

Abril - Junio de 2013

ISSN 0121-5132

P.V.P. Colombia \$12.000,00



Publicación admitida por Colciencias en el Índice Nacional de Publicaciones Seriadas, Científicas y Tecnológicas colombianas - Publindex - Clasificación tipo C  
Publicación incluida en Ulrichsweb.com™  
Tarifa postal reducida N.º 2013-107 4-72  
Servicios Postales Nacionales S.A.  
Vence 31 de diciembre de 2013 - ISSN 0121-5132

- Las bases de los TLC.
- Comparación entre el corte con láser de CO<sub>2</sub> de PMMA virgen y PMMA reciclados.
- Transmisión de energía eléctrica mediante inducción magnética en campo cercano.
- Calidad del agua lluvia.
- Aplicaciones de nanotecnología en la construcción de pavimentos.
- The Corporate Social Responsibility Pyramid.
- Ecuación de Butler-Volmer a partir de la mecánica cuántica.
- **NOTICIAS**  
Aniversario 126 de Sociedad Colombiana de Ingenieros



REVISTA DE LA ESCUELA COLOMBIANA DE

Ingeniería

90

- Las bases de los TLC.
- Comparación entre el corte con láser de CO<sub>2</sub> de PMMA virgen y PMMA reciclados.
- Transmisión de energía eléctrica mediante inducción magnética en campo cercano.
- Calidad del agua lluvia.
- Aplicaciones de nanotecnología en la construcción de pavimentos.
- The Corporate Social Responsibility Pyramid.
- Ecuación de Butler-Volmer a partir de la mecánica cuántica
- **NOTICIAS**  
Aniversario 126 de la Sociedad Colombiana de Ingenieros.

## CONSEJO DIRECTIVO DE LA ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA

**PRESIDENTE** GERMÁN EDUARDO ACERO RIVEROS

**VOCALES** MYRIAM ASTRID ANGARITA GÓMEZ  
SANDRA XIMENA CAMPAGNOLI MARTÍNEZ  
RICARDO QUINTANA SIGHINOLFI  
HÉCTOR ALFONSO RODRÍGUEZ DÍAZ  
JAIRO ALBERTO ROMERO ROJAS  
GERMÁN RICARDO SANTOS GRANADOS  
EDUARDO SILVA SÁNCHEZ  
JAIRO URIBE ESCAMILLA  
OSWALDO CASTILLO NAVETTY  
(representante de los profesores)  
JAVIER FELIPE CANO SUÁREZ  
(representante de los estudiantes)

**RECTOR** ROBERTO RÍOS MARTÍNEZ

**SECRETARIO** RICARDO ALFREDO LÓPEZ CUALLA

## REVISTA DE LA ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA

**DIRECTOR** JAIRO ALBERTO ROMERO ROJAS

**COMITÉ EDITORIAL** GERMÁN EDUARDO ACERO RIVEROS  
CLAUDIA RÍOS REYES  
PAULA XIMENA RÍOS REYES  
HÉCTOR ALFONSO RODRÍGUEZ DÍAZ  
RICARDO SALAZAR FERRO  
GERMÁN RICARDO SANTOS GRANADOS

**DIRECCIÓN EDITORIAL** CRISTINA SALAZAR PERDOMO

**EDICIÓN** **DISEÑO Y DIAGRAMACIÓN**  
JORGE CAÑAS SEPÚLVEDA  
**CORRECCIÓN DE ESTILO**  
ELKIN RIVERA GÓMEZ

**DIRECCIÓN COMERCIAL** EDITORIAL ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA

Versión digital disponible en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

AUTOPISTA NORTE AK 45 N.º 205-59  
TEL.: (57 1) 668 3600, EXT. 533  
[revista@escuelaing.edu.co](mailto:revista@escuelaing.edu.co)  
BOGOTÁ, D.C., COLOMBIA

LA ESCUELA Y LA REVISTA NO SON RESPONSABLES DE LAS IDEAS Y CONCEPTOS EMITIDOS POR LOS AUTORES DE LOS TRABAJOS PUBLICADOS. SE AUTORIZA LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL DE LOS ARTÍCULOS DE LA REVISTA SI SE CITAN LA FUENTE Y EL AUTOR.

# Contenido

## 5 / EDITORIAL

### Problemas frecuentes de suelos en la construcción de edificaciones urbanas

*Jorge Enrique Durán Gutiérrez*

## 7-10

### Las bases de los TLC

*Eduardo Sarmiento Palacio*

Cuando la iniciativa del TLC empezó a discutirse en el gobierno de Clinton, se consideraba que el libre mercado era una bendición que favorecía a todos los participantes. De acuerdo con el principio de ventaja comparativa, esperaban que la reducción de los aranceles y el libre movimiento de capitales propiciaran una elevación de la productividad y los salarios que favorecieran a los dos socios.

## 11-15

### Comparación entre el corte con láser de CO<sub>2</sub> de PMMA virgen y PMMA reciclados

*Diego Reyes Jiménez - Diego Ramos Acosta*

El corte de acrílico con láser de CO<sub>2</sub> es un proceso muy utilizado dentro de la industria de la transformación de plástico debido a la excelente calidad del corte y a su precisión. En el mercado existen dos tipos de acrílico: el fabricado con metil-metacrilato virgen y el fabricado con metil-metacrilato reciclado. En este estudio se realizaron pruebas de corte láser de CO<sub>2</sub> de estos dos materiales, con distintos parámetros de velocidad y potencia, para observar cuánto se afectan estos materiales por el calor generado durante el proceso de corte y qué diferencias hay en la calidad de corte.

## 17-28

### Transmisión de energía eléctrica mediante inducción magnética en campo cercano

*Hernán Paz Penagos*

La realización de dos experimentos para el transporte inalámbrico de energía eléctrica en regiones de campo cercano (reactivo y zona de Fresnel), en los cuales se aplicó el principio de inducción magnética y se usaron solenoides autorresonantes en un régimen de acoplamiento cercano a 1, demostró ser eficiente en la transferencia de electricidad a distancias hasta de cuatro veces el radio de la bobina, con una eficiencia del 60 %.

# Contenido

## 29-36

### Calidad del agua lluvia

*Jairo Alberto Romero Rojas - Iván Camilo Andrade Santana - Felipe Nicolás Mora Rusinque*

Para aprovechar el agua lluvia como fuente alterna es necesario conocer su calidad. En este artículo se presentan resultados de evaluación de calidad del agua lluvia, medida por su pH, alcalinidad, acidez, dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), dureza, turbidez, color, conductividad, absorción ultravioleta (AUV), demanda química de oxígeno (DQO) y conteo de coliformes.

## 37-42

### Aplicaciones de nanotecnología en la construcción de pavimentos

*Luz S. Quintero - Luis E. Sanabria*

En los últimos años se ha producido una revolución científica a nivel global centrada en la aplicación de la nanotecnología para el desarrollo de nuevos materiales, el mejoramiento de las propiedades de los materiales ya existentes y las interacciones entre éstos que, además, ha permeado al sector de la industria de la construcción de vías.

## 43-48

### The Corporate Social Responsibility Pyramid

*Andrés Felipe Cortés Ortiz - Sebastián Cortés Mejía*

En este artículo se pretende crear la definición de responsabilidad social empresarial (RSE), determinando sus principios y objetivo final utilizando una pirámide como metáfora. En principio, se recolecta información relevante para determinar que cada acción referente a RSE se puede clasificar de acuerdo con tres principios que forman la base de la pirámide: condiciones laborales, medio ambiente y relación con los *stakeholders*.

## 49-54

### Ecuación de Butler-Volmer a partir de la mecánica cuántica

*William Aperador Chaparro - Jorge Hernando Bautista Ruiz - Arnoldo Emilio Delgado Tobón*

La electroquímica trata de la interrelación de los fenómenos químicos y eléctricos, así como del estudio de las propiedades eléctricas de las soluciones de los electrolitos, estableciendo una relación entre la acción química y eléctrica de tales sistemas.

## 55 / NOTICIAS

Aniversario 126 de la Sociedad Colombiana de Ingenieros

## 61 / ALCANCE Y POLÍTICAS

# Editorial

## Problemas frecuentes de suelos en la construcción de edificaciones urbanas

**JORGE ENRIQUE DURÁN GUTIÉRREZ**

Profesor del Centro de Estudios Geotécnicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

jorge.duran@escuelaing.edu.co

Ningún ingeniero o arquitecto familiarizado con la actividad de los estudios, los diseños y la construcción de edificaciones en las ciudades y poblaciones colombianas ha sido ajeno a la creciente y alarmante preocupación generada por el impacto que la ejecución de obras nuevas o la modificación o renovación de unas ya existentes tiene en el entorno.

En efecto, dado el crecimiento de la actividad de la construcción de edificaciones urbanas, públicas o privadas, habitacionales, institucionales, comerciales o industriales en los últimos años, se han aumentado exponencialmente los “siniestros” o “novedades negativas” de afectaciones causadas por nuevas obras a las edificaciones ya existentes, a las redes de servicios públicos o a la infraestructura vial y del espacio público.

Muchas veces, tales problemas se deben a que no se han dedicado los recursos humanos, económicos y de tiempo necesarios para determinar la existencia de amenaza de daño al entorno, así como para analizar y poner en práctica las medidas apropiadas para reducir los efectos que esto pueda tener en el vecindario.

Las causas o los detonantes de las afectaciones al entorno o la subestimación de éstas pueden ser, entre otros, los siguientes:

- Deficiente caracterización de las condiciones del subsuelo del proyecto propio y de las áreas vecinas.
- Escaso o nulo conocimiento de la tipología de cimentación y de la tipología estructural de las edificaciones vecinas.
- Inspección poco rigurosa de las condiciones del entorno antes de empezar la obra, específicamente en lo relacionado con el funcionamiento, la operatividad y el comportamiento estructural, al igual que en lo referente a los acabados y detalles arquitectónicos no estructurales.
- Predominio en las ciudades y pueblos colombianos de una tipología urbanística consistente en casas de uno a tres pisos, dispuestas sin aislamientos, y en edificios que, en la mayoría de los casos, no tienen aislamiento con su vecino en por lo menos dos de los costados.
- Falta de normas claras y firmes que impidan la construcción de edificios colindantes con casas, lo que se ha convertido en un proceso forzado y traumático de renovación urbana que ha incrementado muchísimo el número de casos de daños a las edificaciones vecinas.
- Análisis demasiado simplificados de los estimativos de las deformaciones y desplazamientos de las paredes, taludes y fondo de la nueva excavación, así como de su evolución con el tiempo.
- Análisis muy sencillos, equivocados o, definitivamente, ausencia de ellos, relacionados con los asentamientos esperados para la nueva edificación y

su área de influencia, en lo referente a su magnitud, distribución o variación espacial y evolución a lo largo de meses, años y décadas.

- Subestimación de los efectos, casi siempre negativos, que la nueva edificación, desde sus primeras etapas de construcción y hasta muchos años después, tienen en las condiciones originales del agua subterránea del sitio y de sus alrededores, en un radio de acción muchas veces apreciable.
- Escasa o nula instrumentación instalada en la obra y en sus alrededores, que podría ayudar al monitoreo o seguimiento del comportamiento de la nueva edificación y del vecindario si se instalara oportuna y técnicamente.

En la ciudad de Bogotá, donde sin duda se seguirá construyendo en zonas correspondientes al depósito de suelos de origen lacustre de arcillas y limos arcillosos de baja consistencia y alta compresibilidad, de espesor considerable, o se emprenderán importantes obras de

renovación urbana en áreas correspondientes a la zona de piedemonte o de transición y en áreas de la zona lacustre, es pertinente que los profesionales de la ingeniería de suelos y de la ingeniería estructural trabajen de la mano, aportando cada uno desde su experiencia, los estudios, los diseños, la supervisión y el seguimiento necesarios para minimizar las afectaciones a vecinos.

En este marco de la actividad profesional de ingenieros geotécnicos, ingenieros estructurales, arquitectos y constructores, al igual que de las autoridades responsables de la normativa existente y las encargadas de los controles de las construcciones, la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, fiel a su tradición y a su misión de promover el intercambio de experiencias de los profesionales de la ingeniería de suelos y estructuras, así como de abrir espacio a una sana crítica que permita dar pasos hacia un mejor ejercicio de la construcción, está organizando el Sexto Encuentro de Ingenieros de Suelos y Estructuras, que tendrá lugar en Bogotá del 26 al 28 de septiembre de 2013. Los esperamos a todos.

# Las bases de los TLC

## EDUARDO SARMIENTO PALACIO

Director del Centro de Estudios Económicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

eduardo.sarmiento@escuelaing.edu.co

Cuando la iniciativa del TLC empezó a discutirse en el gobierno de Clinton, se consideraba que el libre mercado era una bendición que favorecía a todos los participantes. De acuerdo con el principio de ventaja comparativa, esperaban que la reducción de los aranceles y el libre movimiento de capitales propiciaran una elevación de la productividad y los salarios que favorecieran a los dos socios. Se suponía que la producción de bienes de ventaja comparativa garantizaba la demanda y conducía a la solución más eficiente.

La experiencia de la apertura en Colombia contravirtió la creencia. El país tiene ventaja comparativa en productos que carecen de demanda externa. La desregulación arancelaria provocó una confrontación de las actividades de ventaja comparativa en la industria y la agricultura, y no tuvo una contraprestación en las actividades protegidas. Los costos superaron con creces los beneficios y se manifestaron a todos los niveles. En los veinte años que siguieron a la adopción de la apertura la economía colombiana experimentó el menor crecimiento del siglo, las tasas de desempleo más altas y un gran retroceso en la distribución del ingreso.

A escala mundial también se confirmó que el libre comercio no es un intercambio neutral de bienes de ventaja comparativa, sino una confrontación por productos comunes. La competencia para aumentar las exportaciones colocó los salarios por debajo de la productividad y amplió la brecha entre trabajadores calificados y no calificados. La nivelación de los sala-

rios se hizo a la baja. En todos los países disminuyó la participación del trabajo en el PIB, se dispararon las ganancias empresariales y se ampliaron las desigualdades de ingresos.

El desbalance no sólo acentuó las desigualdades sino que interfirió en el crecimiento y la estabilidad mundiales. Los bajos ingresos del trabajo y las enormes ganancias del capital dieron lugar a un exceso de ahorro que quebró el orden económico internacional. Y como la población no está en capacidad de adquirir los bienes que puede elaborar, la economía evoluciona por debajo de sus posibilidades en materia de producción y empleo, y queda expuesta a una gran inestabilidad. La resistencia a aceptar esta realidad y enfrentarla consti-

---

**A escala mundial también se confirmó que el libre comercio no es un intercambio neutral de bienes de ventaja comparativa, sino una confrontación por productos comunes.**

---



tuye la principal explicación de la recesión de 2008 y de la posterior recaída.

## EURO

La mejor ilustración está en la Unión Europea. El euro tuvo entre sus creadores y defensores a los más distinguidos pensadores económicos, y pretendía ser la pieza perfecta para consolidar una integración entre países tan perfecta como la existente dentro de ellos. El sistema opera con una moneda única, un banco central conjunto y reglas económicas homogéneas de comportamiento. Durante mucho tiempo apareció como el modelo que debía extenderse a todo el universo y regir el orden económico internacional.

Lamentablemente, la organización giró en torno al más puro fundamentalismo de mercado. Basados en la misma teoría de ventaja comparativa de Ricardo de principios del siglo XIX, dieron por hecho que el comercio y las exportaciones son determinados por las actividades de ventaja comparativa, independientemente del nivel de desarrollo y la competitividad de las naciones. Así, las economías con menores productividades absolutas, como Grecia, España, Portugal e Italia, están en las mismas condiciones de Alemania para equilibrar la balanza de pagos y el pleno empleo.

En este contexto, la recuperación de Europa ha girado totalmente alrededor de la austeridad en forma de represión salarial y recorte de política fiscal. Luego de cinco años, el resultado es un completo fracaso. En la actualidad, más de la mitad de Europa se encuentra en recesión.

Se incurrió en las concepciones macroeconómicas dominantes que establecen que los países pueden lograr la estabilidad cambiaria y el pleno empleo dentro de cualquier régimen con políticas fiscales o monetarias. El diagnóstico es equivocado cuando la recesión se

origina por la pérdida de la competitividad externa, la cual aumenta el déficit en cuenta corriente, como ocurre en Grecia, España, Portugal e Italia. Las políticas expansivas reactivan la producción a cambio de elevar el endeudamiento y los déficits en cuenta corriente, en tanto que las contractivas reducen los déficits en cuenta corriente y el endeudamiento a cambio de acentuar la recesión.

## INTERCAMBIO COMERCIAL DE PRODUCTOS COMUNES Y DIFERENTES

La explicación más simple de las relaciones comerciales se presenta en un modelo de dos sectores y un factor de producción: el trabajo. En este modelo, el intercambio se puede expresar como la igualdad entre las productividades y los salarios reales en las dos regiones<sup>1</sup>. Si los bienes producidos son los mismos y tienen los mismos precios, la relación de las productividades debe ser igual a las relaciones de salarios. Si una región experimenta un incremento de la productividad con respecto a la otra, los salarios relativos de ésta deben disminuir en la misma proporción.

Supongamos por un momento que en la primera región (A) opera un aumento en la productividad con respecto a la segunda (B), como ocurrió entre Alemania y el resto de Europa. Si los salarios entre A y B no se modifican o disminuyen, como sucedió en los últimos diez años en Europa, las igualdades entre las productividades y los salarios dejarían de cumplirse y sólo se podrían restaurar si los precios en la región A son menores que los de la región B. En tales condiciones, se generaría un superávit en cuenta corriente en la primera y un déficit en la segunda que quebraría el equilibrio mundial. La región B experimentaría una deficiencia de demanda efectiva que la precipitaría en recesión, con

1. En términos algebraicos se tendría:

$$\frac{W_A}{P_A} = v_A$$

$$\frac{W_B}{P_B} = v_B$$

Donde  $W_A, P_A, v_A$  son salarios, precios y productividad en los dos países.

déficit en la balanza de pagos. El intento de enfrentar esta situación con políticas contractivas acentuaría el desempleo y la recesión, como ocurrió en los países de la Europa periférica. El desbalance puede corregirse únicamente con una cuantiosa devaluación en la región B que reduzca en forma notoria el salario, lo cual está proscrito dentro del régimen de moneda única.

El panorama es muy distinto si las regiones producen bienes diferentes. En cada bien, el salario real sería igual a su respectiva productividad. El incremento de la productividad en el país A ocasionaría una reducción del precio del bien y un alza en el salario real. Lo cierto es que la situación del país B no se modificaría; su salario en términos del precio se mantendría igual a su productividad. Los salarios reales de las dos regiones dependerían de la demanda y serían independientes de las productividades.

Es claro que los resultados y los comportamientos varían, según los países o las regiones produzcan bienes de ventaja comparativa o bienes comunes. La primera opción se presenta cuando los productos de ventaja comparativa disponen de una demanda infinita, lo que es contraevidente. Basta observar las cuentas externas de cualquier economía para advertir que la mayor parte del comercio está representada por productos elaborados en todos los lugares. La especialización en un número reducido de productos es una abstracción que va en contra de la naturaleza. La presunción únicamente se cumple en un mundo de papel.

Más concretamente, la teoría de la ventaja comparativa se cumple en un contexto en que el número de países es igual al número de productos y éste es igual al número de factores. Si el número de países y de factores es menor que el número de productos, el principio no se cumple. Las naciones tienen que producir otros bienes para utilizar los factores y balancear las cuentas externas. El comercio internacional está inversamente relacionado con el salario. El sistema es inestable, porque todos los países tenderían a bajar las remuneraciones para ofrecer sus productos a menores precios. El resultado es un salario por debajo de la productividad y la sobreproducción de bienes transables comunes, en particular bienes industriales y agrícolas.

## TLC CON ESTADOS UNIDOS

El resultado contradice la idea fuerza del euro de que las economías con grandes diferencias de productividad

se pueden normalizar por la vía del mercado o de las políticas fiscales y monetarias aisladas. Las enormes diferencias acumuladas de competitividad entre Alemania y las economías periféricas sólo se pueden corregir mediante devaluaciones drásticas, que quiebran la moneda única. Esto significa, en la práctica, el retiro de Grecia y luego de España, Italia, etc. Lo grave es que el problema de Europa no para ahí. Las devaluaciones únicamente son viables si las economías mayores, como Alemania y Francia, adoptan políticas expansivas que les permitan colocar sus productos.

Los desaciertos de Colombia en el TLC provienen de los mismos errores conceptuales. El país no sólo presumió que estaba en las mismas condiciones de Estados Unidos para enfrentar la competencia sino que le dio todo tipo de ventajas. Estados Unidos reduce los aranceles a 3 %, algo que ya había hecho en la mayoría de los productos en virtud de la ATPDEA, y Colombia los baja de 13 % a cero. Estados Unidos mantiene los subsidios a la agricultura y Colombia renuncia a los aranceles. El régimen de patentes es mucho más restringido que el existente en el ámbito internacional. Colombia mantiene un sistema de cambio flotante con intervenciones menores, en tanto que Estados Unidos opera con la moneda de reserva, que le permite intervenir abiertamente en el mercado.

La realidad era distinta. No era casual que en todos los estudios previos efectuados en los dos países se anticipara que las importaciones colombianas se incrementarían mucho más que las exportaciones. La productividad industrial en Estados Unidos es cinco veces mayor que en Colombia y en los últimos veinte años aumentó 40 %; en el mismo periodo, el tipo de cambio real se revaluó 40 %. No se requiere entrar en mayores detalles para advertir que en la mayoría de los bienes

---

**Las relaciones comerciales no son un intercambio de productos de ventaja comparativa en que todos ganan. Se trata, más bien, de una confrontación en que ganan los países que más aumentan la productividad y bajan los salarios.**

---

producidos en los dos países el precio de los colombianos es mayor. Así lo confirma la información del primer año que siguió al tratado. Las cifras de marzo muestran que en el último año no se ha creado un solo empleo, la industria registra caídas de 10 %, la agricultura no sale del marasmo, en tanto que las exportaciones caen 20 % y las de Estados Unidos, 30 %. En los sectores de textiles, confecciones y autopartes presentan descensos de más de 25 %. En la actualidad, el déficit en cuenta corriente asciende a 7 % del PIB en términos reales.

Los TLC le significarán al país un incremento del déficit en cuenta corriente que quebrantará la base macroeconómica y sectorial. A diferencia de lo que ocurrió en el pasado, el daño no se genera por conducto de las exportaciones, sino por la sustitución de producción nacional por importaciones. Aún más grave, no se manifiesta tanto en escasez de divisas como en deficiencias de demanda efectiva, caída de la producción y desindustrialización.

## CONCLUSIONES

El error del TLC es el mismo de la apertura y el euro, y no podrá remediarse mientras los dirigentes y economistas no entiendan, razonen y reconozcan el error histórico. Las relaciones comerciales no son un intercambio de productos de ventaja comparativa en que todos ganan. Se trata, más bien, de una confrontación en que ganan los países que más aumentan la productividad y bajan los salarios.

Estamos ante uno de los desaciertos más serios de la ciencia económica. Las teorías y los criterios dominantes se fundamentan en la presunción de que los países producen bienes diferentes. Así, la variación de la productividad de un país se ajusta con una variación de los precios relativos y el comercio internacional es independiente de los salarios. Al salario real determinado por los productos de ventaja comparativa, las naciones están en condiciones de colocar indefinidamente sus productos en los mercados internacionales. Significa, ni más ni menos, que el número de países y factores de producción es mayor que el número de productos, lo cual es del todo contraevidente. Las condiciones son distintas en el mundo real en que los países producen bienes comunes. La mayor productividad de las naciones que van adelante se compensa con menores salarios de los socios comerciales.

Los TLC con Estados Unidos representan una interferencia en la integración latinoamericana, orientada a ampliar los mercados internos y propiciar la industrialización. Los países quedan en condiciones de triangular el intercambio comercial, adquiriendo las importaciones en Estados Unidos y colocándolas a mayores precios en la región. Se convierten en facilitadores de las importaciones y las multinacionales, en contra del valor agregado y el empleo nacional.

La aprobación del TLC se inició cuando las teorías de comercio internacional estaban en furor y la aprobación se da cuando están desprestigiadas. Todas las evidencias señalan que el libre comercio envilece los salarios y amplía las brechas entre trabajadores calificados y no calificados, propicia desbalances financieros entre las naciones y regiones y torna más frecuentes las recesiones y las crisis cambiarias. En la forma como está concebido, el tratado de libre comercio le significará a Colombia el alejamiento de la industrialización, la agricultura temperada y el avance tecnológico. El país mantiene la estructura subalterna de mediados del siglo XX, dominada por la minería y los servicios, que redundará en crecimiento modesto, empleo inadecuado y deterioro de la distribución del ingreso.

## REFERENCIAS

- Sarmiento, E. (2008). *Economía y globalización*. Bogotá: Grupo Editorial Norma.
- Sarmiento, E. (2011). *Transformación productiva y equidad. Después de la crisis*. Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.



# Comparación entre el corte con láser de CO<sub>2</sub> de PMMA virgen y PMMA reciclados

## Comparison between CO<sub>2</sub> laser cutting of virgin PMMA and recycling PMMA

**DIEGO REYES JIMÉNEZ<sup>1</sup> - DIEGO RAMOS ACOSTA<sup>2</sup>**

1. MSc. Eng. Facultad de Ingeniería Mecánica. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

2. MSc. Eng. Facultad de Ingeniería Mecánica. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

diego.reyes@escuelaing.edu.co - diego.ramos@escuelaing.edu.co

Recibido: 15/12/2012 Aceptado: 01/02/2013

Disponible en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

### Resumen

El corte de acrílico con láser de CO<sub>2</sub> es un proceso muy utilizado dentro de la industria de la transformación de plástico debido a la excelente calidad del corte y a su precisión. En el mercado existen dos tipos de acrílico: el fabricado con metil-metacrilato virgen y el fabricado con metil-metacrilato reciclado. En este estudio se realizaron pruebas de corte láser de CO<sub>2</sub> de estos dos materiales, con distintos parámetros de velocidad y potencia, para observar cuánto se afectan estos materiales por el calor generado durante el proceso de corte y qué diferencias hay en la calidad de corte. Los resultados experimentales mostraron que el comportamiento durante el corte láser del acrílico virgen y el acrílico reciclado es muy distinto debido a las impurezas propias del acrílico reciclado.

**Palabras claves:** láser, acrílico, corte con láser, láser de CO<sub>2</sub>, aplicaciones industriales del láser.

### Abstract

Cutting acrylic with CO<sub>2</sub> laser is a widely used process in the industry of plastic transformation due to the excellent quality of the cut and its accuracy. In the plastic market there are two types of acrylic, one manufactured with virgin methyl-methacrylate and the other manufactured with recycled methyl-methacrylate. In this study, cutting tests of these two materials were made with a CO<sub>2</sub> laser using different parameters of speed and power in order to observe how both materials are affected by the heat generated during the cutting process and if there were any differences on the cutting quality. The experimental results showed a great difference in behavior between the virgin acrylic and recycled acrylic during laser cutting, due to the impurities in the recycled acrylic.

**Keywords:** laser, acrylic, laser cutting, CO<sub>2</sub> laser, industrial laser applications.

## INTRODUCCIÓN

En el mundo se están haciendo grandes esfuerzos para desarrollar métodos eficientes de reciclaje y reutilización de los plásticos, debido al daño ambiental que éstos causan al ser desechados por métodos convencionales, así como por el incremento constante de los costos de fabricación de plásticos provenientes del petróleo. En el campo de los plásticos, el poli-metil-metacrilato (PMMA) o acrílico se ha convertido en un material muy deseado dentro de la industria de la transformación de plástico, gracias a sus propiedades físicas [1].

En razón de las características particulares de este material es posible, por un proceso de pirólisis, transformar el retal de PMMA en su monómero, el metil-metacrilato (MMA). Este monómero, a su vez, puede volverse a utilizar para fabricar PMMA, permitiendo así el proceso de reciclaje del PMMA [2].

La pirólisis del PMMA consiste en el calentamiento del PMMA a temperaturas por encima de los 500 K en un ambiente libre de oxígeno. Este calentamiento genera una reacción de despolimerización en la que hay una rotura de las cadenas poliméricas, la cual lleva a la producción del monómero MMA y otros subproductos. El proceso de pirolisis del PMMA puede llegar a tener eficiencias de recuperación del monómero de hasta el 97 %, haciendo de éste un proceso eficiente y económico [3,4].

Uno de los mayores retos dentro del proceso de reciclaje de cualquier material es tratar de que las propiedades físicas del material reciclado se mantengan dentro de un nivel que le permita un uso en la misma aplicación que se le había dado al material original, o en alguna otra aplicación que tenga valor.

En la actualidad, uno de los procesos de transformación del PMMA más utilizados en la industria es el corte con láser. El mecanismo por el cual un láser puede llegar a generar un corte en el PMMA se denomina corte por vaporización, el cual consiste en llevar el PMMA a su estado gaseoso por medio de un láser de alta potencia.

Una de las ventajas de este mecanismo de corte láser para el PMMA es que gracias a que los puntos de fusión y vaporización de este material son muy bajos, no se necesita mucha energía por parte del láser para realizar este cambio de estado [5,6].

El otro atributo del corte láser del PMMA por encima de un corte mecánico tradicional es que la calidad

de corte obtenido por el láser es superior. Los bordes de una pieza resultante de un corte de PMMA con láser son brillantes y pulidos, lo cual les da un alto valor estético a las piezas cortadas por este proceso.

Dichas características hacen que los láseres de CO<sub>2</sub> sean una herramienta ideal para el corte con láser de PMMA. Dependiendo de la potencia del láser, permite el corte de distintos espesores de lámina de PMMA. Igualmente, Zhou y Mahdavian han demostrado que láseres de CO<sub>2</sub> de 60 W de potencia son capaces de realizar cortes de hasta 1 cm de espesor [7].

El objetivo de esta investigación es comparar el corte láser de un PMMA fabricado con monómero virgen (PMMA virgen) y un PMMA fabricado con monómero reciclado (PMMA reciclado). Se desea observar qué diferencias hay en la calidad de corte y en la afectación térmica por este proceso en cada uno de tales materiales, lo que permitirá dar un concepto acerca de las posibilidades de uso del PMMA reciclado en las mismas aplicaciones que se le dan al PMMA virgen cortado con láser.

## DISEÑO EXPERIMENTAL

Para la realización del experimento se contó con un láser de vidrio sellado de 80 W, una mesa X-Y y un lente de longitud focal de 40 mm. Los parámetros variados fueron la potencia del láser y la velocidad de corte. Se dejó constante la posición focal del láser sobre la superficie del material y no se utilizó gas auxiliar de corte para evitar turbulencia dentro de la zona de corte que pudiera afectar los resultados [8].

En cuanto al material, puesto que comercialmente hay PMMA de muchos colores, se decidió usar PMMA transparente, ya que los rellenos que se utilizan para darle color al PMMA pueden afectar el corte láser del PMMA [9]. Se diseñó una probeta con forma cuadrada de 30 x 30 mm y de 3 mm de espesor, para permitir un mejor análisis de la zona de corte. Para la fabricación de las probetas se emplearon PMMA transparente fabricado con monómero virgen y PMMA transparente fabricado con monómero reciclado.

Para el desarrollo del experimento se programó cada probeta para ser cortada con distintas combinaciones de potencia del láser y de velocidad de corte (tabla 1, figura 1).

**Tabla 1**  
Variables experimentales y resultados para el corte de PMMA virgen y reciclado

Prueba	Velocidad (mm/s)	Potencia (W)	HAZ acrílico virgen (mm)	HAZ PMMA reciclado	Calidad de corte acrílico Virgen (mm)	Calidad de corte PMMA Reciclado	Espesor (mm)	Energía específica
1	3	80	0,5	0,65	Translúcido	Opaco	3	8,9
2	3	70	0,58	1,1	Translúcido	Opaco	3	7,8
3	3	60	0,6	1	Translúcido	Opaco	3	6,7
4	2	80	0,6	1	Translúcido	Opaco	3	13,3
5	2	70	0,9	1,4	Translúcido	Opaco	3	11,7
6	2	60	0,65	1	Translúcido	Opaco	3	10,0
7	1	80	0,7	1,5	Translúcido	Opaco	3	26,7
8	1	70	1,1	1,7	Translúcido	Opaco	3	23,3
9	1	60	0,86	1,6	Translúcido	Opaco	3	20,0
10	0,5	80	1,2	2,2	Translúcido	Quemado	3	53,3
11	0,5	70	1,4	2,4	Translúcido	Quemado	3	46,7
12	0,5	60	1,5	2,5	Translúcido	Quemado	3	40



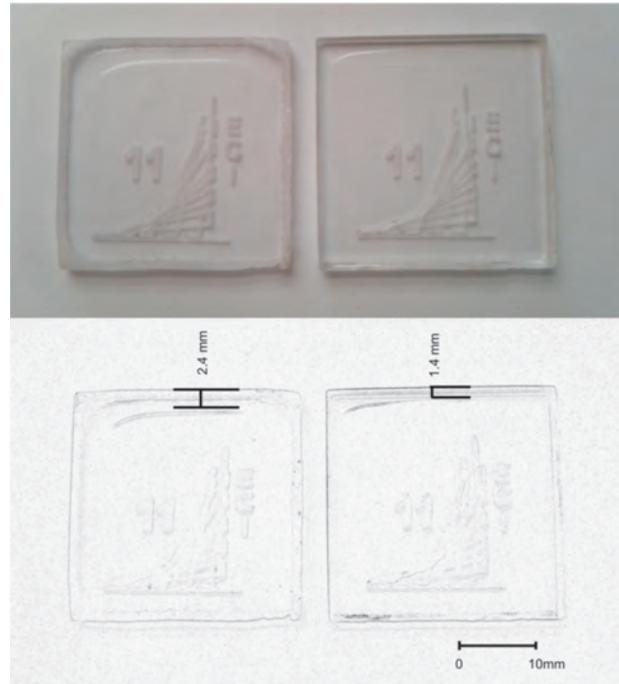
**Figura 1.** Diseño experimental de probetas.

Una vez cortados, se les hizo a las probetas un análisis visual de la calidad de corte y se tomaron fotos, las cuales se pasaron por un filtro que permitió observar y medir la extensión de la zona afectada por el calor en cada probeta (figura 2).

## RESULTADOS

En la tabla se muestran los resultados de la calidad de corte y la zona afectada por calor (HAZ) para cada potencia y velocidad de corte utilizado.

También se realizó el cálculo de la energía aportada por el láser al material, llamada energía específica  $E_E$ , la cual es función de la potencia del láser  $P$ , la velocidad de corte  $v$  y el espesor del material  $S$ .



**Figura 2.** Arriba: foto para prueba #11 de acrílico reciclado (izq.) y acrílico virgen (der.). Abajo: foto modificada con filtro de detección de bordes para medición del HAZ mediante análisis fotográfico para prueba #11.

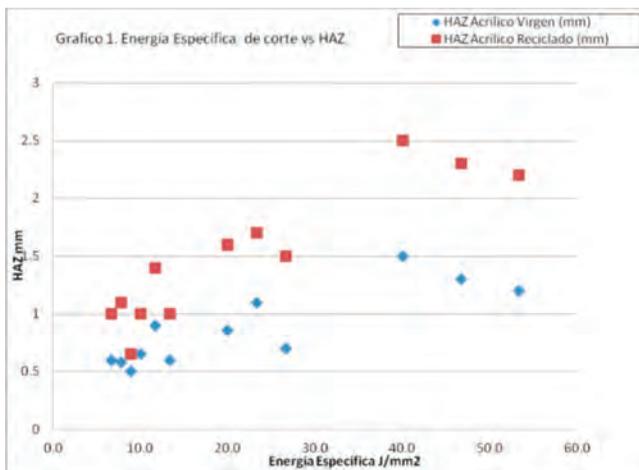
$$E_E = \frac{P}{Sv} \quad [10]$$

Este valor permite evaluar la cantidad de energía que está entrando a la zona de corte, independientemente de la potencia o velocidad a la cual se está realizando el proceso.

## ANÁLISIS DE RESULTADOS

### Afectación térmica del material

A continuación se puede apreciar cómo, para cualquier valor de energía específica, el PMMA virgen siempre tiene una afectación térmica menor que el PMMA reciclado. Este efecto se observa también en los resultados de la calidad de corte, donde se ve que para ningún valor de energía específica el PMMA virgen se degradó durante el corte, mientras que para valores altos de energía específica hubo una gran degradación en el PMMA reciclado y generó cortes de mala calidad.



Investigaciones anteriores han permitido determinar que debido a las impurezas presentes en el PMMA reciclado, hay una mayor dispersión de luz dentro de este PMMA que dentro de un PMMA virgen [11].

La dispersión de luz hace que cuando los fotones del láser impactan el material, éstos comiencen a cambiar de dirección y, por tanto, empiezan a afectar una cantidad de material mucho más grande, en comparación con el PMMA virgen, en el cual los fotones del láser se mantienen concentrados en un área pequeña, lo que genera una menor afectación térmica del material. Dicho fenómeno hace que durante el corte de un PMMA reciclado, éste se afecte más térmicamente en comparación con el PMMA virgen. Por tal razón, el acrílico reciclado es mucho más sensible a la cantidad de energía que se utilizará durante el proceso de corte. Se puede observar que para valores de energía específica altos, el acrílico reciclado produce cortes de mala calidad, por lo que este material siempre debe cortarse en combinaciones de potencia y velocidad que generen valores no mayores de  $20 \text{ J/mm}^2$ .

### Calidad de corte

Según los resultados, se puede observar que el corte sobre el PMMA virgen genera un borde transparente y pulido, sin ningún tipo de rebaba para todas las pruebas, mientras que el corte sobre PMMA reciclado produce un borde opaco, sin importar los parámetros de velocidad y potencia del láser, pero el corte en general sigue siendo bueno, ya que no genera ningún tipo de rebaba y la superficie de corte no es muy rugosa.

La formación del corte transparente y pulido en el PMMA virgen ha sido investigado por Powell, el cual propone que el proceso por el cual se genera esta superficie transparente y pulida es gracias a la repolimerización rápida del PMMA fundido dentro de la zona de corte. Este material repolimerizado vuelve a tener las mismas propiedades de transparencia del material base. En caso de que el material se enfríe antes de haber terminado la repolimerización (esto puede ocurrir), el corte queda opaco. Este proceso se puede generar cuando se utiliza gas auxiliar de corte a una presión muy alta, el cual por convección enfría rápidamente la zona de corte y no da tiempo para que el material se repolimerice. Como la polimerización de las cadenas se interrumpe, quedan muchas cadenas cortas, las cuales generan un fenómeno de dispersión de luz y, por tanto, disminuyen la transparencia del material. A este efecto se le conoce como glaseado.

En el corte de PMMA virgen se pudo observar que en todas las probetas se presentó el proceso de repolimerización en la zona de corte, ya que todas las pruebas obtenidas generaron bordes pulidos y transparentes.

En el PMMA reciclado este proceso de repolimerización rápida no se presentó, ya que nunca se obtuvo un corte transparente. Las impurezas que tiene el PMMA reciclado son la principal razón por la cual sucede este fenómeno, ya que aunque dichas impurezas sólo llegan a ser del 5 %, se ha comprobado que éstas afectan las propiedades químicas del PMMA. Durante el proceso de polimerización estas impurezas actúan como inhibidores de la reacción, llegando a reducir la velocidad de la reacción en un 50 % [4, 16]. Durante el corte láser de PMMA reciclado, la presencia de las impurezas disminuye la velocidad de repolimerización, la cual no es lo suficientemente alta para terminar la reacción antes que el material se haya enfriado, por lo que se consigue una calidad de corte similar a la que se obtiene cuando se corta el PMMA con un flujo de gas alto.

## CONCLUSIONES

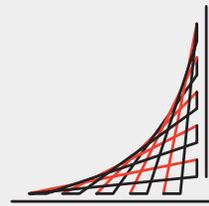
El proceso de corte láser de PMMA virgen permite generar cortes de buena calidad, los cuales no generan rebaba y producen un borde de corte transparente. El acrílico virgen tiene una afectación térmica muy baja durante el proceso de corte, motivo por el cual el rango de velocidad y potencia dentro del que se puede cortar PMMA virgen es muy amplio.

El proceso de corte de PMMA reciclado permite generar cortes de buena calidad, los cuales no generan rebaba y producen un borde de corte opaco. El PMMA reciclado tiene una afectación térmica alta debido a la alta dispersión de fotones que se genera dentro del material, por lo que el rango de velocidad y potencia dentro del cual se puede cortar PMMA reciclado es muy restringido.

Dependiendo de la aplicación final de la pieza cortada, el PMMA reciclado puede o no remplazar el acrílico virgen. La principal consideración que se debe tomar al respecto es si para la aplicación final se requiere que el borde del acrílico sea transparente. En caso de que esto no sea necesario, el acrílico reciclado puede ser una buena opción para remplazar el acrílico virgen.

## REFERENCIAS

1. Nunes dos Santos, W., Marcondes, J., Agnelli, A., Mummery, P. & Wallwork, A. (2007). Effect of recycling on the thermal properties of polymers. *Polymer Testing*, N.º 26, 216-221.
2. Kaminsky, W. & Eger, C. (2001). Pyrolysis of filled PMMA for monomer recovery. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, N.ºs 58-59, 781-787.
3. Lopez, G., Artetxe, M., Amutio, M., Elordi, G., Aguado, R., Olazar, M. & Bilbao, J. (2010). Recycling poly-(methyl methacrylate) by pyrolysis in a conical spouted bed reactor. *Chemical Engineering and Processing*, N.º 49, 1089-1094.
4. Achilias, D. (2007). Chemical recycling of poly (methyl methacrylate) by pyrolysis. Potential use of the liquid fraction as a rawmaterial for the reproduction of the polymer. *European Polymer Journal*, N.º 43, 2564-2575.
5. Powell, J. & Kaplan, A. (2004). Laser Cutting: From First Principles to the State of the Art. Proceedings of the 1st Pacific International Conference on Application of Lasers and Optics 2004.
6. Havrilla, D. & Anthony, P. (1999). Process fundamentals of industrial laser welding and cutting. Rofin-Sinar, Inc.
7. Zhou, B.H. & Mahdavian, S.M. (2004). Experimental and theoretical analyses of cutting nonmetallic materials by low power CO<sub>2</sub>. *Journal of Materials Processing Technology*, N.º 146, 188-192.
8. Radovanovic, M. & Madic, M. (2011). Experimental Investigations of CO<sub>2</sub> Laser Cut Quality: A Review. *Nonconventional Technologies Review*, N.º 4.
9. Black, I. (1998). Laser cutting of Perspex. *Journal of Materials Science Letters*, N.º 17, 1531-1533.
10. Steen, W.M. & Mazumder, J. *Laser Cutting, Drilling and Piercing. Laser Material Processing*, 4th ed. ISBN 978-1-84996-061-8. Springer.
11. Popescua, V., Vasileb, C., Brebub, M., Popescua, G.L., Moldovanc, M. & Prejmereanc, C., Stanulet, L., Cojocaruf, I. (2009). The characterization of recycled PMMA. *Journal of Alloys and Compounds*, N.º 483, 432-436.
12. Davima, J.P., Barricasa, N., Conceicao, M. & Oliveira (2008). Some experimental studies on CO<sub>2</sub> laser cutting quality of polymeric materials. *Journal of Materials Processing Technology*, N.º 198, 99-104.
13. Noor, M.M., Kadirgama, K., Rahman, M.M., Zuki, N.M., Rejab, M.R.M. & Muhamad, K.F. (2009). Prediction Modelling of Surface Roughness for Laser Beam Cutting on Acrylic Sheets. *Advance Material Research*, ISSN 1022-6680.
14. Dahotre, N.B. & Harimkar, S.P. (s.f.). Laser Cutting of Various Materials. *Laser Fabrication and Machining of Materials*. ISBN 978-0-387-72343-3.
15. Newborough, M., Highgate, D. & Matcham, J. (2003). Thermal depolymerisation of poly-methyl-methacrylate using mechanically fluidised beds. *Applied Thermal Engineering*, N.º 23, 721-731.
16. Davim, J.P., Oliveira, C., Barricasa, N. & Conceição, M. (2008). Evaluation of cutting quality of PMMA using CO<sub>2</sub> lasers. *Int J Adv Manuf Technol*, N.º 35, 875-879.



## Un futuro mejor a tu alcance



### Pregrado

- Ingeniería Civil\*\*\* SNIES:1980
- Ingeniería Eléctrica\*\* SNIES: 1982
- Ingeniería de Sistemas\*\* SNIES:1981
- Ingeniería Industrial\*\* SNIES:2563
- Ingeniería Electrónica\*\* SNIES: 2866
- Economía\*\* SNIES: 3602
- Administración de Empresas SNIES: 53966
- Matemáticas\*\* SNIES: 17443
- Ingeniería Mecánica SNIES: 54358
- Ingeniería Biomédica SNIES: 91049

Escuela Colombiana de Ingeniería - Universidad del Rosario

Título: Profesional / Duración Economía, Administración de Empresas, Matemáticas, Ingeniería Biomédica 9 semestres. Los demás programas: 10 semestres.

\*\* Acreditación Nacional de Alta Calidad

\* Acreditación Internacional de Alta Calidad RIACES 28 de julio de 2011

### Especializaciones

- Desarrollo y Gerencia Integral de Proyectos SNIES: 8501
- Diseño, Construcción y Conservación de Vías SNIES: 8503
- Economía para Ingenieros SNIES: 11696
- Estructuras SNIES: 2973
- Gerencia de Producción Industrial SNIES: 52800
- Gestión Integrada QHSE SNIES: 19205
- Ingeniería de Fundaciones SNIES: 52304
- Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente SNIES: 4656
- Saneamiento Ambiental SNIES: 4826

Título: Especialista

## Pregunta por nuestras BECAS

### Maestrías

- Desarrollo y Gerencia Integral de Proyectos  
SNIES: 101339
- Gestión de Información SNIES: 91269
- Ingeniería Industrial SNIES: 101895
- Ingeniería Civil SNIES: 53118
- Ingeniería Electrónica SNIES: 101379

Título: Magíster

### Educación Continuada

Programas de formación, capacitación y actualización enfocados al desarrollo profesional y personal en las áreas de ingeniería, gerencia, calidad, sostenibilidad, medio ambiente, administración, logística, finanzas, estadística, TIC e infraestructura, entre otras, así como servicios de capacitación para las empresas privadas y públicas a escala global.



/escuelacolingenieria



/Escuelacolingenieria



/escuelaing



/escuelacoling



@Escuelaing



# Transmisión de energía eléctrica mediante inducción magnética en campo cercano

## Electricity transmission by magnetic induction in near field

### HERNÁN PAZ PENAGOS

Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, programa de Ingeniería Electrónica. Profesor asociado, docente e investigador. Coordinador del grupo de investigación Ecitrónica (B en Colciencias).

hernan.paz@escuelaing.edu.co

Recibido: 20/01/2013 Aceptado: 10/02/2013

Disponible en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

### Resumen

La realización de dos experimentos para el transporte inalámbrico de energía eléctrica en regiones de campo cercano (reactivo y zona de Fresnel), en los cuales se aplicó el principio de inducción magnética y se usaron solenoides autorresonantes en un régimen de acoplamiento cercano a 1, demostró ser eficiente en la transferencia de electricidad a distancias hasta de cuatro veces el radio de la bobina, con una eficiencia del 60 %. En el artículo se presentan los diseños y resultados de la experiencia de investigación se discute la aplicabilidad práctica de estos sistemas y se sugieren mejoras para trabajos futuros.

**Palabras claves:** inducción magnética, resonancia, acoplamiento, transmisión de energía.

### Abstract

Performing two experiments for wireless transport of electrical energy in the near field regions: reactive and Fresnel zone, in which the principle magnetic induction was applied and solenoids in a self resonant and coupling regime close to 1, were used, these showed to be efficient in the transfer of electricity to distances up to four times the radius of the coil, with an efficiency of 60 %. The article presents the design and results of research experience, likewise, it is discussed the practical applicability for future work.

**Keywords:** magnetic induction, resonance, coupling, power transmission.

## INTRODUCCIÓN

La transferencia de energía mediante inducción magnética y a través de ondas de radio fue un problema que se planteó Tesla (1856-1943) a principios del siglo pasado. Él intentó solucionarlo mediante un sistema de distribución de electricidad a largas distancias –Torre Wardenclyffe–, desafortunadamente sin éxito; otras estrategias que se experimentaron para transportar energía eléctrica por un medio inalámbrico fueron posteriores y se enfocaron en emitir radiación altamente directiva; tales fueron los casos de estudio de la NASA, en 1975, que logró transmitir 34 kW de potencia a una distancia de 1,5 km en la banda de microondas o de la industria militar en Norteamérica, que diseñó y construyó un sistema electrónico para la transferencia de dosis letales de potencia, mediante rayos láser en el campo de batalla (Pozar, 2005; Xin & Wang, 2010); no obstante, estas soluciones no eran eficientes en potencia, requerían línea de vista libre de obstáculos y representaban riesgos graves para la salud humana, de tal manera que se revaluaron.

Hace poco investigadores del Massachusetts Institute of Technology (MIT) retomaron el problema y para su solución propusieron WiTricity para la transmisión de energía por ondas de radio (Karalis et al., 2008; Hamam et al., 2009). El principio de operación de esta tecnología se fundamenta en técnicas de inducción magnética mejoradas, resonancias de larga vida y acoplamiento fuerte. En sus experimentos lograron transferir electricidad inalámbricamente a una bombilla de 60 W (hasta encenderlo), ubicado a 2 m de distancia y con una eficiencia del 40 %. Sin embargo, quedan muchos temas por investigar y prácticas de laboratorio por realizar para mejorar los resultados obtenidos.

En la perspectiva de aportar a la resolución del problema planteado, el grupo Electrónica-línea de investigación en telecomunicaciones abordó la investigación que tuvo por título *Electricidad propagada inalámbricamente en bajas frecuencias* y se desarrolló durante el 2009. El objetivo general consistió en diseñar y construir dos sistemas de transmisión inalámbrica de energía eléctrica en la banda de VLF (*Very Low Frequency*), mediante los principios de inducción magnética, autorresonancia y acoplamiento de ondas de radio en campo cercano.

## MARCO DE REFERENCIA TEÓRICA

En este punto se examinan, entre otros aspectos, los principios teóricos de inducción magnética y características del canal de radio. La inducción eléctrica es la propiedad de un circuito de crear una fuerza electromotriz en otro que se ubica cercano a aquél, a partir de un campo magnético variable que a su vez es causado por la variación de una corriente. La fuerza, dirección y extensión de  $B$  se representan a menudo a través de líneas de campo magnético. La relación entre señal inducida y el flujo de campo magnético se expresa mediante la ley de Lenz (ecuaciones 1 y 2).

$$V_{\text{inducido}} = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

$$V_{\text{inducido}} = \oint E \cdot dl \quad (2)$$

Por flujo se entiende la cantidad de campo magnético que pasa por la superficie que encierra el circuito cerrado (ecuación 3).

$$\Phi = \iint_s B \cdot ds \quad (3)$$

En consecuencia, un segundo bucle cerrado y conductor, interpuesto en campo cercano del primero, podría captar una parte de ese flujo magnético oscilante, para inducir una corriente eléctrica en éste (ley de inducción de Faraday).

El medio de propagación es el espacio libre. En particular para esta investigación interesaba caracterizarlo en las subregiones de campo cercano al solenoide, por donde se esperaba propagar la energía. Más adelante se identifican y comparan algunas características (tabla 1).

De los datos (tabla 1) se puede inferir que en la zona de Fresnel y a bajas frecuencias las corrientes de desplazamiento debidas a la polarización de los dieléctricos son despreciables en comparación con las corrientes de conducción que predominan en los circuitos; por lo tanto, la magnitud del campo magnético es relevante en la proximidad del emisor y disminuye respecto de su origen, con al menos el cuadrado de la distancia, por lo que su efecto desaparece rápidamente al alejarse de la fuente. Además, este campo es independiente del eléctrico, pudiendo existir por separado o no existir, dependiendo del valor de  $r$  y de  $\lambda$  (Paz, 2009).

**Tabla 1**  
Términos predominantes para cada subregión de campo cercano

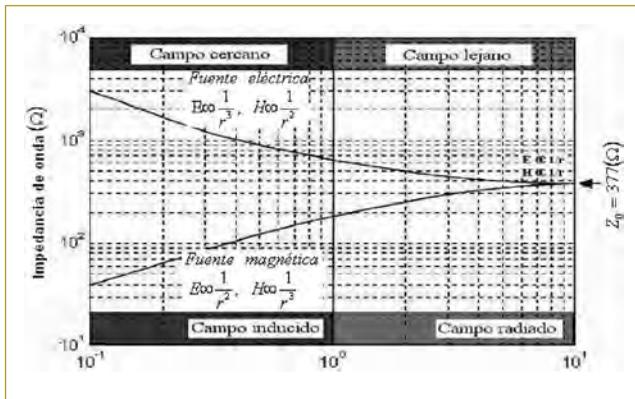
Parámetro / tipo de campo	Campo cercano reactivo	Campo cercano radiado
Otros nombres	Cuasiestático, de inducción o zona evanescente.	Zona de Fresnel.
Regiones*	$0,62\sqrt{\frac{D^3}{\lambda}} > r > 0$	$\frac{2D^2}{\lambda} > r > 0,62\sqrt{\frac{D^3}{\lambda}}$
Tipo de potencias	Reactiva: durante medio ciclo la potencia se irradia desde la fuente almacenándose temporalmente en el campo cercano y, durante el segundo medio, la potencia regresa desde el campo cercano a la fuente.	Hay presencia de campo reactivo y empieza a emerger campo radiado no ionizante.
Potencia media radiada	Es nula.	La potencia reactiva es aproximadamente igual a la potencia radiativa. Es posible el transporte de una potencia media.
Relación de fase entre los campos $E_r$ y $H_r^{**}$	En la proximidad de la fuente, se desconoce la relación existente entre la fase de los campos. Podrían tender a estar en cuadratura entre sí.	Desfasados y tienden a estar en fase entre ellos.
Propiedades del campo	Se determinan principalmente por las características de la fuente.	Se determinan por las características de la fuente y del medio en que se logra propagar.
Variación de los campos con la distancia	$E \propto \frac{1}{r^3}$ , $H \propto \frac{1}{r^2}$	$E \propto \frac{1}{r^2}$ , $H \propto \frac{1}{r^2}$
Interacción entre campos	No guardan ninguna relación y son cantidades físicas independientes.	Están ligeramente acoplados, de modo que uno podría influir en el otro.

\*D es la longitud total de la antena y r la distancia desde el punto de radiación hasta un punto de medición arbitrario.

\*\* La distribución angular de los campos (diagrama de radiación) es función de la distancia a la antena.

Nota: Las fronteras de una región a otra cambian gradualmente.

Así mismo, con las variaciones de E y H se pueden deducir las variaciones de impedancia del medio según el tipo de subregión. En la siguiente figura, y en una escala logarítmica, se muestra dicha variación de impedancia para las regiones de campo (figura 1).



**Figura 1.** Impedancia de la onda en función de la distancia de la fuente en términos de  $\frac{\lambda}{2\pi}$ .

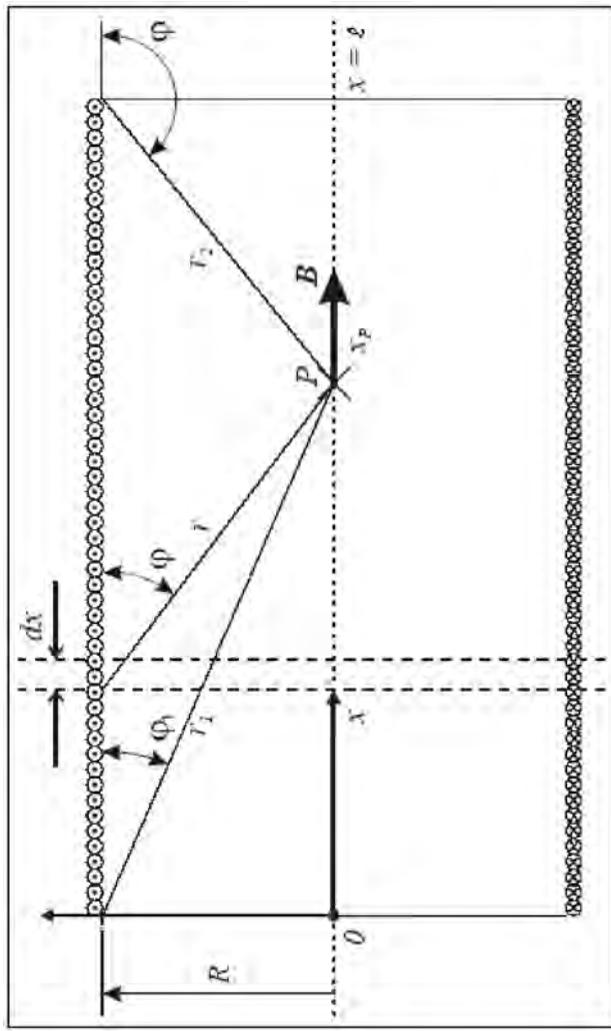
Según Yaghjian (1986), en este contexto la impedancia de la onda en la subregión de campo cercano reactivo se determina por las características de la fuente, mientras que en la zona de Fresnel el campo de radiación no es sustancialmente del tipo onda plana y tiene una estructura compleja; por tanto, la relación entre E y H no es constante, y no es la impedancia intrínseca del aire  $Z_0 = 377\Omega$  (o del medio por el que se propaga).

### METODOLOGÍA

La metodología seguida en la investigación fue revisión de los principios teóricos involucrados en la tecnología WiTricity, cálculo del campo magnético máximo de un solenoide mediante dos aproximaciones matemáticas diferentes, diseño de los experimentos, especificaciones de los circuitos, análisis y discusión de los resultados.

*Primera aproximación.* Como se muestra en la siguiente figura, se partió de un solenoide monocapa conformado por espiras arrolladas una próxima a la otra (de paso

constante) en un sistema de coordenadas sobre el eje  $x$  y con origen en 0. Sobre el mismo eje geométrico se alinearon los solenoides transmisor y receptor que tendrán longitudes  $\ell$  diferentes entre sí, pero en ambos casos  $\ell > R$ . Estas condiciones iniciales se consideraron para el primer experimento (figura 2).



**Figura 2.** Configuración de algunos parámetros del solenoide monocapa con núcleo de aire.

Sea  $N$  el número de espiras,  $R$  el radio de una de ellas y  $\ell$  la longitud del solenoide. La circulación de  $i$  a lo largo de  $\ell$  del solenoide se puede aproximar a una distribución laminar de corriente  $i$  en la superficie del cilindro sobre el cual está arrollado el solenoide (núcleo de aire), si se parte del hecho de que todas las espiras tienen el mismo radio  $R$  y se supone que por cada espira circula el mismo valor de corriente  $i$ . Luego se toma

la corriente que circula en cada espira y se multiplica por el número de espiras  $N$ , para obtener el valor de corriente laminar  $Ni$ . Con esta aproximación se obtiene una densidad lineal de corriente  $Ni/\ell$ . Haciendo esta aproximación se puede tomar un incremental de corriente laminar como si fuera una espira elemental de espesor  $dx$ , por la que circula una corriente  $(Ni/\ell) dx$ . Esto permite integrar desde 0 hasta  $\ell$  a lo largo del eje del solenoide, ya que la espira deja de considerarse en forma discreta para pasar a tratarse en conjunto como un todo continuo a lo largo del eje geométrico de alineación.

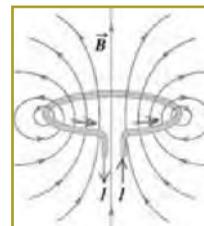
Desarrollando el proceso algebraico correspondiente se obtiene la ecuación 4, que denota la intensidad de campo  $B$ , para cualquier punto  $P$  ubicado sobre el eje del solenoide ( $P$  está a una distancia  $x_p$  del origen).

$$B = \frac{\alpha_0 Ni}{2\ell} \left( \frac{\ell - x_p}{\sqrt{R^2 + (\ell - x_p)^2}} + \frac{x_p}{\sqrt{R^2 + x_p^2}} \right) \quad (4)$$

El valor de campo magnético máximo de  $B$  se calcula mediante la ecuación 5, en la cual se considera  $P$  en el punto medio sobre el eje del solenoide.

$$B = \frac{\alpha_0 Ni}{\ell} \frac{1}{\sqrt{\left(2\frac{R}{\ell}\right)^2 + 1}} \quad (5)$$

*Segunda aproximación.* Para este caso se contó con un solenoide de longitud  $\ell$  muy corto y con un perímetro de la espira ( $2\pi R$ ) lo suficientemente pequeña en relación con la longitud de onda de la frecuencia de operación del experimento en VLF. Con las anteriores restricciones y guiados por la teoría de antenas, se modeló el solenoide como si fuera una antena *loop* corta, a través de la cual circulaba una corriente casi constante (figura 3).



**Figura 3.** Aproximación del solenoide a una espira circular y radiación de campo magnético.

En consecuencia, para el cálculo de  $B$  se emplearon las mismas relaciones de campos electromagnéticos aplicados para el dipolo hertziano corto.

En esta perspectiva, el vector de potencial magnético se calcula mediante la ecuación 6.

$$\vec{A} = \frac{\mu}{4\pi} (I_0 \ell) \frac{e^{-jkr}}{r} (\cos\theta \hat{r} - \text{sen}\theta \hat{\theta}) \quad (6)$$

Donde  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  era la constante de propagación,  $r$  es la distancia al punto donde se considera el potencial  $A$  y  $\ell$  la longitud del dipolo corto al cual se aproxima el solenoide.

La dificultad de obtener  $B$  para cada una de las espiras con cualquier distribución de corriente y que fuera válida en cualquier punto de observación, radicaba en la complejidad de desarrollar la integral del potencial  $A$ . Por esta razón, se halló el campo magnético para todo el conjunto mediante las ecuaciones 7 y 8.

$$H_\phi = \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \quad (7)$$

Entonces

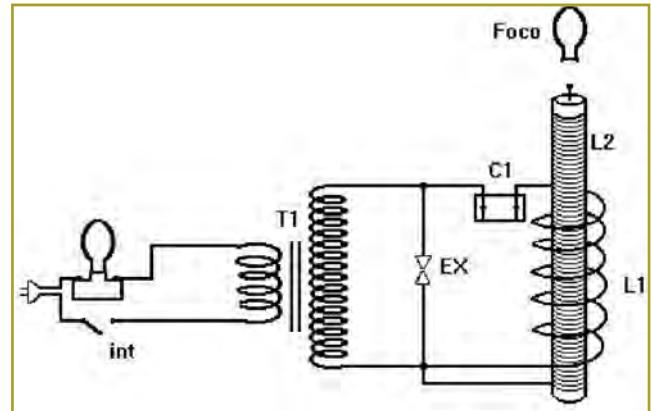
$$H_\phi = j \frac{k(I_0 \ell) \text{sen}\theta}{4\pi r} \left( 1 + \frac{1}{jkr} \right) e^{-jkr} \quad (8)$$

Para este experimento, el punto de observación  $r$  se eligió entre  $\frac{2D^2}{\lambda} > r > 0,62\sqrt{\frac{D^3}{\lambda}}$  en la subregión de Fresnel; en consecuencia, la potencia asociada a los campos en esta zona no son totalmente potencia radiada propagándose por el medio (campos dinámicos), ni tampoco potencia reactiva almacenada en forma similar a la que se puede encontrar en campos estáticos.

La potencia del solenoide correspondía a campos cuasiestáticos o de VLF que dependían en forma cuasiestacionaria de la distribución de cargas y corrientes en el solenoide, y cuya interacción daba como resultado un número complejo con una parte real y una parte imaginaria: la parte real o potencia radiativa podía transferirse al medio, y por tanto era la que se debía utilizar, mientras que la potencia reactiva era la parte imaginaria y ésta no podía transferirse al medio, simplemente permanecía oscilando entre los campos. La

magnitud de potencia radiativa y la reactiva variaban con la distancia respecto del origen y era posible predecirla con la ecuación de Friis modificada (Balanis, 2005) o tomando el promedio de la potencia recibida en muchos puntos ubicados a una distancia  $r$  del transmisor. De acuerdo con lo anterior, se pudo corroborar lo que se afirma en la bibliografía sobre que la zona de Fresnel tiene importancia únicamente en antenas grandes comparadas con la longitud de onda, como los reflectores parabólicos.

Continuando con los diseños, en la siguiente figura se muestra el circuito básico para construir el sistema de Tesla, que para el cálculo de  $B$  utiliza la primera aproximación (figura 4).



**Figura 4.** Diagrama esquemático del circuito del primer experimento.

El principio de funcionamiento consiste en que una corriente eléctrica alterna, que circula por una bobina  $L_1$ , crea a su alrededor un campo electromagnético variable, capaz de inducir corriente alterna en otra bobina  $L_2$  colocada en su mismo núcleo. Este sistema está conformado por la red eléctrica como fuente de suministro de energía (120 Vrms y 60 Hz), transformador elevador  $T_1$ , explosor EX, condensador  $C_1$  y dos bobinas:  $L_1$  y  $L_2$ . El EX se construye con dos tornillos que se enfrentan por sus cabezas y separan una distancia aproximada de 1 mm (figura 5).

Mientras que el condensador  $C_1$  se ensambla con placas metálicas de papel aluminio (grosor  $< 0,2$  mm y  $\sigma = 0,039$  W/m  $\cdot$  K), separadas por un dieléctrico con hojas de acetato ( $\epsilon_r = 3,9$ ). Su función es almacenar cargas eléctricas (figura 6).

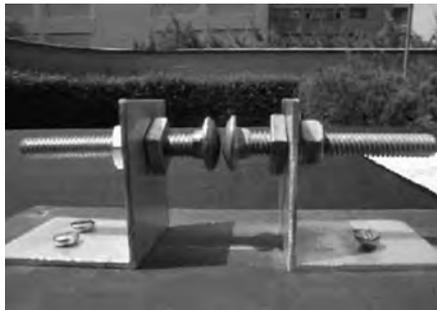


Figura 5. Configuración del explosor EX.



Figura 7. Construcción de los dos embobinados que conforman el circuito resonante.

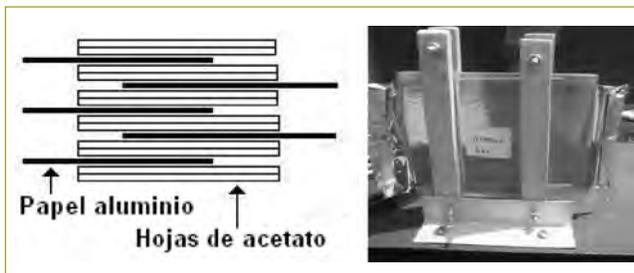


Figura 6. Configuración del condensador  $C_1$ .

En esta perspectiva, el campo magnético se genera y acopla a través de un circuito resonante y otro autorresonante, diseñados mediante las ecuaciones 8 y 9, y a la misma frecuencia.

$$f_R (Hz) = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} \quad (8)$$

$$f_{AR} (Hz) = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2 C_d}} \quad (9)$$

El primero que se modela matemáticamente mediante un circuito resonante serie está constituido por una bobina  $L_1$  ( $L$  con núcleo de aire de la figura 7), construida con alambre de cobre (resistividad igual a  $1,724 \cdot 10^{-6} \Omega \text{ cm}$ ), calibre 8, aislamiento de plástico y arrollada en seis espiras de 12 cm de diámetro, resuena con la capacitancia de  $C_1$ , determinada por el área efectiva de las placas conductoras, espesor y clase de

material empleado como dieléctrico. El segundo circuito es autorresonante, por lo que se modela como un circuito resonante paralelo, está formado por  $L_2$  ( $L$  esmaltada de la figura 7), con espiras de 8 cm de diámetro y embobinado con alambre de cobre calibre 12 sobre una botella de plástico con agua y de longitud 20 cm.

En autorresonancia, el inductor resuena con su propia capacitancia distribuida  $C_d$ ; ésta se calculó con la ecuación 10, que corresponde a la fórmula de Medhurst (Medhurst, 1947).

$$C_d (pF) = kD \quad (10)$$

Donde  $D$  es el diámetro y  $\ell$  la longitud del solenoide, ambos datos en cm; por su parte,  $k$  es un coeficiente de la relación  $\ell / D$  (tabla 2).

Como se requería una frecuencia de autorresonancia en la banda VLF, se intentó incrementar el efecto de la capacitancia distribuida del solenoide, haciendo  $k$  lo suficientemente grande, pero sin comprometer el factor de calidad del circuito; esto implicó solenoides largos.

Como se vio (figura 4),  $T_1$  interconecta la red eléctrica con un circuito resonante serie mediante sus embobinados; la configuración y relación del número de vueltas en estos últimos cumplen la función de acoplamiento magnético y también de elevar el nivel de la señal de voltaje desde 120 hasta 1300 Vrms; téngase en cuenta que de la relación de vueltas y del calibre del

Tabla 2  
Factores de  $k$  para el cálculo de la  $C_d$  del inductor

$\ell/D$	0,1	0,3	0,5	0,8	1	2	4	6	8	10	15	20	30
K	0,096	0,06	0,05	0,05	0,046	0,05	0,072	0,092	0,112	0,132	0,186	0,236	0,34

alambre entre los embobinados primario y secundario de  $T_1$  dependerá el nivel de corriente inducida. Después se conecta el explosor mediante una configuración en paralelo con el secundario de  $T_1$ .

Por su parte, el condensador  $C_1$  se fija a una de las puntas de la bobina primaria  $L_1$  y la otra punta a uno de los extremos del explosor. Así mismo, se interconectan los terminales de las bobinas  $L_1$  y  $L_2$  a la otra placa del explosor. A  $L_2$  también se conecta la carga que se quiere alimentar de manera inalámbrica.

A través del embobinado secundario del transformador  $T_1$  se inyecta corriente alterna al condensador  $C_1$ , generando una diferencia de potencial entre las placas de éste. La tensión es tan alta que rompe la resistencia del aire, haciendo saltar una chispa entre los bornes del explosor  $EX$ ; mediante ésta se cierra un circuito volante (Hayt et al., 2007) que permite la descarga de  $C_1$  a través de la bobina primaria  $L_1$ ; enseguida el condensador  $C_1$  se carga nuevamente, repitiendo el proceso y estableciendo un circuito sintonizado. Debido a la corriente alta que circula por éste, el campo cercano es predominantemente magnético.

La ubicación de  $L_2$  dentro de  $L_1$  (figura 8) permite que el flujo magnético  $\Phi$  generado por cada espira de  $L_1$  tenga un flujo magnético total  $\lambda = N\Phi$  que es mutuo con  $L_2$  porque también atraviesa su devanado, obteniéndose un acoplamiento magnético fuerte, casi unitario. Así las cosas, se induce una corriente eléctrica máxima que se puede utilizar para alimentar una bombilla de 100 W, como se mostrará más adelante. Algunos ejemplos comunes de dispositivos basados en la inducción magnética son los transformadores y generadores eléctricos.



**Figura 8.** Circuito eléctrico físico del segundo experimento.

Otro criterio de diseño fue aproximarse a una relación distancia de separación entre centros de espiras adyacentes/diámetro del alambre de 0,56, con el fin de maximizar el  $Q$  del circuito resonante. Para lograrlo se utilizó alambre 12, que tiene un diámetro de 2,05 mm; en consecuencia, la separación entre espiras fue de 1,153 mm.

El factor de calidad  $Q$  para el circuito resonante serie se evaluó con la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{X_{L_s}}{R_s} \quad (11)$$

Donde  $X_{L_s}$  y  $R_s$  son la reactancia inductiva y resistencia serie del solenoide, también llamado valor equivalente de resistencia de pérdidas. Se nota que cuanto más baja es la resistencia de la bobina en relación con la reactancia inductiva, más alto será el  $Q$  y más ideal será el inductor. Así mismo, se puede afirmar que en baja frecuencia predomina una resistencia de corriente continua y que el  $Q$  es una función lineal de la frecuencia, aunque también depende de las dimensiones, forma y separación entre las espiras.

Por su parte, para el circuito resonante paralelo se recurrió a la ecuación 12.

$$Q = \frac{R_p}{X_{L_p}} \quad (12)$$

Otro procedimiento para calcular el  $Q$  del circuito resonante paralelo, teniendo como criterio de diseño la geometría del solenoide, consiste en aplicar la fórmula de Medhurst:

$$Q = 7,5 D \varphi \sqrt{f} \quad (13)$$

Donde  $D$  es el diámetro de la bobina en cm,  $f$  es la frecuencia en MHz y  $\varphi$  es el coeficiente extraído del gráfico de Medhurst (1947), que depende de las relaciones  $l/D$  de la tabla 2.

En resumen, se obtuvieron los siguientes valores de diseño para los solenoides monocapa (tabla 3).

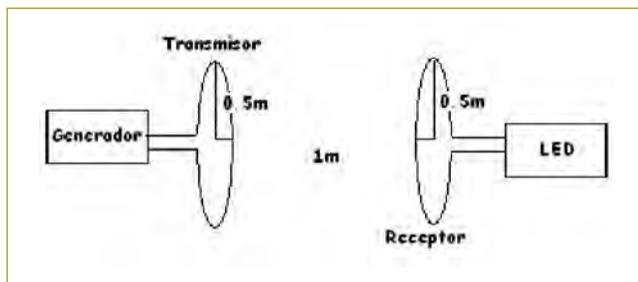
**Tabla 3**  
Datos del diseño del experimento 1

Parámetro / tipo de circuito	FR, FAR (KHz)	L	C	R	Q
Resonante	16	L1=27 $\mu$ H	C1=3.7 $\mu$ F	8 m $\Omega$	340
Autorresonante		L2=67 $\mu$ H	Cd=1.5 $\mu$ F	674 $\Omega$	100

Finalmente, el acoplamiento magnético se produce cuando el flujo magnético de un dispositivo enlaza a otro y, como consecuencia, le induce una corriente; en esta perspectiva, se logró un acoplamiento fuerte en el sistema porque se tuvo en cuenta la proximidad o inductancia mutua  $M$  entre los dos solenoides; éste se calculó mediante la ecuación 14.

$$F_{\text{acoplamiento}} = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (14)$$

A continuación se puede apreciar el circuito esquemático del segundo montaje experimental, con el cual se transmitió electricidad mediante ondas magnéticas a una frecuencia de 16 KHz (figura 9).



**Figura 9.** Circuito esquemático del segundo montaje experimental.

En este sistema se acoplan dos antenas hélices autorresonantes con una configuración de solenoides rectos monocapa de 50 cm de radio, construido con alambre de cobre esmaltado  $\sigma = 5,7 \times 10^7 \left( \frac{1}{\Omega \cdot m} \right)$ , autosoportado sobre una base de material aislante, para minimizar pérdidas por efecto de proximidad y con núcleo de aire, similar a un radio de Galena.

A partir de una frecuencia de trabajo conocida y utilizando la teoría de circuitos eléctricos se diseñaron  $L$  y  $C_d$  idénticos para los dos solenoides, porque tanto la hélice transmisora como la receptora tenían las mismas especificaciones geométricas. Para hallar el valor del inductor se empleó la ecuación 15, que corresponde a la fórmula de Wheeler (Wheeler, 1942).

$$L(\mu H) = 0,001 \frac{N^2 \cdot D^2}{\ell + 0,45D} \quad (15)$$

Donde  $N$  es el número de espiras,  $D$  el diámetro de la bobina y  $\ell$  la longitud de ésta (los dos últimos parámetros en mm).

Por su parte, el cálculo de la capacitancia distribuida siguió la fórmula de Medhurst ya mencionada. Los dos solenoides se alinearon en el mismo eje axial y se aproximaron hasta lograr acoplamiento magnético; de este modo, las líneas de fuerza del devanado transmisor se enlazaron con el devanado del receptor para máxima transferencia de energía por un medio inalámbrico. El  $Q$  de ambos solenoides se calculó con la ecuación 13 y dependió fundamentalmente de su geometría, ya que los parámetros físicos quedaban escondidos detrás de los geométricos.

Más adelante se resumen los datos que arrojó el diseño (tabla 4).

La resistencia de radiación para un dipolo corto, calculada a partir de las ecuaciones propuestas en los libros de antenas y electromagnetismo (Kraus, 2002; Sadiku, 2003) para una frecuencia de 16 KHz, es aproximadamente de 9 K $\Omega$ , de manera que la  $R$  de pérdidas del solenoide es diez veces menor.

**Tabla 4**  
Datos del diseño del experimento 2

Parámetro / tipo de circuito	FAR (KHz)	L	C	R	Q
Autorresonante	16	L1,2=98 $\mu$ H	Cd=1 $\mu$ F	829 $\Omega$	84

## RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

*Del primer experimento.* A continuación se muestra una escena del primer experimento, en la cual se ilumina un bombillo de 100 W, alimentado de manera inalámbrica desde una fuente (bobina externa) situada a 5 cm de distancia (figura 10). Este sistema requería corrientes grandes con el fin de alcanzar cobertura, para lo cual fue necesario sintonizar y acoplar magnéticamente los circuitos transmisor y receptor para lograr una inducción de corriente que suministrara cargas críticas; sin embargo, una buena sintonía implicaba bajas pérdidas en el inductor que maximizara el factor de calidad de los solenoides, además de garantizar una conservación energética entre éstos.

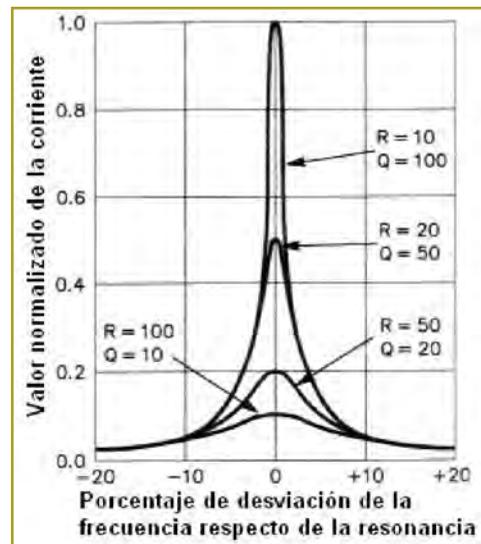


**Figura 10.** Pruebas realizadas con el primer experimento.

En el caso específico de este experimento, la resistencia de pérdidas no sólo comprendió la resistencia que resultaba del efecto pelicular por la circulación de corriente a través del conductor sobre el que se construyó la bobina, sino que también sumaban las pérdidas por dispersión de campo en el núcleo de aire del solenoide. Además, a la frecuencia de resonancia, ubicada en el valor intermedio de la banda de VLF, no lograban acoplarse algunas líneas de campo debido a que las longitudes de onda grandes que emitía el transmisor no garantizaban directividad.

Seguidamente se muestran varias curvas del factor de calidad de resonancia logradas en el experimento a partir de distintos embobinados utilizados para la cons-

trucción del solenoide 1 (figura 11). Como se evidencia, cuando el transmisor resuena y el valor de  $R_s$  del inductor es alto, la corriente a través del circuito disminuye de modo inversamente proporcional; en este caso, el factor de calidad  $Q$  es bajo y la curva de resonancia es ancha. Por el contrario, a menores valores de  $R_s$  tanto mayor será la amplitud de  $I$ ; de hecho, teóricamente, si no hubiese  $R$  alguna en el circuito, la amplitud de  $I$  y el valor de  $Q$  serían infinitos en el punto de resonancia.



**Figura 11.** Curvas de resonancia para diferentes valores de  $Q$ .

En resumen, se consiguió selectividad con respecto a la frecuencia gracias a la selección de materiales adecuados y al seguimiento de algunos criterios de diseño, tales como construir solenoides con alambres conductores de diámetros grandes, diseñar el sistema a una frecuencia intermedia de VLF, embobinar los solenoides con una geometría cilíndrica que garantizará un coeficiente  $k$  (tabla 3) aproximado a 2 y que no implicará  $R_s$  altas; sin embargo, se falló en cobertura para la máxima transferencia de energía al circuito autorresonante por las altas pérdidas de éste.

*Del segundo experimento.* Como ya se reseñó, la segunda experiencia investigativa se diseñó y construyó para inducir campo magnético y eléctrico mutuo en zona de Fresnel; el propósito era crear una onda viajera y lograr gran cobertura. Sin embargo, la radiación elec-

tromagnética, aunque ha demostrado ser eficiente para la transmisión de señales de información moduladas en una portadora, no lo es para la transferencia eficaz de energía eléctrica porque la dispersa en muchas direcciones, desperdiciando grandes cantidades de ésta en el espacio libre, además de sufrir una atenuación de potencia inversamente proporcional a la distancia. En resumen, se encendió un led de 90 mW de potencia, a una distancia de 80 cm y con una eficiencia del 60 % (figura 12).



**Figura 12.** Pruebas realizadas con el segundo experimento.

En la transferencia de energía a través de campo cercano (subregión de Fresnel) se lograron algunos aciertos, como la sintonía del sistema y el acoplamiento electromagnético; pero también continúan algunos problemas por superar. Un desacierto fue que la fuente de suministro (generador) no tuvo la potencia suficiente para hacer funcionar nada a una distancia mayor de 80 cm; sin embargo, debido al fenómeno de autorresonancia fue posible que la segunda corriente fuera grande como para encender un led.

Tal como sucedió en el primer experimento, se produjeron pérdidas que se intentaron controlar; éstas tuvieron distintos orígenes, entre las cuales se mencionan las pérdidas debidas a la resistencia del embobinado, constituida por la resistencia óhmica del alambre del arrollamiento; las ocasionadas por el efecto de proximidad de los solenoides; las generadas por corrientes parásitas inducidas en materiales conductores próximos al solenoide; las pérdidas dieléctricas en los materiales aislantes asociadas al inductor (soporte del arrollamiento); las pérdidas en el núcleo y por efecto peculiar.

Para el caso de los circuitos autorresonantes de ambos experimentos, y como por naturaleza esta frecuencia

se ubica por arriba de la frecuencia de resonancia, fue necesario incrementar la  $C_d$  del solenoide para sintonizar el sistema a la misma  $F$ , que se logró mediante un arrollamiento de espiras muy juntas y consecutivas, y con alambre esmaltado, así como con un núcleo adecuado aprovechando que el aire tiene menor constante dieléctrica y, por consiguiente, arroja mayor capacidad distribuida; sin embargo, en los circuitos autorresonantes hay baja estabilidad y tanto la resistencia del inductor como su capacitancia distribuida intervenían en el  $Q$  del circuito, por lo que fue conveniente recurrir a consideraciones geométricas para superar estos inconvenientes y lograr la sintonía del sistema.

No obstante lo anterior, la autorresonancia por inducción demostró ser medianamente eficiente para aplicaciones de este tipo, ya que la energía de la onda que se enlazaba en el segundo solenoide era fundamentalmente magnética; ello dio lugar a otras pérdidas por histéresis, residuales y por corrientes parásitas o de Foucault, que le restaron eficiencia al sistema.

Como el solenoide receptor estaba sometido a un campo alterno, demoraba medio ciclo de ida y otro medio de regreso para atravesar distintos estados de energía magnética; por lo tanto, al integrar la curva en un ciclo completo se obtenía la diferencia entre la energía absorbida y la energía devuelta, o sea, resultaba la energía gastada en hacer describir al solenoide un ciclo completo. En consecuencia, la pérdida por histéresis por ciclo y por unidad de volumen era proporcional a la superficie que encerraba el lazo.

Por su parte, las corrientes parásitas aparecían cuando el solenoide receptor se sometía al campo magnético longitudinal inducido; como resultado de este campo, se generaba en dicho circuito corrientes parásitas que, de acuerdo con la ley de Lenz, producían un campo magnético antagónico; en consecuencia, estas corrientes eran directamente proporcionales a la inducción alterna  $B_{máx}$  y a la frecuencia e inversamente proporcionales a la resistividad del volumen del material receptor. Por esto, los valores altos de inducción y la frecuencia de operación en VLF causaron valores significativos de pérdidas, tanto debidas a histéresis como a corrientes parásitas, porque dependían proporcionalmente de  $B_{máx}$  y de  $f$ ; éstas, con las pérdidas residuales y las de efecto *skin*, limitaron el alcance de la comunicación inalámbrica a través de campo magnético inducido.

En resumen, para el primer experimento fue necesario conservar la fuente de energía y el dispositivo de captura muy cercana el uno del otro, para lograr transferencia de energía con magnitudes relativamente altas, mientras que para el segundo se consiguió cobertura, en detrimento de la magnitud de la señal transferida.

## DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Este apartado se plantea desde tres perspectivas: eficiencia de los sistemas de transferencia de energía por un medio inalámbrico, implicaciones para la salud de las personas debido a la propagación de ondas magnéticas con niveles de intensidad altos, y nuevas posibilidades que se abren en este campo de investigación.

Con respecto al primer aspecto, la eficiencia en la transferencia de energía mediante inducción magnética y en campo cercano es relativamente baja si la potencia de la fuente y la frecuencia de operación son bajas, el factor de acoplamiento del sistema es menor que 1 y el factor de calidad de los bobinados de los circuitos resonantes no es mayor de cien veces, por lo menos. Lo anterior implica investigar en nuevos materiales, operarlos en los puntos de mayor linealidad posible y explorar nuevas geometrías para minimizar las pérdidas, tanto en los devanados como en los núcleos; así mismo, se sugiere evitar sistemas que se sintonicen mediante autorresonancia, ya que la inducción magnética por estos medios genera enormes pérdidas en el núcleo, que sumado al de los bobinados, le restan eficiencia al sistema. En cuanto a la característica de eficiencia del sistema WiTricity, referida por los estudiosos del MIT, acerca de que toda la energía del primer circuito resonante no es inducida al segundo sino que parte de esa energía es reabsorbida por la bobina transmisora, en un sistema resonante fuertemente acoplado, se podría inferir que no es posible generar o captar campo magnético con una eficiencia cercana a 1; sin embargo, es susceptible de mejorar el 40 % logrado en las investigaciones realizadas por el mismo instituto (Lee et al., 2012), si se implica en el enlace una interacción de campos, no sólo campo magnético, puesto que la potencia media transferida tiene una relación directa con la dependencia que exista entre  $E$  y  $H$ .

En cuanto al segundo aspecto, de acuerdo con las normas de seguridad para distintos tipos de emisiones (IEEE, 2006), se recomienda emplear frecuencias

magnéticas bajas que se caracterizan por ser no ionizadas, por lo cual no afectan a las personas; ahora bien, por leyes de propagación está demostrado que a bajas frecuencias hay baja interferencia, y en condición de resonancia magnética no radiante, la mayoría de los materiales conductores circundantes no interactúan con los campos magnéticos, razón por la que no hay acoplamientos indeseados; no obstante, a bajas frecuencias las longitudes de onda son grandes, lo cual implica isotropía que dispersa la energía, desacoplando al sistema y restándole eficiencia; además, en bajas frecuencias hay dificultad para lograr buenas resonancias debido a que el  $Q$  del circuito tiende a ser también bajo.

Por otra parte, se restringen niveles de intensidad de campo que desencadenen efluvios, coronas y arcos eléctricos que puedan atentar contra la integridad del ser humano. En esta perspectiva, algunos científicos del MIT afirman que WiTricity no representa ningún riesgo significativo para la salud humana (Kurs et al., 2007).

Por último, sobre las nuevas posibilidades que se abren para la tecnología WiTricity, muchos usuarios de dispositivos electrónicos (*laptops*, teléfonos celulares, reproductores MP3/MP4, cámaras, PDA, tabletas, televisores y teléfonos inteligentes, entre otros) que se alimentan a través de baterías que se deben recargar muchas veces desean una solución inalámbrica, sencilla y universal que los libere de los problemas de las conexiones alámbricas de los cargadores y adaptadores, además de ser ecológico, ya que eliminaría cientos de kilómetros de cables de alimentación y miles de millones de pilas desechables; en esta perspectiva, se continuará investigando en la tecnología WiTricity para mejorar en las limitaciones antes mencionadas, para que se convierta en una solución adecuada a partir del cumplimiento con las normas aplicables en relación con las radiaciones electromagnéticas máximas permitidas en el hogar, oficina, industria y demás entornos. Avanzando en este sentido, se podría extender a aplicaciones que capten la energía solar fuera de la atmósfera del planeta para retransmitirla mediante haces dirigidos a las residencias, medios de transporte y cargas industriales ubicadas en la Tierra. Desde luego que surgirán nuevas cuestiones por resolver, como evitar el robo de energía eléctrica y garantizar sistemas de transferencia eficientes en una gama o escala de conversión amplia, desde mW hasta KW, que le dé acceso a cualquier tipo de usuario.

Para trabajos futuros en este campo de investigación, y en aras de identificar la frecuencia de operación adecuada, se podrían explorar en el laboratorio las frecuencias de resonancia de Schumann de 7,83, 14,1 y 20,3 Hz (Nickolaenko, 2002) o cualquiera de sus armónicas que propicie un acoplamiento fuerte, además de minimizar las pérdidas con el propósito de mejorar la eficiencia del sistema de transmisión de energía eléctrica mediante inducción magnética en campo cercano; a esas frecuencias, pero fundamentalmente a 7,83 Hz, se podría conseguir resonancia bien acoplada, similar a la que se presenta en acústica, electromagnética, magnética o nuclear, porque a dicha frecuencia resuena la cavidad tierra-ionosfera, según Schumann (1952), y con esta premisa se minimizan las pérdidas, ya que no sólo el transmisor y el receptor entrarían en resonancia mediante sintonización, sino que también el medio de propagación lo estaría por su propia naturaleza; en consecuencia, se operaría en un régimen fuertemente acoplado y la transferencia de energía podría ser más eficiente.

## CONCLUSIONES

Los sistemas de transferencia de energía eléctrica experimentados en esta investigación arrojan un mejoramiento en la eficiencia respecto de trabajos previos; sin embargo, queda aún mucho trabajo por realizar en cuanto a mejorar en cobertura e identificar las frecuencias más propicias para lograr acoplamientos fuertes en los enlaces, y dispositivos transmisores - receptores estables y fáciles de fabricar. Definitivamente, se descarta diseñar e implementar sistemas que recurran a la sintonía por autorresonancia, ya que se incrementan las pérdidas y disminuye la eficiencia.

Los trabajos en esta perspectiva pueden llevar a la tecnología *WiTricity* a una buena puesta a punto, y aunque está en un nivel en el que puede ser útil en algunas aplicaciones prácticas, se podría extender a otras aplicaciones y mejorar aún más, tanto en eficiencia como en cobertura, mediante nuevas geometrías de los elementos resonantes y ensayando con nuevos materiales que incrementen el factor de calidad  $Q$  de los circuitos.

Los sistemas actuales que emplean radiación electromagnética, como las antenas de radio, no sirven para el transporte eficiente de energía porque la dispersan en muchas direcciones, desperdiciando grandes cantidades de energía en el espacio, además de una atenuación de potencia radiada en una proporción cuadrática a la distancia de propagación.

## REFERENCIAS

- Xin, W.G. & Wang, Yan (2010). A method for improving the wireless power transmission efficiency of an endoscopic capsule based on electromagnetic localization and synthesis of magnetic field vector. *Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, vol. 6, 113-122.
- Pozar, D.M. (2005). *Microwave Engineering*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 736 pp.
- Karalis, A., Joannopoulos, J.D. & Soljacic, M. (2008). Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer. *Annals of Physics*, vol. 323, N.º 1, 34-48.
- Hamam, R. E., Karalis, A., Joannopoulos, J.D. & Soljacic, M. (2009). Efficient weakly-radiative wireless energy transfer: An EIT-like approach. *Annals of Physics*, vol. 324, N.º 8, 1783-1795.
- Yaghjian, A. (1986). An overview of near-field antenna measurements. *IEEE transactions antennas propagation*, AP-34: 30-45.
- Paz, Hernán (2009). *Sistemas de comunicaciones digitales* (1.ª ed.). Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. 399 pp.
- Balanis, C.A. (2005). *Antenna theory: analysis and design*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 1047 pp.
- Medhurst, R. (1947, March). HF resistance and self capacitance of single-layer solenoids. *Wireless Engineering*, p. 80.
- Hayt, W., Kemmerly, J. & Durbin, S. (2007). *Engineering circuit analysis*. Bogotá: McGraw Hill, 856 pp.
- Wheeler, H. (1942, September). Formulas for the skin effect. *Proceedings of the IRE*, pp. 412-424.
- Kraus, John (2002). *Antennas* (3.ª ed.), Bogotá: McGraw Hill, 574 pp.
- Sadiku, M. (2003). *Elementos de electromagnetismo* (3.ª ed.). Bogotá: Oxford, 431 pp.
- Lee, Jeongwon, Zhen, Bo, Song-Liang, Chua, Qiu, Wenjun, Joannopoulos, John D., Soljacic, Marin & Shapira, Ofer (2012). Observation and differentiation of unique high-Q optical resonances near zero wave vector in macroscopic photonic crystal slabs. *Physical Review Letters*, vol. 109, N.º 6, 236-241. Recuperado el 17 de agosto de 2012 de <http://prl.aps.org/abstract/PRL/v109/i6/e067401>.
- IEEE (2006). IEEE standard C95.1-2005 IEEE standard for safety levels with respect to human exposure to radio frequency electromagnetic fields, 3 kHz to 300GHz. Piscataway, NJ.
- Kurs, A., Karalis, A., Moffatt, R., Joannopoulos, J., Fisher, P. & Soljacic, M. (2007). Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances. *Science*. vol. 83, p. 317.
- Nickolaenko, A. (2002). *Resonances in the earth-ionosphere cavity*. Tokyo: Kluwer.

# Calidad del agua lluvia

## Rainwater quality

JAIRO ALBERTO ROMERO ROJAS<sup>1</sup> - IVÁN CAMILO ANDRADE SANTANA<sup>2</sup> - FELIPE NICOLÁS MORA RUSINQUE<sup>3</sup>

1. Ingeniero civil. MEEE. Profesor titular. Escuela Colombiana de Ingeniería.

2. Ingeniero civil. Escuela Colombiana de Ingeniería.

3. Ingeniero civil. Escuela Colombiana de Ingeniería.

jairo.romero@escuelaing.edu.co - ing.camiloandrade@gmail.com - felipenicolasm@yahoo.com

Recibido: 22/01/2013 Aceptado: 15/02/2013

Disponible en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

### Resumen

Para aprovechar el agua lluvia como fuente alterna es necesario conocer su calidad. En este artículo se presentan resultados de evaluación de calidad del agua lluvia, medida por su pH, alcalinidad, acidez, dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), dureza, turbidez, color, conductividad, absorción ultravioleta (AUV), demanda química de oxígeno (DQO) y conteo de coliformes. Se encontró que todos los parámetros de calidad del agua lluvia analizados cumplen con la norma colombiana de agua potable, con excepción de pH, turbiedad, color y conteo de coliformes. Los análisis indican que la calidad del agua lluvia depende de la captación, así como del periodo y recorrido en el ambiente<sup>(1)</sup>.

**Palabras claves:** agua lluvia, calidad del agua, reúso de agua.

### Abstract

The harnessing of rainwater as an alternative resource requires the knowledge of its quality. This article evaluates rainwater quality parameters such as pH, alkalinity, acidity, carbon dioxide, hardness, turbidity, color, conductivity, ultraviolet absorption, chemical oxygen demand and coliform count. It was observed that all the parameters of rainwater quality measured were within the permissible limits specified in the Colombian drinking water standard with the exception of pH, turbidity, color and coliform count. The analysis showed that the quality of rainwater depends on the conditions of the catchment and the period and way of its transportation<sup>(1)</sup>.

**Keywords:** rainwater, water quality, reuse of water.

## INTRODUCCIÓN

El agua lluvia es un componente que forma parte del ciclo hidrológico y alimenta la escorrentía superficial, subsuperficial y subterránea. Los sistemas de captación de agua lluvia interceptan el fluido antes de continuar en el ciclo natural para su aprovechamiento en múltiples usos. El empleo de este tipo de sistemas se caracteriza por la recolección, concentración y almacenamiento del agua que corre por una superficie natural o artificial hecha por el hombre. Se trata de un recurso que debe ser considerado dentro del abanico de opciones planeadas para el mejoramiento o la ejecución de un sistema de suministro de agua en una comunidad.

En las ciudades de Barcelona, Santiago de Compostela y La Coruña se realizó una caracterización de las aguas pluviales (figura 1) desde su precipitación o primer contacto con la superficie (lluvia urbana); su paso por los tejados (escorrentía de tejado); su paso por la superficie de la ciudad (escorrentía superficial urbana); en caso de haberlos, su entrada en sistemas de Tedus (técnicas de drenaje urbano sostenible); su entrada en colectores (alcantarillado pluvial y alcantarillado sanitario) e instalaciones asociadas (tanques de tormenta)<sup>(2)</sup>.

El estudio comprendió un total de 17 puntos de control representativos de zonas urbanas y de unos 60 episodios de lluvia, en los que se analizan más de 100 parámetros (microbiológicos, indicadores de sólidos, nutrientes, indicadores de salinidad, materia orgánica, metales, disolventes clorados, fármacos, pesticidas y otros parámetros). Del estudio de Llopard-Mascaro<sup>(2)</sup>

se destacan las siguientes conclusiones: en cuanto a contaminación microbiológica, las concentraciones de *Escherichia coli* y enterococos intestinales aumentan a escala logarítmica, en varios órdenes de magnitud, al avanzar en el recorrido urbano del agua lluvia; a medida que se avanza en el recorrido del ciclo urbano del agua lluvia, el volumen de agua que se puede captar es mayor, aunque también es mayor su carga contaminante; para una valorización o aprovechamiento del agua pluvial, cuanto más avanzado se encuentre el punto de captación dentro del ciclo, más necesarias son las técnicas de minimización o de tratamiento de esta contaminación.

Del estudio llevado a cabo por la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica de los diferentes parámetros físico-químicos del agua lluvia<sup>(3)</sup>, en doce lugares de Santiago, durante siete tormentas del invierno del 2001, se destaca que en todos los eventos se observó gran variabilidad en la concentración de los contaminantes durante el transcurso de la tormenta, con los valores más altos, casi siempre, para los diez primeros milímetros de lluvia (figura 2).

En un análisis hecho de la calidad del agua lluvia en La Bocana de Buenaventura se hallaron coliformes fecales en los tanques, situación causada por la falta de cubrimiento de los tanques y por la ausencia de desinfección. Sin embargo, el agua lluvia, antes de interceptar el techo, no presentó riesgo microbiológico. El estudio determinó que el agua lluvia se usa y es aceptada por la comunidad de La Bocana; el 83 % de las viviendas la utilizan en diferentes formas: agua lluvia sola (27 %),

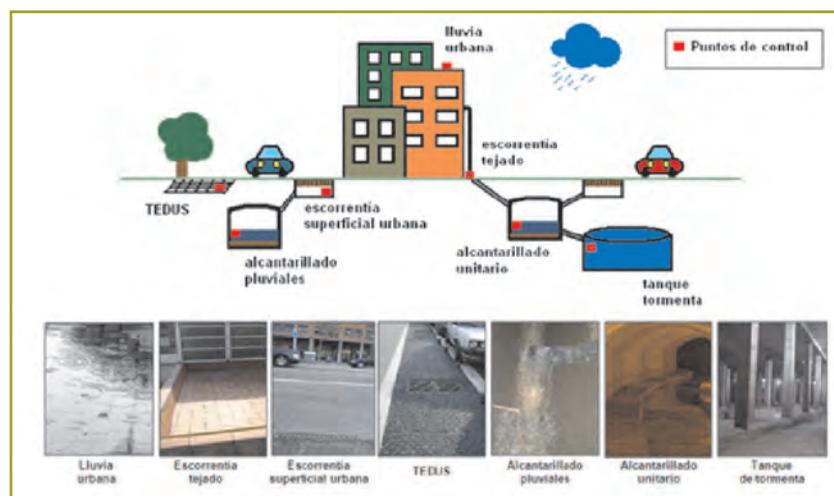


Figura 1. Puntos de control en el recorrido del agua lluvia<sup>(2)</sup>.

agua lluvia-acueducto (42 %), agua lluvia-acueducto-río (7 %), agua lluvia-aljibe (2 %). El agua lluvia se emplea para consumo doméstico, lavado de ropa, alimentos y aseo personal. Esta técnica ha garantizado la satisfacción de la demanda básica de la comunidad, dado que el sistema entubado no ha cumplido con el nivel de servicio esperado. Las precipitaciones son suficientes en cantidad y calidad para el suministro, aunque existen limitaciones para un mejor aprovechamiento por deficiencias en el área de techos y en la capacidad de los tanques de almacenamiento<sup>(4)</sup>.

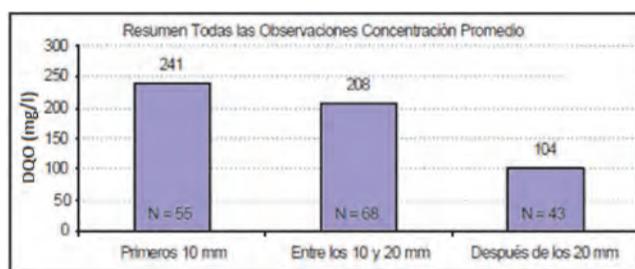


Figura 2. Variación de DQO durante una tormenta<sup>(3)</sup>.

Caracterizaciones de aguas lluvias llevadas a cabo por Méndez<sup>(5)</sup> y Kim<sup>(6)</sup> se muestran a renglón seguido (tabla 1).

**Tabla 1**  
Características de las aguas lluvias<sup>(5,6)</sup>

	Méndez	Kim
pH	5,8 - 6,9	6,3 - 6,7
Conductividad $\mu\text{s}/\text{cm}$	9 - 102	54 - 37
Turbiedad	5 - 35	0,8 - 1,4
SST mg/L	10 - 150	1,2 - 1,7
$\text{NO}_3$ mg/L	0 - 4,7	2,8 - 3,1
COT mg/L	-	1,1 - 1,3
CT, UFC/100 mL	64 - 1367	5000 - 10.000
CF UFC/100 mL	1 - 253	-

Las aguas procedentes de escorrentía superficial, de sistemas de drenaje pluvial, presentan un grado de contaminación no despreciable, dependiendo de su exposición a las posibles fuentes de contaminación (tabla 2).

## METODOLOGÍA

Las muestras de agua lluvia atmosférica, agua sin ningún contacto adicional, se tomaron del techo del edificio F de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Las muestras de agua lluvia del tejado son de agua de la caja de recolección de agua lluvia del techo del edificio F, tomadas en la parte baja del edificio F, donde descarga la red de agua lluvia. Las muestras se almacenaron y analizaron de acuerdo con las especificaciones de los métodos estándar<sup>(7)</sup>.

## RESULTADOS

### Oferta de agua

La precipitación promedio mensual en la zona de estudio, tomada de la estación de Guaymaral, de la Secretaría de Ambiente del Distrito Capital, ubicada en la Escuela Colombiana de Ingeniería, ignorando la evaporación, se presenta posteriormente (tabla 3 y figura 3). Los datos analizados muestran que el mes más lluvioso del año es octubre, con valores promedio superiores a los 104 mm/mes y que el mes más seco es enero, con un valor promedio de 23 mm/mes.

Teniendo en cuenta los promedios mensuales de precipitación; el material del techo; una pérdida por evaporación del 20 % anual a causa de la textura del material del techo, de las pérdidas en las canaletas, del almacenamiento y de la ineficiencia del sistema de captación, distribuida uniformemente durante los doce meses del año; un coeficiente de escorrentía superficial

**Tabla 2**  
Fuentes principales de contaminación<sup>(2)</sup>

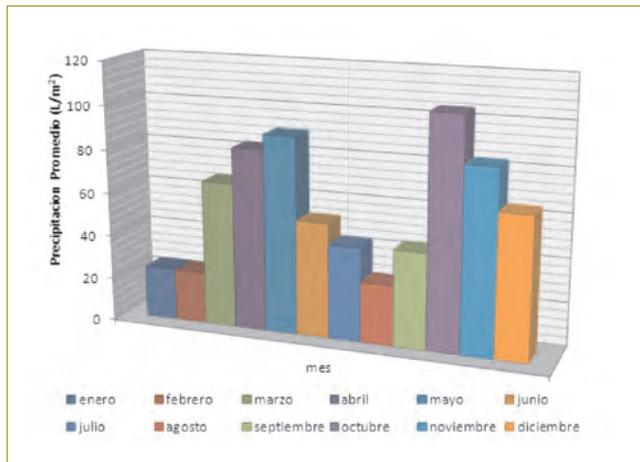
Categoría	Punto de control	Fuentes principales de aportes de contaminación
Carga contaminante baja	Lluvia urbana	Contaminación atmosférica: combustiones incompletas originadas por el tráfico rodado, sistemas de calefacción, actividad industrial, etc.
	Escorrentía superficial	Lavado de la superficie de tejado: arrastre de sedimentos depositados en la superficie de tejado durante el tiempo seco y corrosión de los materiales del propio tejado.

de 0,83<sup>(8)</sup> y el área superficial del techo del edificio F de 170 m<sup>2</sup>, se calculan las ofertas mensuales de agua de la tabla 4.

**Tabla 3**

Precipitación promedio mensual, periodo 1998 - 2010

Mes	Precipitación (mm/mes)	Mes	Precipitación (mm/mes)
Enero	23	Julio	42
Febrero	23	Agosto	27
Marzo	66	Septiembre	43
Abril	82	Octubre	104
Mayo	89	Noviembre	83
Junio	52	Diciembre	64
Promedio anual	59		



**Figura 3.** Precipitación promedio mensual, periodo 1998 - 2010.

**Tabla 4**

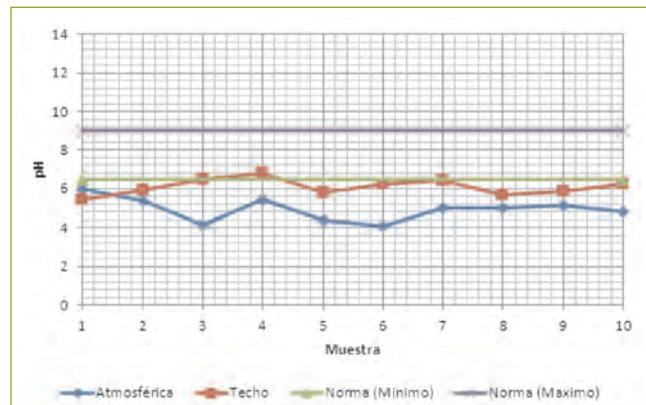
Oferta mensual de agua en m<sup>3</sup>

Mes	m <sup>3</sup>	Mes	m <sup>3</sup>
Enero	3,28	Julio	5,94
Febrero	3,25	Agosto	3,81
Marzo	9,21	Septiembre	6,05
Abril	11,48	Octubre	14,49
Mayo	12,43	Noviembre	11,55
Junio	7,26	Diciembre	8,93

**CALIDAD DEL AGUA LLUVIA**

Las características del agua lluvia atmosférica y del agua lluvia del tejado determinadas (pH, turbiedad, color, dureza, conductividad, AUV, DQO, CF, alcalinidad acidez y CO<sub>2</sub>) se presentan más adelante (tablas 5 y 6).

El pH (figura 4) del agua lluvia atmosférica es de 4,9 ± 0,5 y el del agua lluvia de tejado 6,1 ± 0,4, valores inferiores al de la norma para agua potable colombiana<sup>(9)</sup>. El incremento del pH en el agua lluvia del tejado puede originarse en el contacto con los depósitos de sedimentos en el tejado que, al parecer, introducen un aumento en la alcalinidad. Los valores de pH son consecuentes con los valores encontrados en la bibliografía<sup>(5,6)</sup>.



**Figura 4.** pH del agua lluvia según su origen.

La alcalinidad presente en todas las muestras tomadas es causada por bicarbonatos. Las muestras atmosféricas exhiben una alcalinidad menor que las de tejado, exceptuando la última muestra; con valores entre 6 y 26 mg/L - CaCO<sub>3</sub> y un promedio de 14 mg/L - CaCO<sub>3</sub>. Las muestras de tejado indican una alcalinidad entre 12 y 32 mg/L - CaCO<sub>3</sub> y un valor promedio de 17 mg/L - CaCO<sub>3</sub>. Los valores observados de alcalinidad cumplen la norma colombiana para agua potable<sup>(9)</sup>. El incremento de la alcalinidad en el agua lluvia del tejado puede originarse en el contacto con depósitos de sedimentos del tejado.

Las muestras atmosféricas exhiben una acidez muy variable, con valores entre 4 y 20 mg/L CaCO<sub>3</sub> y un promedio de 10 ± 5 mg/L CaCO<sub>3</sub>. Las muestras de tejado indican una acidez entre 8 y 14 mg/L CaCO<sub>3</sub> y un valor promedio de 11 ± 2 mg/L CaCO<sub>3</sub>. La causa de acidez es CO<sub>2</sub>, como resultado de la disolución de dióxido de carbono atmosférico, debido a que el único contacto que tiene es con la atmósfera<sup>(10)</sup>.

Las muestras atmosféricas exhiben valores de CO<sub>2</sub> entre 3 y 17 mg/L - CO<sub>2</sub> y un promedio de 9 ± 4 mg/L - CO<sub>2</sub> mientras que las de tejado presentan valores entre 7 y 12 mg/L - CO<sub>2</sub> y un promedio de 10 ±

**Tabla 5**  
Calidad del agua lluvia atmosférica

Muestra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Promedio	Intervalo	
Turbiedad (UNT)	7,1	7,2	4,6	2,1	3,8	6,4	6,7	7,8	3,2	4,3	5,4	± 1,9	2,1
Color (UPC)	30	20	25	10	10	10	10	10	15	10	15	± 7	10
pH	6	5,4	4,1	5,5	4,4	4,1	5	5	5,2	4,8	5,0	± 0,6	4,10
Dureza mg/L - CaCO <sub>3</sub>	24	10	20	32	20	20	20	20	16	24	21	± 5	10
Conductividad (µs/cm)	16	20	10	16	20	14	11	12	18	22	16	± 4	10
AUV (cm <sup>-1</sup> )	0,04142	0,03105	0,02575	0,02125	0,06415	0,03455	0,06555	0,03735	0,02455	0,02975	0,0375	± 0,0148	0,02
DQO - mgO <sub>2</sub> /L	3,2	12,8	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	9,6	6,4	5,12	± 3,26	3
Coliformes fecales (UFC/100 mL)	10	30	16	40	30	60	38	18	42	73	36	± 19	10
Alcalinidad mg/L - CaCO <sub>3</sub>	24	8	6	12	12	12	10	10	22	26	14	± 7	6
Acidez mg/L - CaCO <sub>3</sub>	16	4	6	14	10	4	8	6	16	20	10	± 5	4
CO <sub>2</sub> mg/L	14	4	5	12	9	4	7	5	14	18	9	± 5	4

**Tabla 6**  
Calidad del agua lluvia del tejado

Muestra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Promedio	Intervalo	
Turbiedad (UNT)	5,8	2,6	3,5	6,0	3,0	4,9	5,4	4,0	3,0	5,4	4,4	± 1,2	2,6
Color (UPC)	30	20	20	20	25	20	20	30	20	25	23	± 4	20
pH	5,5	5,9	6,5	6,8	5,8	6,2	6,4	5,7	5,8	6,3	6,1	± 0,4	5,5
Dureza mg/L - CaCO <sub>3</sub>	24	16	28	14	18	28	16	30	16	18	21	± 6	14
Conductividad (µs/cm)	51	25	27	23	23	25	25	24	26	22	27	± 8	22
AUV (cm <sup>-1</sup> )	0,017742	0,02911	0,01355	0,01415	0,02141	0,01454	0,01836	0,02155	0,01741	0,01878	0,0187	± 0,0044	0,01
DQO - mgO <sub>2</sub> /L	3,2	3,2	6,4	6,4	6,4	3,2	6,4	6,4	3,2	6,4	5,12	± 1,57	3
Coliformes fecales (UFC/100 mL)	24	42	38	52	42	74	46	26	54	76	47	± 17	24
Alcalinidad mg/L - CaCO <sub>3</sub>	32	12	28	18	12	16	16	14	16	12	18	± 7	12
Acidez mg/L - CaCO <sub>3</sub>	10	13	12	8	14	10	14	14	12	8	12	± 2	8
CO <sub>2</sub> mg/L	9	11	11	7	12	9	12	12	11	7	10	± 2	7

1mg/L - CO<sub>2</sub>, valores que cumplen con la norma de agua potable colombiana<sup>(9)</sup>.

Los valores de conductividad del agua lluvia atmosférica varían entre 10 y 22  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , con un promedio de  $16 \pm 4 \mu\text{S}/\text{cm}$ , y entre 22 y 51  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , con un promedio de  $27 \pm 8 \mu\text{S}/\text{cm}$ , en el agua de tejado, dejando en evidencia que la calidad del agua se deteriora con el incremento de su recorrido (figura 5). Los valores obtenidos de conductividad, tanto en las muestras del tejado como en las atmosféricas, cumplen con la norma vigente de calidad del agua potable colombiana.

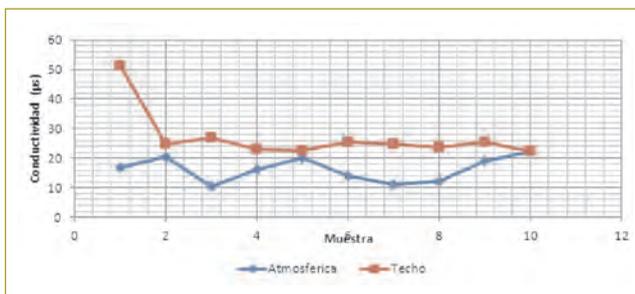


Figura 5. Conductividad del agua lluvia.

El color del agua lluvia (figura 6) oscila entre 10 y 30 UPtCo, con un promedio de  $15 \pm 7 \text{ UPTCo}$  en el agua atmosférica, mientras que en las muestras del tejado los valores oscilan entre 20 y 30 UPtCo, con un valor promedio de  $23 \pm 4 \text{ UPTCo}$ , valores similares a los obtenidos por Montt et al. en las aguas de Santiago de Chile (3), que no cumplen en todos los casos con la norma colombiana para agua potable<sup>(9)</sup>.

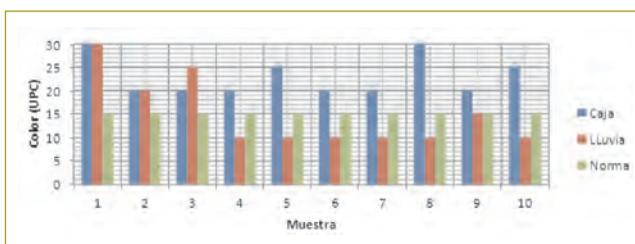


Figura 6. Color del agua lluvia.

Se obtuvieron valores de turbiedad para las muestras atmosféricas entre 2 - 7 UNT, con un promedio de  $5,3 \pm 1,8 \text{ UNT}$ , y para muestras del tejado valores muy similares, entre 2 - 6 UNT, con un promedio de  $4,3 \pm 1,2 \text{ UNT}$ , que no cumplen con la norma para agua potable colombiana<sup>(9)</sup>.

La dureza de las muestras atmosféricas oscila entre 10 y 32 mg/L CaCO<sub>3</sub>, con un valor promedio de  $20 \pm 5 \text{ mg/L CaCO}_3$ ; para las muestras de tejado entre 14 y 30 mg/L CaCO<sub>3</sub>, con un valor promedio de  $20 \pm 5 \text{ mg/L CaCO}_3$ . Todos los valores de dureza cumplen ampliamente con el límite establecido en la norma colombiana de agua potable de 300 mg/L - CaCO<sub>3</sub><sup>(9)</sup>. Dichos valores indican que el agua lluvia analizada es un agua blanda, de dureza carbonácea<sup>(10)</sup>.

Las muestras de agua lluvia atmosférica arrojaron valores de DQO entre 3 y 12 mg O<sub>2</sub>/L, con un promedio de  $5 \pm 3,2 \text{ mg O}_2/\text{L}$ ; las de tejado, valores entre 3 y 6 mg O<sub>2</sub>/L, con un promedio de  $5 \pm 1 \text{ mg O}_2/\text{L}$ , que indican concentración orgánica baja y agua de muy buena calidad.

La AUV puede usarse para cuantificar compuestos orgánicos tales como sustancias húmicas, alifáticas y aromáticas, que absorben fuertemente la radiación ultravioleta, para correlación con variables como el color, el contenido de carbono orgánico, los precursores de trihalometanos y otros subproductos de la desinfección. En la práctica se ha encontrado que valores por debajo de 0,04 cm<sup>-1</sup> son un indicador de que el agua tiene un contenido mínimo de COT, es decir, que son aguas de excelente calidad<sup>(10)</sup>.

En las muestras de agua lluvia analizadas se encontraron valores de AUV desde 0,02 cm<sup>-1</sup> hasta 0,06 cm<sup>-1</sup> (figura 7), que confirman los resultados observados de DQO (figuras 8 y 9) e indican que la calidad del agua analizada es excelente desde el punto de vista orgánico.

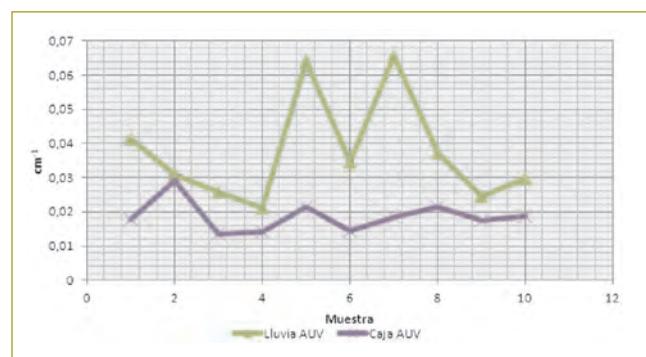


Figura 7. AUV del agua lluvia.

En todas las muestras de agua lluvia analizadas no se observó existencia de coliformes fecales. Sin embargo, se encontraron conteos de coliformes totales para las muestras atmosféricas, entre 10 y 73 UFC/100 mL, con

un valor promedio de  $36 \pm 19$  UFC/100 mL, y para las muestras del tejado entre 24 y 76 UFC/100 mL, con un valor promedio de  $47 \pm 17$  UFC/100 mL (figura 10), valores que no cumplen con la norma colombiana para agua potable<sup>(9)</sup>.

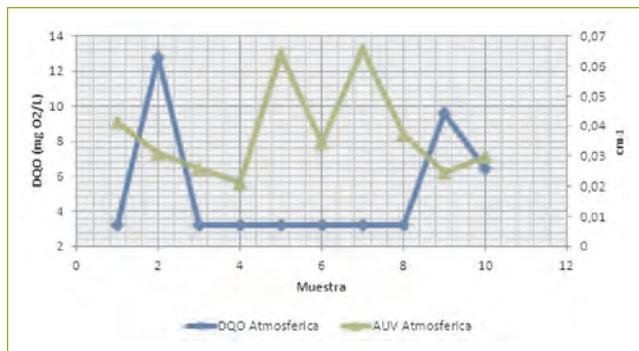


Figura 8. DQO y AUV del agua lluvia atmosférica.

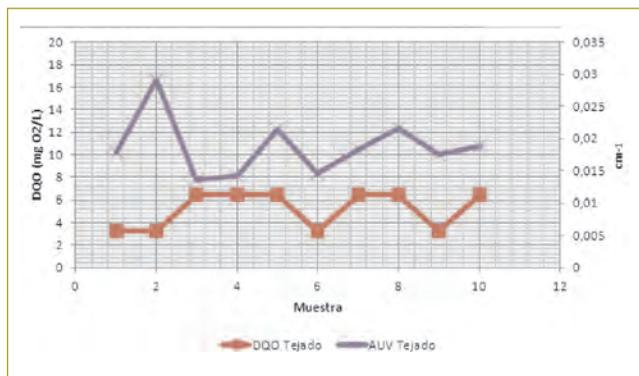


Figura 9. DQO y AUV del agua lluvia del tejado.

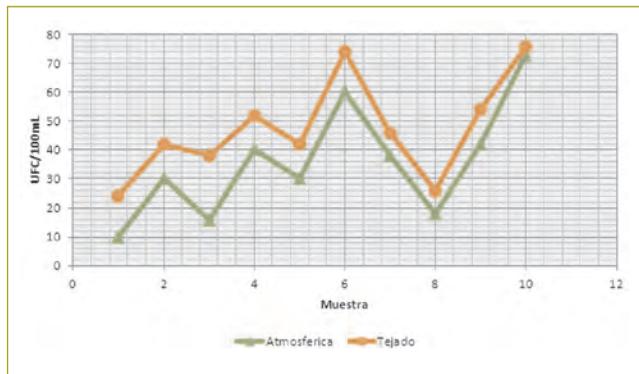


Figura 10. Coliformes totales del agua lluvia.

En la figura anterior (figura 10) se observa claramente que las muestras atmosféricas tienen valores de CT menores que las de tejado, pero también se hace

evidente que el aporte del tejado no es significativo y es proporcionalmente similar en todos los muestreos. Los valores son mayores en tormentas de larga duración, que corresponden a los eventos 6 y 10. La presencia de CT en el agua lluvia puede estar asociada con su existencia en los sólidos suspendidos en el ambiente y con su disolución y precipitación durante los eventos de lluvia.

## REÚSO

La factibilidad de reutilizar el agua lluvia depende de los criterios de calidad establecidos para cada uso, del costo que represente su aprovechamiento y de la necesidad y aceptación de los usuarios; en la actualidad no existen normas específicas de calidad para reutilización de aguas.

En la tabla 7 se resumen los resultados de calidad de agua lluvia y se comparan con criterios sugeridos para su reutilización como agua potable, como agua para riego ambiental y para usos similares, como agua para lavado de vehículos y como agua para arrastre de residuos de sanitarios y de uriniales.

Como se puede observar, los parámetros analizados del agua lluvia no cumplen con los criterios sugeridos de pH, color y turbiedad para consumo humano, ni tampoco con los criterios sugeridos de turbiedad y CT para riego ambiental y usos similares, como lavado vehicular y descarga de sanitarios y uriniales (tabla 7).

## CONCLUSIONES

El reúso del agua lluvia analizada, para riego ambiental, lavado de vehículos y descarga de sanitarios y uriniales es factible con tratamiento previo por filtración y desinfección.

El agua lluvia analizada podría emplearse como fuente de agua potable con tratamiento convencional por coagulación, filtración, desinfección y ajuste de pH.

La calidad del agua lluvia atmosférica y del tejado es sensiblemente similar.

**Tabla 7**  
Resumen de resultados y criterios sugeridos de reúso<sup>(9, 10, 11, 12)</sup>

Parámetro	Agua lluvia		Tipo de reúso	
	Atmosférica	Tejado	Agua potable	Todo tipo de riego ambiental (campos de golf, parques, cementerios) y lavado vehicular, descarga de sanitarios y urinales
Turbiedad, UNT	5,3	4,4	2	5
Color, UPtCo	15	23	15	-
pH	5	6,1	6,5 - 9,0	5 - 9
Alcalinidad, mg/L-CaCO <sub>3</sub>	14	18	200	-
Acidez, mg/L-CaCO <sub>3</sub>	10	12	200	-
CO <sub>2</sub> , mg/L	9	10	-	-
Dureza, mg/L- CaCO <sub>3</sub>	21	21	300	-
Conductividad, $\mu$ S/cm	16	27	50 - 1000	1000
DQO, mg O <sub>2</sub> /L	5	5	-	-
AUV, cm-1	0,038	0,019	-	-
CT, UFC/100 mL	36	47	0	0
CF, UFC/100 mL	0	0	-	0

## REFERENCIAS

- Andrade, S.I.C. & Mora, R.F.N. (2011, diciembre). Análisis de calidad del agua lluvia. Trabajo dirigido en ingeniería civil. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería, Centro de Estudios Ambientales.
- Llopard-Mascaro, A., Gil, A., Martínez, M., Puertas, J., Suárez, J., Del Río, H. et al. (2009). Caracterización analítica de las aguas pluviales y gestión de las aguas de tormenta en los sistemas de saneamiento. Barcelona.
- Montt, J.P. et al. (2003). Caracterización de la calidad de las aguas lluvias urbanas de Santiago. Santiago.
- Caicedo, E.Y. & Sánchez, L.D. (2000). Uso del agua lluvia en La Bocana - Buenaventura. Cali: Universidad del Valle, Instituto Cinara.
- Méndez, C. et al. (2011). The effect of roofing material on the quality of harvested rainwater. *Water Research*, 45, (5), pp. 2049-2059.
- Kim, M. et al. (2011). Stormwater quality and quantity in the urban environment. Auckland.
- APHA. AWWA. WEF (2011). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 22.<sup>a</sup> ed.
- Monsalve, G. (1999). *Hidrología en la ingeniería*. Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Ministerio de la Protección Social, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2007). Resolución 2115 del 22 de junio de 2007.
- Romero Rojas, J.A. (2009). *Calidad del agua*. Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Ministerio de Salud (1984). Decreto 1594 del 26 de junio.
- U.S. Environmental Protection Agency (2004). Guidelines for Water Reuse.

# Aplicaciones de nanotecnología en la construcción de pavimentos

## Nanotechnology applications in pavement constructions

LUZ S. QUINTERO<sup>1</sup> - LUIS E. SANABRIA<sup>2</sup>

1. Corasfaltos, sede UIS Guatiguara. Piedecuesta, Colombia.

2. Corasfaltos, sede UIS Guatiguara. Piedecuesta, Colombia.

luz.quintero@corasfaltos.com - info@corasfaltos.com

Recibido: 01/02/2013 Aceptado: 26/02/2013

Disponibile en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

### Resumen

En los últimos años se ha producido una revolución científica a nivel global centrada en la aplicación de la nanotecnología para el desarrollo de nuevos materiales, el mejoramiento de las propiedades de los materiales ya existentes y las interacciones entre éstos que, además, ha permeado al sector de la industria de la construcción de vías. La implementación de los recientes avances en el campo de la nanotecnología aplicada a la construcción de pavimentos presenta un gran potencial para facilitar la construcción de pavimentos larga vida, de manera que se contribuirá notablemente al uso sostenible de los recursos naturales, al empleo más eficiente de los recursos económicos destinados al desarrollo de la infraestructura vial y a una reducción del impacto ambiental por el rodamiento de los vehículos.

**Palabras claves:** nanotecnología, asfalto, agregado, suelos, carreteras inteligentes, pavimentos.

### Abstract

In recent years there has been a global scientific revolution focused on the application of nanotechnology to develop new materials, improving the properties of the existing ones and the interactions between them that has also permeated the industrial sector of construction of roads. The implementation of recent advances in the field of nanotechnology applied to pavement construction has great potential to facilitate the production of long life pavements, in order to contribute significantly to the sustainable use of natural resources, the more efficient use of financial resources for development of the road infrastructure and reducing the environmental impact by vehicles bearing.

**Keywords:** nanotechnology, asphalt, aggregate, soils, smart roads, pavements.

## INTRODUCCIÓN

El futuro prometedor que ofrece la nanotecnología en el desarrollo de la infraestructura vial se basa en el hecho de que el diseño y la fabricación de materiales nanoestructurados y nanomateriales ha venido a ofrecer una nueva gama de propiedades de los materiales hasta ahora desconocida y con posibilidades de obtener un desempeño muy superior, en comparación con los materiales convencionales. Esto ha sido posible gracias a los avances en instrumentación de técnicas analíticas y microscópicas, como la resonancia magnética nuclear, la difracción de rayos X, la espectroscopia de infrarrojo, la espectroscopia raman, la microscopia electrónica de barrido, la microscopia de transmisión electrónica y la microscopia de fuerza atómica, entre otras.

En la última década, esta nueva rama de la tecnología, que finalmente es un compendio multidisciplinario que estudia el comportamiento de la materia a escala de una millonésima del diámetro de un cabello, ha venido considerándose en los desarrollos e innovación de nuevos materiales para mejorar el desempeño de las vías construidas con pavimentos flexibles, en todo el espectro de las estructuras que los componen. Es así como hay desarrollos de nanotecnología aplicados a los ligantes y morteros asfálticos, la estabilización de vías, los agregados pétreos y la construcción de vías inteligentes o *smart roads*.

En Colombia, Corasfaltos ha liderado y promovido las iniciativas de implementación de la nanotecnología en el desarrollo de los pavimentos flexibles en los sectores académico, gubernamental e industrial desde el año 2008, participando como punto de contacto del 7.º Programa marco (7PM) para el oriente colombiano, en una red administrada por Colciencias, punto de contacto nacional del 7PM. Sus acciones de promoción se han orientado hacia la organización de *workshops* formativos que buscan la participación en proyectos de cooperación en investigación, en el área de nanotecnología, junto con países europeos y países socios de cooperación internacional de la Comunidad Europea. Al mismo tiempo, Corasfaltos ha venido desarrollando diferentes proyectos de investigación, que involucran la aplicación de nanotecnología, para la industria de los pavimentos flexibles.

En este artículo se quiere hacer una reflexión sobre las incursiones y oportunidades de aplicación de la nanotecnología en la construcción de vías con pavi-

mentos flexibles, las cuales proporcionarán a corto o mediano plazo una mayor durabilidad y desempeño de las vías, lo que se traduce en un uso racional de los recursos financieros dedicados al desarrollo de la infraestructura vial.

## NANOTECNOLOGÍA APLICADA A LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS

El pavimento flexible, conocido también como pavimento asfáltico, es una estructura formada por varias capas, como la subbase, la base y la carpeta asfáltica, apoyada sobre la subrasante, la cual puede ser el mismo terreno natural, graduado y compactado que, en muchas ocasiones, también es sometido a tratamiento físico, químico o biológico para mejorar su capacidad portante, procedimiento comúnmente denominado “estabilización de suelos”.

Uno de los aspectos comúnmente considerados en la construcción vial es el mejoramiento de la subrasante para que sea capaz de soportar, sin deformarse, las cargas transmitidas por el tráfico vehicular, que se ha venido haciendo cada día más pesado y más congestionado. Esta manipulación del suelo base, con aditivos o sin ellos, busca aumentar también su resistencia a los cambios físicos y químicos propiciados por el ambiente durante la vida útil de la estructura. Las propiedades del suelo, como resistencia, rigidez, compresibilidad, permeabilidad, trabajabilidad, potencial de hinchamiento, sensibilidad al agua y tendencia al cambio de volumen, pueden alterarse mediante el empleo de diferentes métodos de estabilización de suelos (1).

La estabilización de suelos mediante reacción con aditivos (estabilización química) es un medio ampliamente utilizado para transformar químicamente suelos inestables (2), (3). La estabilización con aditivos es particularmente importante en la construcción de vías para modificar suelos de subrasante, subbases y materiales de bases. Específicamente, la estabilización química modifica un número importante de propiedades ingenieriles de los suelos, de manera que éstos aumentan en resistencia mecánica, resistencia a la fractura, a la fatiga, a la deformación permanente, disminuyen su hinchazón y tienen una mayor resistencia al daño por humedad. Las mejoras más sustanciales en estas propiedades son las obtenidas en suelos moderadamente a altamente plásticos, tales como los arcillosos.

Por ejemplo, cuando se adiciona cal viva ( $\text{CaO}$ ) a un suelo arcilloso, inmediatamente se suceden reacciones de hidratación que conducen a la formación de hidróxido de calcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ). El hidróxido de calcio es una reserva de iones  $\text{Ca}^{+2}$  que pueden involucrarse en intercambio de cationes entre el espacio de las capas del mineral arcilloso o en absorción sobre la superficie de la arcilla, conduciendo a una reducción en el espesor de la doble capa difusa. Estas modificaciones a corto plazo resultan en una floculación de las partículas de arcilla, conduciendo a nivel macroscópico a la reducción de plasticidad del suelo y a mejoras significativas en la trabajabilidad del suelo.

Otro proceso, llamado “estabilización a largo término”, que involucra una reacción puzolánica es el responsable de la mejora de las propiedades mecánicas de las arcillas. La reacción puzolánica corresponde a la interacción de ciertos aditivos con el material silíceo en presencia de agua para formar un gel hidratado. En suelos tratados con cal, los mecanismos de reacción puzolánica no están muy claros. Durante las últimas décadas se han dedicado muchos esfuerzos a la investigación de la reacción hidráulica en el cemento y la reacción puzolánica en el cemento compuesto, especialmente en la formación del hidrato silicato de calcio (C-S-H), su nanoestructura y propiedades ingenieriles (4). Algunos autores consideran que el C-S-H puede constar de una, dos o aun tres fases diferentes que pueden coexistir a escala nanométrica en una matriz amorfa (5).

Aunque no se hayan llamado oficialmente como tal, muchos materiales geotécnicos pueden definirse como nanomateriales y su comportamiento se ha estudiado por largos años a nanoescala; por ejemplo, las arcillas poseen una nanoestructura de láminas superpuestas, separadas entre sí unos cuantos nanómetros. Esto incluye el estudio de cristales minerales y su estructura, interacciones agua-suelo y el comportamiento de minerales arcillosos. La aplicación de este nuevo conocimiento puede conducir a métodos alternativos más eficientes y duraderos para la estabilización de arcillas en los suelos para la construcción de pavimentos flexibles.

## NANOTECNOLOGÍA APLICADA AL MEJORAMIENTO DE LIGANTES ASFÁLTICOS

Los ligantes asfálticos son quizás los materiales que han recibido mayor interés para su modificación con múlti-

ples nanomateriales, entre los que están las nanoarcillas y nanocarbonos. Las nanoarcillas pueden considerarse arcillas modificadas para producir complejos de arcilla compatibles con monómeros y polímeros orgánicos (6). Estas nanoarcillas se han empleado en la modificación de polímeros para producir nanocompuestos que se pueden utilizar en la modificación de asfalto, o se han empleado directamente como modificadoras del asfalto. En la familia de los nanocarbonos se encuentran las nanofibras de carbono, nanotubos de carbono de pared simple y paredes múltiples y los fullerenos.

Shiman et al. modificaron un asfalto colombiano con un fullereno modificado  $\text{C}_{60}$ -4BA y con un nanocompuesto que contenía nanotubos de carbono de pared simple, carbón amorfo y nanopartículas de catalizador, obteniendo mejoras significativas en las propiedades a alta temperatura, así como en el proceso de envejecimiento a corto plazo y el grado de desempeño del asfalto modificado con nanocompuesto (7), (8), (9).

Quintero y Sanabria produjeron un nanocompuesto polimérico con nanotubos de carbono modificados, con el cual modificaron un asfalto 60/70 y obtuvieron una mayor resistencia al envejecimiento termooxidativo, un aumento considerable en su resistencia al ahuellamiento y su módulo dinámico, así como una disminución de su susceptibilidad térmica, con el cual fue posible producir mezclas asfálticas de alto módulo (10).

Entre las múltiples investigaciones realizadas sobre modificación de ligantes asfálticos con nanomateriales, están las hechas por Jahromi y Khodaii, quienes modificaron asfalto con arcillas nanofil-15 y cloisite-15A, evidenciando una nanoestructura de láminas de nanoarcilla exfoliadas en el bitumen y cambios en las propiedades reológicas de éste, disminuyendo su ángulo de fase y aumentando su rigidez, al igual que su resistencia al envejecimiento (6).

Por su parte, Goh et al. evaluaron el comportamiento de mezclas asfálticas modificadas con microfibras de carbono y nanoarcilla (montmorillonita modificada con polisiloxano) expuestas a agua o soluciones de deshielo, observando que las nuevas mezclas tenían valores de resistencia conservada de tracción (*Tensile Strength Ratio*, TSR) similares o superiores a los de la mezcla sin modificar; más aún, más de la mitad de las muestras modificadas con nanofibras y otros materiales exhibieron un TSR superior a 1, lo cual quiere

decir que esas muestras, luego de ser acondicionadas en medio húmedo, obtuvieron una mayor resistencia a la tracción, lo que permitió concluir que la adición de nanoarcilla y microfibras de carbono al asfalto reduciría la vulnerabilidad a la humedad de las mezclas asfálticas (11). You et al. modificaron asfalto a alta temperatura con montmorillonita, para lograr la exfoliación de la arcilla en el asfalto, y hallaron que el módulo dinámico aumentaba significativamente a lo largo de un amplio rango de temperaturas (13 - 70 °C) y frecuencias de carga estudiadas (0,01 - 25 Hz) (12).

Por otro lado, Sureshkumar et al. prepararon mezclas ternarias (asfalto - nanoarcilla - polímero) adicionando nanoarcilla y polímero EVA al asfalto, tanto separadamente la nanoarcilla y el polímero, como en la forma de un nanocompuesto polimérico (nanoarcilla/EVA); sus caracterizaciones les permitieron concluir que los métodos de mezclado para producir las mezclas ternarias influyen las interacciones entre el asfalto y el polímero y, por lo tanto, las propiedades reológicas finales. En particular, se demostró que la nanoarcilla tiene un efecto compatibilizante entre el asfalto y el polímero, así como que una alta compatibilidad entre la arcilla y el polímero conducía a una mejor dispersión del polímero en el asfalto, influenciando así las propiedades reológicas del ligante asfáltico nanocompuesto (13).

Fang et al. prepararon también mezclas ternarias de asfalto con montmorillonita organofílica (OMMT) y residuos de empaques de polietileno, sus resultados mostraron que la modificación organofílica de la montmorillonita resultó en un incremento del espaciamiento entre capas de la arcilla y la exfoliación de la arcilla en el asfalto modificado, igualmente se observó un efecto benéfico de la nanoarcilla en la compatibilidad entre el polímero y el asfalto, así como un aumento considerable en la penetración, punto de ablandamiento y ductilidad del asfalto modificado, produciendo un asfalto con excelente estabilidad a alta temperatura, resistencia al agrietamiento a baja temperatura y también a la deformación (14).

Otro de los nanomateriales empleados en la modificación de asfaltos han sido las nanopartículas de SiO<sub>2</sub>. Ghasemi et al. prepararon ligantes asfálticos con diferentes concentraciones de SBS y nanopartículas de SiO<sub>2</sub> para luego evaluar sus mezclas asfálticas y concluir que las mezclas asfálticas modificadas con 5 % SBS más 2 % nano-SiO<sub>2</sub> darían los mayores aumentos en las propiedades físicas y mecánicas de ligantes asfálticos y mezclas (15).

Todos estos desarrollos muestran una clara tendencia hacia la aplicación de la nanotecnología en el mejoramiento de las propiedades mecánicas, resistencia a los efectos ambientales y durabilidad de las mezclas asfálticas, lo que permite elucidar que se construirán en un futuro cercano vías con pavimentos larga vida, los cuales se distinguen, entre otras cosas, por su mayor rigidez y resistencia al ahuellamiento. Esta posibilidad incide directamente en la industria petroquímica, debido a que recientes estudios en Estados Unidos han demostrado que el consumo de combustible para el tránsito de vehículos podría reducirse en un 3 % si se utilizaran pavimentos más rígidos; al mismo tiempo, el uso de pavimentos más rígidos presenta grandes beneficios ambientales que, según se calculó en el mismo estudio, conduciría a una reducción en las emisiones de CO<sub>2</sub> de 46,5 millones de toneladas por año en Estados Unidos (16).

## NANOTECNOLOGÍA APLICADA AL MEJORAMIENTO DE AGREGADOS PÉTREOS

El análisis microscópico y a nanoescala de las propiedades superficiales de varios tipos de agregados utilizados en la construcción de pavimentos puede ser de gran ayuda en la comprensión del comportamiento del agregado en las mezclas asfálticas. Fenómenos como la porosidad superficial pueden ayudarnos a entender la falla inesperada de algunas mezclas asfálticas, debido a la absorción excesiva de ligante sobre la superficie de agregados muy porosos, produciendo una retención del asfalto en los poros del agregado que puede ser muy superior a la contemplada en el diseño de la mezcla asfáltica. La nanotecnología ha contribuido al mejoramiento de las interacciones entre agregados pétreos y el asfalto, principalmente desde la perspectiva de caracterización superficial de su morfología y composición química.

El campo del mejoramiento de agregados para la producción de mezclas asfálticas se ha orientado más hacia macrosoluciones, tales como es el desarrollo de trituradoras más eficaces en la reducción de tamaño, produciendo una mayor angularidad del agregado pétreo e induciendo un mínimo de microgrietas durante el procesamiento.

## NANOTECNOLOGÍA EN EL DESARROLLO DE CARRETERAS INTELIGENTES

En el campo de las carreteras inteligentes (*smart roads*), existe una amplia gama de transductores que se están desarrollando para implementarlos en el mejoramiento de la seguridad vial, manejo de tráfico y registro de condiciones de operación. Al mismo tiempo, se han planteado otros acercamientos a las carreteras inteligentes, concibiéndolas como una de las fuentes de energía alternativa más prácticas del futuro, las cuales tendrán embebidos cristales piezoeléctricos capaces de convertir deformaciones mecánicas, producidas por el paso de los vehículos sobre la vía, en corriente eléctrica. Empresas de Israel son precursoras en este campo y se presentan como las primeras en demostrar soluciones piezoeléctricas a escala industrial para “cosechar” energía a partir del tráfico vehicular en carreteras, vías férreas y pistas de aterrizaje de aviones. Una de estas firmas se encuentra instalando sus diseños a manera de demostración, y promete generar 400 kW de potencia que pueden transferirse a la red de interconexión eléctrica, con solamente un cubrimiento de 100 metros de una vía con cuatro carriles. Estos nuevos sistemas propuestos, compuestos por materiales piezoeléctricos, se cubren usualmente con una capa de mezcla asfáltica o concreto, pueden instalarse en cualquier lugar donde exista tráfico de vehículos pesados y no están restringidos a climas específicos, horarios de operación o áreas geográficas.

Otros países están liderando estos desarrollos, como el caso de Japón, donde se instalaron frente a las ventanillas de venta de tiquetes en algunas estaciones de tren estos dispositivos piezoeléctricos, de manera que son activados por los pasos de las personas que compran los tiquetes de tren. Estos dispositivos están proyectados para producir 1400 kW de energía, la cual sería suficiente para alimentar toda la iluminación y los avisos luminosos en estas estaciones (17).

## CONCLUSIONES

En la última década se ha producido una revolución científica mundial que involucra la utilización de técnicas de instrumentación avanzadas que permiten estudiar con mayor precisión las estructuras, fenómenos y propiedades presentes a escala nanométrica, la cual ha venido ofreciendo múltiples soluciones para el mejoramiento de las propiedades de materiales y sus

interacciones. Además, ha mostrado que puede permear al sector de la industria de la construcción de vías con pavimentos flexibles, teniendo en cuenta los desarrollos recientes en investigaciones sobre la modificación de ligantes asfálticos con nanoarcillas, nanocarbonos y polímeros nanocompuestos, así como el potencial de los materiales piezoeléctricos en sistemas de generación de energía eléctrica alimentados por el rodamiento de los vehículos sobre la vía, y los nuevos transductores en desarrollo para el mejoramiento de la seguridad vial, manejo de tráfico y registro de condiciones de operación.

La implementación de los recientes avances en el campo de la nanotecnología aplicada a la construcción de pavimentos presenta un gran potencial para facilitar la construcción de pavimentos larga vida, de modo que se contribuirá notablemente al uso sostenible de los recursos naturales y a la utilización más eficiente de los recursos económicos destinados al desarrollo de la infraestructura vial.

Se ha demostrado que la construcción de pavimentos más rígidos contribuye directamente a la reducción apreciable en el consumo de combustible de los vehículos, lo cual es muy positivo, dada la aceleración en el crecimiento del inventario del parque automotor nacional, así como a una reducción en las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera ocasionadas por el tránsito de vehículos.

## REFERENCIAS

1. Fang, Hsai-Yang (1991). *Foundation Engineering Handbook*. Londres: Chapman and Hall. 0412988917.
2. Bell, F.G. (1996). Lime stabilization of clay minerals and soils. *Engineering Geology*, vol. 42, s.l.: Elsevier, pp. 223-237.
3. Le Runigo, B., Cuisinier, O., Cui, Y.J., Deneele, D. & Ferber V. (2009). Impact of the initial state on fabric and permeability of a lime treated silt under long term leaching. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 46, s.l.: NRC Research Press, pp. 1243-1257.
4. Alizadeh, R. (2009). *Tesis: Nanostructure and Engineering Properties of Basic and Modified Calcium-Silicate-Hydrate Systems*. Ottawa, Canada: University of Ottawa.
5. Pomakhina, E., Deneele, D., Gaillot, A.-C., Paris, M. & Ouvrard, G. (2012). <sup>29</sup>Si solid state NMR investigation of pozzolanic reaction occurring in lime-treated Ca-bentonite. *Cement and Concrete Research*, vol. 42, s.l.: Elsevier, pp. 626-632.
6. Jahromi, S.G. & Khodaii, A. (2009). Effects of nanoclay on rheological properties of bitumen binder. *Construction and Building Materials*, vol. 23, s.l.: Elsevier, pp. 2894-2904.
7. Shiman, L., Shiman, A., Spitsyna, N. & Lobach, A. (2011). Effects of Nanocomposites on the High Temperature Rheological Properties of a PG58 Asphalt Binder. *Geotechnical Special Publication*, vol. 223, s.l.: ASCE, pp. 229-237.

8. Chiman, L., Chiman, A., Spitsyna, N. & Lobach, A. (2011). *Efecto de fullereno modificado C60-4BA sobre propiedades del asfalto* PG 58-22. Rio de Janeiro: s.n. XVI CILA - Congreso Iberoamericano del Asfalto.
9. Chiman, L., Chiman, A., Spitsyna, N. & Lobach, A. (2009). *Estudio en laboratorio del efecto de un nanocomposito sobre algunas propiedades reológicas del asfalto*. Lisboa, Portugal: s.n., XV CILA - Congreso Iberoamericano del Asfalto.
10. Quintero, L.S. & Sanabria, L.E. (2012). *Analysis of Colombian Bitumen Modified With a Nanocomposite*. Nanjing, China: s.n., ISAP 2012.
11. Goh, S.W., Akin, M., You, Z. & Shi, X. (2011). Effect of deicing solutions on the tensile strength of micro- or nano-modified asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, vol. 25, s.l.: Elsevier, pp. 195-200.
12. You, Z., Mills-Beale, J., JustiFoley, M., Roy, S., Odegard, G.M., Dai, Q. & Goh, S.W. (2011). Nanoclay-modified asphalt materials: Preparation and characterization. *Construction and Building Materials*, vol. 25, s.l.: Elsevier, pp. 1072-1078.
13. Sureshkumar, M.S., Filippi, S., Polacco, G. & Kazatchkov, I. (2010). Internal structure and linear viscoelastic properties of EVA/asphalt nanocomposites. *European Polymer Journal*, vol. 46, s.l.: Elsevier, pp. 621-633.
14. Fang, C., Yu, R., Zhang, Y., Hu, J., Zhang, M. & Mi, X. (2012). Combined modification of asphalt with polyethylene packaging waste and organophilic montmorillonite. *Polymer Testing*, vol. 31, s.l.: Elsevier, pp. 276-281.
15. Ghasemi, M., Marandia, S., Tahmooresi, M., Jalal kamali, R. & Taherzade, R. (2012). Modification of Stone Matrix Asphalt with Nano-SiO<sub>2</sub>. 2, *Journal of Basic and Applied Scientific Research*, vol. 2, s.l.: Text Road, pp. 1338-1344.
16. Physics Central. [En línea] [Citado el 31 de julio de 2012.] <http://www.physicscentral.com/explore/action/roadscience1.cfm>.
17. The American Ceramic Society. [En línea] [Citado el 2 de agosto de 2012.] <http://ceramics.org/ceramictechtoday/tag/piezoelectrics/page/2/>.

# The Corporate Social Responsibility Pyramid

ANDRÉS FELIPE CORTÉS ORTIZ<sup>1</sup> - SEBASTIÁN CORTÉS MEJÍA<sup>2</sup>

1. Estudiante de doble programa, noveno semestre de ingeniería industrial y séptimo semestre de economía y finanzas internacionales en la Universidad de La Sabana. Integrante del semillero de investigación interdisciplinario en responsabilidad social (SIRS) de la Universidad de La Sabana.

2. Estudiante de doble programa, noveno semestre de ingeniería industrial y octavo semestre de administración de negocios internacionales en la Universidad de La Sabana. Integrante del Semillero de Investigación Interdisciplinario en Responsabilidad Social (SIRS) de la Universidad de La Sabana.

andres.cortes1@unisabana.edu.co - sebastian.cortes@unisabana.edu.co

Recibido: 03/02/2013 Aceptado: 05/03/2013

Disponible en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

## Resumen

En este artículo se pretende crear la definición de responsabilidad social empresarial (RSE), determinando sus principios y objetivo final utilizando una pirámide como metáfora. En principio, se recolecta información relevante para determinar que cada acción referente a RSE se puede clasificar de acuerdo con tres principios que forman la base de la pirámide: condiciones laborales, medio ambiente y relación con los *stakeholders*. Luego, se define el pico de la pirámide como un nuevo concepto llamado percepciones de responsabilidad social (PRS), explicado como el propósito final de una compañía que desee considerarse socialmente responsable. Por último, la pirámide se presenta con el fin de comprender gráficamente cómo los tres principios de RSE deben trabajar juntos para sostener el PRS.

**Palabras claves:** responsabilidad social empresarial (RSE), percepciones de responsabilidad social (PRS), condiciones laborales, medio ambiente, *stakeholders*, base, pico, pirámide.

## Abstract

This article intends to create the definition of Corporate Social Responsibility (CSR) by determining its principles and ultimate objective using a pyramid based on a metaphor. First, the information is gathered in order to determine that every action regarding CSR can be classified under three principles: labor conditions, environment and relationship with stakeholders; these represent the foundations of the pyramid. Then, the peak of the pyramid is described as a new concept named Social Responsibility Perceptions (SRP) which is explained as the purpose of every company that wants to be considered as socially responsible. Finally, the pyramid as such is shown in order to understand how the three principles of CSR must work together in order to sustain the SRP.

**Keywords:** Corporate Social Responsibility, Pyramid, Social Responsibility Perceptions, labour conditions, environment, stakeholders, foundations, peak.

## INTRODUCTION

Corporate social responsibility has “emerged today as the challenge for the XXI century companies to innovate and to improve their processes through their life cycle” (Cortés Mejía & Cortés Ortiz, 2011). New characteristics and modes of operation need to be introduced in a company for it to achieve a socially responsible condition. This is definitely a process that takes management effort and time. Different theoretical frameworks will be analyzed to corroborate how the three principles of environmental protection, labour conditions and stakeholder relations work together as the core of CSR and represent the foundations for the CSR objective.

Normally, CSR is regarded purely theoretical because of its novelty with just few different applications around the world. This explains why many scholars are willing to express their point of view to establish a definite concept behind the term. Because of this, some important institutions that are related with CSR are trying to unify scholarly research in some important pragmatic points. Those institutions are: The Global Compact, The OECD, International Standard Organization and The Social Accountability international. Following Cortés and Cortés (2011) necessity for establishing Corporate Social Responsibility (CSR) boundaries and its ultimate and globalized definition, a solution is going to be given.

## THE THREE PRINCIPLES: CSR PYRAMID'S FOUNDATION

First, Global Compact is based on 10 principles which comprise “Human rights, labour, environment and anti-corruption” (United Nations Global Compact). Then the OECD, taking into account the real importance of the responsibility that the enterprises have with society, decided to create guidelines for multinational enterprises that are based on “employment and industrial relations, human rights, environment, information disclosure, combating bribery, consumer interests, science and technology, competition, and taxation” (OECD, 2011).

On the other hand there are institutions known as “standards makers” such as the International Standard Organization, which began to discuss the CSR affirming that its standard ISO 26000:2010 “helps clarify what social responsibility is, helps businesses and organizations translate principles into effective actions and shares best

practices relating to social responsibility, globally. It is aimed at all types of organizations regardless of their activity, size or location” (ISO, 2010). And it mainly expresses its doctrine as “human rights, labor practices, the environment, fair operating practices, consumer issue, and community involvement and development” (ISO, 2010).

Finally, another standard maker is the Social Accountability International (SAI), which created the SA 8000. The principles of this standard are: “child labor, forced labor, health and safety, freedom of association and right to collective bargaining, discrimination, disciplinary practices, working hours, remuneration and management systems” (SAI, 2008). Those nine points are regulated by the SAI with global representative enterprises to guarantee the achievement of the guidelines if a certification is to be provided.

In order to easily verify the correlation between the principles within each international institution's documents, the following comparison chart was created (table 1):

As shown in the table it is possible to aggregate the statements of each different institution in order to find out the pillars where any company or country could be evaluated in terms of corporate social responsibility, each corporation meets a particular principle which is not possible to match at a first glance in the three major categories, but looking deeper it may be able to be classified as such. The principle of corruption of the UNGC could be a matter of public or private institutions. Those institutions can influence the context of the company, which is the definition of a stakeholder.

Among those principles called “others” of the OECD guidelines, combating bribery is a clear example of having good relationships with stakeholders; and science and technology refers to “Endeavour to ensure that their activities are compatible with the science and technologic (S&T) policies and plans of the countries in which they operate and as appropriate contribute to the development of local and national innovative capacity” (OECD, 2011). That's mainly what the OECD wants to express, and it is very clear that S&T principle refers to two stakeholders relationship, one is the government-customer. The same explanation is valid for the principle of ISO 26000 about development.

Finally management systems in the SA 8000 refers to “Top management shall define in writing, in wor-

Table 1

Pillars/Institutions	UN Global Compact	OECD Guidelines	ISO 26000: 2010	SA 8000 Standard
Guidelines/certification	Guidelines	Guidelines	Guidelines	Certification
Type of document	Public Document	Public Document	Standard	Standard
Type of diffusion	Office of GP	NCP	Standard Institutions	SAI
Monitoring	Signing/ GRI	NCP	Standard Institutions	Certification renewal
Labour	- Principle 3: Businesses should uphold the freedom of association and the effective recognition of the right to collective bargaining -Principle 4: the elimination of all forms of forced and compulsory labour -Principle 5: the effective abolition of child labour -Principle 6: the elimination of discrimination in respect of employment and occupation	-Employment and industrial relations	-labor practices	-Child labor -Forced labor -Freedom of association and right to collective bargaining -Disciplinary practices -Working hours -Remuneration
Environment	- Principle 7: Businesses should support a precautionary approach to environmental challenges -Principle 8: undertake initiatives to promote greater environmental responsibility -Principle 9: encourage the development and diffusion of environmentally friendly technologies.	- Environment	-The environment	
Relationship with stakeholders	-Principle 1: Businesses should support and respect the protection of internationally proclaimed human rights -Principle 2: make sure that they are not complicit in human rights abuses.	-Human rights - Consumer interests - Competition - Taxation -Information disclosure	-Human rights -Fair operating practices -Consumer issue -Community involvement	-Health and safety -Discrimination
Others	-Principle 10: Businesses should work against corruption in all its forms, including extortion and bribery.	- Combating bribery -Science and technology	-Development	-Management systems

kers' own language, the company's policy for social accountability and labor conditions, and display this policy and the SA8000 standard in a prominent, easily viewable place on the company's premises, to inform personnel that it has voluntarily chosen to comply with the requirements of the SA8000 standard" (SAI, 2008) which display mainly a contact of the company with the worker that lead us to locate it in labour.

Is very important to make this analysis because in three main variables is concentrated all the effort made by the enterprises to be socially responsible. In the

book the "triple bottom line" (Savitz & Weber, 2006) is described in three words: Profit, people and planet the principles of a socially responsible enterprise. And here is where taking the OECD, Global Compact, SAI, and ISO with the doctrine of the book, what is expressed by (Cortés Mejía & Cortés Ortiz, 2011) saying that the Labour conditions, with the conservation of the environment and the creation of good relationships with stakeholders, holds the important focus of an enterprise that is the value creation for the named groups, which is the topic of the next part of the article.

## SRP: THE PEAK OF THE CSR PYRAMID

Now that it was possible to classify CSR actions within three basic principles that contain any organization's activity toward becoming socially responsible, it is time to start defining the objective of CSR. What should a company be looking for when applying CSR?

As it was shown earlier, companies need to take care of the environment, to improve labour conditions and to have a good relationship with every stakeholder if they want to strengthen their CSR structure. But if CSR is to become a large scale phenomenon, its application needs to create incentive by affirming that it should lead to profit. This represents a strong reason for growing interest in the subject.

It is off course important that financial performance relates directly to CSR because even though ethical principles affirm that being socially responsible is the right thing to do, companies still have the obligation of optimizing performance, leading to the search of strategies that help doing so.

Aguinis and Glavas (2012) argued that “managers’ emphasis on CSR values was associated with followers’ perceptions of visionary leadership, which positively influenced employees’ extra effort, which in turn positively influenced firm performance”. Also, Barnett and Salomon (2005) said that “even though social screening forces a narrowing of investment choices, if adequately implemented, social screening can lead to an increase in financial returns” and that “the costs incurred by a firm to improve its relations with its local communities are more than offset by financial gains”.

Lev, Petrovits and Radhakrishnan (2010), after developing a statistical model, affirmed that “corporate giving is associated with subsequent sales growth”. This shows clearly the existent relationship between CSR and future profit increase. Wagner, Lutz and Weitz (2009) also referred to this relation by arguing that “social responsibility perceptions affect the image of brands and firms, the propensity of consumers do buy brands and patronize retailers, as well as the financial performance of firms”. Also, after reviewing 127 different studies that analyzed corporate social performance and corporate financial performance relationship, Margolish and Walsh (2004) concluded that “half of the results (54) pointed to a positive relationship between corporate social performance and financial performance. Only seven studies found a negative relationship; 28 studies

reported non-significant relationships, while 20 reported a mixed set of findings”. It is important to keep in mind that this relationship has not been completely established, and therefore the direction should not be assumed as positive with total confidence.

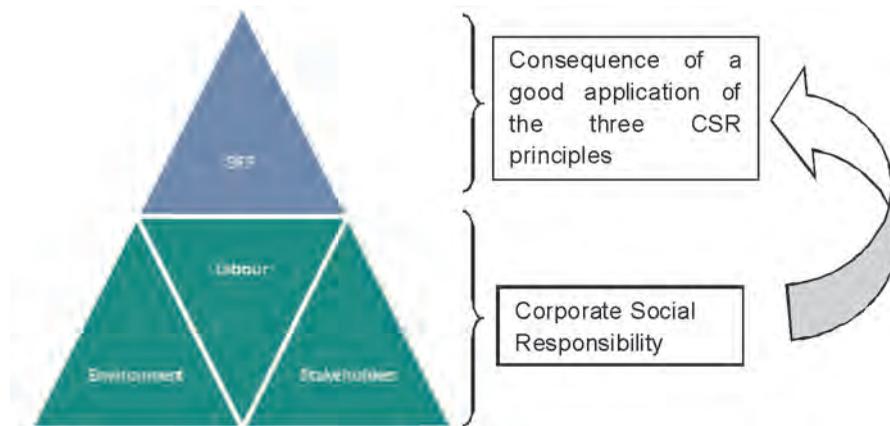
Now, CSR is certainly more than a new movement looking for profit by the action of good causes. CSR is a new concept that contains the evolution of companies, their future: *operating for more than profit*. CSR needs to be the actions that along with profit, give the company something it is looking for.

For example, “there are several nonfinancial outcomes that result from CSR such as improved management practices, product quality, operational efficiencies, attractiveness to investors, and enhanced demographic diversity” (Aguinis & Glavas, 2012). CSR should not become a simple strategy destined to enhance financial rewards by *being good*. There are several other outcomes that need to be understood in order to give CSR the real importance it deserves in the future of organizations. Barnett and Salomon (2005) said that “the market may at first be slow to reward firms for particular social actions, then provide increasing financial incentives as the issue becomes salient and popular, only to later simply expect firms to take such actions without financial reward”.

So what is this *thing* that lies ahead of profit? The answer cannot certainly be something material and measurable. This *thing* can only be what each company wants it to be. It's subjective. It's a perception.

Aguilera, Rupp and Williams (2007) said that “the perceived fairness of the working environment has been shown to affect both employee well-being (e.g., job satisfaction, stress, health, emotion) and organizationally relevant outcomes, such as employee commitment, turnover, absenteeism, job performance, citizenship behavior, and counterproductivity”, and that “individuals are concerned with fairness, even when there is no apparent economic benefit for doing so and the recipient of the just or unjust act is a stranger”.

Garriga and Mele (2004) argued that business, as with any other social group or individual, has to contribute to the common good simply because it is a part of society. Also, that business “contributes to the common good in different ways, such as creating wealth, providing goods and services in an efficient and



fair way, at the same time respecting the dignity and the inalienable and fundamental rights of the individual”.

Because of this, the concept of **Social Responsibility Perceptions (SRP)** was created in order to include every measurable and not measurable aspect that an organization intends to reach after applying CSR. This is the peak of the CSR pyramid. Every organization works on the three principles to obtain a strong and valuable SRP. In other words, a company applies CSR because it needs the SRP to be higher, i.e. it needs to perceive that what it is doing is right, and it wants everybody to perceive that what it is doing is right as well. Creating value and enhancing performance along with this.

The SRP concept includes every form of perception that an organization can get after focusing on applying the three principles of CSR. Can the SRP be just profit and nothing else? Yes it can, applying CSR and just looking for profit is valid, money is still the future perception of a lot of actions. But keep in mind that the SRP has a greater destiny, it contains profit as a simple material context and takes companies to a whole new level of importance in society. A level where the effects and the methods of their operation must matter to them and everybody else related to them.

Some scholars also affirm that CSR actions should take profit into account as well as other positive effects on society. Kimberly and Peery (1985) said that “a socially responsible decision should have utility, that is, it should lead to economically beneficial results. Secondly, a socially responsible decision should seek to avoid harm even at a cost to the maximization profit. (...) Thirdly, a beneficent decision might seek to positively affect society, that is, promote social justice”. The most

important thing to understand is that organizations should seek to enhance their SRP, being something that intends to increase performance by measurable and not measurable indicators. Garriga and Mele (2004) concluded that “most of current CSR theories are focused on four main aspects: (1) meeting objectives that produce long-term profits, (2) using business power in a responsible way, (3) integrating social demands and (4) contributing to a good society by doing what is ethically correct”.

In conclusion, the SRP is defined as the peak of the CSR pyramid because it is the final objective of applying the three principles correctly. The organization operates with the clear purpose of value creation by CSR, and it intends to increase performance by perceiving better operation results.

### CONCLUSION: THE CSR PYRAMID

The discussion of whether CSR increases profit or not needs to be ultimately forgotten and surpassed. The moment is now for SRP to start being taken seriously as the ultimate goal that can only be reached by CSR principles working together.

According to the SRP the greatest company may or may not be the richest, but it will certainly be the one where CSR actions are highly perceived by everybody. The leading company in CSR can only be the company that strengthens the three principles of CSR to get the highest SRP.

## BIBLIOGRAPHY

- Aguilera, R., Rupp, D. E., Williams, C. A., & Jyoti, G. (2007). Putting de s back in corporate social responsibility: a multilevel theory of social change in organizations. *Academy of management review*, 836 - 863.
- Aguinis, H. & Galvas, A. (2012). What we know and don't know about corporate social responsibility: a review and research agenda. *Journal of management*, 932.
- Barnett, M. L., & Salomon, R. M. (2005). Beyond dichotomy: the curvilinear relationship between social responsibility and financial performance. *Strategic Management Journal*.
- Boal, K. B., & Perry, N. (1985). The cognitive structure of corporate social responsibility. *Journal of management*, 71-82.
- Cortés Mejía, S., & Cortés Ortiz, A. F. (2011). RSE: en busca de una definición globalizada y la delimitación de sus fronteras. *Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería*, 21-26.
- Garriga, E., & Mele, D. (2004). Corporate social responsibility theories: mapping the territory. *Journal of business ethics*, 51-71.
- ISO. (2010). *International Standard Organization*. Retrieved June 29, 2012, from ISO 26000:2010: <http://www.iso.org/iso/home/standards/management-standards/iso26000.htm>.
- Lev, B., Christine, P., & Suresh, R. (2010). Is doing good good for you? How corporate charitable contributions enhance revenue growth. *Strategic Management Journal*, 180-200.
- Margolis, J. D., & Walsh, J. P. (2003). *Misery Loves Companies: Rethinking Social Initiatives by Business*. Johnson Graduate School. Cornell University.
- OECD. (2011, May). OECD. Retrieved June 29, 2012, from Guidelines For Multinational Enterprises: [http://www.oecd.org/abouut/0,3347,en\\_2649\\_34889\\_1\\_1\\_1\\_1\\_1,00.html](http://www.oecd.org/abouut/0,3347,en_2649_34889_1_1_1_1_1,00.html)
- Paladino, M. (2004). *La responsabilidad de la empresa en la sociedad*. Ciudad de Mexico: Ariel.
- Robbins, S. P., & Coulter, M. (2007). *Management*. Upper Saddle River: Person Education.
- SAI. (2008). SA 8000. Social Accountability International .
- Savitz, A. W., & Weber, K. (2006). *The triple bottom line*. San Francisco: John Wiley & Sons, Inc.
- United Nations Global Compact. (n.d.). *The Global Compact*. Retrieved June 29, 2012, from About us: <http://www.unglobalcompact.org/AboutTheGC/TheTenPrinciples/index.html>.
- Wagner, T., Lutz, R., & Weitz, B. (2009). Corporate hypocrisy: overcoming the threat of inconsistent corporate social responsibility perceptions. *Journal of marketing*.

# Ecuación de Butler-Volmer a partir de la mecánica cuántica

## Butler-Volmer equation from quantum mechanics

WILLIAM APERADOR CHAPARRO<sup>1</sup> - JORGE HERNANDO BAUTISTA RUIZ<sup>2</sup> - ARNOLDO EMILIO DELGADO TOBÓN<sup>3</sup>

1. Facultad de Ingeniería, Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá.
2. Facultad de Ciencias Básicas, Universidad Francisco de Paula Santander. Cúcuta.
3. Facultad de Ingeniería, Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá.

g.ing.materiales@gmail.com - jbautistaruiiz@yahoo.es - arnoldo.delgado@escuelaing.edu.co

Recibido: 05/02/2013 Aceptado: 10/03/2013

Disponible en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

### Resumen

La electroquímica trata de la interrelación de los fenómenos químicos y eléctricos, así como del estudio de las propiedades eléctricas de las soluciones de los electrolitos, estableciendo una relación entre la acción química y eléctrica de tales sistemas [1]. Uno de los objetivos de la electroquímica es analizar el proceso de interacción de partículas fermiónicas (electrones) con la materia [2]. Estos fenómenos ocurren a una escala atómica, por lo que su descripción es posible mediante los métodos de la mecánica cuántica. Además, es importante interpretar el comportamiento de los electrones desde el punto de vista de función de onda, tal como lo plantean las primeras nociones de mecánica cuántica, y por medio de cálculos matemáticos encontrar los valores más probables relacionados con algunas propiedades conocidas. El propósito de este trabajo es analizar, desde los primeros principios cuánticos, cómo se producen estas interacciones y su aplicación al campo de la electroquímica. Se describen algunos formalismos de la mecánica cuántica que conducen a la interpretación de la ecuación de Butler-Volmer.

**Palabras claves:** ecuación Butler-Volmer, función de onda, ecuación de Schrödinger, teoría de perturbaciones.

### Abstract

Electrochemistry relates the chemical and electrical phenomena, and the study of electrical properties of electrolyte solutions, establishing a relationship between chemistry and electricity of such systems. Analyzing the fermionic particles interaction process as electrons with matter, is one of the objectives of the electrochemistry, but these phenomena happen in an atomic scale, therefore it's complete and detailed description is susceptible to handle with the quantum mechanics approaches; Besides it is important to interpret the electrons behavior from the wave function point of view, as the first mentioned quantum mechanics notions describing to get the calculation of the more probable values of the known properties for these electrons. The purpose is analyze from the first quantum principles how do the interactions produce, apply to the electrochemistry, therefore it describes some quantum mechanics formalisms which produce the Butler-Volmer interpretation of the equation.

**Keywords:** Butler-Volmer equation, wave function, Schrödinger equation, perturbation theory.

## INTRODUCCIÓN

La electroquímica es una rama de la química que estudia la transformación entre la energía eléctrica y la energía química [3]. En otras palabras, las reacciones químicas que se dan en la interfase de un conductor eléctrico (llamado electrodo, que puede ser un metal o un semiconductor) y un conductor iónico (el electrolito), que puede ser una disolución y, en casos especiales, un sólido [4].

Si una reacción química es conducida mediante una diferencia de potencial aplicada externamente, se hace referencia a una electrólisis. En cambio, si la caída de potencial eléctrico es creada como consecuencia de la reacción química, se conoce como un “acumulador de energía eléctrica”, también llamado batería o celda galvánica.

Las reacciones químicas donde se produce una transferencia de electrones entre moléculas se conocen como reacciones redox, y su importancia en la electroquímica es vital, pues mediante este tipo de reacciones se llevan a cabo los procesos que generan electricidad o, en caso contrario, son producidos como consecuencia de ella.

En general, la electroquímica se encarga de estudiar las situaciones donde se producen reacciones de oxidación y reducción, encontrándose separadas, física o temporalmente, en un entorno conectado a un circuito eléctrico.

La electroquímica es un importante punto de partida en la producción de energía eléctrica directamente relacionada con las reacciones de sustancias químicas, alcanzándose una eficiencia de conversión del 90 % [5]. Los descubrimientos de Galvani, Volta, Le Blanc y Tafel permitieron relacionar las velocidades de reacción en las pilas electroquímicas en función de la diferencia de potencial aplicado sobre éstas [6]. Las interacciones de la materia asociadas con el paso de una corriente eléctrica dependen de las características de los portadores con carga negativa (el electrón), debido a la afinidad que el electrón tiene por las partículas con carga positiva de la materia (protones), ya sea en los átomos, los grupos de átomos o moléculas. Esta afinidad es análoga a la afinidad química que las partículas presentan entre sí. De hecho, todas las reacciones químicas son el resultado de un cambio en la estructura electrónica de átomos y electrones libres, los cuales se puede combinar con la materia (reducción) para ser liberados por ellos (oxidación).

La relación cuantitativa entre los electrones libres de una corriente eléctrica y las partículas de una sustancia en el que provoca una reacción se define por las leyes de Faraday [7].

Una consecuencia en la producción de energía eléctrica a partir de reacciones de sustancias químicas es el inmediato flujo de corriente a través de la interfase. En una pila electroquímica, era el hecho de que la fuente de energía externa provocaba la aparición de una diferencia de potencial a través de la doble capa eléctrica existente en la interfase, produciendo un cambio o desviación con respecto a los valores que le corresponderían para determinar reacciones electroquímicas, a la situación de intensidad nula o de equilibrio, es decir, asumir valores tales que se presente una sobretensión o sobrepotencial. Tal enunciado se explica de manera implícita por Butler y explícitamente por Volmer, condensado en un modelo físico-matemático que lleva su nombre [8]. Para poder tener una buena interpretación de la ecuación de Butler-Volmer se presenta inicialmente una descripción de la teoría de las perturbaciones para poder interpretar los sistemas cuánticos en equilibrio termodinámico.

## TEORÍA DE PERTURBACIONES DEPENDIENTE DEL TIEMPO

En mecánica cuántica, los operadores cumplen la función de excitar un sistema físico con el fin de obtener información sobre éste; así los operadores de energía, momentum, espín, arrojan resultados probables de los valores propios de tales sistemas [2].

Uno de los principales operadores cuánticos es efectivamente el operador hamiltoniano  $\hat{H}$ . Cuando se aplica sobre una función de onda, se obtiene la energía del sistema:

$$\hat{H}|\psi\rangle = E|\psi\rangle \quad (1)$$

El objetivo de la teoría de perturbaciones es describir sistemas cuánticos complejos con formalismos sencillos. La idea es aplicar hamiltonianos perturbativos al sistema para estudiar las energías producidas, ya que las soluciones de la ecuación de Schrödinger son en general demasiado idealizadas; por tanto, con la teoría de perturbaciones es posible obtener valores más aproximados de sistemas físicos reales. A partir de ello, es posible

analizar fenómenos como el efecto Stark [8], en el que un campo eléctrico perturbativo afecta a un sistema, o de la misma forma, el efecto Zeeman [9 - 13], sólo que con un campo magnético.

Desde el punto de vista de la electroquímica es posible analizar el proceso de transferencia de electrones en un medio a partir de esta teoría cuántica.

El físico Paul Dirac demostró que la probabilidad de transición de un electrón de transferencia es susceptible de manejarse con métodos perturbativos, y además el estado de electrón donador aumenta linealmente con el tiempo [14].

A continuación se describe específicamente en qué consiste el método:

Aplicado directamente al proceso de interacción entre electrones, se debe definir un estado para el electrón donado  $\Psi_D$  y otro para el electrón aceptado  $\Psi_A$ .

Este proceso es eminentemente energético, por lo que se debe definir desde la cuántica un número de estados para los electrones por unidad de energía, que se llamará  $\varphi_A(U)$ .

Así, a partir de la teoría de perturbaciones se obtiene la velocidad constante de transferencia de electrones, definida como:

$$k_{ie} = \frac{2\pi}{h} |M_{DA}|^2 \varphi_A(U) \quad (2)$$

Donde  $|M_{DA}|^2$  es la matriz de elementos que contiene los estados de transición del electrón donante al electrón que acepta, definido mediante:

$$|M_{DA}|^2 = \int \Psi_D V \Psi_A dV \quad (3)$$

Tal como en mecánica cuántica se calculan los valores esperados de las partículas, aquí se calculan las energías de interacción producidas por la transición electrónica; en este caso,  $V$  representa la energía de interacción.

La ecuación 2 cumple con las características de la regla de oro de Fermi, que se emplea en teoría de perturbaciones para calcular la tasa de transición entre un autoestado de la energía dado y un continuo de autoestados [2].

De manera tal que se calcula la probabilidad de que se produzca una transición por unidad de tiempo,

en este caso del estado aceptor al estado donador. Se postula de la siguiente manera:

$$\omega_{ji} = \frac{2\pi}{h} |\langle \psi_f^{(0)} | \widehat{V} | \psi_i^{(0)} \rangle|^2 \rho(E_f^{(0)}) \quad (4)$$

El sentido físico de esta ecuación se centra en el cálculo de la probabilidad de transición por unidad de tiempo entre el estado inicial  $|\psi_i^{(0)}\rangle$  y un conjunto de estados finales  $|\psi_f^{(0)}\rangle$ , transición que se produce por una perturbación en relación con estos estados; específicamente, para este caso en particular, la perturbación se manifiesta por el potencial de interacción que produce la transferencia fermiónica [2].

Para el presente estudio es imprescindible tener en cuenta que la regla de oro de Fermi aplica desde su principio cuántico a la electroquímica cuando los electrones se transfieren de un estado donador a una multitud de estados aceptores.

Sin embargo, también puede suceder que los electrones se transfieran desde una multitud de estados donadores; esto pasa en las reacciones óxidorreducción (redox) en las soluciones de electrolito, cuando esto sucede, se debe aplicar una suma de todos los posibles estados del sistema, por lo que la mecánica cuántica de transiciones predice:

$$k_{ie} = \int_{-x}^{+x} \frac{2\pi}{h} |M_{DA}|^2 \varphi_A(U_D) \varphi_D(U_D) dU_D \quad (5)$$

De esta manera, es posible hallar las densidades de probabilidad. Cabe recordar, por otro lado, que la matriz densidad en mecánica cuántica es de gran importancia y utilidad en problemas estadísticos cuánticos, y el problema específico afrontado mediante la electroquímica es analizar todos los posibles estados electrónicos después de la transición, lo que se convierte precisamente en un proceso estadístico a nivel cuántico.

Además de analizar los procesos cuánticos, es clave hacer hincapié en la termodinámica del sistema, recalando que la densidad estadística de las funciones estado está dominada por fluctuaciones del potencial electrostático dentro de las soluciones de electrolitos, pero estas soluciones se encuentran en un determinado equilibrio termodinámico.

### SISTEMAS CUÁNTICOS EN EQUILIBRIO TERMODINÁMICO

Un sistema en equilibrio termodinámico se caracteriza porque las variables que describen dicho sistema no cambian con el tiempo, pero en el tipo de sistemas analizado por la electroquímica las variables termodinámicas son en realidad estacionarias. Esto significa que las propiedades estadísticas de las fluctuaciones o de los pequeños cambios son independientes del tiempo en el momento de la medición.

En general, con el fin de evaluar a fondo las características de este tipo de transiciones se debe introducir el factor de Boltzmann, ya que dicho factor siempre se encuentra presente en los sistemas que se consideran en equilibrio termodinámico de esta forma:

$$\exp\left(\frac{-\Delta W}{k_B T}\right) \quad (6)$$

Donde  $\Delta W$  es un potencial termodinámico apropiado para la solución del problema en cuestión.

Este potencial apropiado es la energía libre de Gibbs, que desde el punto de vista termodinámico,  $\Delta G'$ , es parte de la energía total de un sistema que puede convertirse en trabajo en condiciones isotérmicas.

Es posible asociar dicha energía libre con la transferencia electrónica, refiriéndose a electrones donadores y aceptores [15]. La energía libre de Gibbs representa la cantidad máxima de energía que puede entregar un mol de sustrato cuando se oxida en condiciones isotérmicas [16].

De esta manera, la función densidad de probabilidad  $\varphi_A(V)$  del potencial eléctrico debe tener una forma estacionaria, donde se encuentre implícito el factor de Boltzmann:

$$\varphi_A(V) = A \exp\left(\frac{-\Delta G}{k_B T}\right) \quad (7)$$

La función trabajo dada por la energía de Gibbs tiene la forma:

$$\Delta G = \frac{1}{2} C (\Delta V)^2 = \frac{1}{2} \frac{(\Delta V)^2}{A} \quad (8)$$

Donde  $C$  es la capacitancia (almacenamiento de carga) entre las especies reactantes y  $A$  es la constante recíproca de la capacitancia. Por lo tanto, la nueva función densidad de probabilidad está dada por la ecuación 9:

$$\varphi_A(V) = A \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(\Delta V)^2}{A k_B T}\right) \quad (9)$$

Sumando con pequeñas energías de interacción y teniendo en cuenta el potencial propio de la interacción entre el electrón donado y el electrón aceptado, es posible expresar nuevamente la densidad de probabilidad de la forma como se muestra en la ecuación 10:

$$\varphi_A(V) = A \exp\left(\frac{-(eV - eV_A)^2}{4\lambda k_B T}\right) \quad (10)$$

Ahora, es importante determinar el valor de la constante  $A$  dentro de la función de probabilidad. Para ello se recurre a los métodos matemáticos de la mecánica cuántica por medio de la normalización de la función.

Desde este punto, la interpretación física enfatiza en que la probabilidad de encontrar una partícula en el espacio es igual a 1; para ello, la función de onda representada por la función de probabilidad de interacción debe cumplir la propiedad matemática de ser de cuadrado integrable. Así, se tiene la expresión 11:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} A \exp\left(\frac{-(eV - eV_A)^2}{4\lambda k_B T}\right) dV = 1 \quad (11)$$

Haciendo uso de una propiedad de la función exponencial, que se observa en la ecuación 12:

$$\frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} A \exp(-x^2) dx = 1 \quad (12)$$

Ahora, identificando y haciendo una sustitución en la ecuación anterior (12):

$$x = \frac{eV - eV_A}{\sqrt{4\lambda k_B T}} \quad (13)$$

Diferenciando la expresión anterior con respecto a  $V$ , se obtiene  $dx$ .

$$dx = \frac{e}{\sqrt{4\lambda k_B T}} dV \quad (14)$$

Remplazando en la fórmula integral de la ecuación 12, se obtiene:

$$\frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \sqrt{\frac{e^2}{4\lambda k_B T}} dV = 1 \quad (15)$$

Comparando término a término la ecuación 11 con esta última ecuación (15), se deduce que la constante  $A$  se expresa así:

$$A = \sqrt{\frac{e^2}{4\lambda k_B T}} \quad (16)$$

Entonces, finalmente la densidad de probabilidad del potencial electrostático es:

$$\varphi_A(-eV) = \frac{1}{\sqrt{4\pi\lambda k_B T}} \left( \frac{-(eV - eV_A)^2}{4\lambda k_B T} \right) \quad (17)$$

## TRANSFERENCIA HOMOGÉNEA DE ELECTRONES

Con los procesos a nivel cuántico y teniendo en cuenta la termodinámica del sistema analizado por la electroquímica, se puede hablar ahora, con un alto grado de precisión, de la tasa constante de transferencia electrónica, definida a partir de la teoría de perturbaciones y la regla de oro de Fermi:

$$k_{ie} = \frac{2\pi}{h} H_{DA}^2 \frac{1}{\sqrt{4\pi\lambda k_B T}} \exp\left(\frac{-\Delta G^*}{k_B T}\right) \quad (18)$$

Donde  $H_{DA}$  representa los elementos de matriz de la transición entre el electrón donado y las especies aceptantes; las otras partes de la expresión corresponden a las propiedades de la energía libre de Gibbs.

$\Delta G^*$  expresa la energía total que se debe transferir desde los alrededores hasta los reactantes para alcanzar la transición de estados.

## ECUACIÓN DE BUTLER-VOLMER

Cuando se multiplica la velocidad de reacción y la carga por mol de cargas positivas, se obtiene la densidad de corriente  $i$ .

$$i = F\eta \quad (19)$$

En esta forma, es posible determinar las relaciones de velocidades tanto catódicas como anódicas para la oxidación y reducción, respectivamente (ecuaciones 20 y 21):

$$\frac{i_{oxidación}}{F} = k_{oxidación}^* [a_R] \exp\left[-\frac{(1-\beta)F\Delta\phi}{RT}\right] \quad (20)$$

$$\frac{i_{oxidación}}{F} = k_{reducción}^* [a_0] \exp\left[\frac{\beta F\Delta\phi}{RT}\right] \quad (21)$$

Estas corrientes indican cuantitativamente la velocidad de transferencia de carga en ambos sentidos en la interfase metal-disolución. En estado de equilibrio, estas corrientes se pueden representar mediante el mismo término. A dicha magnitud se la denomina densidad de corriente de canje de equilibrio,  $i_0$  [8, 17]. Si el sistema electroquímico es perturbado mediante alguna diferencia de potencial, es decir, si se desplaza de su estado de equilibrio, la densidad de corriente de desplazamiento viene dada por la diferencia entre la corriente de deselectronización y la corriente de electronización:

$$\begin{aligned} \frac{i_{NETA}}{F} &= k_{oxidación} [a_R] \exp\left[\frac{(1-\beta)F\Delta\phi}{RT}\right] \\ &- k_{reducción} [a_0] \exp\left[-\frac{\beta F\Delta\phi}{RT}\right] \end{aligned} \quad (22)$$

Los coeficientes de transferencia anódicos y catódicos son pesos asociados a las dos reacciones, pero no corresponden a un balance de carga.

Desdoblando  $\Delta\phi$  en la diferencia de potencial de equilibrio,  $\Delta\phi_e$  y otra porción, concretamente la parte extra,  $\eta$ , se tiene

$$\Delta\phi = \Delta\phi_e + \eta' \quad (23)$$

Sustituyendo la relación anterior en la ecuación 19, resulta:

$$i = i_0 \left( \exp \left[ \frac{(1-\beta)F\eta}{RT} \right] - \exp \left[ -\frac{\beta F\eta}{RT} \right] \right) \quad (24)$$

Esta ecuación representa la variación de la densidad de corriente a través de una interfase metal-disolución en función de la diferencia  $\eta$  entre la diferencia de potencial real en condiciones de no equilibrio y la diferencia de potencial de equilibrio

## CONCLUSIONES

Desde el punto de vista de la electroquímica, es posible analizar el proceso de transferencia de electrones en un medio a partir de esta teoría cuántica. En mecánica cuántica los operadores cumplen la función de excitar un sistema físico, con el fin de obtener información sobre éste.

La aplicación de los lineamientos de la mecánica cuántica, en especial la teoría de perturbaciones, permite describir los comportamientos cuánticos complejos con formalismos sencillos. Para tal efecto, se aplican hamiltonianos perturbativos al sistema para estudiar las energías producidas, ya que las soluciones de la ecuación de Schrödinger en general son demasiado idealizadas; por tanto, con la teoría de perturbaciones es posible obtener valores más aproximados de sistemas físicos reales.

Por medio de la teoría de perturbaciones se puede deducir la ecuación de Buttler-Volmer, que rige los comportamientos electroquímicos

## REFERENCIAS

- [1] Bard, A.J. & Faulkner, L.R. (2001). *Electrochemical methods: fundamentals and applications*. New York: John Wiley & Sons.
- [2] Smit, J. (1991). *Transfer operator and lattice fermions*. *Nuclear Physics B - Proceedings Supplements*, vol. 20, N.º 1, 542-545.
- [3] Chang, R. (2007). *Electroquímica*. McGraw Hill.
- [4] García, A. & Gabriel, D. (2002). *Manual de laboratorio de fisicoquímica de los materiales*. Madrid: Universidad Autónoma Metropolitana.
- [5] Chaudhuri, S.K. & Lovley, D.R. (2003). Electricity generation by direct oxidation of glucose in mediatorless microbial fuel cells. *Nat. Biotechnol.*, vol 21, N.º 1, 1229-1232.
- [6] Szpak, S., Mosier-Boss, P.A., Scharber, S.R. & Smith, J.J. (1992). Charging of the Pd/nH System: Role of the Interphase. *J. Electroanal. Chem.*, vol. 337, N.º 2, 147-156.
- [7] Bagotsky, V.S. (2006). *Fundamentals of electrochemistry*. New York: John Wiley & Sons.
- [8] Bockris, J.O. M. & Reddy, A.K.N. (1978). *Electroquímica moderna*, vol. I, Madrid: Ed. Reverte.
- [9] Gao, R., Hewitt, T.D. & Roy, D. (1993). Stark shift of an interband transition in Cu determined by surface charge measurements. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, vol. 54, N.º 6, 685-690.
- [10] Zeeman, E.C. (1972). *Differential Equations for the Heartbeat and Nerve Impulse*. Coventry, UK: Mathematics Institute, University of Warwick.
- [11] Zeeman, E.C. (1971). *Differential equations for the heartbeat and nerve impulse, Dynamical systems*. Proc. Sympos. Salvador: Univ. Bahia, Academic Press, 683-741.
- [12] Zeeman, E.C. (1976). Catastrophe theory. *Proc. Roy. Inst. Gt. Brit.*, vol. 49, N.º 1, 77-92.
- [13] Zhang, H., Holden, A.V. & Boyett, M.R. (2001). Modelling the effect of beta-adrenergic stimulation on rabbit sinoatrial node. *J. Physiol.*, vol. 533, N.º 1, 38-39.
- [14] Zhang, H., Holden, A.V., Noble, D. & Boyett, M.R. (2002). Analysis of the chronotropic effect of acetylcholine on sinoatrial node. *J. Cardiovasc. Electrophysiol.*, vol. 13, N.º 1, 465-474.
- [15] Cheung, D.L. & Troisi, J. (2010). Theoretical Study of the Organic Photovoltaic Electron Acceptor PCBM: Morphology, Electronic Structure, and Charge Localization. *Phys. Chem. C.*, vol. 114, N.º 48, 20479-20488.
- [16] Manohar, A.K., Bretschger, O., Nealsen, K.H. & Mansfeld, F. (2008). The polarization behavior of the anode in a microbial fuel cell. *Electrochim. Acta*, vol. 53, N.º 9, 3508-3513.
- [17] Acevedo, R. & Montes-Atenas, G. (2004). *Hacia un enfoque dinámico de la físico-química*, vol. II. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ciencias de los Materiales.

# Noticias

Aniversario 126 de la Sociedad Colombiana de Ingenieros

En el marco de la celebración de los 126 años de la Sociedad Colombiana de Ingenieros, el gobierno nacional les confirió la Orden al Mérito Julio Garavito a tres profesores de la Escuela.



La ministra de Transporte, Cecilia Álvarez-Correa Glen y la presidenta de la Sociedad Colombiana de Ingenieros, Diana María Espinosa Bula, en compañía del ingeniero Germán Santos Granados, Orden al Mérito Julio Garavito en el grado de Gran Cruz.



La ministra de Transporte y la presidenta de la Sociedad Colombiana de Ingenieros junto al ingeniero Jorge Enrique Durán Gutiérrez, Orden al Mérito Julio Garavito en el grado de Gran Oficial.



En la gráfica aparecen la ministra de Transporte, la presidenta de la Sociedad Colombiana de Ingenieros y el ingeniero Jairo Alberto Romero Rojas, Orden al Mérito Julio Garavito en el grado de Gran Oficial.

Discurso pronunciado por la presidente de la Sociedad Colombiana de Ingenieros, Diana María Espinosa Bula, en la celebración de los 126 años de fundación de la SCI.

Señoras y señores:

Cuando el 29 de mayo de 1887 un grupo de ingenieros fundó la Sociedad Colombiana de Ingenieros, acordaron que el honor y la dignidad de su profesión constituirían para ellos su mayor orgullo y, en consecuencia, para enaltecer su profesión, determinaron ajustar sus conductas a un conjunto de normas que se convirtieron en el código de ética profesional.

## LA ÉTICA PROFESIONAL

Han transcurrido ciento veintiséis años, y las normas fundamentales que nos legaron en ese código se encuentran tan vigentes como entonces.

Reflexionar sobre el contenido de ese código es una práctica que realizamos los ingenieros asociados anualmente en nuestra sesión solemne, en la que además de conmemorar la fundación de nuestra sociedad, se otorgan los premios a los mejores ingenieros del país por su excelencia académica y profesional y por parte del gobierno nacional se otorgan a los ingenieros colombianos, las condecoraciones de la Orden al Mérito Julio Garavito. Esto nos permite asimilar la grandeza del alcance de las frases que nuestros fundadores escribieron.

Quiero en esta ocasión, cuando conmemoramos el centésimo vigésimo sexto aniversario de nuestra fundación, invitarlos a reflexionar sobre el contenido de las tres primeras normas del citado código:

1. “Ejercer tanto la profesión como las actividades que de ella se derivan, con decoro, dignidad e integridad”. Nuestros antecesores, escogieron “decoro” para pedir respeto, propusieron “dignidad” para alcanzar excelencia y pidieron “integridad” para aspirar a incorruptibilidad.
2. “Obrar siempre bajo la consideración de que el ejercicio de la profesión constituye no sólo una actividad técnica sino también una función social”. No buscaron nuestros fundadores proponer simplemente que los profesionales fueran unos buenos conocedores de las disciplinas de la ingeniería, sabiamente plantearon la necesidad de corresponder a la sociedad en general, que es a quien van dirigidas las obras y las inversiones que ejecutan los gobiernos a través de los ingenieros y las empresas de ingeniería, y quien consecuentemente se convierte en la beneficiaria directa de las realizaciones y obras, o la víctima de sus errores y fracasos.
3. “Actuar siempre honorable y lealmente frente a las personas o entidades a las cuales preste sus servicios”. El acatamiento de las normas, el cumplimiento de las obligaciones, el respeto a sus superiores y la necesaria equidad entre derechos y deberes, permitieron forjar esta norma constitutiva de nuestro código.

Hoy es un momento único para la ingeniería de nuestro país, precisamente cuando Colombia, aún con grandes rezagos de infraestructura, se convierte en un lugar atractivo para las inversiones, donde diariamente están llegando colegas extranjeros y las grandes empresas de ingeniería del mundo buscan radicarse en Colombia. Nos corresponde desde la Presidencia de la SCI emprender una gran movilización intelectual, a escala nacional, para que estos postulados se difundan y se apliquen por parte de nacionales y extranjeros.

### **PARTICIPACIÓN DE INGENIERÍA EXTRANJERA**

El actual mundo globalizado que nos ha convertido en ciudadanos del mundo nos permitirá incursionar más allá de nuestras fronteras y debemos prepararnos para ello. Así triunfaremos en el mercado internacional. Pero también debemos prepararnos para afrontar con calidad y conocimiento la ingeniería proveniente de otros países que pretenden competir con nosotros. Bienvenidos nuestros colegas.

Paralelamente nos compete estar vigilantes del cumplimiento de requisitos y exigencias que deben llenar nuestros colegas foráneos. Solicitaremos desde el Copnia la correcta aplicación de las normas vigentes sobre la materia y ante las entidades estatales solicitaremos la adecuada proporcionalidad en la integración de consorcios, uniones temporales o alianzas, de tal manera que la participación de la Ingeniería colombiana no sea inferior al 50% en cada proyecto. Debemos evitar el desastre ocurrido a la ingeniería chilena, que prácticamente desapareció por no prever lo que podría suceder.

### **EL PAPEL DE LAS UNIVERSIDADES**

Adicionalmente, la gran mayoría de universidades, en su afán de conseguir recursos para cumplir su tarea, se convirtieron en competencia de sus propios egresados, y muchos contratantes con el fin de dar celeridad o evitar los procesos de contratación que exige la ley, buscan las consultorías en los entes educativos. Toda una generación hoy sufre el impacto de la degradación de los principios y valores, producto de equivocadas decisiones de los gobernantes. En nuestras universidades, la academia tiene por desarrollar un papel preponderante para difundir en la cátedra los principios de la ética profesional. Nuestras universidades deben dedicarse a cumplir su tarea, pero es necesario que el Estado proporcione los recursos que se requieren para que esas entidades encargadas de la enseñanza asuman plenamente la razón para la cual fueron creadas, la docencia y la investigación, y no se vean obligadas a acudir a la consultoría, para sobrevivir.

### **LA CONTRATACIÓN ESTATAL**

Las empresas estatales que deben cumplir la función de contratantes están en la obligación de aplicar las normas y los procedimientos que dictan la ley y los reglamentos. Pero cuando estas normas son imprecisas, maleables o laxas, permiten el surgimiento de conductas reprochables que generan corrupción.

Nuestros poderes legislativo y ejecutivo han errado al promulgar leyes y decretos “anticorrupción”, que antes de servir para combatir malas prácticas y conductas inadecuadas de empresarios emergentes que en complicidad con funcionarios indelicados, permitieron la aparición de actuaciones dolosas, que estigmatizaron

nuestra profesión, y han contribuido sí a limitar el ejercicio profesional de nuestros ingenieros y pequeñas y medianas empresas de ingeniería.

La amenaza que pende sobre la sobrevivencia de las empresas de ingeniería de construcción y consulta, y de los contratistas y consultores, personas naturales, es la imposibilidad de ofrecer sus servicios a su cliente por excelencia, el Estado, pues las exigencias y requerimientos, en materia técnica y financiera, nos están dejando por fuera del mercado.

En efecto, la pérdida de experiencia con el paso del tiempo, el errado convencimiento de las entidades contratantes que creen que quien debe tener los recursos para ejecutar contratos de obra o de consultoría, es el vendedor, léase contratista, y no quien compra, el contratante. O el cálculo de la capacidad de contratación -K de contratación-, después de la expedición del Decreto 734 de 2012, son factores que amenazan la sostenibilidad de la contratación de nuestros ingenieros y sus empresas.

Hoy está publicada en la página del Secop la versión 4.1 del proyecto de decreto elaborado por la Agencia Nacional de Contratación.

Haciendo eco de un clamor generalizado de los miembros de la sociedad, de sus 22 sociedades regionales y de sus 32 correspondientes, manifestamos nuestra inconformidad por inconvenientes, algunos apartes de la versión 4.1 del proyecto del decreto que pretende derogar en su integridad el Decreto reglamentario 0734 de 2012, o decreto único de contratación. De expedirse en los términos actuales prevemos una parálisis en la contratación pública hasta que los anunciados manuales, de cuestionable fortaleza jurídica, sean expedidos. Pero igual de grave nos parece que el criterio para determinar la capacidad residual de contratación de los contratistas de obra pública se centre exclusivamente en factores financieros e ignoren la capacidad técnica, administrativa, operacional y la trayectoria o experiencia real de las empresas. Solicitamos que dicho decreto no sea expedido en los términos de la versión citada, ofreciendo nuestro concurso para contribuir a la formulación de los correctivos necesarios, confiando en que ellos sean de recibo por el gobierno nacional y la Agencia Nacional de Contratación.

Teniendo en cuenta que el tema más álgido es el de la capacidad de contratación, insistimos respetuosamente proponer: Retomar la fórmula anterior para el cálculo

del K, cuya glosa era que podría estar sobrevalorado, situación que podría superarse con la modificación del factor de paridad internacional, y retomar la definición de capacidad residual como la diferencia entre la capacidad de contratación y los saldos pendientes de ejecutar en los contratos vigentes. Esta fórmula funcionó sin problemas durante mucho tiempo.

En este mismo auditorio, el señor presidente de la república, el año anterior, expresaba con razón: “Si a los ingenieros les va bien, si a los cafeteros les va bien, si a los arquitectos les va bien, al país le va bien”. Hoy debo manifestarle al gobierno nacional que para que nos vaya bien, primero debemos tener los ingenieros oportunidades de participar en los proyectos de nuestra patria.

La voluntad política de los contratantes, la aplicación de los principios de la Ley 80 de 1993 y la erradicación de la discrecionalidad en la elaboración de pliegos de condiciones pueden garantizar la sostenibilidad o la permanencia en el tiempo de nuestras empresas de ingeniería y el ejercicio de la profesión de ingeniero, en el noble oficio de ser constructores del desarrollo de nuestro propio destino.

Recibimos con beneplácito las invitaciones de la ministra de Transporte para revisar el proyecto de ley de infraestructura sobre el cual tenemos nuestras observaciones y las haremos llegar próximamente. Del director de ANI para atender las sugerencias de la SCI para asegurar la adecuada participación de los ingenieros colombianos en los proyectos de tan importante entidad. Y del director general del Instituto Nacional de Vías para revisar los precios y tarifas que se utilizan en el sector a su cargo, de acuerdo con la localización de las obras y las dificultades o facilidades de acceso, en las diferentes regiones de nuestro país.

## LA INTEGRACIÓN DE LA INGENIERÍA COLOMBIANA

Consecuente con el programa de trabajo de la presente administración y con el debido acompañamiento de nuestra junta directiva, hemos dedicado nuestros mejores esfuerzos para pasar de las palabras a los hechos en la cristalización de nuestros propósitos: con la histórica participación de 21 sociedades regionales de las 24 existentes, hasta esa fecha, los presidentes regionales atendieron la convocatoria de la pPresidencia para elegir entre ellos los dos representante ante la junta directiva, a la que estatutariamente tienen derecho. En tal virtud

fueron elegidos el ingeniero Álvaro Villegas Moreno, presidente de la Sociedad Antioqueña de Ingenieros y Arquitectos y el ingeniero Alexander Suárez Rodríguez, presidente de la Asociación Nariñense de Ingenieros, líderes gremiales y profesionales, dignos representantes de la ingeniería colombiana regional.

Así mismo se efectuó la convocatoria a las sociedades correspondientes para la elección del representante de éstas ante la junta directiva. Con la participación de 24 sociedades correspondientes, se eligió la ingeniera Patricia Díaz, como su representante.

Al asumir hace dos meses como presidente de la Sociedad Colombiana de Ingenieros expresé:

“Nuestro compromiso es trabajar en primera instancia en la toma de decisiones y acciones para que la participación de nuestros ingenieros asociados, sea vinculante, participativa y actuante. Tenemos que lograr que en la Sociedad estén los mejores ingenieros del país y nos proponemos fortalecer la estructura organizacional de la misma, para ofrecer a las comisiones técnicas permanentes, a las sociedades regionales y a las sociedades correspondientes, mejores instrumentos de información y mayores facilidades funcionales. Estas sociedades serán el apoyo para el diseño de la estrategia de acción. Ellas son los cuerpos vivos que detectan en forma inmediata las necesidades y las angustias de la ingeniería tanto en sus regiones, como en las actividades que representan”.

Consecuente con lo anterior, hemos iniciado la tarea de integrar la ingeniería nacional.

Hoy es una fecha muy especial para la Sociedad Colombiana de Ingenieros. Hoy acoge en su organización a un territorio muy apreciado y a un importante grupo de ingenieros de San Andrés Islas, Providencia y Santa Catalina. Se hace realidad un sueño y un deseo aplazado por varias décadas. Nos emociona confirmar que nuestros hermanos insulares del Caribe hoy son parte de nuestra familia de la ingeniería. El vínculo de las islas y el continente nace en la esperanza y en la ilusión que nos convocan a mantener lazos de amistad, de solidaridad y de hermandad duraderas.

Hemos otorgado a su presidente regional, el ingeniero Iván Cabrera, el Diploma de Sociedad Regional de la SCI, convirtiéndose en nuestra vigésima quinta sociedad regional, tengan la seguridad ustedes colegas, que desde la Sociedad Colombiana de Ingenieros, estaremos prestos a atender sus clamores y ser la caja

de resonancia de los problemas de esa bella región de la patria y sus intercesores ante el gobierno nacional para una adecuada y justa participación de la Ingeniería regional en los trabajos que se desarrollen en las islas.

En el presente año, celebraremos reuniones de junta directiva conjuntas en las regionales de Cauca, Santander, Antioquia, Atlántico y Tolima, con el propósito de estrechar los lazos de colegas, identificar los problemas que los agobian en las regiones y convertir la SCI en la vocera de sus inquietudes y defensora de sus aspiraciones gremiales.

En el mes de agosto del presente año, en la ciudad de Medellín participaremos en la celebración de los 100 años de la Sociedad Antioqueña de Ingenieros y Arquitectos (SAI) en la Plaza Mayor de Convenciones.

Del 21 al 24 de agosto se realizará el XXXII Congreso Nacional de Arquitectura y de Ingeniería que tiene como mensaje central “Un encuentro con el futuro”.

También se efectuarán las reuniones de la Unión Panamericana de la Ingeniería (Upadi) y la Academia Panamericana de Ingeniería (API). Estas reuniones se celebrarán entre el 19 y el 23 de agosto. La Upadi cumplirá 64 años el próximo 20 de julio, tiene su sede en Brasil, cuenta con 27 países miembros de América donde participan 31 organizaciones de ingeniería y España como miembro observador.

Se esperan para estos eventos unos 2000 asistentes nacionales y 1000 extranjeros. Nuestra invitación para asistir a estos importantes eventos.

### RECONOCIMIENTO A MEDELLÍN

Es motivo de orgullo para todos los colombianos el reciente reconocimiento a la ciudad de Medellín como la ciudad más innovadora del mundo. Se hace más relevante la distinción por tratarse de una competencia en la que participaron importantes ciudades. El primer lugar es un justo reconocimiento a la ciudad, a sus habitantes, a las autoridades municipales y a las fuerzas vivas de la ciudad. Medellín se distingue por sus bibliotecas, sus parques temáticos, su sistema de transporte público, el metro, los cables aéreos y las escaleras eléctricas públicas. Sus habitantes son ejemplo de cultura ciudadana y por el cuidado y apropiación del equipamiento urbano. Medellín se constituye en un referente. Reciban una sincera y afectuosa felicitación. La ingeniería nacional hace un reconocimiento a la ciudad de Medellín.

## COOPERACIÓN INTERNACIONAL

Considero oportuno y muy satisfactorio, en esta ocasión, destacar que en el día de ayer Colombia fue invitada a adherir a la OCDE, que es la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico, con sede en París, a la que pertenecen 34 países entre los que están los latinoamericanos México (1994) y Chile (2010). Sus objetivos se centran en descifrar qué es lo que conduce al cambio económico, social y ambiental; por otra parte, la OCDE firma acuerdos anticomercio, a través de los cuales los países establecen medidas para disuadir, prevenir y penalizar a las personas y a las empresas que prometan, den, ofrezcan o encubran gratificaciones a funcionarios públicos o extranjeros que participan en transacciones comerciales internacionales; Colombia firmó dicho acuerdo desde enero de 2013.

## LA EXCELENCIA DE LA INGENIERÍA COLOMBIANA

El motivo central de esta conmemoración que hoy nos congrega en este templo de la ingeniería nacional es el otorgamiento del Premio Nacional de Ingeniería. El Grupo Consorcio Triángulo Coyaima 2006, integrado por las firmas Construcciones Civiles S.A. y Vías y Construcciones Vicon S.A., ha sido galardonada con el premio Nacional de Ingeniería otorgado por la Sociedad Colombiana de Ingenieros por el sistema de conducción principal frente Uno, del Distrito de Riego del Triángulo del Tolima y sus obras anexas en el municipio de Coyaima.

Este Sistema de conducción principal del Distrito de Riego permitirá la captación y conducción de hasta treinta metros cúbicos de agua por segundo (30 m<sup>3</sup>/s) del río Saldaña, y una conducción de 10 km con diferentes tipos de estructuras, desde La bocatoma hasta el embalse zanja honda a través de túneles viaductos, Box Culvert revestidos en concreto.

La obra tuvo un costo total de \$276.138 millones, con recursos del gobierno nacional a través de la gerencia de Fonade, y recursos del Inocoder. Expreso el reconocimiento especial de la SCI a los colegas merecedores de la máxima distinción de la Ingeniería Colombiana en el presente año:

Constructores  
Conciviles  
Vicon S.A.

## Interventores

Estudios técnicos, Cedec y Gómez Cajiao y Asociados. Todas estas firmas son colombianas y con gran trayectoria profesional, con más de 40 años de existencia, que han demostrado permanentemente la capacidad e integridad de la ingeniería nacional.

De igual manera, a los ingenieros que reciben del gobierno nacional la Orden al Mérito Julio Garavito les expreso mi reconocimiento y admiración.

## NUESTRO COMPROMISO

En nuestras empresas de ingeniería tenemos un vasto campo de acción para hacer realidad estos principios. Fundamentalmente, nuestra actitud en las decisiones que tomemos y proceder que adoptemos, marcarán de manera indeleble de nuestra personalidad: lo que somos y lo que queremos ser. Una mala práctica no debe tener cabida en el ejercicio profesional.

Desde la presidencia de la SCI, con el apoyo irrestricto de su actual junta directiva y las sociedades regionales y correspondientes, donde se encuentran representados los ingenieros de todo el país, existe el propósito de iniciar esa gran movilización intelectual para dignificar nuestro noble ejercicio profesional. Seamos ingenieros jóvenes o adultos, empleados o independientes, consultores, interventores, constructores, o concesionarios de obras, todos tenemos un gran compromiso con nuestro país. Hagamos grande y digna nuestra profesión. ¡Somos conscientes de que lo fundamental es nuestra actitud!

En esta actuación es fundamental el apoyo y compromiso de los ingenieros para participar en los procesos cumpliendo todas las normas establecidas y los requerimientos que nos imponen los entes contratantes, que a su vez deben en sus actuaciones exigir condiciones proporcionales y adecuadas a las obras a ejecutar y proponer y llevar a cabo proyectos completamente identificados, evaluados y estudiados, que efectivamente cumplan con las especificaciones técnicas necesarias, para llevar a feliz término las obras que reclama la infraestructura nacional, la cual debe obedecer a las necesidades reales de nuestra sociedad, a los requerimientos de nuestra geografía y nunca a una coyuntura política o económica.



# REVISTA ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA

## Alcance y política

El objetivo de la *Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería* es difundir artículos técnicos que contribuyan al desarrollo del país a través de una publicación con alta calidad editorial y rigor científico.

La revista acepta prioritariamente los siguientes tipos de trabajos, que le permiten mantener su categorización:

1. **Artículo de investigación científica y tecnológica.** Documento que presenta, de manera detallada, los resultados originales de proyectos de investigación. La estructura generalmente utilizada contiene cuatro apartes importantes: introducción, metodología, resultados y conclusiones.
2. **Artículo de reflexión.** Documento que presenta resultados de investigación desde una perspectiva analítica, interpretativa o crítica del autor, sobre un tema específico, recurriendo a fuentes originales.
3. **Artículo de revisión.** Documento producto de una investigación donde se analizan, sistematizan e integran los resultados de investigaciones publicadas o no publicadas, sobre un campo en ciencia o tecnología, con el fin de dar cuenta de los avances y las tendencias de desarrollo. Se caracteriza por presentar una cuidadosa revisión bibliográfica.

También admite artículos de las siguientes tipologías:

4. **Artículo corto.** Documento breve que presenta resultados originales preliminares o parciales de una investigación científica o tecnológica, que por lo general requieren una pronta difusión.
5. **Reporte de caso.** Documento que presenta los resultados de un estudio sobre una situación particular, con el fin de dar a conocer las experiencias técnicas y metodológicas consideradas en un caso específico.
6. **Revisión de tema.** Documento resultado de la revisión crítica de la literatura sobre un tema en particular.

Cabe destacar que se privilegian para la revista los tipos de artículos de los numerales 1, 2 y 3.

La revista circula trimestralmente y recibe sólo artículos inéditos. Los trabajos recibidos se someten al concepto de pares académicos y del Consejo Editorial.

## Requisitos para la publicación de artículos

Los artículos presentados a la revista deben remitirse por correo electrónico a [revista@escuelaing.edu.co](mailto:revista@escuelaing.edu.co), adjuntando los siguientes formatos debidamente diligenciados: autor.doc, clasificación.doc y tipo.doc, cuyos archivos se pueden descargar de <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>. En este mismo sitio está disponible la plantilla guía que contiene la estructura determinada por la revista para los artículos.

## Scope and policy

*Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería* disseminates technology articles helping to our country development. It emphasises on its high quality print and its scientific rigour. Articles submitted for publication shall be classified into one of the following categories— which allow it keeps its indexation:

1. **Scientific and technological research article.** These documents offer a detailed description about the original findings of research projects. In general, the usually used structure contains four important sections: introduction, methodology, results and conclusions.
2. **Reflection article.** These documents present the results of a research project on a specific, interpretative, or critical view by the author about a particular topic by using original sources.
3. **Review.** A document resulting from a finished research, where the published and/or unpublished findings of investigation in a particular field of science or technology are analysed, systematised and integrated to report the progress and the development tendencies. These documents include a careful bibliographic review.

*Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería* also accepts the following types of articles:

4. **Short article.** A brief text presenting the original, preliminary and/or partial results of a scientific or technological study, which normally need to be disseminated as quickly as possible.
5. **Case report.** A document that presents the results of a study on a specific situation in order to report the technical and methodological experiences considered in a particular case.
6. **Thematic review.** These documents are the product of a critical review of literature on a particular topic.

Our revista privilege articles as the highlight ones in numbers 1, 2 and 3.

*Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería* is a quarterly publication that only accepts unpublished articles. The revista submits all the papers to the verdict of two academic peers, who evaluate the article.

## Ruling for publication

The article must be sent by e-mail to [revista@escuelaing.edu.co](mailto:revista@escuelaing.edu.co) with 3 files attached: Author.doc, Classification.doc and Type.doc available in <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>. There is also a template guide for the structure of the article (template guide.doc).



# Entregando lo mejor de los **colombianos**

Línea de atención al Cliente Nacional: 01 8000 111 210

Línea de atención al Cliente Bogotá: (57-1) 4199299

➤ [www.472.com.co](http://www.472.com.co)