología de la enseñanza - aprendizaje).
11. Cátedra o planta.
12. La función de producción analizada se encuentra afectada por externalidades tipo Arrow, es decir, hay un aprendizaje en el oficio "Learning by doing" adquirido a través de la experiencia.
13. No basta con el incremento físico de los insumos directos para aumentos en la producti-

vidad, ya que ésta también depende de factores indirectos como elementos claves para transferir y enriquecer el conocimiento.

14. CA - análisis de Spearman.
15. Encuestas: "Metodología de la enseñanza", "Percepción del egresado sobre su formación" y "Participación activa del estudiante en su formación".
16. Sistema de Información de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
17. Para ampliación de detalles consultar la tesis "Factores asociados para determinar la calidad de la educación superior: Programa de Economía de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito", Beatriz Adalgiza Torres Alayón, Universidad de los Andes, 2005.

## BIBLIOGRAFÍA

- Arrow, K. (1962). The economic implication of learning by doing. *Review of Economics Studies*, N° 29, junio.
- Baquero, A. (coord.), (2002). *Modelos de desarrollo económico: Colombia 1960-2002*. Bogotá: Editorial Oveja Negra.
- Bejarano, J.A. (1999). *Hacia dónde va la ciencia económica en Colombia: siete ensayos exploratorios*. Bogotá: Tercer Mundo Editores, Colciencias, Universidad Externado de Colombia, Facultad de Economía, enero.
- Borrero, A. (1999). *Simposio permanente sobre la universidad: XV Seminario general nacional 1998 - 1999*, vol. 6. Bogotá: Universidad Javeriana, Programa de Ciencias Religiosas.
- Chaves, A. & Arias, H. (2002). *Cálculo de la tasa interna de retorno de la educación en Colombia*. Documento de Trabajo N° 2. Bogotá: Universidad Externado de Colombia, Facultad de Economía.
- Chickering, A. & Gamson, Z. (1995). *The seven principles in action: improving undergraduate education*. Bolton, MA.: Anker Publishing Company, Inc.
- Cide-Facultad de Ingeniería Uniandes (1998). *Formación de recursos humanos para la innovación y el desarrollo tecnológico en ingeniería*. Estudio realizado para Colciencias y el DNP.
- Cifuentes, J. & Pérez, M. (1999). Sistema de acreditación colombiano, visión analítica. *Cuadernos de Ascun*, N° 7. Bogotá: Congreso de la República de Colombia, Ley 30 de junio de 1992.
- Contraloría General de la República (2002). *La educación superior colombiana: el reto de la calidad*. [www.contraloriagen.gov.co/cdsocial/contenido/Educacion%20Superior.pdf](http://www.contraloriagen.gov.co/cdsocial/contenido/Educacion%20Superior.pdf).
- Flórez, C., Melguizo, T. & Valderrama, D. (2000). *Análisis económico e institucional de factores asociados al logro en pregrado: un estudio de caso para tres universidades en Colombia*. Bogotá: Colciencias - Cede - Oficina de Planeación Universidad del Rosario.
- Hair, J., Anderson, R., Tatham, R., & Black, W. (2000). *Análisis multivariante*, 5a. ed. Madrid: Prentice Hall.
- Higher Education Assessment and Educational Testing Service (1998). *Major Field Test, Program Manual*. Princeton, N.J.
- Icfes (2002). 2001: Año de la calidad. *Boletín Informativo del Icfes* N° 99.
- Kuh, G.D. (1981). *Indices of quality in the undergraduate experience*. AAHE ERC/ Higher Education Research. Report N° 4. Washington D.C.: American Association for Higher Education.
- Kuh, G.D. and others (1979). *Evaluation in student affairs*. American College Personnel Association (Acpa). Cincinnati, Ohio: University of Cincinnati.
- Lewis, R. & Smith, D. (1994). *Quality in higher education*, 1<sup>st</sup> ed. Series Editor Frank Voehl. Delray, Florida: St. Lucie Press.
- López, R., Thomas, V. & Wang, Y. (1998). *Addressing the Education Puzzle*, World Bank Document. MEN - Icfes (2001). *Bases para una política de Estado en materia de educación superior*. Bogotá, mayo.
- Presidencia de la República - DNP. (2002). *Bases del Plan Nacional de Desarrollo 2002-2006: hacia un Estado comunitario*. Bogotá.
- Pritchett, L. & Filmer, D. (1997). *What Education Production Functions Really Shows: A Positive Theory of Education Expenditures*, en World Bank, August 20.
- Proyecto de formación del Programa de Economía* (2003). Escuela Colombiana de Ingeniería. Documento base presentado al Icfes para la aprobación del Registro Calificado, enero.
- Proyecto educativo institucional: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito* (2001). Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, octubre.
- Reyes, A. y otros (1998). *Empleo, productividad e ingresos en Colombia: 1990 - 1996*. Informe de trabajo a la OIT. Bogotá.
- Sarmiento, E. (1998). *Alternativas a la encrucijada neoliberal*. Bogotá: Ecoe ediciones, Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería y Academia Colombiana de Ciencias Económicas.
- Sarmiento, E. (2000). *Cómo construir una nueva organización económica*. Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería y Editorial Oveja Negra.
- Sarmiento, E. (2002). *El modelo propio: teorías económicas e instrumentos*. Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería y Grupo Editorial Norma S.A.
- Sistema Nacional de Acreditación - Consejo Nacional de Acreditación (1998). *Lineamientos para la acreditación*, 3a. ed. Bogotá, febrero.
- Universidad Colegio Mayor del Rosario, Facultad de Economía (1999). *Informe de autoevaluación del programa de pregrado en economía*. Bogotá.
- Universidad de Antioquia, Facultad de Economía (2000). *Reflexiones de la evaluación de la calidad*. Medellín.
- Universidad Externado de Colombia (2001). *Informe de autoevaluación del programa de pregrado en economía*. [www.uexternado.edu.co/facecono/general.html](http://www.uexternado.edu.co/facecono/general.html).
- Villa, L. (2001). *Economía de la educación*. Centro de Investigaciones en Educación Superior. Bogotá: Facultad de Economía, Universidad de los Andes.
- Williamson, J. (1993). *Democracy and the Washington Consensus*, vol. 21, World Bank, pp. 1329-1336.
- Williamson, J. (1990). "What Washington means by policy reforms", en *Latin American Adjustment: How much has happened*. Washington D.C.: Institute for International Economics



# Minimización de los factores que ocasionan las eflorescencias en los muros de mampostería de arcilla



Es muy importante para los diseñadores entender los tipos de eflorescencia que pueden ocurrir y tener por lo menos el conocimiento básico de los factores que influyen en la aparición de eflorescencias en los ladrillos de mampostería. En este artículo se presentan los muy complicados y frecuentes mecanismos que contribuyen a la formación de eflorescencias, que incluyen las fuentes probables de sales solubles, así como también las fuentes de humedades que activan las sales. La información presentada muestra la composición de cada tipo de mancha, a través de experiencias y de referencias de investigaciones. Los diseñadores no sólo deben entender las causas y los mecanismos de varios tipos de eflorescencias, que pueden ocurrir en muros de ladrillo, pero que se pueden avisar para prevenir las eflorescencias y controlarlas cuando puedan aparecer. Finalmente, se discuten la importancia del diseño, los detalles y la selección de materiales, la utilización de sellantes, al igual que la trascendencia de las buenas prácticas de construcción.

It is important for designers to understand the various types of efflorescence which can occur and to have at least a basic knowledge of the factors influencing the appearance of efflorescence on brick masonry. This notes cover the often very complicated mechanisms leading to the formation of efflorescence, including the probable sources of soluble salts as well as the sources of moisture needed to activate these salts. Information is presented as to the composition of each known type of stain, along with research references and experiences describing conditions necessary to cause these stains to appear. Designers must not only understand the causes and mechanisms of the various types of efflorescence which can occur on brick walls, but should be aware of means to prevent efflorescence and to control it if it does appear. This notes presents a discussion on the importance of design, details, selection of materials, the use of sealants as well as the importance of good construction practices.

**Departamento Técnico de la  
Asociación Nacional de Fabricantes  
de Ladrillo y Derivados de la Arcilla  
(Anfalit)**



## INTRODUCCIÓN

Las eflorescencias son normalmente depósitos de cristales de sales en la cara expuesta de la mampostería de ladrillo, que se pueden prevenir. El entendimiento de la naturaleza de los mecanismos del cómo se producen las eflorescencias, así como también las posibles causas de las sales solubles y humedad, son esenciales para la prevención de este fenómeno.

A lo largo de este artículo se hacen recomendaciones para la prevención, el control de eflorescencias y el análisis de una lista de revisión para determinar los problemas y procedimientos de remoción de estas patologías.

## DETECCIÓN DE EFLORESCENCIAS

Es impracticable evitar que las sales y la humedad entren en contacto con la mampostería. Sin embargo, la reducción de cada uno de los factores que contribuyen a las patologías es posible y usualmente se puede reducir o prevenir la ocurrencia de las eflorescencias.

*Selección de materiales.* Para ladrillos de fachada, conformación de aparejos, tipos de morteros, etc., se deben seleccionar los aspectos que determinan la reducción de las posibles fuentes que contengan sales solubles. Este es el primer paso para la prevención de las eflorescencias. Las siguientes recomendaciones se presentan como soporte para los diseñadores en la selección de materiales para limitar la ocurrencia de las eflorescencias.

*Unidades de mampostería.* No deben contener sales solubles o contribuir a las eflorescencias. Se recomienda que las unidades de mampostería sólidas, de perforación vertical u horizontal o unidades de mampostería utilizadas para fachadas, se ensayen de acuerdo con la NTC 4017, Métodos de muestreo y ensayo de unidades de mampostería de arcilla y productos afines, para determinar su tendencia a la eflorescencia.

En el ensayo para determinar las eflorescencias se considera colocar en inmersión muestras representativas de unidades de arcilla en agua destilada durante un período de siete días. Al final de este período, las unidades se secan y examinan para compararlas con muestras de control que no se sumergieron. La pieza debe catalogarse como “no efloreceda” o “eflorescencia despreciable” para ser aceptada.

*Cara de los muros.* Muchos materiales contienen relativamente altos porcentajes de álcali que pueden contribuir a la eflorescencia en la cara expuesta de la mampostería. Cuando se utilizan materiales con contenidos de sales solubles, se recomienda que los detalles en los muros y los diseños consideren separar estos materiales de las caras expuestas de la mampostería.

*Mortero.* La principal contribución de las eflorescencias por parte de los morteros se debe a los cementos con alto contenido de álcali. La tendencia a generar eflorescencias se puede prevenir con una medida aceptable desde el análisis químico del cemento Portland. Los cementos con altos contenidos de alcalinidad son más susceptibles de producir eflorescencias que los de baja alcalinidad. La norma ASTM Standard Specification for Portland Cement, C 150, contiene la siguiente nota como parte de la sección 4, de resistencia química:

“Nota 3. El cemento no debe contener más de 0,60% de álcali, calculado como el porcentaje de  $\text{Na}_2\text{O}$ , más 0,658 veces el porcentaje de  $\text{K}_2\text{O}$ , que se debe especificar cuando el cemento se utilice con agregados para concreto que pueden tener una reacción nociva. La referencia se tomaría de la especificación para agregados en el concreto (ASTM C33) para el criterio de reactividad nociva”.

Los álcalis se refieren al total de ácidos solubles, los cuales están incluidos en las fracciones alcalinas solubles en agua. En general, el álcali soluble en agua puede estar contenido en el orden del 60% del total. Otros ingredientes del mortero, como arena, agua, cal, deben seleccionarse también con sumo cuidado, aunque su contribución a



las eflorescencias es menos frecuente. Los tipos de mortero y sus proporciones deben seleccionarse con base en los requerimientos estructurales y el grado de exposición particular del proyecto.

*Aditivos.* Para mortero por lo general no se recomiendan si no se conocen realmente sus ingredientes y datos sobre sus efectos y consecuencias sobre los muros de mampostería.

### Aspectos para tener en cuenta en el diseño

La utilización de excelentes materiales y mano de obra no asegura el éxito del proyecto, debe ir acompañada de un diseño apropiado.

*Secciones de muro.* Para el diseño de muros de mampostería y la selección de materiales para la construcción se deben tener en cuenta la resistencia de los materiales y la resistencia de penetración a la lluvia, basada en la exposición a la cual el muro ha de ser sometido.

Se puede prevenir la penetración del agua lluvia en el interior de la mampostería proveyendo una cavidad de aire detrás de la mampostería exterior, con un canal que permita la evacuación del agua a través de goteros hacia el exterior para obtener una máxima resistencia a la penetración de la lluvia y alcanzar una mínima eflorescencia. Otra manera es utilizando una barrera interna a la penetración de agua en la cara posterior del muro.

*Detalles.* Una de las condiciones necesarias para la ocurrencia de las eflorescencias es la presencia de humedad dentro del muro. El impedir el avance de la humedad contribuirá a que desaparezcan los mecanismos de la eflorescencia. El éxito depende en gran medida de la atención y el diseño de detalles críticos. La importancia primaria de estos detalles está asociada con la prevención del ingreso de humedad dentro de la mampostería. También son detalles de importancia el alejar el agua directa de las zonas de remate en las partes altas de los muros y de las superficies horizontales. Se deben tener en cuenta para prevenir la ocurrencia de eflorescencias las recomendaciones de diseño, definir los tipos de muros, características de la mano de obra, detalles, flanches, goteros, entre otros puntos de cuidado y atención.

*Masillas y sellantes.* Estos productos en las obras se emplean para corregir o disimular errores en la mano de obra, pero deben utilizarse de acuerdo con los diseños e instalarse de la misma manera que otros elementos en la estructura. Las juntas entre la mampostería y otros elementos como puertas, ventanas y juntas de expansión deben sellarse, ya que son en su mayoría fuentes de penetración de agua lluvia dentro de la mampostería. Esos puntos vulnerables deben requerir una atención especial durante el diseño y la construcción. También se debe contemplar el establecimiento de programas de mantenimiento para inspeccionar y remplazar los sellantes que lo requieran. El tiempo de durabilidad de un sellante está considerado entre cuatro y diez años, dependiendo del tipo de exposición.

### Prácticas de construcción

Como se discutió previamente, las prácticas constructivas y la mano de obra empleada pueden contribuir a la generación de eflorescencias en los muros de mampostería. Algunas recomendaciones y prácticas para prevenir este fenómeno se presentan a continuación:

*Mano de obra.* Se deben tener en cuenta el llenado completo de las juntas de mortero, y la necesidad de mantener la limpieza de los muros y de las cavidades en las unidades perforadas. La atención de estos aspectos es de primordial importancia para prevenir la penetración de humedad dentro de la mampostería y las consecuentes patologías de eflorescencias.

*Protección.* Los muros de mampostería construidos parcialmente se encuentran expuestos a la lluvia y otros elementos durante la construcción, que pueden generar saturación durante semanas o meses (dependiendo de las condiciones climáticas).





Esta saturación prolongada puede causar la precipitación de sales solubles. Estas condiciones pueden contribuir a la contaminación de la mampostería con sales solubles de cualquier parte de la construcción (como concreto, pañetes, yeso, obra blanca, etc.). Durante la construcción todos los muros deben mantenerse secos, cubiertos con algún elemento que los proteja del agua, al final de las labores del día o en tiempos de descanso prolongados en el trabajo. Empaques de cemento, tablonas, hojas plásticas delgadas, pedazos de ladrillos, no deben aceptarse como elementos que cubran adecuadamente el muro. Se utilizan rollos de polietileno o lonas impermeables con material a prueba de agua, los cuales ofrecen una excelente protección por extensos períodos de tiempo.

*Almacenamiento de materiales.* El método de almacenamiento de los materiales en un proyecto de construcción incide en la aparición futura de eflorescencias. Los materiales deben almacenarse de manera que se evite su saturación durante la lluvia o exposición a la humedad climática, así como también a la contaminación de sales u otros elementos que puedan contribuir con la aparición de eflorescencias.

*Unidades de mampostería.* Las unidades de mampostería deben aislarse de la contaminación y suciedad que pueda aportar el terreno. También deben protegerse del nivel freático que pueda contener sales solubles. Se deben cubrir con un elemento que las proteja de la lluvia y las mantenga secas, y ponerlas en algún tipo de entramado para aislarlas de la contaminación del terreno.

*Cemento.* El cemento, como material utilizado para la elaboración de los morteros, debe almacenarse en lugares donde no esté expuesto a la lluvia o la humedad que pueda alterar sus propiedades químicas.

*Arena.* La arena para mortero debe almacenarse de manera tal que se encuentre aislada de la posible contaminación del terreno, de la suciedad, materia orgánica o agua del terreno, los cuales pueden ser factores que contribuyan a la precipitación de eflorescencias. Se debe contemplar la posibilidad de cubrir la arena y los agregados con algún tipo de membrana que los proteja.

Las recomendaciones que se ofrecen en este artículo hacen énfasis en la selección de materiales, el tener en cuenta el diseño de las secciones de muros y detalles de construcción para minimizar la disponibilidad de sales y la ocasión de la penetración de agua dentro de la estructura. Tales recomendaciones deben ir acompañadas del buen criterio para lograr los resultados y desempeños esperados.

### Bibliografía

Selected ASTM Standards for Brick (1985). Compiled by ASTM for Brick Institute of America, August.

Technical Notes on Brick Construction 1 Revised (1981). "Cold Weather Masonry Construction-Introduction", Reissued July. Technical Notes on Brick Construction 7 Series on the Subject of Water Resistance of Brick Masonry.

Technical Notes on Brick Construction 8 Revised (1972). "Portland Cement-Lime Mortars for Brick Masonry", September.

Technical Notes on Brick Construction 20 Revised (1977). "Cleaning Brick Masonry", Sept.-Oct.

Technical Notes 23 Revised (1985). "Efflorescence, Causes and Mechanisms, Part I of II", May.

Asociación de Ladrilleras Unidas de Antioquia (2004). *Manual de fachadas: manejo y protección del ladrillo a la vista*. Medellín: Asociación de Ladrilleras Unidas de Antioquia







# Foro Internacional sobre la

# Microzonificación Sísmica en Bogotá

## Panelistas

- >> Luis Esteva
- >> Mete Sozen
- >> Gabriel Fernández
- >> Luis Guillermo Aycardi
- >> Luis Enrique García
- >> Fernando Ramírez
- >> Jorge Alberto Rodríguez
- >> Édgar Rodríguez
- >> Carlos Salvador
- >> Álvaro González
- >> Adolfo Alarcón

En el marco del Cuarto Encuentro Nacional de Ingenieros de Suelos y Estructuras, organizado por la Escuela Colombiana de Ingeniería y realizado en el aula máxima de la institución entre el 3 y el 5 de mayo de 2006, se llevó a cabo el Foro Internacional sobre Microzonificación Sísmica de Bogotá, con el fin de revisar el desarrollo histórico de la normatividad vigente sobre el tema y destacar tanto la información existente como los enfoques metodológicos surgidos últimamente. A lo largo del foro los investigadores invitados expusieron sus puntos de vista sobre la materia, con el objeto de ayudar a encontrar una solución definitiva a esta problemática que afecta a la capital del país.



**MODERADOR**

En nombre de la Escuela Colombiana de Ingeniería les damos una cordial bienvenida tanto a los expertos invitados como a los asistentes al foro, en el que se dará respuesta a las inquietudes surgidas a propósito de la evaluación hecha a lo largo del encuentro a la microzonificación sísmica de Bogotá. Los panelistas son Luis Esteva, Mete Sozen, Gabriel Fernández, Luis Guillermo Aycardi, Luis Enrique García, Fernando Ramírez, Jorge Alberto Rodríguez, Édgar Rodríguez, Carlos Alvarado, Álvaro González y Adolfo Alarcón.

En esta oportunidad se trabajará el esquema de pregunta-respuesta, en razón del elevado número de panelistas invitados.

**Pregunta (Adriana Hoyos)**

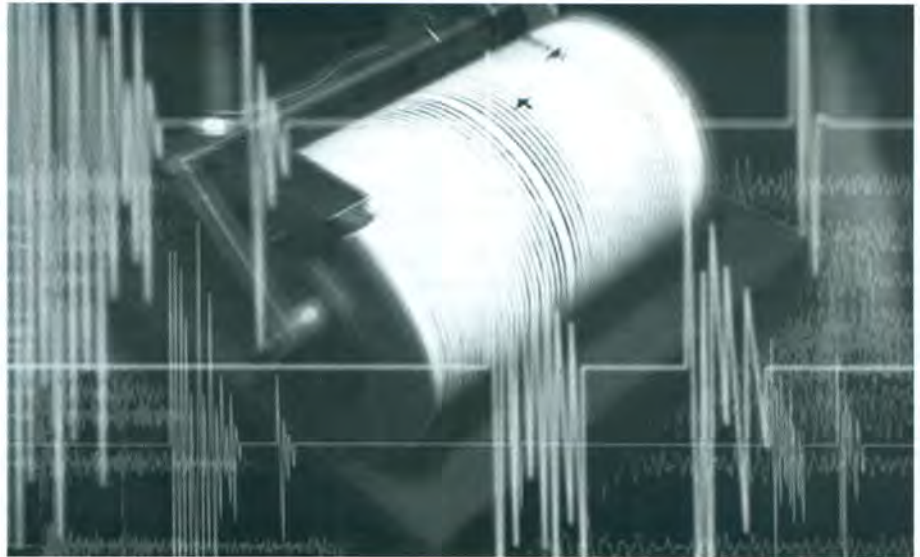
Si la microzonificación se publicó en 1997 y se hizo ley en el 2001, ¿qué pasó con ese tiempo de estudio, polémicas, confrontaciones, deliberaciones finales entre una fecha y otra? Es decir, ¿por qué no se aprovechó entre 1997 y 2001 para hacer algún tipo de mejora?

**ÉDGAR RODRÍGUEZ**

Yo estuve hasta enero del 2000 en Ingeominas y hasta ese año, desde el punto de vista estructural, casi no había observaciones; sin embargo, después que se hizo ley se empezaron a realizar los análisis y los cálculos de rigor e intervinieron los estructurales. En esa época nunca llegó ninguna solicitud de que se frenara o de que se cambiara la microzonificación.

**Pregunta (Andrés Sandoval)**

¿Piensa que la determinación de un riesgo sísmico para Bogotá tuvo una influencia política para promover el crecimiento económico y ahora se pretende corregir este hueco en la norma



con aceleraciones muy altas en la microzonificación sísmica?

**FERNANDO RAMÍREZ**

A mi juicio, cualquier decisión tiene influencia política, pero finalmente es un proceso de negociación social. En ese momento participaron agremiaciones de geotecnistas, estructurales, arquitectos, se hicieron debates... Sinceramente, no creo que en las decisiones finales hayan mediado aspectos económicos de agremiaciones o de algún sector en particular.

**ADOLFO ALARCÓN**

En relación con este tema de la norma sismorresistente y de la aprobación de la microzonificación creo que una de las falencias fue no haber hecho los análisis económicos necesarios, pero hasta donde podemos darnos cuenta no hubo ninguna injerencia o directriz de tipo político por parte de las autoridades. Considero que lo que hayamos aprobado es solamente responsabilidad de los técnicos y tiene sus limitaciones por no haber verificado los impactos económicos.

**Pregunta (Francisco de Valdenebro)**

¿La construcción para los estratos económicos bajos no se afecta por los espectros? Digo esto porque la autoconstrucción no los tiene en cuenta, mientras que la construcción legal, que posee trámite de licencia y construcción, es la que mira los espectros...

**FERNANDO RAMÍREZ**

Estoy de acuerdo con usted en que la autoconstrucción se aleja de las normas y es la manera como construyen los estratos uno y dos, principalmente, pero eso no quiere decir que no sea construcción legal. Ahí hay un tema de autoconstrucción informal, mas no ilegal. Una gran parte no tiene licencia, pero la idea es tratar de acercar la norma y los requerimientos mínimos a la autoconstrucción y a los procesos de construcción.

**Pregunta (Francisco de Valdenebro)**

Si sólo se limitan los mínimos, cambia únicamente la situación para los proyectos grandes que pueden pagar estudios locales; en su opinión, ¿qué pasa con los demás proyectos? La idea es



que a la construcción hay que mirarle de fondo los espectros, porque no basta eliminarle los mínimos, sean éstos buenos, regulares o malos.

### LUIS ENRIQUE GARCÍA

Si quitan los mínimos, la persona que hace el estudio de sitio tiene la posibilidad de acudir a un valor que está cubierto por la norma nacional. No comparto el argumento de que se presenta un peligro, puesto que si no existiera microzonificación hay una norma nacional que estaría rigiendo, aprobada por cerca de 300 ingenieros. Además, con esta medida se arreglaría el 90% de las críticas a la microzonificación y habría el espacio suficiente para llevar a cabo todo el plan que tienen preparado.

Lo que dice la norma es que cuando se quiera diseñar un edificio usando técnicas contra el tiempo no se puede utilizar un solo acelerograma sino una familia de acelerogramas, sobre todo si se va a emplear un programa como SAP, que brinda la posibilidad de diseñar con esa técnica; así, se le puede pedir a quien utilice la técnica que use algo representativo del espectro de diseño fijado por la norma, esto es, no se baje a más del 80% de lo que dice la norma.

Este no es un procedimiento para producción de espectros sino para analizar estructuras contra el tiempo, y ahora se nos argumenta que eso está en la norma. Está en la norma pero para analizar estructuras contra el tiempo y no para hacer espectros.

### Álvaro J. González

Recordemos la historia. Primero, ¿quién hizo los espectros? Solamente había dos geotecnistas en una única reunión de revisión: Augusto Espinosa y yo, y tres ingenieros estructurales: Alberto Sarria, Luis Yamín y Ómar Darío Cardona, quienes hicieron los espectros originales de la microzonificación. Los geotecnistas no tuvimos nada que ver en la elaboración de los espectros originales. Después, ¿quién elaboró la primera versión del decreto que está vigente? La elaboró la AIS, que hizo la primera versión, donde aparecen los espectros sin mínimo original y requisito de estudios locales para períodos mayores de 2,5 segundos. En ese momento la norma era cumplir los espectros tal como estaban y nada más.

Luis Enrique García: Pero existía la ley nacional...

Álvaro J. González: De acuerdo con lo que mostré, si hay microzonificación ya no opera la ley nacional. Si se pusieron los mínimos fue para dar una salida lógica, sabiendo que había muchas inconsistencias en la norma, poca exploración; creo que se está confundiendo el remedio de los mínimos con la enfermedad de los espectros. Los mínimos se presentaron ante un comité en donde estaban Adolfo Alarcón por Ingeominas, Ómar Darío Cardona por AIS y Palomino por Acies, el cual aprobó los mínimos.

En este orden de ideas, si a la gente de los estratos 2 y 3 se les pide parte del subsidio para reforzar las viviendas, ¿por qué a los de los estratos 5 y 6 no se les puede exigir una contribución con los estudios locales para que ayuden al desarrollo de la ciudad?

Pero qué tiene de malo quitarla...  
(Luis Enrique García)

Ahora no se puede traer lo de hace cinco años al contexto actual, ya que si no se hubieran hecho esos mínimos nunca habríamos sabido que daba menos que el mínimo o más que el mínimo. El problema es que para el código nacional no hubo ningún patronamiento de los espectros, se adoptaron tal cual salieron de California.

La amenaza sísmica es otra cosas de la que hay que hablar. Por razones sismológicas, en Cali y en Medellín, en estudios locales, la amenaza baja en 0,05 g; por motivos económicos, el doctor Ramírez dice que en Bogotá no podemos

pagar más de un período de retorno de 250 años, entonces ¿por qué tenemos que usar 500 años? Elaboré una figura donde hice un ejercicio con los costos de los daños evaluados en el estudio de microzonificación sísmica y los costos de recuperación de la ciudad y encontré que para el costo mínimo me da 0,15 g, no podemos pagar más. ¿Por qué 0,20 g? Más aún, si uno mira juiciosamente el mapa de amenaza sísmica de Colombia o el mapa del USGS de amenaza sísmica mundial, la amenaza sísmica en Bogotá sería de 0,25 g, pero nosotros no podemos pagar más de 0,15 g.

### Pregunta (Luis Enrique García)

Y yo vuelvo a preguntar: ¿qué tiene de malo quitar los mínimos?

### FERNANDO RAMÍREZ

Sus argumentos son muy lógicos y muy claros, pero cualquier modificación al Decreto 074 tiene unas implicaciones



Los geotecnistas no tuvimos nada que ver en la elaboración de los espectros originales.  
Álvaro González



políticas, y creo que lo más responsable en este caso es hacer unas modificaciones debidamente sustentadas desde el punto de vista técnico.

Lo que hemos planteado en las primeras discusiones del foro sobre el decreto son cosas de forma y no de fondo. En mi opinión, un tema de tantas implicaciones económicas para la ciudad no se puede tomar tan a la ligera. Para reformarlo debe haber un proceso y una serie de estudios de por medio, y si lo que usted dice es tan cierto pues entonces el resultado en su momento dirá

que no sólo se quitaron los mínimos, sino que también se arreglaron las señales de entrada y se mejoraron los perfiles, los análisis dinámicos del depósito de arcilla, es decir, se hizo una revisión integral del estudio, lo que servirá de sustento para finalmente llevarlo a la firma.

#### CARLOS BERNAL

Yo anotaré dos puntos que se tocaron acá pero que valdría la pena traerlos nuevamente para responder la otra parte de la pregunta: ¿quién va a pagar la parte de los estratos 2 y 3? La respuesta la dio Gabriel Fernández: eso lo tiene que pagar la sociedad haciendo el mapa correcto. Lo que se está haciendo no es decir yo pido 100 y demuestre usted que es 80. La obligación de la sociedad y del gobierno es, con base en estudios, determinar el valor correcto que podría ser 85 o 72, o de pronto 105, en lugar del 100 que está allí. Y si es 105 tocará hacerlo con 105.

Otro punto que me pareció sorprendente es que el 52% de los 55 estudios

que ha recibido la DPAE no pidieron bajar el límite inferior. Esto significa que el límite inferior no es tan vital.

Carlos Restrepo: bueno, digamos que eso le pasó al 34% de los estudios.

Luis Enrique García: es muy poco. Esto significa que sólo 55 edificios en la ciudad han pedido el fin del ciclo con *n* millones de metros cuadrados de construcción.

Fernando Ramírez. Ese es el problema del mínimo...

Luis Enrique García. No, creo que eso es totalmente retórico, pero se entiende que se necesitan el tiempo y el espacio para arreglar el problema, aunque se tiene de colchón la norma nacional que estaba mucho antes del Decreto 074; si no existiera este decreto, serían las reglas de juego de diseño. Después vino un ajuste intermedio que no apareció en el proyecto original de microzonificación que hicieron Ingeominas y Uniandes, el cual es inconveniente; hasta la persona que lo hizo dice que está mal.

#### Pregunta (José Hernández)

¿Qué opinión tienen ustedes sobre la microzonificación sísmica de Bogotá, cuáles son las diferencias más significativas con la microzonificación de sus países y en qué se puede ayudar a mejorar la de Bogotá?

#### LUIS ESTEVA

Es muy difícil decir algo sólido sin haber podido seguir todo el proceso. Si me preguntaran qué haría para resolver este conflicto, trataría de hacer una revisión detallada del mismo. Con la participación de gente de distintas posiciones y obviamente con la supervi-

sión de profesionales respetados tanto por su calidad moral como por su capacidad técnica, y sin intereses personales, porque siento que no hay convicción sobre el hecho de que los valores que aparecen en la microzonificación, los valores de amenaza sísmica, son pura decoración.

Primero habría que ver si se está de acuerdo o no con la amenaza sísmica y por qué, y qué cosas ameritan correcciones.

Segundo, se debería ver con qué valores están diseñando en países con amenaza sísmica similar, con la posibilidad de hacer reducciones con argumentos como los que acaban de oír, pero que sean decisiones informadas en estos aspectos técnicos.

Tercero, sobre la posibilidad de quitar los mínimos o no, me costaría mucho trabajo decirlo porque depende de que se consideren algunos escenarios sobre los resultados del análisis de sitio. No se trata de dejarlos o no, sino de analizar qué pasa en varios casos específicos, porque no podemos tomar decisiones basados en un solo caso.

#### Pregunta (Carlos Castaño)

La ley de microzonificación incrementó tanto las zonas de reforzamiento de colegios que los convirtió en una especie de búnkeres. Debido a la inminente contratación de los otros colegios; ¿qué tan viable es que la norma se flexibilice por lo menos en sus aspectos estructurales extremos o no confiables actualmente?

#### LUIS ENRIQUE GARCÍA

La Secretaría de Educación no está obligada a tomar medidas extraordinarias. Lo está haciendo voluntariamente. Es un programa que lleva ya bastantes años, que nació a raíz del sismo del eje cafetero.

Al no estar obligados, entiendo que le preguntaron a la comisión nacional





si habría la posibilidad de hacerlo a un nivel de seguridad menor, y creo que en un aparte de la norma se dice que se pueden efectuar este tipo de modificaciones. En mi opinión, el que no estén obligados los pone en una posición excepcional.

#### **Pregunta (Francisco Salazar)**

¿Qué tan confiables son los espectros de velocidad y desplazamiento construidos a partir de una señal discreta con un doscientosavo de segundo, haciendo dos iteraciones, corrigiendo por línea base y utilizando filtros arbitrarios?

#### **JORGE ALBERTO RODRÍGUEZ**

No tengo claro si se está refiriendo a los espectros que uno calcula en los análisis de respuesta, o a los que se registran con acelerógrafos porque la respuesta a la pregunta va enfocada a la clase de análisis que se realiza con las señales de registro de un acelerograma, por ejemplo. No sé exactamente a cuál se está refiriendo.

#### **FRANCISCO SALAZAR**

Cuando uno se pone a analizar toda esta información de acelerogramas, se da cuenta de que se depende mucho

de los *softwares* que traen los fabricantes, que calculan la velocidad y el desplazamiento, pero para hacer esos cálculos hay que efectuar integraciones, numerosas correcciones por línea base y después utilizar ciertos filtros para llegar a desplazamientos más o menos sensatos.

#### **JORGE ALBERTO RODRÍGUEZ**

Cuando se tiene el registro de aceleración, se pueden hacer algunas correcciones a la señal, como filtrarla o diezmarla, cambiar el paso del tiempo, etc. En lo que hay que tener cuidado es en dar esos pasos que uno podría estar obligado a tomar, por ejemplo porque algunos softwares limitan el número de datos y aceleraciones en el tiempo, para que el contenido frecuencial de la señal no cambie los resultados del análisis. Es decir, uno podría hacer un cambio en el muestreo de la señal, por ejemplo pasar de cada 0,05 a cada 0,02 segundos, efectuando un diezmo de diez veces pero sin afectar el contenido frecuencial. Obviamente, si se cambia el contenido frecuencial de una señal sísmica se alteraría el resultado del espectro de respuesta. Esa sería una de las recomendaciones que daría.

#### **Pregunta (Carlos Bernal)**

Ahí lo que se está quitando son las señales que no se logran con esa resolución. Entonces la pregunta que habría que hacerse es para qué sirve en el problema lo que estoy quitando. O sea, una señal menor de 0,002, más pequeña que eso, que tiene más oscilaciones, en qué medida puede ser útil o no.

#### **LUIS ENRIQUE GARCÍA**

Le voy a dar unos ejemplos. En un terremoto que se presentó en Turquía en 1999, si uno no corregía por línea base la señal emitida por un acelerógrafo cerca de la falla le daba un desplazamiento, no volvía a cero el desplazamiento. Otro caso: si usted integra dos veces la señal le da desplazamiento, y el desplazamiento que le muestra en el registro no es real porque se movió el continente con respecto al otro. Cuando eran digitalizados era más complicado, pero hoy no. Los desplazamientos que tengo son los verdaderos o los que me da la línea base.

#### **Pregunta**

En el Decreto 074 se menciona que en las edificaciones de tipo 2 hay un plazo de tres años para realizar los estudios de reforzamiento y tres años para ejecutarlos. ¿Se ha pensado en aplicar una sanción a quienes no lo hayan realizado, ya que el tiempo venció en el 2005?

#### **LUIS ENRIQUE GARCÍA**

No es el Decreto 074 sino la Ley 400. Hay dos cosas: la Ley 400 era a seis años, pero luego una ley que se promulgó en la administración Pastrana, en diciembre de 2003, la amplió para todas las zonas de amenaza sísmica y para todos los sitios de servicio de salud. Según esta ley, a cualquier centro de salud del país tienen que hacerle rehabilitación. Entiendo que en la comi-



sión hay un borrador del proyecto de ley que está esperando la posesión del nuevo Congreso para extenderla nuevamente. En la versión vieja no sé si hayan aplicado algunas sanciones, una de las cuales era cerrar el edificio, esto es, una sanción al edificio y no al funcionario.

### Pregunta (María Cecilia Sierra)

¿Qué se está esperando para realizar diseños con interacción suelo-estructura? En todo el encuentro vi estructuras apoyadas en algo que no es rígido, sino que hay una discretización del suelo como un medio flexible, lo cual genera fuerzas muy grandes en las estructuras que no son reales, como se ve en los casos presentados.

### ÁLVARO J. GONZÁLEZ

Lo que pasa es, y espero que al doctor García no se le haya olvidado, que en el código está que con interacción suelo-estructura sólo se permite llegar hasta el 80% de la aceleración máxima.

### Pregunta (Carlos Riveros)

Quién tiene la razón en el debate de microzonificación, ¿los ingenieros estructurales o los ingenieros geotecnistas? Además, ¿en qué están de acuerdo y en qué definitivamente están en desacuerdo para hacer una microzonificación hoy?

Creo que en lo que sí estamos de acuerdo tanto ingenieros estructurales como geotecnistas es en hacer estructuras seguras. (Gabriel Fernández)

### LUIS GUILLERMO AYCARDI

Creo que hoy los ingenieros geotecnistas borraron la microzonificación y quien primero la criticó y la sancionó fue Álvaro González. De aquí en adelante los únicos que emplearán la microzonificación serán aquellos que no puedan pagar un estudio especial, por tiempo o por dinero.

### ÉDGAR RODRÍGUEZ

Pienso que la microzonificación sísmica de Bogotá como proyecto es mucho más que los cinco espectros que salieron de ese estudio. Hubo cerca de quince subproyectos

donde se analizaba la parte de investigación sísmológica, tectónica, geológica, tanto regional como local, y la investigación geotécnica que se hizo en el país; eso está vigente hoy en día y nadie puede decir que está mal. Quiero aclarar que la definición de espectros no la hizo Ingeominas, fue una actividad específicamente de la Universidad de los Andes; la verdad no sabemos qué pasó dentro del grupo, con sus asesores, que sacaron el mapa con esos espectros, pero esa es una de las quince actividades de la microzonificación.

### LUIS GUILLERMO AYCARDI

Es a los espectros de la microzonificación a lo que me refiero...

### GABRIEL FERNÁNDEZ

Creo que en lo que sí estamos de acuerdo tanto ingenieros estructurales como geotecnistas es en hacer estructuras seguras. El otro punto en el que estamos de acuerdo es en que hay que modificar los espectros. A ese respecto hay que enfatizar en que Ingeominas ha estado analizando los elementos de juicio para efectuar una modificación completa y sería, que nos va a llevar seguramente a bajar un poco estos niveles de fuerza, estas cargas. Pienso que es una actitud positiva y no veo necesidad de hacer esta argumentación retórica; hay que ser más bien claros: tenemos los elementos de juicio para realizar las modificaciones necesarias.



### Pregunta (Mario Camilo Torres)

¿Considera que aspectos como el ISE y la respuesta de sitio son verdaderamente importantes a la hora de analizar la respuesta de una estructura, o como lo dijeron los estructurales, es ciencia ficción?

### GABRIEL FERNÁNDEZ

Yo creo que no es ciencia ficción. Realmente hay que analizar el suelo, porque ayuda a mejorar el diseño. La interacción suelo-estructura es buena. Lo que estamos viendo es que las señales que se están dando para el diseño son muy altas, y lo son por muchas razones; por fortuna, los datos de es-



tos estudios que se están haciendo son claves para efectuar una corrección completa y segura. Hay que enfatizar lo positivo y disminuirle a la retórica.

### ADOLFO ALARCÓN

Yo, como director de Ingeominas de la época, quisiera decirles que me habría gustado dedicarle más tiempo a la parte técnica en su momento; hoy, después de haber vuelto a mis labores académicas en la Universidad Nacional y especialmente después de haber participado en el proceso de evaluación de los estudios de efecto local, tengo otra posición y otra visión, la que quiero compartir brevemente porque creo que es importante.

En primer lugar, tanto geotecnistas como estructurales tenemos unos paradigmas de los que a veces no nos podemos desprender. Se ha presenta-

en el tema de las propiedades dinámicas. Es más, diría que a pesar de los estudios de efectos locales, no hemos avanzado mucho en la caracterización dinámica, en eso debemos tener cuidado. Se ha vuelto como un ejercicio en el que todo el mundo interviene, dibuja curvas casi perfectas; incluso muchos profesores del área estructural también participan en ese proceso. Todos estamos convencidos de que hay que revisar, modificar y corregir los valores de microzonificación, por lo que considero que se podría tomar una decisión política, como suspenderlos mientras se corrigen. En el tema de propiedades, de cómo se calculan los espectros, los modelos, si no se tiene en cuenta el efecto de la interacción suelo-estructura, habría que introducir el factor de reducción por efecto suelo-estructura.

de los códigos, es una simplificación, es un modelo que tiene limitaciones, incluso desde el punto de vista estructural. Probablemente, en roca podamos llegar a acordar unos espectros estándar de diseño; entiendo la necesidad en la práctica de tener unas herramientas, pero los estructurales tienen una tarea imposible: reflejar en un solo instrumento el efecto de los campos, el tipo de estructura, el perfil.

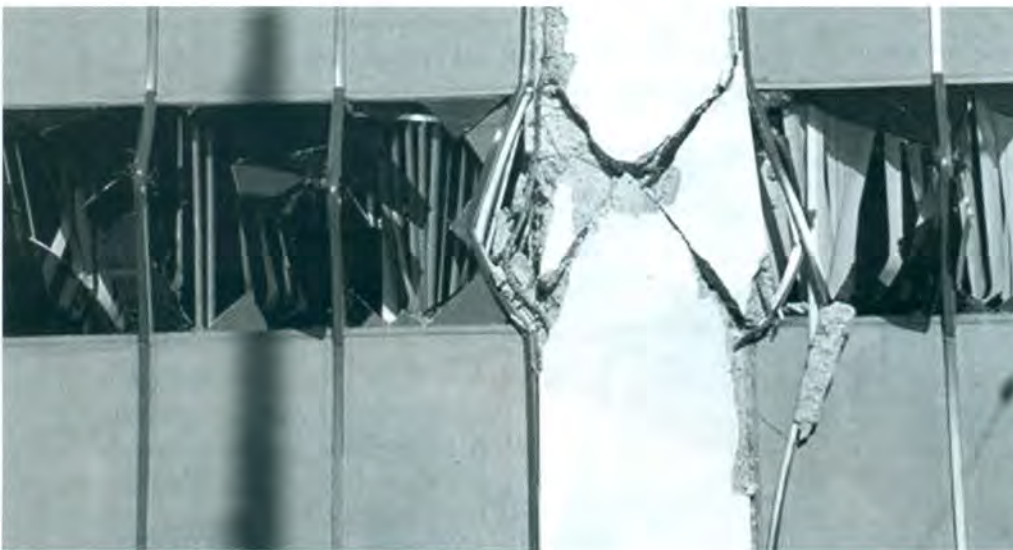
Una alternativa sería plantear desde los códigos el cambio de este instrumento como elemento de diseño para ciertos casos, pero no se puede pretender que esa herramienta combine todos los efectos para efectos de diseño; la interacción de todas las estructuras no es igual con los sismos de los diferentes campos y mucho menos si tenemos distintas condiciones de perfil y diversas propiedades esfuerzo-deformación. Pienso que el método es perverso en sí mismo y mi posición es quitarlos todos. Estamos discutiendo sobre algo en lo que realmente ninguno tiene la razón, por eso hay que buscar un camino intermedio.

### LUIS GUILLERMO AYCARDI

Quiero agradecerles a todos los asistentes a este foro por su participación. El evento todo, el foro y este encuentro no tienen precedente alguno. La prueba es que deseamos seguir discutiendo y opinando sobre el tema. Creo que a pesar de que ha habido discrepancias, nos han unido para trabajar más en conjunto, dispuestos a participar en las modificaciones que nos proponga el doctor Ramírez, con el propósito de que en febrero del año entrante se tenga una modificación total a lo que estamos viviendo. Les agradezco a todos su asistencia. 🏹

do mucha discusión sobre el tema del pico a los tres segundos. Ayer mostré cómo el tema de las curvas que uno usa para calcular la respuesta es muy sensible al pico, incluso a que haya pico o no; creo que somos muy simplistas

Veo que el problema también viene del área estructural, los conceptos y las metodologías tienen que cambiar. El espectro es un concepto que en un momento dado también debe revisarse. Lógicamente vino de los estructurales,







Por Cristina Salazar Perdomo

## Javier Botero Álvarez

Un académico en el otro lado

Ingeniero Civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería, Ph.D. en Física de la Universidad del Estado de Louisiana, Baton Rouge, Estados Unidos. Investigador en sistemas complejos, física atómica y condensación de gases cuánticos, entre otros. Ha sido profesor visitante en la Universidad de Ulm en Alemania y en la Universidad de Tennessee en Estados Unidos. Fue director de Datos Atómicos y Moleculares en el Organismo Internacional de Energía Atómica. En la Escuela fue profesor titular y ocupó el cargo de Vicerrector Académico. En septiembre del 2002 entró a formar parte del equipo de trabajo del Ministerio de Educación Nacional como director de Educación Superior y un mes después fue nombrado como Viceministro de Educación Superior.

Javier Botero Álvarez es ingeniero civil de la Escuela. Profesor e investigador desde sus inicios como profesional; inquieto lector, consagrado al trabajo y a su familia; desde hace unos años varió su dedicación a la academia al asumir el cargo de viceministro de Educación Superior. Botero Álvarez habló para la *Revista de la Escuela* sobre su experiencia profesional y personal en relación con el presente y el futuro de la educación en Colombia.

*Han pasado más de 20 años desde que se graduó. Reconoce que hay una brecha entre la formación que recibían los profesionales de aquella época y la de hoy, cuando el Estado ha manifestado abiertamente su compromiso con la educación superior en beneficio de la sociedad. Destaca que en su época de estudiante las*

*relaciones humanas eran muy fuertes. Claro, en ese entonces la Escuela tendría 500 estudiantes, una décima parte de la población actual, y las universidades estaban marcadas por el interés de formar excelentes profesionales en un área específica del conocimiento. Esto ha cambiado en las últimas décadas. Las instituciones buscan ese conocimiento universal al que hace honor la palabra universidad, en aras de la formación integral del estudiante. El avance tecnológico, además, hace que el contexto educativo de hoy diste mucho del de dos décadas atrás.*

*Señor viceministro, cuando usted era estudiante, ¿sentía que le faltaba algo a su formación o encontró ese vacío en el ejercicio de la profesión? Yo era consciente de que algo*



me faltaba y lo busqué en otras fuentes. Esto depende de cada estudiante en particular. Lo cierto es que hoy en día es mucho más importante esa formación integral para tener acceso a diferentes áreas.

*En este momento, ¿considera que es viable el modelo de institución dedicada a la formación de un solo tipo de profesional, como ocurrió por ejemplo con las escuelas de medicina o de ingeniería?*

No me atrevería a aseverar eso porque uno ve, por ejemplo en Francia, la experiencia de las grandes escuelas. Obviamente, los estudiantes entran después de dos años de recibir una formación más amplia, que incluye otros aspectos transversales. Aun en Alemania hay lo que se llama Fachschule, que brinda una formación muy especializada. No creo que esté totalmente descartado, pero sí hay ventajas al recibir una formación más amplia, en particular para el nivel profesional universitario. Por otro lado, también hay grandes necesidades de una formación tecnológica muy definida y especializada. Uno de los mayores retos es, precisamente, combinar las dos cosas.

*Precisamente sobre esa formación técnica y tecnológica, en Colombia hay un choque entre profesionales, técnicos y tecnólogos. ¿En otros países varía el concepto que se tiene de esos niveles?*

Sí, hay diferencias grandes entre los países, cosa que se ha intentado disminuir. Europa está realizando un proceso muy importante que tanto Colombia

como América Latina deben mirar muy de cerca para ver qué pueden aprovechar. Se trata del Proceso de Bologna, en el que todos los países, con tradiciones muy distintas, están tratando de alinearse un poco. Se propone una formación escalonada de tres, cinco y siete años. Es muy interesante. Ahora, el nivel tecnológico y técnico

profesional no es muy común en otras latitudes. En países latinoamericanos los hay, en España está el técnico superior, que no se homologa exactamente con el nivel ELE de Bologna, pero se asimila y llegará allí. Equivale a un tecnólogo en Colombia. En Latinoamérica hay grandes diferencias: México y Chile tienen un sistema parecido al nuestro. Pocos países tienen los tres niveles, el técnico profesional, el tecnólogo y el profesional universitario. Es algo que habría que revisar.

*En Colombia se mantiene la idea de que un nivel lleva a otro, no de que cada uno sea independiente.*

En el ministerio —y aquí sí hablo más desde mi cargo— hemos tratado de promover la formación por ciclos. Hay quienes piensan que eso no es posible. Yo estoy convencido de que sí y además de que se puede hacer muy bien. No debemos pensar que es como un trampolín sino como una

**La idea es que un estudiante que curse un primer ciclo pueda ingresar al mercado laboral con unas competencias y un título que le faciliten el acceso a un trabajo.**

puerta giratoria entre el sector de formación y el sector laboral. La idea es que un estudiante que curse un primer ciclo pueda ingresar al mercado laboral con

unas competencias y un título que le faciliten el acceso a un trabajo; si después quiere y tiene la posibilidad de retornar, puede continuar en un segundo ciclo con esa misma filosofía: formar, desarrollar unas competencias claras que lo habiliten para un nivel de trabajo distinto y, al mismo tiempo, para continuar en un tercer ciclo.

*Entendido así, no habría por qué mirarla como formación de primera, de segunda o de tercera. El profesional se siente más que el técnico...*

Claro, ese es un problema grave aquí en Colombia. Sucede entre el médico y la enfermera, y aún más entre el auxiliar de enfermería, la enfermera y el médico. La enfermera es tan profesional como el médico, pues ha hecho un programa de cuatro años. Eso sucede en todas las áreas. Es un problema muy arraigado en la cultura, que en parte se relaciona con el origen de la formación técnica y la tecnológica, concebidas como educación no formal, que en un momento se llamaron "carreras intermedias", "carreras cortas". Hoy en día el concepto ha cambiado porque son saberes distintos que pueden complementarse. Un técnico

profesional, por ejemplo, puede dominar un área y ser tan importante o más que el mismo ingeniero. Lo mismo ocurre en el nivel tecnológico. Pienso que todavía hay un camino largo por recorrer para que esto sea aceptado y apropiado en la sociedad en general, incluidas las instituciones de educación superior.

### De la academia al gobierno

*Hace unos años usted estaba en la academia y quién sabe cómo habría recibido la propuesta de los ciclos propedéuticos. Ahora que está "del otro lado", ¿ha cambiado su percepción con respecto a la labor del gobierno?*

Obviamente, ahora la entiendo mucho más. Además, estoy convencido de que el hecho de venir del sector educativo directamente ha sido una ayuda grandísima porque, primero, uno lo conoce. Eso genera credibilidad. No está teorizando, tratando de reglamentar y legislar algo que desconoce. Segundo, el estar aquí lo aterriza a uno en el sentido de que no siempre la idealización de la academia es lo más conveniente para el país. Uno puede pensar que lo mejor sería tener ingenieros con seis años de formación, que supieran de todo y fueran expertos en todo. Sí, sería buenísimo, pero no es práctico, no es económicamente viable, y al país, en general, no le conviene. Entonces ahora tengo esas dos visiones que se complementan y facilitan el trabajo.

*Específicamente, qué ha podido comprender ahora, en el ejercicio del cargo.*



Por ejemplo, la importancia de contar con unos lineamientos de política clara para calidad. Algo más que hoy en día me sorprende pero que cuando estaba en la Escuela como vicerrector simplemente aceptaba, es la deserción. Decía “Sí, aquí entran 200, al segundo pasan 140 o 120, después 80 y se gradúan 30. Así es la vida: unos pasan y otros no”. Aquí, hoy, afirmo que esto es inaceptable. Una de las funciones de la universidad es precisamente formar; si unos vienen con falencias, resolvámoselas, ayudémosles, hagámoles más actividades propedéuticas, de nivelación. No es lógico que de un curso apruebe sólo el 10%. Ahí hay un error. Puede que uno piense “Si no pasaron el examen, pues no pasaron”. Pero cuánta responsabilidad tienen el profesor y la institución en general. Ahora lo veo desde una perspectiva distinta.

*En este momento, con la experiencia adquirida en su cargo, ¿piensa que los académicos son dogmáticos?* Una de las características de un profesor es que sabe más que sus interlocutores. El profesor se para al frente de 40, 50 o 100 personas a decirles cómo es la cosa. Y normalmente, en su área, tiene la razón. Quizás por eso se tiende a pensar que siempre la tiene. Creo que sí es muy común en nosotros los académicos, porque todavía me considero uno de ellos, que seamos un poco más testarudos o por lo menos que nos tengan que convencer con argumentos. No es tan fácil hacernos cambiar de parecer.

*Por otra parte, tampoco debe ser fácil hacerle entender a la comunidad lo que a usted le consta porque es su cotidianidad, porque tiene las cifras y conoce la realidad desde otra perspectiva.*

Eso también se aprende un poco. Al principio, si me criticaban, me afectaba. Ya no tanto... se va curtiendo la piel.

*Cuando vuelva a la academia — porque va a volver—, ¿qué no haría o qué cambiaría luego de vivir esta experiencia, de haber participado en todo el proceso de acreditación y de registro calificado de numerosos programas e instituciones, después de conocer las brechas y las necesidades..*

Algo supremamente importante en un cargo de éstos es aprender a escuchar y a concertar. No fue fácil para mí y al principio sé que cometí errores. Con un grupo de trabajo analicé y dije “nos vamos por aquí”. Pues resulta que existe todo un sector de alto nivel de formación y de opinión que hay que saber aprovechar. Considero que ese es uno de los puntos que más tendré en cuenta cuando vuelva. Por otro lado, digamos que este trabajo me ha dado una visión mucho más amplia, no sólo nacional sino internacional. He tenido la oportunidad de participar en múltiples foros del sector de la educación superior en el mundo y he visto la importancia de la flexibilidad y la necesidad de combatir la deserción, porque genera frustraciones y problemas de los que de pronto el profesor no es consciente. Para él simplemente el estudiante perdió la materia; y de pronto para la directiva de la

institución el muchacho se fue. Pero ese muchacho que se fue tiene una vida y el impacto es tremendo. Es imperiosa una formación mucho más acorde con la realidad. Por ejemplo, en ingeniería se debe trabajar mucho en la parte curricular. ¿Qué sentido tiene que estemos enseñando hoy casi lo mismo que yo aprendí hace 25 años? Y lo que yo aprendí hace 25 años, era casi lo mismo que aprendió la generación anterior hace 50. Creemos que hay que aprender a hacer todo esto, aprender integrales múltiples y derivadas múltiples y resolver sistemas de ecuaciones diferenciales y problemas de

### Sobre la autonomía

*Desde su cargo y con base en su experiencia académica, ¿cree que las universidades son autónomas?*

Huy, claro. Fíjese que hay una confusión en lo que se entiende por autonomía. Para mí, no hay nada más autónomo que una empresa privada. El empresario hace lo que quiere pero obviamente tiene que cumplir la ley, y si está en un sector relacionado con los ciudadanos, tiene que acatar ciertas normas. El problema con la autonomía universitaria es que se quiere llevar realmente a un extremo, al de hacer lo que se quiera. La



física de tal manera... o aprender tal método de cálculo que realmente no estamos tan seguros de que forme y desarrolle las competencias que hoy se requieren, y aprender algo que —de eso sí estoy seguro— no va a volver a utilizar nunca. Se debe repensar esto a fondo. En Colombia algunas instituciones lo están haciendo; poquitas, pero están empezando a hacerlo.

autonomía es hacer lo que se quiere dentro de un marco constitucional, un marco legal y además un marco de calidad. Es cuestión de responsabilidad social. Es no sólo potestad sino responsabilidad del Estado garantizar que eso se produzca. El ministerio no tiene por qué decirle a una institución “Abra tal o cual programa” o “Enseñe de esta u otra manera”, pero sí es su responsabilidad garantizar la calidad de la educación. Es lo que se ha hecho a través del Sistema de Aseguramiento de la



Calidad. Creo que la peor estafa es esa: un muchacho que cursa un programa de cinco años, con un esfuerzo enorme de tiempo y de dinero, se gradúa y resulta que lo que aprendió no le sirve, el cartón no le sirve. El Estado debe garantizar que lo que se quiera hacer, se haga bien; adicionalmente, las instituciones están recibiendo un dinero del público.

Un padre de familia, un estudiante, entregan un dinero muy importante para la familia con el propósito de recibir ayuda en un proceso de formación. El Estado tiene que ser responsable de eso. Además, hay una grandísima asimetría de información. El estudiante normalmente llega a una institución y no sabe mucho de ella. Llega porque sus amigos van allá o porque su papá salió de allá, pero nada más. Y eso que está haciendo una de las inversiones más importantes de su vida. Para un padre de familia, ese es el mayor legado para sus hijos. ¿Cómo va el Estado a permitir que eso se desperdicie y se despilfarre? No es cuestión de tener o no autonomía.

*En cuanto a la acreditación y al registro calificado, ¿las instituciones pueden confiar en que los pares están haciendo bien su tarea, que son idóneos?* Esa es una gran preocupación. Se trata de hacer una buena selección y brindar una capacitación apropiada, pero como en todo proceso en el que participa una multiplicidad de

actores, existe un riesgo. Sin embargo, el hecho de que se trabaje con pares académicos, o sea con profesores en ejercicio, da cierta tranquilidad. Por tal razón todo lo de Conaces se trabajó así. Había otra alternativa, como el proceso que tenía el Icfes, en el que unos supervisores iban a visitar la institución. El riesgo ahí es mucho mayor. Aquí por lo menos son pares, personas que están en una institución y conocen el



área. Además, saben que después de visitar una institución los pueden visitar a ellos. En cuanto a si siempre el par es idóneo... se han presentado casos en que no ha habido la idoneidad esperada, pero es parte del proceso de depuración, ¿no?

*Con base en el conocimiento que tiene acerca del país y de otros, ¿cómo está la universidad colombiana con respecto a Latinoamérica?*

Es difícil decir cómo está la educación superior colombiana

porque es muy heterogénea. Colombia tiene instituciones que pueden competir con las mejores de Latinoamérica, sus egresados se enfrentan hoy a los mejores egresados de cualquier universidad, no sólo de Latinoamérica sino del mundo. Ahora, eso en la punta. Si vamos a los promedios, considero que, en calidad, Colombia está en el promedio latinoamericano, y en algunas áreas quizás se encuentre por encima.

*La opinión internacional de la educación en Colombia es que va por buen camino. Claro, falta mucho por recorrer.*

Fallamos en cobertura. Realmente se deja mucha gente por fuera. Estamos muy mal en

el nivel técnico y en el tecnológico, donde hay un desprestigio y un posicionamiento muy bajos de la formación.

Ocurre en casi toda Latinoamérica. Brasil ha trabajado mucho en esa materia y México viene haciéndolo para mejorar la situación. En resumen, diría que el país va bien. La opinión internacional de la educación en Colombia es que va por buen camino. Claro, falta mucho por recorrer.

*¿Qué satisfacciones le ha dejado su cargo?*

Varias. Por ejemplo, haber implantado un sistema de aseguramiento de la calidad, a mi modo de ver bastante sólido, que tiene procesos, infraestructura, condiciones y una parte de resultados, de los Ecaes, del Observatorio Laboral,

para ver realmente lo que está pasando con la calidad. El sistema de información, que era una debilidad grandísima del sector. Haber puesto sobre la mesa que la educación superior tiene que dejar de ser tan elitista, tanto académica como social y geográficamente. Que Bogotá cuente con una cobertura cercana al 50% y la mayor parte de los departamentos llegue a duras penas al 10%; que en esos departamentos toda la oferta esté en la capital; o sea, que un muchacho en un municipio que no es capital, en un departamento que no es uno de los cuatro líderes, tenga menos del 5% de probabilidad de llegar a la educación superior, es absurdo. Y también haber generado estrategias como los Centros Regionales de Educación Superior. Todos esos logros me tranquilizan, porque me demuestran que no he perdido el tiempo.

### De cara al futuro

*En su experiencia dentro y fuera del país, ¿ha tenido la oportunidad de hablar con los jóvenes? ¿Qué están esperando ellos?*

Yo me reúno dos veces por semestre con los representantes estudiantiles de los consejos superiores de las universidades públicas, que obviamente son los muchachos más politizados. Ahora, ellos están esperando otras cosas. He asistido a algunos foros con los estudiantes, pero se vuelve más un tema de política. El otro asunto, que uno quiere abordar y por eso lo propone, no se toca. Debo aceptar que no he tenido tanta oportunidad de



dialogar con los estudiantes en este sentido.

*Nadie sabe a ciencia cierta qué va a hacer a la vuelta de cinco años. Supongo que cuando usted estudió ingeniería civil, se imaginaba trabajando en esa área. Sin embargo, después fue profesor y luego terminó un doctorado en física e hizo investigación. Ahora está en un cargo público. Mirando los perfiles profesionales de hoy y sumando las muchas y mejores oportunidades que tienen los estudiantes de esta generación, uno se pregunta entonces para ejercer qué y en dónde se forman los profesionales de hoy...*

Claro, por eso precisamente creo que son fundamentales el currículo flexible y una buena formación integral, en ese orden. Porque cada vez más sucede que un profesional cambie fácilmente de sector, y esto puede suceder varias veces en la vida. Obviamente la universidad o la educación superior debe tener un perfil más o menos concreto para que el egresado también pueda conseguir un trabajo específico. Lo importante es que desarrolle las competencias que le permitan ir en diversas direcciones y aprovechar lo que se vaya presentando. Sí, una persona que estudió ingeniería civil puede trabajar 40 años en construcción y ya. Eso no tiene nada de malo. Pero otra puede comenzar a trabajar en construcción, pasar a

administrar una firma, después manejar toda la parte financiera y terminar de banquero. O empezar de ingeniero, después de físico y luego en el sector público. Creo que en la educación superior hay que considerar esto en el currículo. Hoy en día el mercado laboral es mucho más movido de lo que era hace unos años.

**Extraño el contacto con los estudiantes y ese ritmo un poco más calmado, con menos urgencias.**

*Usted sabe tres idiomas: inglés, alemán y español. Dónde aprendió los otros dos, ¿en el colegio?*  
Noooo, ojalá.

*La pregunta se debe a que es interesante analizar el caso del bilingüismo. Figura entre los propósitos del Distrito y del programa Visión 2019, y parece que estamos crudos...*

A ver: hay programa nacional de bilingüismo, que se está liderando desde el ministerio.

Existen unas metas y unos niveles. Se está trabajando primero con los docentes. Una de las condiciones específicas de las resoluciones en educación superior es que todo programa académico debe tener un programa en segunda lengua. Esa es condición indispensable. Claro que estamos lejos. Fijese, yo estudié inglés diez años en el colegio, con tres clases semanales, y salí que a duras penas podía

mantener un diálogo sencillo. Hasta cuarto bachillerato (de aquella época) seguía uno con el verbo *to be* y con unos profesores que no creo que hablaran inglés. Era realmente fatal, lamentable. En el último año de universidad pensé en irme a estudiar fuera del país. Necesitaba el inglés. Entonces empecé a estudiar todas las tardes y después, para presentar el Toefl, hice un curso intensivo de cuatro horas diarias. Y claro, ahí uno paga lo que sea. Llegué becado a Estados Unidos y... fue terrible. Aunque la beca incluía un buen curso de tres meses, a los dos de estar estudiando debía dictar un laboratorio en inglés. Fue la peor pesadilla. Aprendí a palo. Tenía que pararme frente a 20 nativos a decirles qué tenían que hacer en el laboratorio. Sí, la falta de una segunda lengua es una de las mayores debilidades. Es parte de lo que hay que hacer: generar mayor conciencia en la población sobre la importancia de un segundo idioma.



*¿Extraña la docencia?*

Sí. Extraño el contacto con los estudiantes y ese ritmo un poco más calmado, con menos urgencias.

*Cuando vuelva a ser profesor, pensando en todo esto que lo agobia ahora, que la deserción, que la cobertura... ¿será distinto?*

Claro. Con el tiempo, uno cambia mucho como profesor. Bueno, no sé si todos, porque algunos nunca lo hacen, pero muchos sí. Las clases que dicté recién graduado, hace 20 años... no, hace 25 años... ¡hace 25 años! No, esas clases nada que ver. Como que uno no buscaba en el estudiante lo que era. Hoy quisiera despertar el interés del estudiante. Ese es el objetivo porque uno en una clase no es capaz de transmitir nada. Ese era el problema antes, que uno pensaba en la transmisión del conocimiento. Hoy estoy plenamente convencido de que esa no es la idea.

*¿Considera que sacrificó a su familia al asumir este cargo?*

Primero que todo, debo decir que tengo una familia muy especial. Yo puedo pasar aquí catorce horas diarias, e incluso hay semanas en las que no alcanzo a encontrarme con mis hijas. De todas maneras, están más grandes y es distinto. Y mi señora me ha dado un apoyo total. Entonces no creo que lo hecho haya sido a costa de la familia. Sí he sacrificado tiempo con ella, pero hemos encontrado también otras cosas valiosas.

*¿Qué quiere hacer cuando salga de aquí?*

Quiero volver a la academia. 🐦



## La transmisión de energía eléctrica en las décadas venideras

Tomado y adaptado de *Scientific American*, julio de 2006

### EL PROYECTO DE LA SUPERRED CONTINENTAL DE TRANSMISIÓN ELÉCTRICA (primera parte)

En la tarde del 14 de agosto de 2003, el fluido eléctrico no llegó a Nueva York y más de ocho millones de habitantes de la gran urbe quedaron sumidos en la oscuridad, junto con otros 40 millones de personas del noreste de Estados Unidos y del estado de Ontario en Canadá. ¿Qué ocurrió? Simplemente, que una planta generadora de energía en Ohio falló, la red de distribución se sobrecargó, las líneas de transmisión de alto voltaje se recalentaron y se dilataron hasta alcanzar el nivel de los árboles y entraron en cortocircuito. Este incidente, y otro aún más extenso que afectó a más de 56 millones de personas en Suiza e Italia, llamó la atención sobre los problemas que aquejan a lo que podríamos denominar el sistema circulatorio de la civilización contemporánea: la red de interconexión eléctrica para transportar energía a millones de habitantes en el planeta.

En América del Norte, la red de distribución se ha construido, paso a paso, durante más de cien años. Actualmente es una estructura con un costo superior a los tres trillones de dólares y una infraestructura que cubre el continente con más de cien millones de kilómetros de líneas de transmisión, cuyas tensiones pueden alcanzar los 765.000 voltios. A pesar de la importancia de la red, nadie tiene control sobre el mantenimiento, la operación y protección de la misma. Otro tanto podemos decir sobre la transmisión de la energía en Europa.

Los apagones de 2003 han llamado la atención de las entidades gubernamentales que tienen a su cargo el suministro de la electricidad, y junto con el sector industrial se han unido los esfuerzos de la investigación en nuevos materiales con la ingeniería para lograr el diseño de sistemas de distribución de energía más confiables y con capacidades autónomas de recuperación en caso de falla. Sin embargo, estas acciones no son suficientes y la transmisión de potencia eléctrica en las próximas décadas enfrentará problemas de fondo, cuya solución deberá satisfacerse con propuestas de ingeniería basadas en nuevos desarrollos que nacen directamente de la investigación en ciencia pura. La ingeniería del futuro deberá integrarse plenamente con la ciencia.

La demanda de energía eléctrica —cada vez mayor—, así como el agotamiento inminente de los combustibles fósiles y su sustitución por otros más limpios, harán necesario el desarrollo de una ingeniería que pueda incorporar los nuevos descubrimientos de la física de bajas

temperaturas y el uso del hidrógeno como combustible alternativo. Las entidades distribuidoras de electricidad, ante la alta demanda, tendrán que elevar los voltajes y las corrientes de transmisión, pero se llegará al límite del millón de voltios, en el cual la intensidad de los campos eléctricos romperá la capacidad aislante de las líneas, produciendo efectos de corona y cortocircuitos. Por otra parte, si se aumentan las corrientes, el recalentamiento y la dilatación de las líneas serán altamente peligrosos.

Para hacer frente a este problema, se ha propuesto un nuevo diseño denominado la Super Red Continental (*Continental SuperGrid*). Se trata de una nueva malla de transmisión de energía que se irá construyendo junto a la red actual, fortaleciendo su capacidad y su confiabilidad de manera que, al cabo de unas pocas décadas, la nueva red sustituirá a la antigua y podrá transmitir a grandes distancias no sólo energía eléctrica limpia, confiable y barata, sino también hidrógeno para almacenamiento de energía y para uso en medios de transporte.

Los estudios de ingeniería al respecto nos dicen que no se necesitará ningún descubrimiento diferente de los ya conocidos. La tecnología actual en el manejo de la energía nuclear, del hidrógeno y de la física de la superconductividad son suficientes para diseñar y construir la Super Red Continental; sólo faltan la cooperación y la voluntad política que brinden el apoyo necesario para esta nueva visión de la ingeniería.

Las líneas de transmisión basadas en materiales superconductores transmitirán la energía eléctrica con una eficiencia casi perfecta y permitirán la generación a grandes distancias de los sitios de consumo, sin peligro de fallas locales. La conexión de la Super Red a las nuevas plantas generadoras ofrecerá dos usos simultáneos: la transmisión de la

energía eléctrica y la conducción de hidrógeno líquido, el cual a su vez se encargará de mantener las bajas temperaturas que garantizarán la superconducción de los materiales transmisores de energía. En nuestra próxima entrega veremos en detalle las características de este megaproyecto de ingeniería del futuro

