

REVISTA DE LA ESCUELA COLOMBIANA DE

INGENIERIA

Año 15 N° 59

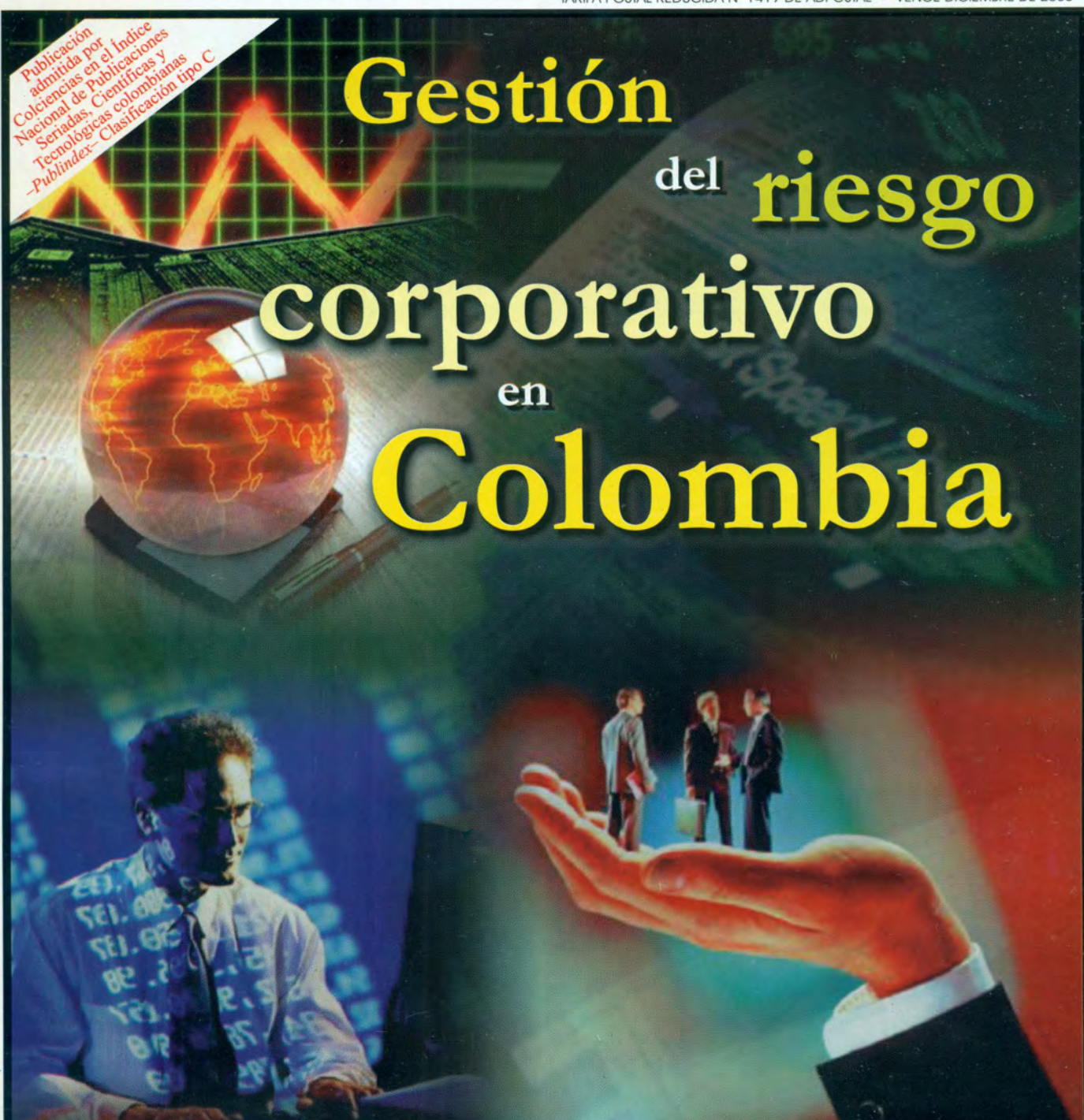
Julio - Septiembre de 2005

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

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

Gestión del riesgo corporativo en Colombia

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



Análisis de los costos y consecuencias de las inundaciones

Camilo Sarmiento Gómez

Las inundaciones son el fenómeno natural que produce los costos más elevados a la sociedad, debido a su frecuencia y extensión geográfica, como quedó demostrado a principios de año con la oleada invernal que afectó a varios departamentos del país. La respuesta de los gobiernos ante estos desastres debe incluir ayuda de todo tipo a los damnificados, pero sin duda la mejor herramienta que hay para enfrentar fenómenos de esta clase es la prevención. Precisamente por esto, y ante la inoperancia de los modelos existentes en la prevención de los costos de las inundaciones, se adaptó un nuevo modelo que permite controlar el nivel de la inundación y el tipo de construcciones en las zonas afectadas. Así las cosas, en Colombia se requiere la elaboración de estudios en tal sentido que permitan formular un programa claro de prevención contra esta clase de desastres, basado en jurisdicciones locales.

Economista de pregrado de los Andes y Ph.D. del programa de Economía y Recursos Naturales de la Universidad de Maryland. Su investigación se ha centrado principalmente en aspectos cuantitativos del comportamiento económico y en el impacto y relación con los recursos naturales. Fue profesor asistente de la Universidad de North Dakota y en la actualidad, como director de proyectos del Pacific Institute of Research and Evaluation, ha implementado una evaluación del programa nacional de seguros en los costos y las consecuencias de las inundaciones en Estados Unidos.

En razón de su frecuencia y extensión geográfica, las inundaciones son el fenómeno natural que produce los mayores costos a la sociedad. La temporada invernal de principios del año 2005, que azotó los departamentos de Santander, Norte de Santander, Huila y Tolima, ilustró con imágenes las consecuencias devastadoras de las inundaciones. Subsecuentes desbordamientos en el período de abril a mayo del año 2005 afectaron a 9.290 familias en 16 departamentos, según el balance entregado por la Defensa Civil.

La asistencia ideal que debería prestar el gobierno a las víctimas de inundaciones es incierta. En ausencia de costos de transacción y perfecta información, la teoría económica establece que el mercado determina la asignación óptima de predios localizados en

zonas de alto riesgo por inundaciones. En este caso, individuos deciden vivir por su propia voluntad en las zonas de riesgo y, por tanto, cuando éste se materializa, la asistencia del gobierno a las víctimas no se justificaría más allá de la función vital del Estado de proteger la vida y salud de los ciudadanos afectados. En la realidad, los ciudadanos no siempre están informados de cuáles son las zonas de alto riesgo de inundaciones y, en muchas ocasiones, los individuos no tienen otra opción que vivir en dichas zonas. A causa de

estas fallas del mercado, la respuesta del gobierno a los desastres naturales debe incluir asistencia en la reconstrucción de las residencias a los pobladores de las zonas afectadas. Sin embargo, el mejor instrumento que posee para enfrentar los desastres naturales es la prevención.

Para proteger la seguridad de los ciudadanos, la responsabilidad de los gobiernos consiste en identificar las zonas de riesgo e implementar sistemas de planeación. Regulaciones de permisos de urbanización deben otorgarse consistentemente con los objetivos de prevenir los costos económicos y hu-

En razón de su frecuencia y extensión geográfica, las inundaciones son el fenómeno natural que produce los mayores costos a la sociedad.

manos provenientes de las inundaciones, y de otros riesgos identificables. Mientras el gobierno no cumpla con esta función de prevención, su responsabilidad en asistir las vícti-

mas será mayor, con el consecuente costo para los contribuyentes.

En la prevención de los costos de las inundaciones existen dos modelos primordiales. El primero se basa en proyectos de ingeniería que reducen la probabilidad de inundaciones en ciertas regiones. Entre las críticas que se hacen a proyectos estructurales se dice que estos últimos no eliminan sino que trasladan los efectos de las inundaciones a otras regiones y, en ciertos casos, contribuyen al deterioro de los recursos naturales.

El segundo modelo se funda en la planeación de los tipos de construcción ante la ubicación de nuevas viviendas en zonas de riesgo. Este modelo se adoptó en Estados Unidos como la política oficial de los últimos 30 años, en la cual la aprobación de permisos de construcción en zonas de riesgo está condicionada a que la residencia cumpla con un nivel anual de protección del 99% contra los efectos de las inundaciones. En ciertos casos proyectos estructurales son fundamentales para reducir el riesgo de inundaciones en ciudades localizadas bajo el nivel del mar y que tienen una alta densidad demográfica. El ejemplo clásico es el sistema de protección estructural que existe para la ciudad de Nueva Orleans, situada unos tres metros bajo el nivel del mar.

En varios países la responsabilidad en la prevención de daños a la sociedad causados por inundaciones ha recaído principalmente en un sistema que delega a los gobiernos municipales la implementación de los programas de planeamiento de las ciudades.

En varios países la responsabilidad en la prevención de daños a la sociedad causados por inundaciones ha recaído principalmente en un sistema que delega a los gobiernos municipales la implementación de los programas de planeamiento de las ciudades. La efectividad de esta política es potencialmente significativa. Por ejemplo, esta política descentralizada en Estados Unidos ha contribuido a reducir el costo esperado anual por parte de inundaciones en más de US\$1.000 millones, y el cumplimiento de las normas de construcción en zonas de riesgo de inundación alcanza un 85%.

En los países en desarrollo, como Colombia, una gran limitante es que los gobiernos locales son más proclives a la corrupción. Por definición gobiernos locales débiles carecen de recursos, por lo que sus funcionarios tienden a ser insuficientes y son más vulnerables al soborno, lo cual promueve la ilegalidad y la violencia.

Condición necesaria para mejorar la seguridad ciudadana en Colombia es fortalecer los gobiernos locales. Para incrementar la efectividad de éstos, debe existir un sistema de chequeos y balances a través de estímulos económicos del gobierno central a los municipales. Por ejemplo, la asistencia del gobierno central a los municipios afectados por desastres naturales estaría condicionada a que los gobiernos locales implementen reglamentaciones mínimas en la prevención de los efectos de las inundaciones. En este caso, las transferencias a las regiones no sólo deben cumplir las funciones de eficiencia y equidad, sino también políticas de seguridad a los ciudadanos.

Hay diversos instrumentos analíticos para entender los efectos de la prevención de riesgos. Para efectuar el análisis económico de los efectos de sistemas de prevención contra los daños de las inundaciones, a continuación se presenta un nuevo modelo de simulación que predice los costos de las inundaciones y permite estimar los efectos de la prevención a los daños ocasionados por las inundaciones en Estados Unidos.



MODELO DE SIMULACIÓN HAZUS-HM FLOOD MODEL

El modelo Hazus-HM se produjo recientemente en Estados Unidos para calcular el impacto de la prevención en los costos de las inundaciones. Este modelo, concebido originalmente para simular el impacto económico de los terremotos, sólo se adaptó hace poco para analizar el costo de las inundaciones y tormentas. El Hazus-HM le permite al usuario controlar el nivel de la inundación y el tipo de construcciones en las zonas afectadas. En el análisis de costos de inundaciones, Hazus está programado dentro del sistema de mapas GIS que contiene la información hidrológica e hidráulica de zonas de riesgo en Estados Unidos. Estos datos geográficos están conectados a la vez a las informaciones de datos del U.S. Census, lo cual permite calcular los costos de las inundaciones.

El modelo Hazus simula un desbordamiento del agua para un nivel asociado con la probabilidad de ocurrencia del fenómeno. De los niveles de inundación y probabilidad en cada vecindario, Hazus estima pérdidas económicas a través de las curvas de daños que son una función de la elevación de estructuras. La flexibilidad de Hazus permite calcular así los daños con una distribución de probabilidad relacionada con los niveles de inundación y la loca-

lidad. Un estimativo importante de estas simulaciones son los daños esperados por inundaciones en diferentes zonas de riesgo. Hazus calcula las pérdidas económicas directas (abrigo, edificios, agricultura, transporte y utilidades), así como indirectas (localización, salario y renta) en diversos tipos de inundaciones y distintas estructuras de la comunidad.

¿QUIÉN PAGA POR LOS DAÑOS?

En Estados Unidos la ley define las pautas que requieren casas nuevas y edificios en zonas de riesgo que estén protegidos contra una inundación de probabilidad anual de 1%. Brevemente, estas pautas requieren que las nuevas estructu-



ras se construyan en o sobre la elevación baja de la inundación (EBI), que reduce la probabilidad de los daños de la inundación en estructuras a un acontecimiento de la frecuencia en menos de 1% por año. Por tanto, para determinar el impacto de las regulaciones en la construcción en las zonas de riesgo en Estados Unidos, experimentos usando Hazus proveen gran flexibilidad. En la simulación se diferencian los daños previstos para las estructuras situadas debajo y por encima de la EBI.

Hazus simula la pérdida total de una inundación por categoría del costo. Adicionalmente, para determinar quién paga los costos de la inundación, Sarmiento y Miller (2005) desarrollaron la metodología que captura las valoraciones de costos en Hazus que no distinguen quienes los asumen y los distribuye en las proporciones derivadas de datos sobre cobertura de seguros en vigor y de pagos en inundaciones del expediente. En el análisis, Sarmiento y Miller

(2005) reemplazan los valores extraídos de la literatura para derivar los factores requeridos para descomponer los costos directos de las inundaciones entre pagadores. Además, descomponen los costos esperados a las víctimas, los contribuyentes, y el impacto de la prevención en los costos de inundaciones.

CONCLUSIÓN

Sarmiento y Miller (2005) establecen que el programa contra inundaciones de Estados Unidos ha disminuido las pérdidas en zonas de riesgo en US\$1.042 millones, que corresponde a una reducción del 35% en costos. La simulación muestra también que el programa de mitigación ha rebajado el costo esperado al gobierno de Estados Unidos en US\$526 millones en asistencia anual, que corresponde a una disminución del 70% en costos de asistencia. Finalmente, el programa de prevención ha reducido las pérdidas a individuos en US\$770 millones anuales, mientras que la provisión de seguros contra inundaciones ha aminorado las pérdidas esperadas a individuos en US\$720 millones anuales. Estos resultados destacan los costos y las conse-

La lección para Colombia tiene que ver con la importancia de formular un programa claro de prevención contra las inundaciones, basado en jurisdicciones locales.

cuencias de las inundaciones, así como la conveniencia de contar con programas de prevención.

La lección para Colombia tiene que ver con la importancia de formular un programa claro de prevención contra las inundaciones, basado en jurisdicciones locales. Para esto es necesario realizar estudios en los costos que las inundaciones causan a la sociedad colombiana, estudios de identificación de zonas de riesgo, al igual que los métodos más eficaces para reducir los costos. Estos estudios deben incluir el efecto de los desastres naturales y la prevención a los sectores más desfavorecidos.

REFERENCIAS

- Federal Emergency Management Agency. *Multi Hazard Loss Estimation Methodology, Hazus- HM Flood Model*, Washington, DC: Mitigation Division.
- Sarmiento, C. & Miller, T. (2005). "Evaluation of the National Flood Insurance Program: The Costs and Consequences of Flooding". *Subcontract to the American Institute for Research*, junio (en borrador)

Consideraciones sobre el empleo del coeficiente de disipación de energía, R , en el análisis de las estructuras de acero

Gabriel Valencia Clement

Se presentan inquietudes sobre la validez de la evaluación de las solicitaciones generadas por la acción de sismo de diseño en las estructuras de acero, mediante el procedimiento de combinar las fuerzas gravitacionales con las fuerzas sísmicas reducidas, E , resultantes de dividir las fuerzas sísmicas, F_s , por el coeficiente de disipación de energía, R , que supuestamente es una buena medida de la capacidad de disipación de energía de la estructura y para el que NSR-98, como muchos otros códigos de diseño, especifica los valores que se deben usar (tablas A.3.1 a A.3.4). Por otra parte, se presenta un resumen de ciertos aspectos del diseño de estructuras de acero contenidos en la norma *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*, versión 2002, de AISC, cuyo planteamiento refuerza el postulado que se desea demostrar, en el sentido de que el uso del factor R en el diseño de estructuras de acero, en zonas de alta sismicidad, genera serias inconsistencias y, en muchos casos, estructuras y cimentaciones inseguras. Aunque el artículo está orientado hacia el diseño de estructuras de acero, es claro que el planteamiento general aplica a todo tipo de estructuras.

Palabras claves: coeficiente de disipación de energía, combinaciones de cargas de código, ductilidad, jerarquía de plastificación (concepto viga débil - columna fuerte), respuesta elástica, respuesta inelástica, solicitaciones.

Ingeniero civil y profesor titular de la Universidad Nacional de Colombia. Profesor y conferencista en las universidades Francisco de Paula Santander, Javeriana, de los Andes, del Valle y Escuela Colombiana de Ingeniería.

INTRODUCCIÓN

Es muy claro para los diseñadores que resulta costoso, con frecuencia innecesario y hasta indeseable, diseñar las estructuras para responder en rango elástico ante los sismos de diseño. En zonas de alta sismicidad, la respuesta elástica puede implicar aceleraciones de magnitud similar a la de la gravedad. Diseñar para las fuerzas que se generan con estas aceleraciones tiene un costo asociado alto. Incluso para edificios altos, proveer estabilidad al volcamiento puede resultar extremadamente difícil, como bien lo anotan Pauley y Priestley (ref. 13). El hecho es que si la resistencia del sistema estructural resistente a fuerzas laterales se desarrolla a un nivel

de respuesta sísmica menor que la correspondiente al sismo de diseño, aparecerán deformaciones inelásticas, con plastificación de algunas secciones.

Las NSR-98 (ref. 3), como la mayor parte de los códigos de diseño estructural que existen en el mundo, plantean la evaluación de las solicitaciones en los elementos de las estructuras, considerando ciertas combinaciones de carga, que en adelante se denominarán SCCC (solicitaciones por combinaciones de carga de código).

En zonas de alta sismicidad, la respuesta elástica puede implicar aceleraciones de magnitud similar a la de la gravedad.

Dicen las NSR-98 en A.1.3.4, paso 11: "Las diferentes solicitaciones que deben ser tenidas en cuenta se combinan para obtener las fuerzas internas de diseño de la estructura, de acuerdo con los requisitos del capítulo B.2 del Reglamento, por el método de diseño propio de cada material estructural", y añade más adelante: "En los efectos causados por el sismo de diseño se tiene en cuenta la capacidad de disipación de energía del sistema estructural, lo cual se logra empleando unos

efectos sísmicos reducidos de diseño, E , obtenidos dividiendo las fuerzas sísmicas F_s determinadas (mediante el análisis elástico de la estructura), por el coeficiente de capacidad de disipación

de energía, R ($E = F_s / R$). Las NSR-98 aclaran que ese coeficiente es función de tres factores: a) el sistema de resistencia sísmica de acuerdo con una clasificación dada; b) el grado de irregularidad de la edificación, y c) los requisitos de diseño y detallado de cada material, para el grado de capacidad de disipación de energía correspondiente.

Las NSR-98, como muchos otros códigos, especifican que el diseño de los elementos estructurales debe hacerse de acuerdo con los requisitos

propios del grado de capacidad de disipación de energía prescrito, grado que se define en forma genérica con el coeficiente R , y además, *que ese diseño debe realizarse para los valores más desfavorables obtenidos de las combinaciones de cargas* (subrayado del autor). Así mismo los códigos, incluidas las NSR-98 (véase NSR, A.1.3.4), definen que para efectos del diseño estructural de los elementos que componen la cimentación se deben usar las SCCC, empleando las cargas apropiadas y las fuerzas sísmicas reducidas de diseño, E .

Para considerar la disipación de energía, así como muchos otros códigos, las NSR-98 introducen el empleo de ese coeficiente R , pero estos códigos no obligan al diseñador a realizar una revisión del comportamiento esperado de la estructura en lo referente a su respuesta inelástica ante el sismo de diseño, ni se exige hallar las solicitaciones que realmente se esperan en los miembros y en las conexiones, las acciones que se transmiten a las cimentaciones y en general las demandas que se presentan cuando ese sismo actúa, salvo en el caso de que se usen análisis estructurales inelásticos, algunos de los cuales sí permiten una aproximación a ese comportamiento esperado.

Por otra parte, el coeficiente R depende del tipo de movimiento del terreno y de las suposiciones que se hagan en la evaluación del amortiguamiento, tal como lo demuestran Watanabe y Kawashima (ref. 16), quienes encuentran que hay una gran dispersión en los valores de R , de acuerdo con las características de esos dos factores.

En el presente artículo se plantean serias dudas sobre la validez de diseñar las estructuras en general, y en especial las estructuras de acero, de los edificios que estarán ubicados en sitios geográficos de mediana o alta sismicidad, así como sus cimentaciones y los elementos no estructurales ligados a esas estructuras, con base en las SCCC, concretamente SCCC que incluyan solicitaciones generadas por fuerzas sísmicas E calculadas, como se mencionó atrás, con las acciones del sismo de diseño, F_s , divididas por el coeficiente de disipación, R , tomado este último como un valor fijo, teóricamente válido para cada tipo genérico de estructura. El autor considera que diseñar con las SCCC en zonas de mediana o alta sismicidad lleva a estructuras inseguras y, en todo caso, con un grado de confiabilidad estructural totalmente incierto. En el caso de las estructuras de acero, parte del problema se supera si se cumplen los requisitos que exigen algunos códigos modernos, tales como las *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings* de AISC, versión 2002 (ref. 1), y que en el momento de escribir el presente trabajo están por ser publicadas en su versión 2005, requisitos entre los que cabe resaltar el uso de conexiones calificadas en laboratorio y la revisión de la jerarquía en el proceso de plastificación, entre otros, que justamente hacen que, al

menos para los miembros estructurales y para las conexiones, las SCCC, afortunadamente, no se tengan en cuenta en el diseño. Esta jerarquía, que algunos autores denominan concepto viga débil - columna fuerte, se estudiará más adelante en detalle.

DUCTILIDAD Y COEFICIENTE DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA, R

Hace unos años, el término ductilidad se usaba sólo para caracterizar el comportamiento de los materiales. Posteriormente, el concepto se extendió a la estructura, y comenzó a asociarse a la resistencia y la rigidez de la estructura en su conjunto.

Hoy se entiende por *ductilidad*, la capacidad que tiene una estructura (o un miembro estructural) de experimentar grandes deformaciones inelásticas y aun en rango plástico, sin que se presente una reducción significativa de su resistencia. En la práctica común del diseño sismorresistente de las estructuras, se acepta tal ductilidad como una medida de la capacidad de disipar energía sísmica mediante la aparición de ese tipo de deformaciones. Pero también se reconoce con dicho término la capacidad que tiene una estructura de sufrir deformaciones después de la iniciación de la fluencia, sin que haya una pérdida significativa de la resistencia. En la literatura especializada se definen varios tipos de ductilidad (ref. 11):

- del material, que corresponde a las deformaciones plásticas de los materiales;
- de la sección transversal, o ductilidad por curvatura, que se refiere a las deformaciones plásticas de la sección transversal de los miembros, considerando la interacción entre las partes que componen esa sección transversal;
- del miembro, o curvatura por rotación, cuando se consideran las propiedades del miembro;
- de la estructura, o ductilidad por desplazamientos, que considera el comportamiento de toda la estructura;
- de energía, cuando se considera al nivel de la energía sísmica disipada.

En los diseños sísmicos basados en la aplicación de fuerzas horizontales, es común estimar las demandas a partir de un análisis lineal, dividiendo las fuerzas por un factor, conocido como factor de modificación de respuesta o coeficiente de disipación de energía, denominado en la literatura como coeficiente R o q -factor. En la figura 1 se representan los desplazamientos de la cubierta de un edificio en función del cortante sísmico; la línea OA muestra el comportamiento elástico de la estructura, en la que los desplazamientos se suponen proporcionales a la magnitud de la fuerza horizontal aplicada. Como se anotó anteriormente,

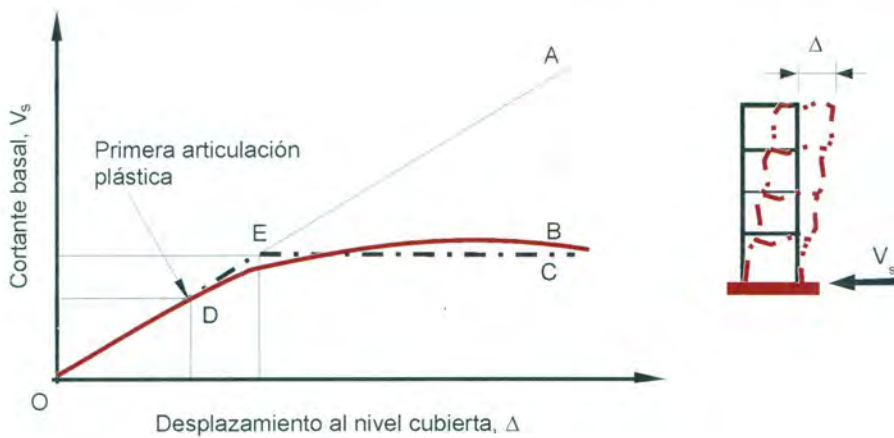


Figura 1. Desplazamiento de una estructura solicitada por una fuerza horizontal.

si la resistencia del sistema estructural resistente a fuerzas laterales se desarrolla a un nivel de respuesta sísmica menor que la correspondiente al sismo de diseño, aparecerán deformaciones inelásticas, con plastificación de algunas secciones. El punto *D* representa la aparición de la primera articulación plástica. A partir de este punto el comportamiento deja de ser lineal, y en la medida en que se presentan más articulaciones, este comportamiento tiende a ser el que muestra la curva ODB, el cual suele simplificarse con la curva idealizada OEC.

En la figura 2a se muestran de nuevo los comportamientos elástico e idealizado. Newmark y Hall (12, pp. 209-236) presentaron en 1973 la propuesta de usar la igualdad de desplazamientos como una aproximación para determinar la magnitud de la fuerza sísmica en estructuras con comportamiento inelástico, propuesta que se basa en analizar la estructura con una fuerza *R* veces menor que la fuerza sísmica F_E teórica, partiendo de que si la estructura se comportase elásticamente, con la fuerza F_E sufriría un desplazamiento igual a Δ_m , mientras que si su comportamiento es plástico idealizado, el mismo desplazamiento se al-

canzaría con una fuerza F_E/R . Este planteamiento lo propusieron Newmark y Hall para el caso de estructuras con períodos relativamente largos, mientras que para períodos cortos propusieron usar el principio de igualdad de energía que se muestra en la figura 2b, que se basa en la determinación de *R* a partir de la igualdad de las áreas de las figuras OAB y OECD. Esta propuesta influyó notablemente en las prácticas de diseño alrededor del mundo en forma trascendental.

En la figura 2a, la ductilidad definida en función de desplazamientos es:

$$\mu = \frac{\Delta_m}{\Delta_y} = R \quad (1)$$

Mientras que la de la figura 2b, igualando las energías, se obtiene:

$$\mu = \frac{\Delta_m}{\Delta_y} = \frac{R^2 + 1}{2} \quad (2)$$

A partir de éstas, Newmark y Hall propusieron las conocidas expresiones:

$$R = \mu \quad (3)$$

$$R = \sqrt{2\mu - 1} \quad (4)$$

Como se puede apreciar, para períodos muy cortos, *R* tiende a la unidad. En las NSR-98 se propone un procedimiento similar, aunque la ecuación (4) es remplazada por la A.2-7).

Hay muchas propuestas para la determinación de *R*, entre otras:

- a) Basadas en el principio de ductilidad (Ballio & Setti).
- b) Basadas en la respuesta de sistemas de un grado de libertad (Newmark & Hall, Giuffré & Gianini, Krawinkler & Nassar).
- c) En métodos de energía (Como & Lani, Kato & Akiyama).
- d) Fatiga a bajos ciclos (Ballio & Castiglioni, Calado & Azevedo).

No obstante, los valores de *R* que fijan los códigos han sido elegidos mediante juicios y criterios ingenieriles, y con base en consensos de los redactores de esos códigos. En la tabla 1 se resumen las propuestas de las NSR-

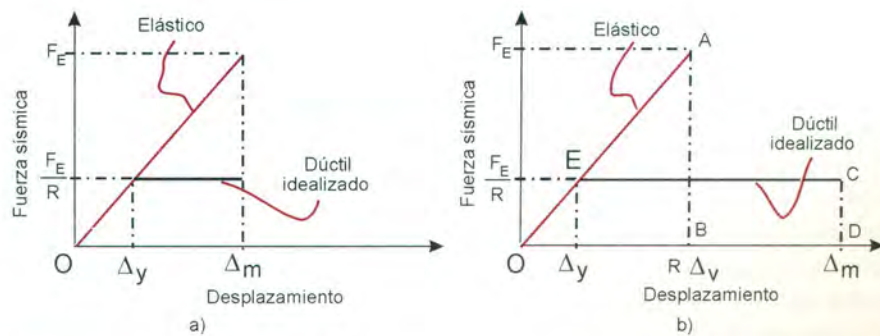


Figura 2. Principios de igualdad de desplazamientos e igualdad de energías para la determinación de *R* en estructuras con períodos largos y cortos, respectivamente.

Tabla 1
Valores del coeficiente de disipación de energía, *R*

Sistema estructural	NSR-98	Fema 450
PAE con conexiones resistentes a momento en zonas por fuera de los vínculos	7	8
PAE con conexiones no resistentes a momento en zonas por fuera de los vínculos	6	7
PAC Especial	6	6
PAC Ordinario	4	5
PRM Especial	7	8
PRM Intermedio	5	4.5
PRM Ordinario	3.5	3.5

Notas

1. PAC = pórtico con arriostramientos concéntricos, PAE = pórtico con arriostramientos excéntricos, PRM = pórtico resistente a momento.
2. En Fema 450 se incluyen algunos sistemas que, para la época en que se redactaron las NSR-98, aún no estaban codificados.

98 y de, NEHRP 2003 (Fema 450, ref. 10), para algunos sistemas de estructuras de acero.

TENDENCIAS ACTUALES EN EL DISEÑO SÍSMICO DE LAS ESTRUCTURAS DE ACERO

En su versión del año 2002, las provisiones sísmicas de AISC, *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings* (ref. 1), que en adelante se denominarán AISC sísmico 2002, se definen varios sistemas sísmicos, a saber: pórticos resistentes a momento, pórticos cercha resistentes a momento, pórticos con arriostramientos excéntricos y pórticos con arriostramientos concéntricos, que en adelante se denominarán PRM, PCRM, PAE y PAC, respectivamente. Para el diseño de estos sistemas, AISC sísmico 2002 parte de la base de que ante las acciones sísmicas, éstos se comportarán inelásticamente, y para garantizar que dicho comportamiento puede desarrollarse, formula varios requisitos que permiten controlar posibles fallas prematuras, esto es, fenómenos que precipiten una falla local o general antes de que las deformaciones plásticas en las secciones de los miembros donde se esperan, se desarrollen al nivel requerido. Las fallas que

se intenta controlar son principalmente las siguientes:

- a) Inestabilidad general, en particular por efectos P- Δ .
- b) Inestabilidad de los miembros: vigas, columnas o viga-columnas.
- c) Inestabilidad local, pandeo local de aletas o almas.
- d) Fractura frágil: tensión en secciones netas, falla de soldaduras, desgarre laminar en placas (por tenacidad u otros fenómenos), fatiga, etc.
- e) Degradación inapropiada de la resistencia o de la rigidez de los miembros ante acciones cíclicas.

Para el diseño de los PRM, la versión 1992 de las especificaciones AISC se basaba en los ensayos realizados por Popov y Stephen en 1972, los que indicaban que para los materiales y los sistemas de conexión ensayados, las conexiones a momento soldadas podían tolerar rotaciones inelásticas de entre 0.010 y 0.015 rad, correspondientes a derivas de entre 2 y 2.5%, aproximadamente, las que, a juicio de los ingenieros de la época, eran suficientes para garantizar un comportamiento adecuado ante las acciones sísmicas. No obstante, las investigaciones que se efectuaron con posterioridad a la ocurrencia del sismo en Northridge (California), en 1994, determinaron

que los numerosos cambios que se habían realizado desde los años setenta en los materiales, la soldadura, la configuración de los miembros, etc., hacían que las conclusiones de aquellas investigaciones ya no fueran aplicables, y que precisamente por tal razón se habían presentado problemas en las conexiones y en los miembros de PRM diseñados con tales principios durante el citado sismo en Northridge. Como consecuencia, en su versión 2002, AISC define tres tipos de PRM: los PRM especiales (PRM-E); los intermedios (PRM-I), que se deben diseñar para permitir rotaciones inelásticas de al menos 0.03 rad y 0.01 rad, respectivamente, y los ordinarios (PRM-O), que se supone permanecerán en rango elástico, y que por tanto tendrán demandas inelásticas mínimas. En estas condiciones, las derivas de piso mínimas que deben tolerar los PRM-E, los PRM-I y los PRM-O son 4, 2 y 1%, en su orden.

Ahora bien, para lograr tales rotaciones en los miembros en los que se espera que se presente plastificación, no solamente hay que controlar la aparición de cualquiera de las fallas prematuras ya nombradas, sino que debe impedirse que otros miembros de la estructura, diferentes de los que plastificarán, registren no sólo cualquiera de aquellas fallas, sino que tampoco ellos mismos presenten plastificación de ninguna de sus secciones, pues esto último evidentemente modificaría el mecanismo de plastificación y podría llevar a la falla de la estructura en su conjunto. Este razonamiento se hace extensivo en AISC sísmico 2002 a otros tipos de sistemas estructurales, en especial a los PCRM, a los PAE y, en alguna medida, a los PAC.

En otras palabras, *en zonas de media y alta sismicidad, en los pórticos de acero los miembros diferentes de aquellos en los que se esperan plastificaciones, deberán diseñarse con las máximas acciones que podrían liberar los*

miembros en los que se espera que se presenten fenómenos de plastificación por la acción del sismo de diseño. Incluso, para que lo anterior tenga un alto grado de confiabilidad, las acciones que liberan esos miembros se incrementan con un factor R_y (entre 1.1 y 1.5, dependiendo del tipo de acero), que corresponde a la relación que hay entre el esfuerzo de fluencia esperado y el mínimo especificado para el material, y por otro factor, denominado C_{pr} por Fema 350 (ref. 8) y Fema 368 (ref. 9), que considera los esfuerzos mayores de F_y que alcanza buena parte de la sección transversal plastificada como resultado del endurecimiento por deformación.

Para el diseño de los PRM, el concepto expuesto se concreta en varias revisiones que exige AISC sísmico 2002, entre las que se cuentan la demostración de que las conexiones tienen la capacidad de rotación necesaria (0.04 o 0.02 rad, según se trate de PRM-E o PRM-I), y la comprobación de que la relación entre la resistencia de las columnas y la resistencia de las vigas sea mayor que la unidad:

$$\frac{\sum M_{pc}^*}{\sum M_{pb}^*} > 1,0 \quad (5)$$

Que algunos autores denominan concepto de *viga débil columna fuerte*, y con cuya aplicación se busca garantizar que las articulaciones plásticas se presentarán en las vigas antes que en las columnas. Tal como se aclaró, la resistencia de las columnas se revisa suponiendo que al plastificarse las vigas liberan un momento igual a $1.1R_y M_p$. Por su parte, para determinar la resistencia de las columnas, se considera la presencia de la carga axial.

Comentario aparte merece la definición que hace AISC sísmico 2002 de dicha carga axial, P_u . Para el autor, la propuesta de AISC es inconsistente, por cuanto se pide calcular P_u como la resistencia requerida de la columna, esto es, el valor de la envolvente de las solicitaciones calculadas para las diferentes combinaciones de carga, incluidas las acciones sísmicas, mientras que el resto de los términos de la ecuación corresponden a la plastificación de los miembros, situación que se presenta normalmente con cortantes sísmicos mayores que E (entendido como F_y/R), tal como se demuestra más adelante.

Por su parte, para los PAE, AISC sísmico 2002 plantea la necesidad de diseñar las vigas por fuera del vínculo, las columnas, las riostras y las conexiones, con las acciones que libera el vínculo cuando se plastifica, incrementadas con el factor R_y y con un factor por endurecimiento que está entre 1.10 y 1.25, dependiendo del miembro que se revise. Situación similar se registra en el diseño de los PCRM, donde el mecanismo se presenta en el llamado segmento

especial, y son las acciones que libera éste, incrementadas, como se describió anteriormente, las que se consideran al revisar el comportamiento del resto del pórtico.

Para aclarar lo anterior, se presenta en forma resumida el análisis del pórtico de cinco pisos que se muestra en la figura 3. Se presumirá que tiene un área aferente por piso de 375 m^2 (se supone que hay pórticos vecinos con conexiones viga-columna sólo a cortante y que por tanto no colaboran con la resistencia sísmica). La carga muerta será de 5.7 kN/m^2 y la viva de 2.50 kN/m^2 . El edificio estará ubicado en un sitio con $A_a = 0.25$, grupo de uso I y coeficiente de sitio S2.

Solución

1. Evaluación de la fuerza cortante sísmica

La masa de cada piso es $m_1 = \frac{375 \times 5,7}{9,8} = 218 \text{ k}$

Mediante un análisis dinámico se halló el período para el primer modo, $T_1 = 0.95 \text{ s}$. El cortante sísmico que arrojó el análisis fue $V_s = 4,620 \text{ kN}$. Con los perfiles que se muestran en la figura 3, para la combinación de carga 1.2D + 0.5L + E, en la que, como lo prescribe NSR-98, E no está dividido por R , los valores de las derivas para los pisos 2, 3, 4, 5 y cubierta son 17, 30, 29, 23 y 16 mm, respectivamente. Como se ve, las derivas cumplen el 1% que exigen las NSR-98. De hecho, los perfiles se eligieron para que, con un peso mínimo (pero dentro de parámetros económicos), se cumpliera este requisito.

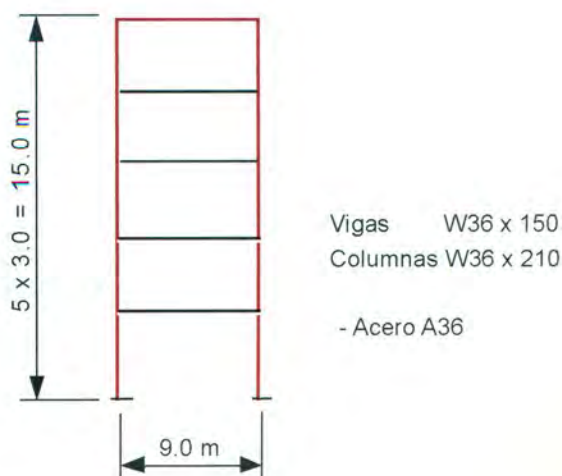


Figura 3. Pórtico de cinco pisos resistente a momentos.

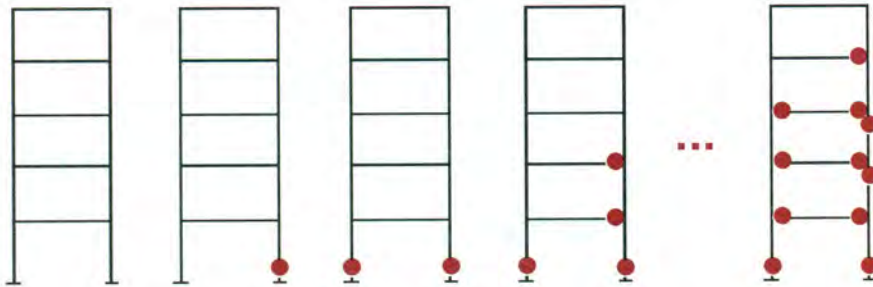


Figura 4. Proceso de plastificación progresiva del pórtico de la figura 3.

De acuerdo con las NSR-98, las solicitaciones se evalúan con R igual a 7 (según Fema 450, podría ser 8), esto es, para solicitaciones se aplica un cortante sísmico, V :

$$V_i = \frac{4,620}{7} = 660 \text{ kN}$$

Se realizó un análisis inelástico de la estructura, con el fin de determinar el comportamiento de la misma. El proceso de plastificación progresivo se presenta en la figura 4, mientras que en la figura 5 se puede observar la curva de capacidad.

La primera articulación plástica se presenta en la base de una de las columnas, y el cortante sísmico que lo produce es 1,470 kN; para la aparición de la primera articulación en una viga (la del nivel 2), es 2,290 kN. Finalmente, el cortante máximo que muestra la curva de capacidad es 2,620 kN, con el que, en teoría, se presentará el mecanismo. En resumen, los valores de la fuerza sísmica son:

- De acuerdo con NSR-98:
 $V = 4,620 \text{ kN}$
 $V_s/R = 660 \text{ kN}$
- Según análisis inelástico:
 $V_{Mec} = 2,620 \text{ kN}$

2. Solicitaciones en los miembros

En la tabla 2 se aprecian los valores de las solicitaciones en las columnas del

primer piso. Las calculadas con la combinación de carga de NSR-98, $1.2D + 0.5L + E/R$, se denotan R_{ul} .

Por otra parte, para cumplir con el principio de viga débil-columna fuerte, como lo establece AISC sísmico 2002 en la sección 9.6, la resistencia requerida por esas columnas se debe hallar considerando el momento que libera la viga ($1.1 R_y F_y Z_b + M_w$). Para el caso presente, ese momento liberado por la viga del segundo piso es:

$$M_{pb}^* = 1.1 \times 1.5 \times 2,350 + 690 = 4,570 \text{ kN}$$

Este momento está calculado para la intersección de los ejes de la viga y

las columnas. AISC sísmico 2002 acepta que para la columna el momento se evalúe al nivel de la cara de la viga. Para este caso, considerando que en la conexión hay una viga y dos columnas, cada una de estas últimas debe diseñarse para resistir un momento

$$M_{pb}^* = 1,650 \text{ kN-m}$$

Se ha supuesto que las columnas inferior y superior toman igual momento, lo que no es del todo cierto. Por su parte, la carga axial se puede determinar usando el subconjunto de la figura 6a, en la que se aprecia que para desarrollar un momento de 4,570 kN-m en la intersección de los ejes, supuestos puntos de inflexión en $h/2$ de las columnas, la fuerza cortante que debe estar actuando es:

$$V^* = \frac{2M_{pb}^*}{h} = 3,040 \text{ kN}$$

A su vez, observando la figura 6b, la magnitud aproximada de la carga axial que induce ese cortante en las columnas por efecto de volcamiento es:

$$P_{uc}^* = \frac{V^* \times (2/3)H}{L} = 3,380 \text{ kN}$$

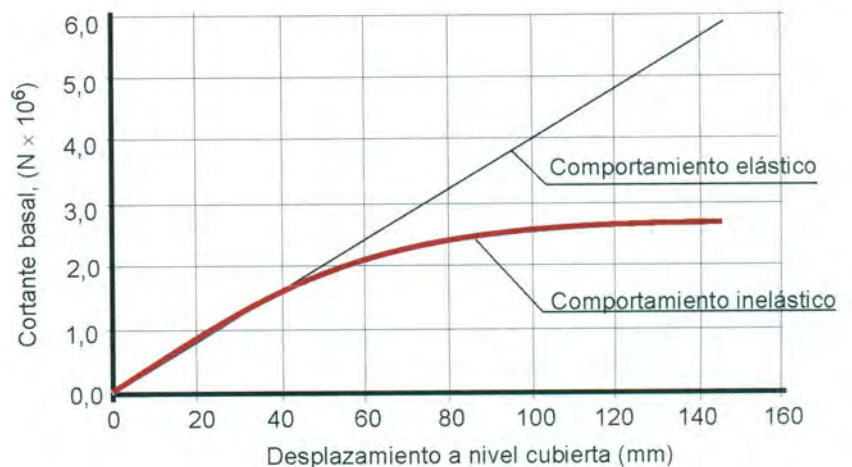


Figura 5. Curva de capacidad del pórtico de la figura 3.

A esta carga axial debe sumarse en una columna el aporte de las cargas gravitacionales, cuya magnitud aproximada, calculada con base en áreas aferentes, es de 3,645 kN. Por tanto, el axial esperado en la columna más exigida cuando se presenta el mecanismo de viga y ésta libera momentos incrementados por $C_{pr}R_y$, será del orden de 7,025 kN. Los valores así hallados se incluyen bajo la denominación R_{u2} en la tabla 2. La conclusión no puede ser más preocupante: al seguir las NSR-98, estamos diseñando con solicitaciones bastante menores que las probables.

3. Acciones en la cimentación

De acuerdo con las NSR-98, las cimentaciones deberían diseñarse con las acciones que se determinan con la combinación de carga más desfavorable, que en el caso presente es $1.2D + 0.5L + F_s/R$, y que aparecen como R_{u1} de la tabla 2; no obstante, para el mecanismo de la viga del segundo piso, las acciones que liberan las columnas a las cimentaciones son mucho mayores: los valores R_{u2} de la misma tabla. Más aún, para lograr la plastificación completa del pórtico, dado que el cortante requerido es todavía mayor, si bien no es de esperarse que la solicitación a flexión sea mayor (pues la R_{u2} se halló partiendo de la plastificación de la viga, y no parece lógico que pueda liberar mayor momento), la carga axial sí lo será.

4. Evaluación de R

Observando las curvas de la figura 5, y con la ecuación 3 (el límite para usar la ecuación 4 en lugar de la 3 es $T = 0.5$ s, de acuerdo con Newmark y Hall), puede establecerse que el coeficiente de disipación de energía, R, para el pórtico que se ha estudiado, es del orden de:

$$R = \mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_p} = \frac{146}{39} = 3.7$$

Valor mucho menor que el R que proponen las NSR-98, que es $R = 7$.

Anotación final

De acuerdo con AISC sísmico 2002, el acero A36 no es recomendable para la construcción de edificios de acero en zonas de alta sismicidad, y de hecho Fema 350 no incluye conexiones precalificadas para este acero; no obstante, para la tesis que se pretende demostrar en el presente artículo esto es irrelevante.

Tabla 2
Solicitaciones en las columnas del piso inferior

Solicitación	Unidades	R_{u1}	R_{u2}
Momento, M_u	kN-m	1,058	1,650
Carga axial, P_u	kN	4,190	7,025

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. No resulta apropiado diseñar los miembros de los pórticos de acero con las solicitaciones halladas mediante el empleo de combinaciones de carga que incluyan los efectos del sismo, considerados éstos con base en el cortante basal dividido por R ($E = F_s/R$). No se debe diseñar para tales solicitaciones, sino para lo que liberan los miembros que se plastifican, incluidos los factores C_{pr} por endurecimiento y R_y por fluencia esperada.

2. En pórticos diseñados por rigidez más que por resistencia, que es lo que normalmente ocurre con los PRM en zonas de media y alta sismicidad, el cortante sísmico requerido para generar el mecanismo es bastante más alto que el determinado usando el coeficiente de disipación R, esto es, utilizando $E = F_s/R$.

3. Para el diseño de las cimentaciones, de los sistemas de conexión de la estructura a esas cimentaciones, de los muros de carga si los hay, en algunos casos de los elementos no estructurales, y de otros elementos ligados con el sistema sísmico, por las mismas razones expuestas en la primera conclusión, generalmente resultará muy inseguro emplear las combinaciones de carga estipuladas por las NSR-98.

4. Lo anterior debe considerarse para el diseño no sólo de las estructuras de acero, sino de estructuras con otros materiales, debiendo establecerse en cada caso hasta dónde aplica lo dicho aquí.

Debe destacarse que si se diseña siguiendo las provisiones del AISC sísmico 2002, parte de los críticos problemas planteados se obvia, pues en ellas se exige usar conexiones precalificadas que garantizan la transmisión de las máximas acciones que resultan de la plastificación de las vigas en los PRM, de los vínculos en los PAE, del segmento especial de los PCRM, etc.; así mismo, se exige revisar el com-

La conclusión no puede ser más preocupante: al seguir las NSR-98, estamos diseñando con solicitaciones bastante menores que las probables.

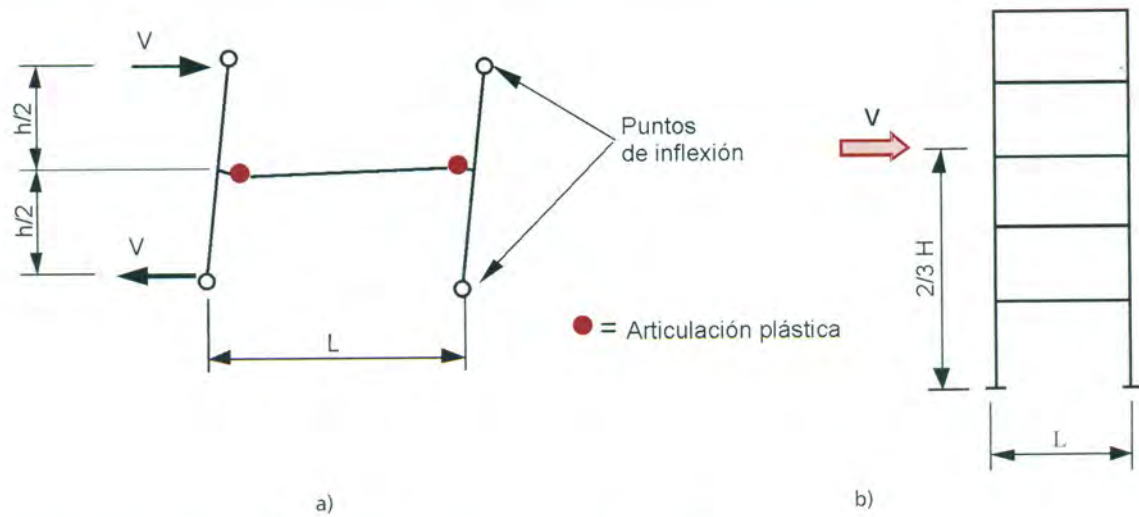


Figura 6. a) Mecanismo del piso inferior. b) Equilibrio general del pórtico.

portamiento de los miembros diferentes del que plastifica, con las acciones que libera el plastificado, incrementadas con los factores C_{pr} , R_y , u otros, según el caso. Infortunadamente, no se dice nada con respecto al diseño de los anclajes, las cimentaciones y los demás elementos estructurales y no estructurales ligados a la estructura.

En la última versión de las especificaciones de diseño de edificios de acero de AISC, ref. 2 (no las provisiones sísmicas que se han denominado en este artículo AISC sísmico 2002, ref. 1, sino las generales de diseño), en el capítulo A, sección A1, se plantea que si se analiza la estructura con $R \leq 3$, no es necesario cumplir los requerimientos de AISC sísmico 2002, y puede la estructura diseñarse cumpliendo solamente las provisiones dadas en esas especificaciones generales. Esto podría entenderse como que en cualquier estructura puede escogerse la metodología de diseño solamente eligiendo el

Se recomienda diseñar los edificios de acero empleando análisis inelásticos, o bien con procedimientos simplificados pero que obvian los inconvenientes planteados.

valor de R , esto es, diseñar con las especificaciones generales adoptando $R \leq 3$ o con las sísmicas si $R > 3$. Es de gran importancia entender el planteamiento de AISC. No se ofrece al diseñador la alternativa de escoger entre las metodologías citadas, sino que, en zonas de baja sismicidad, donde los códigos de construcción aplicables

permiten diseñar estructuras con baja capacidad de disipación de energía, puede usarse $R \leq 3$ sin necesidad de cumplir con las exigentes normas dictadas por AISC sísmico 2002, pero debe tenerse claro que si se requiere el uso de estructuras con alta capacidad de disipación, entonces sí deben cumplirse esas normas. Las NSR-98, por ejemplo, no aceptan el uso de PRM-O en zonas de alta sismicidad, obligando a diseñar PRM-E, y este tipo de PRM debe cumplir el título F3 (equivalente un tanto obsoleto de AISC sísmico 2002). Lo que sí es claro es que si la estructura estará ubicada en zona de

baja sismicidad, no tiene objeto utilizar un $R > 3$, pues, a pesar de que se puede trabajar con cortantes sísmicos menores en el momento de evaluar solicitaciones (que si la sismicidad es baja, es discutible si es algo que realmente revista alguna utilidad), ello obliga a detallar la estructura de acuerdo con AISC sísmico 2002, lo que puede traducirse en un mayor costo final de la estructura (ref. 4).

Finalmente, se ve con gran preocupación el hecho de que los resultados obtenidos para el pórtico de pocos pisos son menos críticos que los hallados para pórticos más altos, en los que el cumplir la condición de rigidez que establecen no sólo las NSR-98 (máxima deriva del 1%), sino buena parte de los códigos que se usan alrededor del mundo, obliga a emplear secciones de gran inercia, y por tanto de gran resistencia, hasta el punto de que se hace probable que este tipo de edificios llegue a presentar un comportamiento prácticamente elástico cuando es solicitado por el sismo de diseño, en cuyo caso *las solicitaciones pueden resultar varias veces mayores que las determinadas mediante análisis adelantados con las citadas combinaciones de carga*. Al respecto, el autor

ha estudiado varios casos tanto de PRM, como de PAE y PCRM, no sólo desde un punto de vista académico (véase la ref. 15), sino en edificios reales en cuyo diseño ha participado, y la conclusión a la que ha llegado es que en principio se está cometiendo un grave error al determinar las solicitaciones cuando se trabaja con un cortante basal dividido por R ($E = F_s/R$) con valores de código del R, sin que éstos sean comprobados durante la etapa de diseño. Por tal razón se recomienda diseñar los edificios de acero empleando análisis inelásticos, o bien con procedimientos simplificados pero que obvien los inconvenientes planteados. Algunos de estos procedimientos pueden ser:

1. Analizar la estructura con las combinaciones de carga de código. Podría usarse el R recomendado en el mismo para determinar las solicitaciones, pero sólo como una aproximación inicial. En todo caso, sin R para hallar las derivas. Comprobar que las derivas cumplen los requisitos de código.

2. Si no cumple cambiar los perfiles de los miembros por unos de mayor inercia, volver al paso 1.

3. Diseñar con las especificaciones de AISC sísmico 2002, entre otras: comprobar jerarquía, diseñar conexiones precalificadas o calificarlas, para ciertas revisiones usar las combinaciones de carga que incluyen el factor de sobrerresistencia, Ω_p , y en general, diseñar los miembros diferentes del que plastifica con las acciones que libera éste, incrementadas con los factores C_{pr} y R_y . Tales acciones se pueden determinar mediante análisis basados en la formación del mecanismo plástico (véanse, por ejemplo, las refs. 6, 7 o 15), análisis de plastificación progresiva (*pushover*), o análisis no lineal cronológico. Cabe anotar que si se utiliza un análisis de formación de mecanismo, se hallarán las máximas solicitaciones que en cualquier situación pueden presentarse en la estructura, independientemente de la magnitud del sismo que ocurra, mientras que si se usa un análisis de plastificación progresiva o un análisis no lineal cronológico, las solicitaciones empleadas en el diseño serán, muy probablemente, las inducidas por las demandas generadas por el sismo de diseño.

4. Evaluar las acciones en las cimentaciones y en otros elementos (anclajes, pantallas, ciertos miembros no estructurales, etc.), resolviendo la estructura para la fuerza cortante necesaria para producir el mecanismo de

plastificación (el mismo principio de liberación nombrado en el paso 3).

Para mayores detalles, se recomienda la ref. 15.

REFERENCIAS

1. American Institute of Steel Construction, Inc. (2002). *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*, Chicago, Il., May 21.
2. _____ (2005). *Specification for Structural Steel Buildings*. Chicago, Il., March 9.
3. AIS (1998). *Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente*, NSR-98. Bogotá.
4. Carter, C.J. (2005). Seismic Design: $R = 3$ or $R > 3$, *Revista MSC de AISC*. Chicago, Il., May.
5. Chia-Ming, U. (1991). Establishing R (or R_w) and C_d Factors for Building Seismic Provisions. *Journal of Structural Engineering*, vol. 117, N° 1, Asce, enero, pp. 19-27.
6. Englekirk, R. (1994). *Steel Structures, Controlling Behavior through Design*. N.Y.: J. Wiley & Sons.
7. Engelhardt, M. & Popov, E. (1989). On Design of Eccentrically Braced Frames, *Earthquake Spectra*, vol. 5, N° 3.
8. Fema 350 (2000). *Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings*. Washington, D.C.: Federal Emergency Management Agency (Fema), report 350.
9. Fema 368 (2001). *NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations, Part 1 - Provisions*, Federal Emergency Management Agency (Fema), report 368, Washington, D.C.
10. Fema 450 (2003). *NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and other Structures*. Washington, D.C.: Fema.
11. Gioncu, V. & Mazzolani, F. (2002). *Ductility of Seismic Resistant Steel Structures*. Londres, U.K.: Spon Press.
12. Newmark, N. & Hall, W. (1973). *Seismic Design Criteria for Nuclear Reactor Facilities*, Building Practices for Disaster Mitigation, National Bureau of Standards, U.S. Washington: Department of Commerce, Report N° 46.
13. Pauley, T. & Priestley, M. (1992). *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Structures*. Londres, U.K.: John Wiley and Sons.
14. Tremblay, R. (2003). Achieving a Stable Inelastic Seismic Response for Multi-Story Concentrically Braced Steel Frames. *Engineering Journal*, 2Q, Chicago, Il., AISC, pp. 111-127.
15. Valencia, G. (2005). *Memorias del curso Diseño sismorresistente de edificios de acero*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
16. Watanabe, G. & Kawashima, K. (2002). *Force Reduction Factors for Seismic Design of Bridges*, Proceedings of fourth Seismic Forum on Implications of Recent Earthquakes. Tokio: Institute of Technology

Se ve con gran preocupación el hecho de que los resultados obtenidos para el pórtico de pocos pisos son menos críticos que los hallados para pórticos más altos, en los que el cumplir la condición de rigidez que establecen no sólo las NSR-98 (máxima deriva del 1%), sino buena parte de los códigos que se usan alrededor del mundo.

Metodología del gradiente para la solución de redes de tuberías a presión

Óscar Eduardo Hernández Murcia

En este artículo se estudia en detalle el método del gradiente para la solución de redes de tuberías a presión, mostrando de una manera clara las ecuaciones que determinan las presiones y los caudales de un sistema de tuberías. Además, se presenta un algoritmo de cálculo que sirve de guía en el momento de aplicar el método a un caso práctico.

INTRODUCCIÓN

El análisis de redes de tuberías es un problema común en el diseño de sistemas de agua potable. La solución de dichas redes de abastecimiento de agua potable implica encontrar los caudales y las presiones al solucionar un sistema de ecuaciones, las cuales se pueden plantear de tres formas: para los nodos, para las mallas o para las tuberías (figura 1).

De acuerdo con esta clasificación se plantean diferentes métodos de aproximaciones sucesivas para la solución de las redes. Entre los más conocidos para la solución de este tipo de problemas están el método de Newton Raphson, el cual utiliza las ecuaciones de los nodos; esto quiere decir que las iteraciones se llevan a cabo sobre cada nodo con presión desconocida. El método de Hardy Cross, que utiliza las ecuaciones de las mallas,

donde el proceso de aproximación se realiza sobre los circuitos de la red, balanceando caudales o alturas de presión, utilizando la ecuación de pérdidas en cada circuito. Por último está el método del gradiente, que utiliza las ecuaciones de las tuberías, efectuando un proceso iterativo sobre las conducciones con caudal desconocido en la red.

Este último método es el que se presenta en detalle a continuación, ya que desde el punto de vista numérico tiene muchas ventajas en cuanto al tiempo de ejecución, por lo que es el más utilizado en la solución de redes a presión en los modelos comerciales o de dominio público. Con el fin de facilitar el uso del método, se presentan en detalle la teoría de éste y un algoritmo de cálculo como herramienta, que sin duda alguna pueden ser de mucha utilidad.

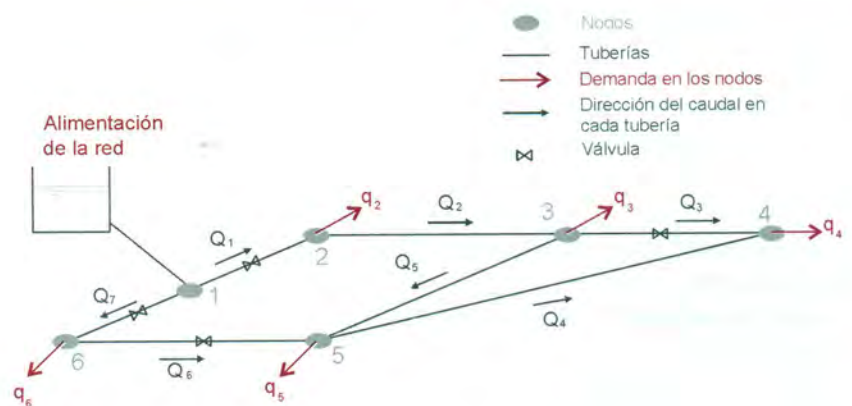


Figura 1. Red típica de abastecimiento de agua potable.

Ingeniero civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería. Especialista en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente, profesor del Laboratorio de Hidráulica, hidráulica I y mecánica de fluidos. Actualmente está vinculado a la institución como docente y en diferentes proyectos de investigación.

El método del gradiente lo presentaron inicialmente Todini y Pilati [1] en 1987, y demostró ser eficiente en extremo. Según Salgado, Todini y O'Connell[1] (1987) se analizaron cuatro casos: el primero con 66 tuberías y 41 nodos, el segundo igual al anterior pero adicionando seis bombas en el sistema, el tercer caso es la misma red del primer cálculo pero con demandas mayores y el cuarto comprende la misma red del primer cálculo pero con dos válvulas cerrando el paso en dos tuberías. Para todos los casos, el método del gradiente consume menos tiempo e iteraciones que cualquier otro (para más detalles de las redes tratadas, ver referencia [1] en la bibliografía).

PLANTEAMIENTO TEÓRICO

En este método se utilizan las ecuaciones de las tuberías para obtener una solución por medio de aproximaciones sucesivas. Aunque usa las ecuaciones de pérdidas en cada tubería, implícitamente se calcula la conservación de la masa en los nodos.

La ecuación que permite calcular las pérdidas en cada tramo de tubería es la siguiente:

$$H_{PTi} = \beta_{f_i} Q_i^{n_f} + \beta_{k_i} Q_i^{n_k} - h_b \quad (1)$$

Donde:

- H_{PTi} = pérdidas totales en la tubería i .
- Q_i = caudal circulante por la tubería i .
- n_f = coeficiente de pérdidas por fricción, igual a 2 al usar la ecuación de Darcy.
- β_{f_i} = coeficiente de pérdidas en la tubería i por fricción
- n_k = exponente del caudal para las pérdidas localizadas, expresadas como una fracción (k) de la energía cinética en la tubería i .
- h_b = altura dinámica total suministrada por una bomba en la tubería i .

El coeficiente β_{f_i} de pérdidas en la tubería i por fricción se puede expresar en la siguiente forma al utilizar la ecuación de Darcy:

$$\beta_{f_i} = \frac{8 f l_i}{g \pi^2 d_i^5} \quad (2)$$

Donde:

- l_i = longitud de la tubería i .
- d_i = diámetro de la tubería i .
- g = aceleración de la gravedad.
- f = coeficiente de fricción calculado según el tipo de flujo, clasificado según el número de Reynolds (Re). Para $Re < 2000$ se utiliza la fórmula de Hazen-Poiseuille

$$f = \frac{64}{Re} \quad (3), \text{ para } Re > 4000 \text{ se utiliza la ecuación de}$$

$$\text{Colebrook-White } \frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \text{Log}_{10} \left\{ \frac{e}{3,71d} + \frac{2,51}{Re\sqrt{f}} \right\}$$

(4) y por último en la zona comprendida entre estos dos valores se presenta una inestabilidad en el cálculo de la fricción, por lo que se recurre a una interpolación cúbica (Dunlop, 1991[2]):

$$f = X_1 + R(X_2 + R[X_3 + X_4]) \quad (5)$$

$$R = \frac{Re}{2000}; X_1 = 7F_A - F_B; X_2 = 0,128 - 17F_A + 2,5F_B;$$

$$X_3 = -0,128 + 13F_A + 2,5F_B$$

$$X_4 = R(0,032 - 3F_A + 0,5F_B);$$

$$F_A = Y_3^{-2}; F_B = F_A \left(2 - \frac{0,00514215}{Y_3 Y} \right); Y_2 = \frac{e}{3,7d} + \frac{5,74}{Re^{0,9}}$$

$$Y_3 = -0,86859 \text{Ln} \left(\frac{e}{3,7d} + \frac{5,74}{4000^{0,9}} \right).$$

El coeficiente β_{k_i} de pérdidas localizadas para la tubería i se puede expresar como una fracción de la energía cinética así:

$$\beta_{k_i} = \frac{8k}{g \pi^2 d_i^4} \quad (6)$$

Donde:

- k = coeficiente de pérdidas localizadas, adimensional.
- d_i = diámetro de la tubería i .

Si existen bombas, éstas se pueden tratar de dos formas: cuando está conectada a un tanque y tiene una tubería de descarga se plantea una ecuación desde el nivel en el tanque (H_t) hasta un punto a la salida de la bomba (i_s), y cuando hay tubería de succión y de descarga se deberá plantear la ecuación entre un punto a la entrada (i_e) y a la salida (i_s) de la bomba.

En cualquiera de los casos se puede considerar la siguiente ecuación:

$$-h_b + H_{i_s} = H_{i_e} \quad (7)$$

Donde:

- H_{i_s} = altura de presión a la salida de la bomba.
- H_{i_e} = altura de presión a la entrada de la bomba.
- h_b = altura suministrada por la bomba. Frecuentemente, la estimación de esta altura se puede realizar utilizando una de las siguientes expresiones:

$$\text{Dadas la eficiencia } (\eta) \text{ y la potencia } (P): h_b = \frac{\eta P}{\gamma Q_i} \quad (8),$$

dados varios puntos de la curva de la bomba, caudal

(Q) y altura suministrada (H_b), se pueden utilizar las siguientes expresiones: $h_b = \sum_{i=1}^n A_i Q^{n-i}$ para $n > 3$ puntos dados (9a) y ajustando una ecuación potencial $h_b = h_c - AQ^B$ (9b).

La ecuación de *continuidad* para los nodos de la red será:

$$\sum_{i=1}^m Q_i - q_i + q_e = 0 \tag{10}$$

Donde el primer término corresponde a los caudales de las tuberías conectadas al nodo i , el segundo es el caudal demandado (q_i), y por último un caudal externo (q_e) (figura 2).

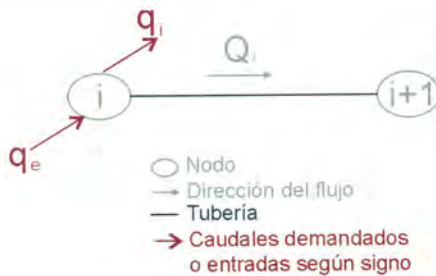


Figura 2. Nomenclatura para la ecuación de continuidad.

Antes de explicar la forma matricial del método, es importante definir los siguientes parámetros:

- (**ne**) número de estanques en el sistema.
- (**nb**) número de bombas en el sistema.
- (**nn**) representa el número de nodos en el sistema con presiones desconocidas.
- (**nt**) representa el número total de tuberías en la red con caudales desconocidos.
- (**nv**) representa el número total de válvulas en la red.
- (**ns**) número que representa la suma de tuberías más válvulas y bombas con caudal desconocido del sistema por analizar.

Con la nomenclatura explicada anteriormente y las ecuaciones planteadas, se puede definir una expresión matricial para la *conservación de la energía* en la red, así:

$$[A_{11}]_{ns \times ns} [Q]_{ns \times 1} + [A_{12}]_{ns \times nn} [H]_{nn \times 1} = -[A_{10}]_{ns \times ne} [H_0]_{ne \times 1} \tag{11}$$

En la cual se identifican tres términos: el primero define las pérdidas en cada tubería, incluyendo las adiciones de energía (bombas); el segundo término corresponde a las

alturas desconocidas de presión en los nodos, y el tercer término representa la conectividad a nodos con presión conocida.

Cada matriz representa lo siguiente:

$[A_{11}]_{ns \times ns}$ es una matriz simétrica, diagonal, de dimensiones ($ns \times ns$), compuesta por la relación entre las pérdidas totales de la tubería i y el valor absoluto del caudal circulante por dicha tubería, definida como sigue, según la ecuación (1):

$$[A_{11}]_{ns \times ns} = \begin{bmatrix} \frac{H_{PT_1}}{|Q_1|} & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \frac{H_{PT_2}}{|Q_2|} & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \frac{H_{PT_3}}{|Q_3|} & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \frac{H_{PT_n}}{|Q_n|} \end{bmatrix} \tag{12}$$

Es importante tener en cuenta que si se ubica una válvula o una bomba en el sistema, se debe agregar un número de filas y columnas igual a la cantidad de elementos presentes en la red en estudio, con el fin de calcular las presiones antes y después de la válvula o la bomba. De este modo, las dimensiones reales de la matriz serán $ns = nt + nb + nv$.

$[Q]_{ns \times 1}$ es una matriz de dimensiones ($ns \times 1$), correspondiente a los caudales de las tuberías con flujo desconocido y se define así:

$$[Q]_{ns \times 1} = \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \\ \vdots \\ Q_{ns} \end{bmatrix} \tag{13}$$

$[A_{12}]_{ns \times nn}$ es una matriz de dimensiones ($ns \times nn$), y representa la manera como se encuentran conectadas las tuberías y los nodos del sistema en análisis; es como el mapa en forma matricial. Cada fila posee sólo dos columnas con valores diferentes de cero y se define teniendo en cuenta la siguiente nomenclatura: para el nodo inicial de la tubería, bomba o válvula se asigna un valor de -1 y para el nodo final de la tubería, bomba o válvula un valor de 1 .

Es importante recalcar que cuando existe una conexión a un nodo con altura de presión constante, la fila correspondiente sólo tendrá un valor en una de sus columnas y éste deberá corresponder a 1, puesto que se presume que este nodo alimenta la red.

$[H]_{nn \times 1}$ = es una matriz de dimensiones $(nn \times 1)$, que representa las presiones en los nodos con altura desconocida y se expresa así:

$$[H]_{nn \times 1} = \begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ H_3 \\ \vdots \\ H_{nn} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$[A_{10}]_{ns \times ne}$ = es una matriz que representa la conexión a tanques o puntos con altura conocida de dimensiones $(ns \times ne)$. En cada fila se pueden tener dos valores: un valor de -1 cuando se encuentra conectado a un nodo con altura conocida y un valor de 0 cuando no hay conexión.

$[H_0]_{ne \times 1}$ = es una matriz con los datos de las alturas constantes de los nodos y de dimensiones $(ne \times 1)$.

Ahora se plantea la ecuación correspondiente a la conservación de la masa en los nodos:

$$[A_{21}]_{nn \times ns} [Q]_{ns \times 1} = [q]_{nn \times 1} \quad (15)$$

Donde:

$[A_{21}]_{nn \times ns}$ = matriz transpuesta de $[A_{12}]_{ns \times nn}^T$, con dimensiones $(nn \times ns)$.

$[Q]_{ns \times 1}$ = vector de caudales desconocidos con dimensiones $(ns \times 1)$, según expresión (13).

El sistema de ecuaciones representadas por (11) y (15) se puede expresar en una forma más compacta así:

$$\begin{bmatrix} [A_{11}]_{ns \times ns} & [A_{12}]_{ns \times nn} \\ [A_{21}]_{nn \times ns} & [0] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [Q]_{ns \times 1} \\ [H]_{nn \times 1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -[A_{10}]_{ns \times ne} [H_0]_{ne \times 1} \\ [q]_{nn \times 1} \end{bmatrix} \quad (16)$$

Para resolver el anterior sistema de ecuaciones se utiliza el método del gradiente, en el cual se debe derivar la expresión anterior, con lo que se obtiene:

$$\begin{bmatrix} [dA_{11}]_{ns \times ns} & [A_{12}]_{ns \times nn} \\ [A_{21}]_{nn \times ns} & [0] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [dQ]_{ns \times 1} \\ [dH]_{nn \times 1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [dE]_{ns \times 1} \\ [dq]_{nn \times 1} \end{bmatrix} \quad (17)$$

Donde:

$[dE]_{ns \times 1}$ = representa para dos iteraciones sucesivas el desbalance de energía expresado en altura para cada tubería.

$[dq]_{nn \times 1}$ = representa para dos iteraciones sucesivas el desbalance de caudal en cada nodo del sistema de tuberías.

$[dA_{11}]_{ns \times ns}$ = matriz diagonal simétrica con dimensiones $(ns \times ns)$ que representa la derivada de las pérdidas en cada tubería o bomba, según sea el caso.

Para el caso en el cual existen sólo tuberías, la matriz será:

$$[dA_{11}]_{ns \times ns} = \begin{bmatrix} \frac{\partial H_{PT_1}}{\partial |Q_1|} & 0 & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ 0 & \frac{\partial H_{PT_2}}{\partial |Q_2|} & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \frac{\partial H_{PT_i}}{\partial |Q_i|} & \cdots & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & \frac{\partial H_{PT_m}}{\partial |Q_m|} \end{bmatrix} \quad (18)$$

En general, los términos de la diagonal según la ecuación (1) quedarán así:

$$\frac{\partial H_{PT_i}}{\partial Q_i} = n_f \beta_{f_i} Q_i^{n_f-1} + n_k \beta_{k_i} H Q_i^{n_k-1} - \frac{\partial h_{bi}}{\partial Q_i} \quad (19)$$

Cuando hay bombas en el sistema, dependiendo del tipo de ecuación utilizada, los términos en la matriz serían:

$$\frac{\partial h_b}{\partial Q_i} = - \frac{\eta P}{\gamma Q_i^2} \quad (20)$$

$$\text{o } \frac{\partial h_b}{\partial Q_i} = \sum_{i=1}^n (n-i) A_i Q_i^{n-i-1} \quad (21)$$

$$\text{o } \frac{\partial h_b}{\partial Q_i} = -A(B) Q_i^{B-1} \quad (21a)$$

De acuerdo con la ecuación (17), se pueden expresar los desbalances entre dos iteraciones sucesivas en la siguiente forma:

$$[dE]_{ns \times 1} = [A_{11}]_{ns \times ns} [Q_i]_{ns \times 1} + [A_{12}]_{ns \times nn} [H_{oi}]_{ne \times 1} \quad (22)$$

$$[dq]_{nn \times 1} = [A_{21}]_{nn \times ns} [Q_i]_{ns \times 1} + [q]_{nn \times 1} \quad (23)$$

Las dos expresiones anteriores se obtuvieron al multiplicar los términos del sistema de la ecuación (17).

Retomando la ecuación (17), la solución del sistema será:

$$\begin{bmatrix} [dQ]_{ns \times 1} \\ [dH]_{nn \times 1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [dA_{11}]_{ns \times ns} & [A_{12}]_{ns \times nn} \\ [A_{21}]_{nn \times ns} & [0] \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} [dE]_{ns \times 1} \\ [dq]_{nn \times 1} \end{bmatrix} \quad (24)$$

En la ecuación anterior se debe tener en cuenta que para dos iteraciones consecutivas los desbalances se expresan como:

$$[dQ] = [Q_{i+1}]_{ns \times 1} - [Q_i]_{ns \times 1} \quad (25)$$

$$[dH] = [H_{i+1}]_{ns \times 1} - [H_i]_{ns \times 1} \quad (26)$$

Al calcular la inversa de la matriz indicada en la ecuación (24), se obtienen las siguientes expresiones para el caudal y la altura de presión en los nodos:

$$[Q_{i+1}]_{ns \times 1} = \left\{ \begin{array}{l} [I]_{ns \times ns} \\ -[dA_{11}]_{ns \times ns}^{-1} [A_{11}]_{ns \times ns} \end{array} \right\} [Q_i]_{ns \times 1} \quad (27)$$

$$- \left\{ \begin{array}{l} [A_{11}]_{ns \times ns}^{-1} \left([A_{12}]_{ns \times nn} [H_{i+1}]_{nn \times 1}^{-1} \right. \\ \left. + [A_{10}]_{ns \times ne} [H_0]_{ne \times 1} \right) \end{array} \right\}$$

$$[H_{i+1}] = - \left\{ \begin{array}{l} [A_{21}]_{nn \times ns} \\ [dA_{11}]_{ns \times ns}^{-1} [A_{12}]_{ns \times nn} \end{array} \right\}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} [A_{21}]_{nn \times ns} [dA_{11}]_{ns \times ns}^{-1} \left([A_{11}]_{ns \times ns} [Q_i]_{ns \times 1} \right. \\ \left. + [A_{10}]_{ns \times ne} [H_0]_{ne \times 1} \right) \\ - \left([A_{21}]_{nn \times ns} [Q_i]_{ns \times 1} - [q]_{nn \times 1} \right) \end{array} \right\} \quad (28)$$

Con base en la anterior solución a los sistemas de ecuaciones establecidos para una red a presión, se presenta a continuación un diagrama de flujo práctico para el cálculo del método, teniendo en cuenta el orden en el cual se deben realizar las operaciones entre matrices con el fin de obtener las presiones en los nodos y los caudales que circulan por el sistema en estudio.

La nomenclatura utilizada en el diagrama de flujo es la siguiente:

ni, indica el nodo inicial de un elemento (tubería, bomba o válvula).

nf es el nodo final del elemento.

l es la longitud de una tubería.

d es el diámetro de una tubería o válvula.

e es la rugosidad absoluta de una tubería.

k es el coeficiente de pérdidas menores en una tubería o válvula.

Las matrices resultantes durante el proceso de cálculo se definen como *MP_i*, término que indica la matriz resultante del paso *i*.

EJEMPLOS DE APLICACIÓN

Los ejemplos planteados a continuación se realizaron en Excel 2000, utilizando las herramientas disponibles (funciones y macros), con el fin de agilizar los cálculos. Los resultados obtenidos en las hojas de cálculo de Excel se comprobaron por medio de un programa de calculadora (Texas, Voyage 200).

Ejemplo 1

Se tiene un sistema de tuberías abierto (figura 3), con las siguientes características:

Tubería	Longitud l (m)	Diámetro d (pulg)	e (m)	K
1	100	24	0,0000015	10
2	100	24	0,0000015	10
3	100	12	0,0000015	10
4	100	12	0,0000015	10

La válvula del sistema posee un coeficiente de pérdidas menores de $k_v = 50$, $g = 9,806 \text{ m/seg}^2$ y $v = 1,14 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{seg}$. Los caudales demandados en los nodos 5 y 6 son de 150 lps y 200 lps, respectivamente (lps: litros por segundo). El nivel en el tanque de alimentación es de 100 metros columna de agua.

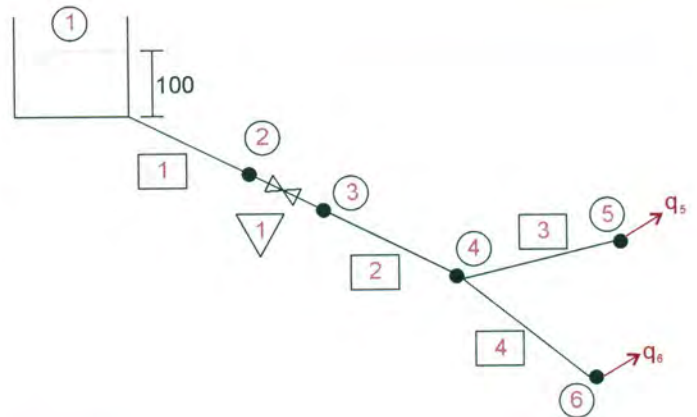
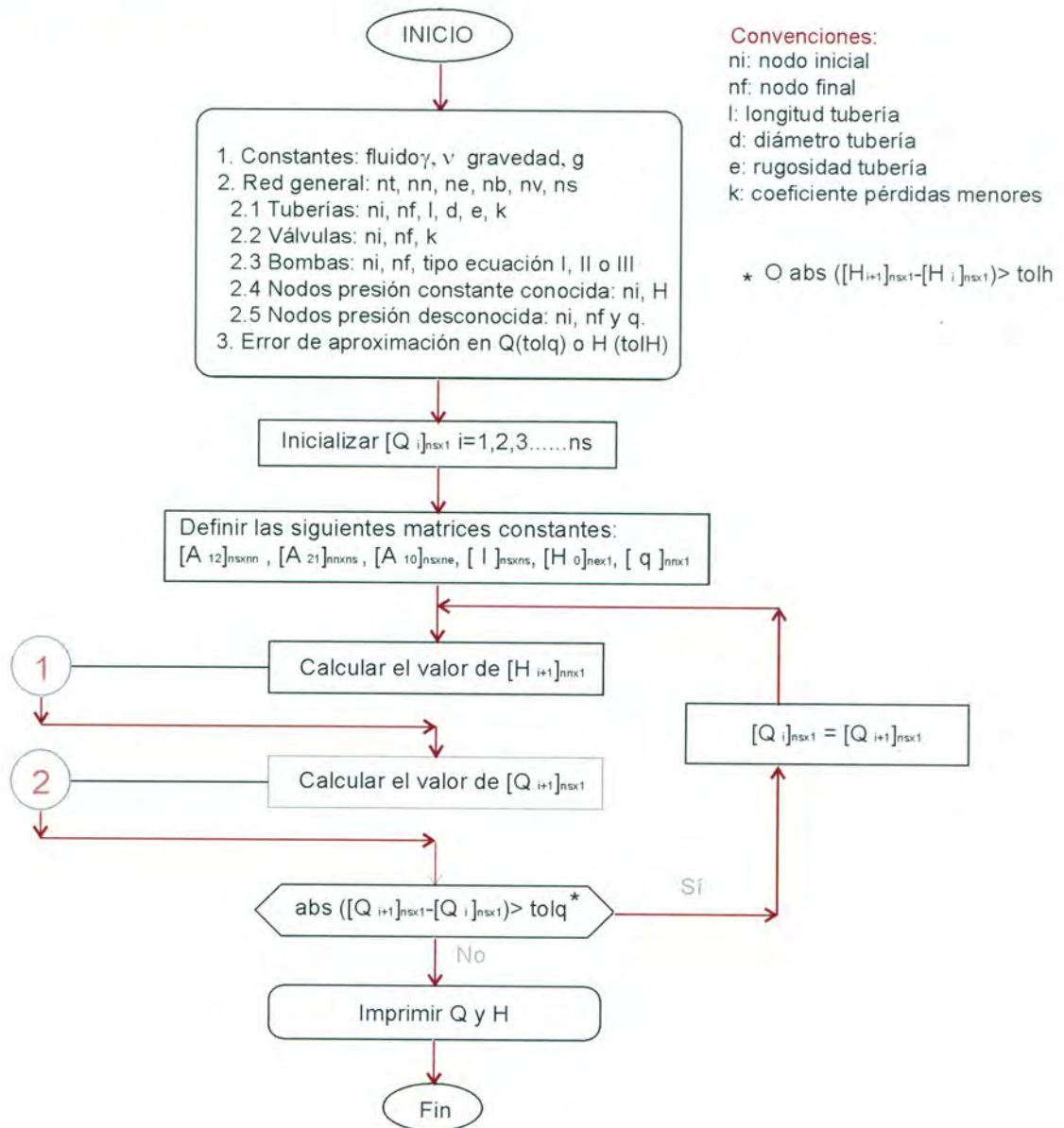


Figura 3.

Utilizando el diagrama de flujo propuesto, se obtuvieron los siguientes caudales y alturas de presión en los nodos después de la segunda iteración:

ALGORITMO DE CÁLCULO



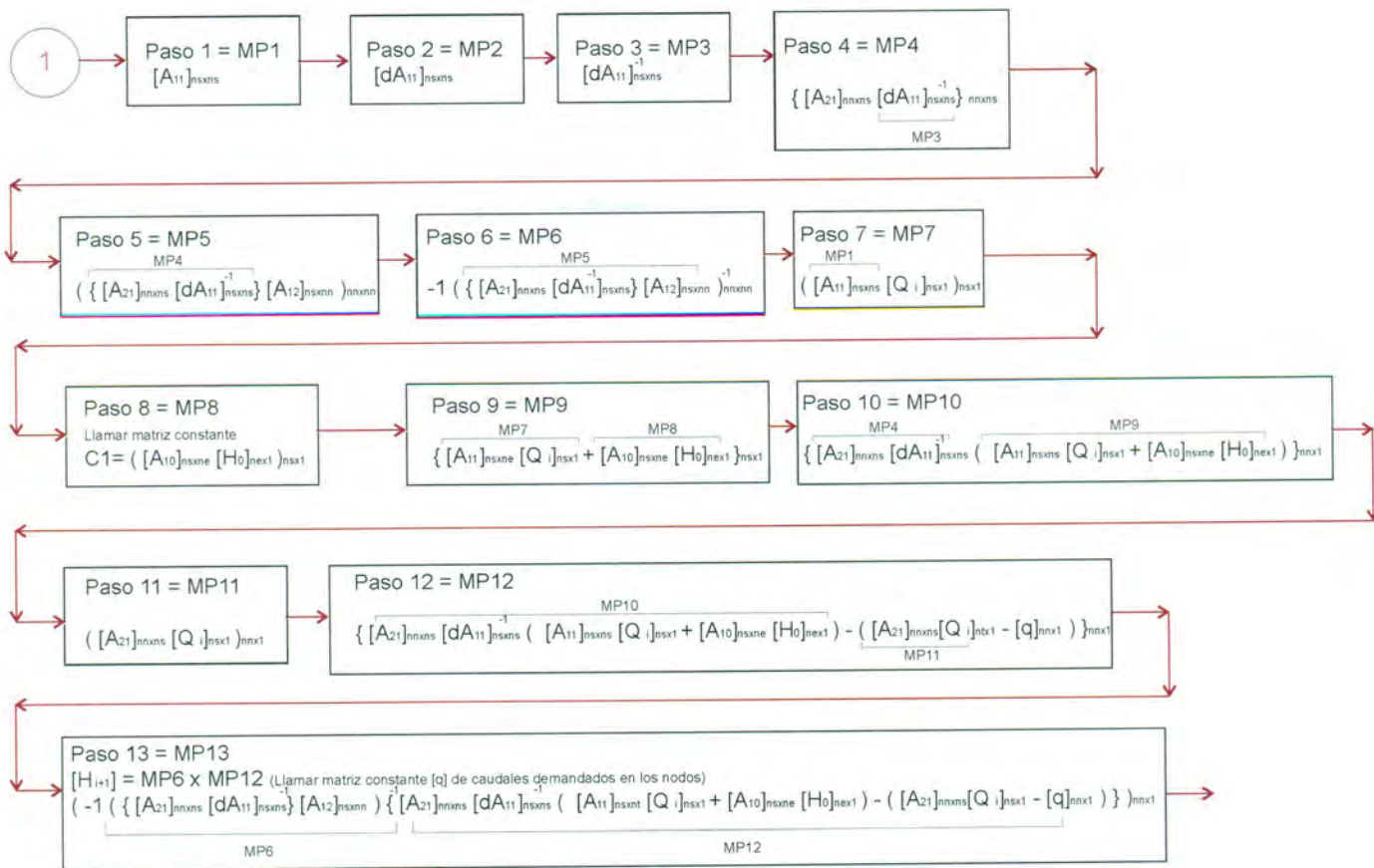
Tubería	1	2	3	4	
Q(Lps)	350	350	250	150	
Nodo	2	3	4	5	6
H(m)	91,1149	95,4486	94,5635	91,4888	89,1764

La solución por medio del programa de calculadora arroja los mismos resultados en dos iteraciones y el tiempo in-

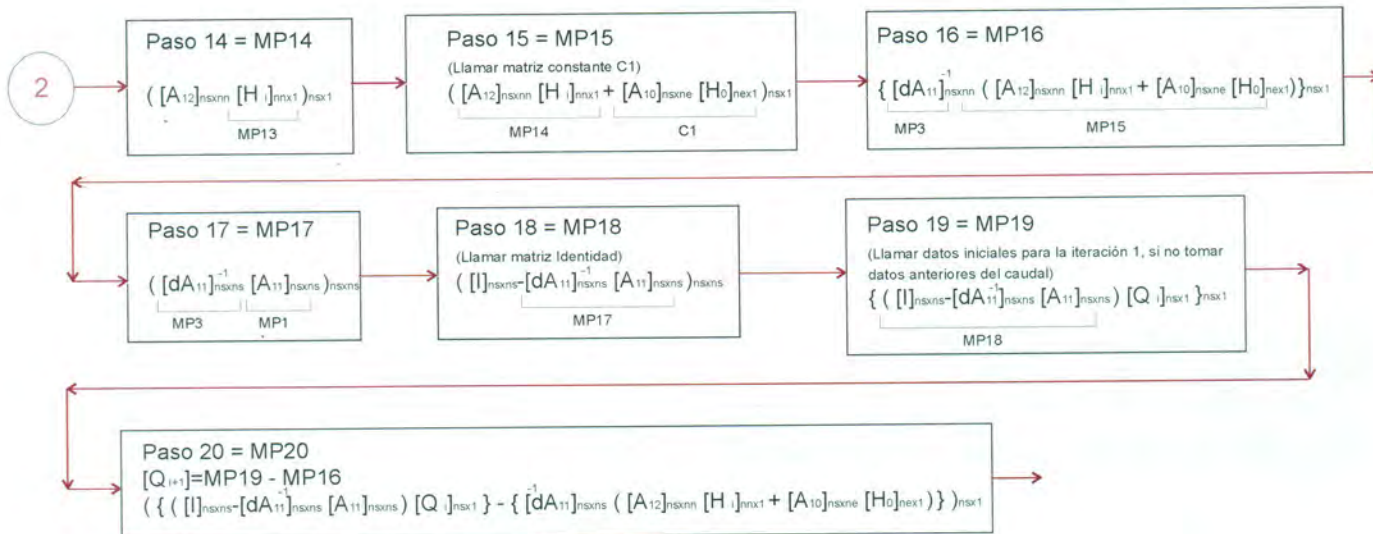
vertido para encontrar la solución fue de 1 minuto 26 segundos. En cada iteración se invierten 30 segundos y 26 segundos al armar las matrices $[A_{12}]_{ns \times nn}$, $[A_{10}]_{ns \times ne}$ y $[H_0]_{nex1}$.

Ejemplo 2

Se tiene el mismo sistema del ejemplo anterior, pero se cambia la configuración para que éste sea un sistema de tuberías cerrado (figura 4). La tubería adicional posee las siguientes características:



Convención
 MPI: Matriz resultante del Paso i



Tubería	Longitud l (m)	Diámetro d (pulg)	e (m)	K
5	100	12	0,0000015	10

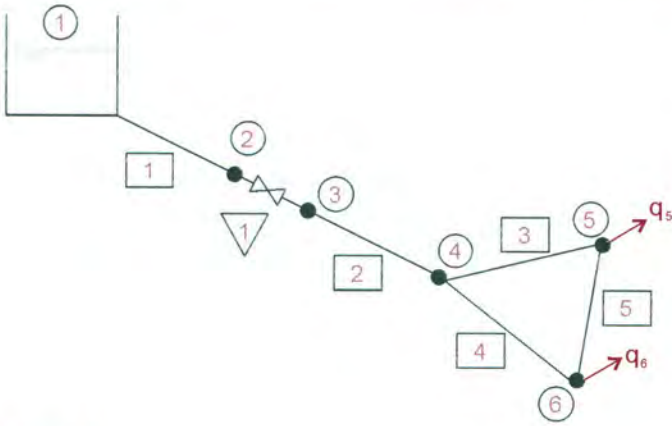


Figura 4.

Los resultados después de tres iteraciones son los siguientes:

Tubería	1	2	3	4	5
Q(lps)	350	350	174,039	175,961	24,039
Nodo	2	3	4	5	6
H(m)	99,1149	95,4486	94,5635	90,4558	90,3669

Al utilizar el método de Hardy - Cross con corrección de caudales se obtuvo la solución en cinco iteraciones con la misma precisión dada por el método del gradiente. La solución en la calculadora se obtiene en tres minutos y cada iteración se realiza en 33 segundos. Al utilizar el método de Hardy - Cross con corrección de caudales se encontró la solución en 3 minutos y 40 segundos, después de siete iteraciones. Para cada iteración se emplean 36 segundos aproximadamente, sin tener en cuenta el tiempo que se invierte en calcular las presiones en los nodos.

Aunque la diferencia en cuanto al número de iteraciones es mínima, en este último ejemplo con respecto al método de Hardy - Cross, con corrección de caudales, para redes complejas la diferencia es significativa en cuanto a tiempo invertido y operaciones para encontrar una solución.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

• El método resulta ideal para la solución de sistemas a presión abiertos y cerrados con alta complejidad, ya que los métodos matriciales son fácilmente programables y el número de operaciones se puede reducir de modo consi-

derable si se ensamblan en forma adecuada las matrices, puesto que sus inversas reducen significativamente el proceso iterativo.

• Una ventaja del método con respecto a los tradicionales es que, en los nodos, para iniciar el proceso iterativo no es necesario cumplir con la ecuación de la conservación de la masa al empezar el proceso iterativo y además estos valores no influyen significativamente en el número de iteraciones.

• Aunque el proceso iterativo no necesita un balance previo es conveniente iniciar los cálculos con valores razonables, consecuentes con las demandas en los nodos de la red en estudio.

• Los resultados obtenidos para un sistema en particular corresponden a los caudales circulantes por cada elemento de la red y las presiones en los nodos. Se evitan así cálculos posteriores para determinar presiones. Como por ejemplo el método de Hardy - Cross, definidos los caudales, es necesario calcular al final del proceso iterativo las presiones en los nodos.

• El algoritmo de cálculo es una guía valiosa en el momento de programar el método del gradiente, en cuanto al orden que se debe llevar en el proceso de cálculo para un problema en particular.

• En algunos casos, aunque el número de iteraciones es muy similar a otro método, con el método del gradiente se reduce el tiempo de ejecución considerablemente, ya que un método matricial exige un menor número de operaciones para la misma iteración.

• Este método es ilimitado en cuanto a la topología de un sistema, a diferencia de otros en los que algunas veces, por la complejidad de la red, resulta imposible su modelación.

• Es recomendable utilizar el método del gradiente cuando el sistema de tuberías es demasiado complejo en cuanto al número de elementos, ya que siempre se puede modelar y se obtiene la solución en menos tiempo y con menos operaciones.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Larry W., Mays, *Hydraulic Design Handbook*, Editorial McGraw-Hill.
- [2] Rossman, Lewis A. (2000). *Epanet 2 Users Manual*, Water Supply and Water Resources Division, Nation Risk Management Research Laboratory, EPA, septiembre.
- [3] Sotelo Ávila, Gilberto. *Hidráulica general*, vol. 1, Editorial Limusa.
- [4] Streeter, Víctor L. *Mecánica de fluidos*, 9ª ed., Editorial McGraw-Hill.
- [5] Shames, Irving H. *Mecánica de fluidos*, 3ª ed., Editorial McGraw-Hill.
- [6] Saldarriaga V., Juan G. *Hidráulica de tuberías*, Editorial McGraw-Hill.
- [7] Chapra C., Steven & Canale, Raymond P., *Métodos numéricos para ingenieros*, 3ª ed., Editorial McGraw-Hill.
- [8] Streeter, Víctor L. *Mecánica de fluidos*, 8ª ed., Editorial McGraw-Hill.

Técnicas utilizadas en la producción y caracterización de puzolanas

Janneth Torres Agredo* y R. Mejía de Gutiérrez**

Para la utilización de puzolanas en mezclas cementicias, morteros y concretos, es requisito indispensable, además de evaluar sus características físicas y químicas, valorar su desempeño, es decir, el efecto de su adición en las propiedades finales, resistencias mecánicas y durabilidad. En el caso de puzolanas obtenidas a partir de procesos de transformación de otros materiales, es importante también el reconocimiento de los materiales de partida y de las variables del proceso, factores estos que pueden afectar la calidad. En el presente trabajo se discuten diferentes técnicas que pueden aplicarse para valorar materiales puzolánicos. Entre éstas se analizan las siguientes: Difracción de Rayos X (DRX), Análisis Termogravimétrico (TG) y Espectroscopia de Infrarrojo (FTIR). De la misma manera, se indica cómo algunas de estas mismas técnicas pueden aplicarse para seguir los procesos de hidratación y valorar el desempeño final de las mezclas de cemento, con el propósito de conceptualizar sobre la calidad de los productos finales.

Palabras claves: puzolanas, caracterización, técnicas de ensayo, difracción de rayos X, análisis termogravimétrico, infrarrojo, cementos, procesos de hidratación, metacaolín.

INTRODUCCIÓN

Las adiciones cementicias se refieren a materiales inorgánicos, naturales o artificiales, que incorporados adecuadamente en cantidad y calidad en el cemento y puestos en obra en forma de morteros y concretos, pueden contribuir de manera positiva al mejoramiento de una o varias de sus propiedades, tales como físicas, químicas, mecánicas o de costo [1]. Dentro del grupo de las adiciones cementicias encontramos a las puzolanas, las cuales son, por definición, materiales silíceos o silicoaluminosos que por sí mismos poseen poco o ningún valor cementicio pero finamente molidos y en presencia de humedad reaccionan químicamente con el hidróxido cálcico a temperatura ordinaria y dan lugar a compuestos de propiedades cementantes.

Una característica importante por determinar es la actividad puzolánica, es decir, la capacidad de reacción, para lo cual se utilizan técnicas físicas (medida de conductividad eléctrica), químicas (ensayo de Frattini o ensayo de Chappelle) o mecánicas (resistencias mecánicas con cemento o cal) [1]. De manera paralela se determinan otras propiedades directamente relacionadas con esta actividad, tales como la composición química, el carácter amorfo

o cristalino, el tamaño de partícula, la microestructura o, en el caso de puzolanas artificiales, las variables inherentes al proceso. Además de estos requerimientos, también se debe evaluar el desempeño cuando se adicionan estos materiales suplementarios a materiales cementicios; en este caso, el seguimiento de los procesos de hidratación es clave en cuanto determina las propiedades finales (mecánicas y de durabilidad) del material agregado.

En el presente artículo se describen algunas técnicas instrumentales que pueden aplicarse tanto a procesos de caracterización y producción de las puzolanas, como en la evaluación de su desempeño en mezclas cementicias.

En el presente artículo se describen algunas técnicas instrumentales que pueden aplicarse tanto a procesos de caracterización y producción de las puzolanas, como en la evaluación de su desempeño en mezclas cementicias. El trabajo se centrará en una puzolana

aluminica denominada metacaolín, que se obtiene a través del proceso térmico controlado de una arcilla caolinítica (filosilicato de fórmula $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$).

TÉCNICAS DE ENSAYO

Difracción de Rayos X (DRX)

Los rayos X pueden usarse de diversas formas en el análisis químico. Una de éstas se basa en que los rayos X emitidos por un elemento excitado tienen una longitud de onda característica de

* Doctora en ingeniería de la Universidad del Valle (Cali) docente y becaria de Colciencias. jannethtorres@hotmail.com jannethtorres@universia.net.co

** Miembro del Grupo de Materiales Compuestos de la Universidad del Valle.

dicho elemento y una intensidad proporcional al número de átomos excitados. Por tanto, los métodos de emisión pueden emplearse tanto para el análisis cualitativo como para el cuantitativo. La excitación puede llevarse a cabo por diversas formas: bombardeo directo del material con electrones (análisis directo por emisión y microanálisis con sonda electrónica) o por irradiación del material con rayos X de longitud de onda más corta (análisis por fluorescencia) [2]. Otro tipo de análisis por rayos X utiliza la diferente absorción de dichos rayos en los materiales (análisis por absorción), método basado en la difracción de rayos X en los planos de un cristal (análisis por difracción). Vale la pena aclarar que aunque las técnicas de difracción pueden usarse para análisis cuantitativos, su mayor utilidad radica en la identificación cualitativa de fases cristalinas [2].

Un difractograma de rayos X corresponde a una serie de picos cuya intensidad (eje Y) es proporcional al número de planos que difractan los rayos incidentes. Esto es característico de cada cristal y con esta información se puede hacer una identificación cualitativa de la muestra. Para hacer evaluaciones semicuantitativas se puede determinar el área bajo la curva de los picos característicos de cada estructura, de tal manera que el área será proporcional a su concentración en la muestra. Por medio de esta técnica también se pueden hacer análisis cuantitativos, siempre y cuando se cuente con el *software* adecuado para tal análisis.

En el caso específico de las puzolanas, esta técnica sirve para evaluar la calidad de la materia prima y el producto final cuando se obtiene la puzolana a partir de procesos de transformación de otro material. También se utiliza para evaluar la actividad puzolánica por medio del consumo de hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) cuando la puzolana se mezcla con cal o reacciona con cemento. Para este último caso, la difracción de rayos X se aplica igualmente para la caracterización de los productos de hidratación.

En la figura 1 se presenta el resultado de una investigación [3] donde se ha utilizado esta técnica para la caracterización de la materia prima (caolinita) y la puzolana obtenida a partir del respectivo tratamiento térmico (metacaolín-MK). La transformación a MK ocurre para el material tratado a 600 °C. Nótese que en el DRX del caolín se aprecian los picos característicos de los minerales presentes ubicados en 2θ : 12,4, 20,1, 24,9; mientras que para el caso del metacaolín, su diagrama es el correspondiente a un material amorfo donde se puede observar el levantamiento de la línea base en la región $2\theta = 20$ a 30° del difractograma [4]. Este material, a temperaturas superiores a 900 °C, se puede transformar en mullita, cuyos picos ca-

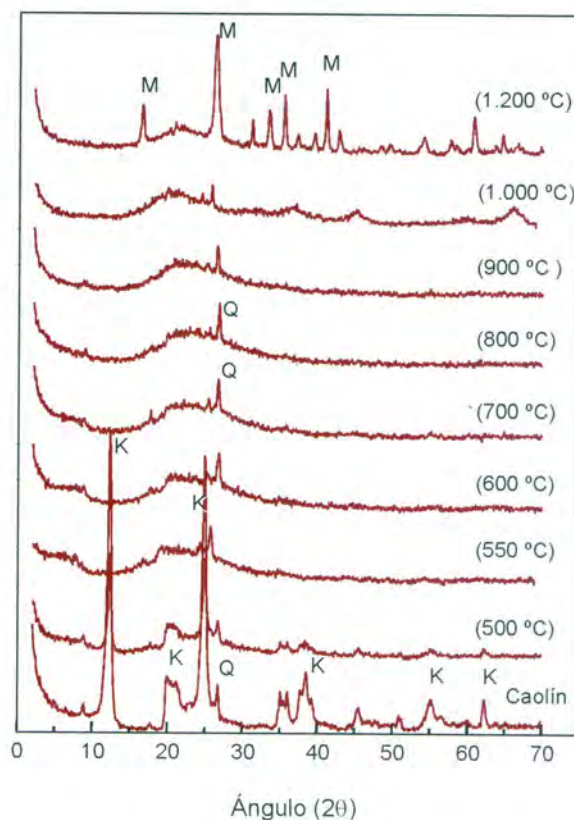


Figura 1. DRX caolín y metacaolín. (K: caolinita, Q: cuarzo, M: mullita).

racterísticos están ubicados en 2θ : 16,43, 26,2, 33,22, 35,27, 40,87 y 60,71.

S. Barger *et al.* [5] reportan una investigación realizada en la Compañía de Cemento Ash, en la que estudiaron una arcilla caolínica usada como puzolana para concreto. A esta muestra se le hizo un seguimiento por difracción de rayos X para determinar la naturaleza mineralógica del material y sus transformaciones en un rango de temperatura de 400 a 1.100 °C. A partir de este estudio, los autores encontraron que la deshidroxilación de la caolinita ocurrió entre 550 y 750 °C, lo cual es coincidente con lo presentado en la figura 1.

Para comparar materias primas, también es posible efectuar la medida del grado de cristalinidad con base en los espectros de DRX, tomando en consideración básicamente las reflexiones de la caolinita que aparecen en la región $2\theta = 20$ a 22° . A medida que aumenta la perfección del cristal, la resolución de estos picos mejora. La técnica también permite evaluar el avance de los procesos de hidratación en los sistemas con cal o cemento adicionados con puzolanas, además de la identificación mineralógica de las fases presentes [5, 6].

Análisis termogravimétrico (ATG)

Esta técnica de ensayo consiste en la determinación de la pérdida o ganancia de masa en función de parámetros tales como la temperatura y el tiempo. La curva que arroja este análisis suministra información sobre la estabilidad térmica de la muestra y los componentes presentes en la misma, además de los compuestos intermedios que puedan formarse durante el proceso térmico y de la composición del residuo que queda al final del proceso [7].

La derivada del termograma (DTG) es la curva que se obtiene derivando la del análisis termogravimétrico (ATG). Esta gráfica, en algunos casos, puede dar información adicional a la obtenida por medio de la termogravimetría. El DTG puede ofrecer una información rápida de la temperatura máxima a la cual ocurre una transformación. Con la gráfica se puede determinar el área bajo la curva de un pico determinado y, por tanto, se logra hacer la cuantificación de las especies presentes en la muestra. También se pueden realizar determinaciones como comparación entre picos, solapamientos, y se pueden establecer velocidades de

pérdida de masa a una temperatura determinada.

Para el estudio de puzolanas, este tipo de técnicas permiten conocer las fases presentes en ella: también se utiliza para la caracterización de materias primas y para la definición y seguimiento de procesos térmicos de fabricación. En el caso particular del metacaolín, esta técnica permite conocer la temperatura a la cual se presenta la transformación de la caolinita al material amorfo (metacaolín), tal como se puede apreciar en la figura 2. Allí se observa un pico endotérmico ubicado en 516 °C, que corresponde al proceso de deshidroxilación, es decir, la conversión de caolinita ($2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) en metacaolín ($2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$), y un pico exotérmico ubicado en 1.000 °C, asociado a la transformación de la fase metacaolín en fase espinel, la cual per-

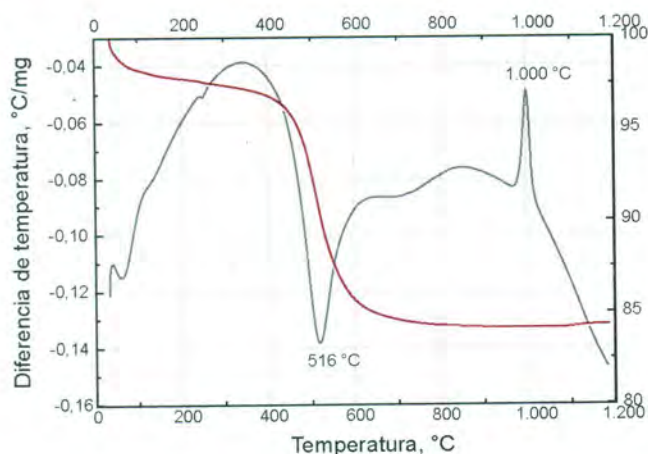
mitirá finalmente la nucleación de la mullita [3]. Otros investigadores han reportado diagramas similares[8].

En cuanto a las mezclas cementicias, esta técnica brinda información sobre los productos que se forman en los procesos de hidratación de los sis-

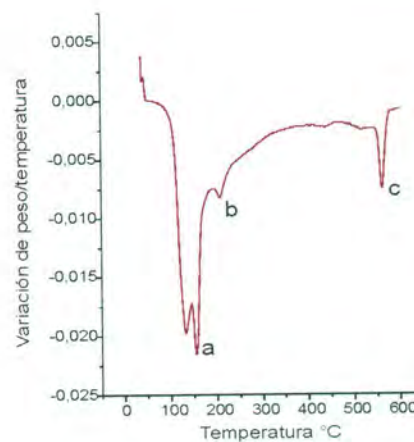
temas de cemento y cemento-puzolanas, cuantificando además las fases presentes [9]. En la figura 2, parte a), se presenta la gráfica DTG para una pasta de cemento-metacaolín a una edad de curado de 60 días; la asignación [10] de los picos para los

productos de hidratación de este sistema es la siguiente: **pico a** para la deshidratación del C-S-H (100-180 °C); **pico b** para las deshidrataciones de C-S-A-H, C-A-H (180-240 °C) de diferentes composiciones, y el **pico c** corresponde a la deshidroxilación del $\text{Ca}(\text{OH})_2$ entre 440 y 580 °C. El

Las técnicas presentadas forman parte de una variedad de ensayos instrumentales que se pueden aplicar para la caracterización de materiales puzolánicos y la evaluación del proceso de hidratación de estos últimos con un cemento Pórtland.



a)



b)

Figura 2. a) Evaluación del caolín mediante análisis térmico. b) Gráfica DTG correspondiente a una pasta de cemento-metacaolín.

pico que antecede el pico **a** corresponde a la humedad de la muestra.

La actividad puzolánica también se puede determinar por esta misma técnica, evaluándose las pérdidas de peso del pico **c** (figura 2, parte b)), el cual corresponde a la deshidroxilación del hidróxido de calcio. El cálculo consiste en la determinación de la cal fijada en la muestra, ya que dicha fijación se produce por la reacción puzolánica. El porcentaje de cal fijada se calcula como: $\% \text{cal fijada} = ((\text{CH})_o - (\text{CH})_p) * 100 / (\text{CH})_o$, donde $(\text{CH})_o$ representa la cantidad inicial de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ presente en la pasta OPC/MK y $(\text{CH})_p$ es la cantidad de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ de la misma pasta a una edad determinada [9]. La aplicación de este concepto se puede apreciar en la figura 3, correspondiente a un estudio realizado para MK, desarrollado a nivel nacional. Se observan valores superiores de cal fijada para el caolín tratado a 700 y 800 °C, temperaturas en las cuales el caolín se ha transformado completamente a MK.

Espectroscopia de Infrarrojo (FTIR)

Este tipo de espectroscopia estudia la radiación entre la materia y la radiación infrarroja, la cual abarca longitudes de onda entre 0,7 y 1.000 μm . Dicha región se divide en infrarrojo cercano (NIR, longitudes de onda λ , entre 0,7 y 2,5 μm), infrarrojo medio (MIR, $\lambda = 2,5 - 25 \mu\text{m}$) e infrarrojo lejano (FIR, $\lambda = 25 - 1.000 \mu\text{m}$) [11]. Fundamentalmente, la técnica FTIR es sensible a la presencia de grupos funcionales en una molécula. Por tanto, la técnica permite identificar especies químicas a través de la determinación de la frecuencia (número de ondas) a la que los distintos grupos funcionales presentan bandas de absorción en el espectro infrarrojo. Además, por medio de la intensidad de las bandas se pueden hacer determinaciones cuantitativas de las especies presentes en la muestra [11].

Esta técnica permite analizar toda clase de muestras, sólidas, líquidas o gaseosas; además es sencilla, rápida y de una alta sensibilidad. Una condición para aplicar esta técnica FTIR es que la muestra debe poseer enlaces químicos, por lo que los átomos y los iones monoatómicos no absorben radiación infrarroja; tampoco pueden detectarse las moléculas diatómicas homonucleares, como O_2 o N_2 . También presentan limitaciones las mezclas complejas y las disoluciones acuosas, ya que el agua absorbe con fuerza la radiación infrarroja [11]. Los resultados de la técnica se representan gráficamente

Vale la pena aclarar que estas técnicas son complementarias, es decir, que una sola de ellas no es concluyente para este tipo de análisis.

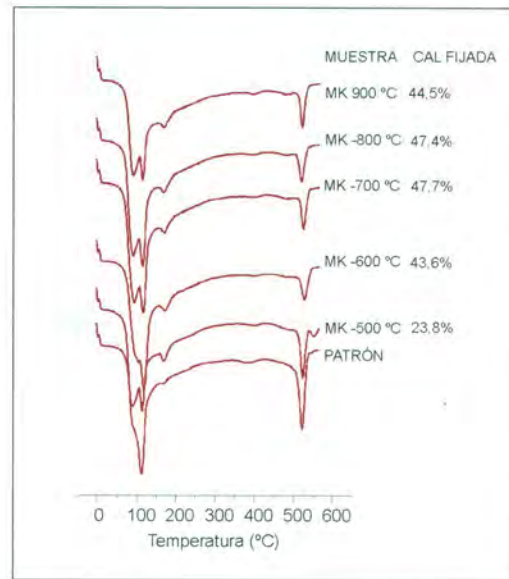


Figura 3. Evaluación de la actividad puzolánica por DTG.

mediante la intensidad de la radiación infrarroja, expresada como absorbancia o transmitancia, en función del número de ondas que se presenta en un intervalo decreciente de 4.000 a 400 cm^{-1} .

La técnica de FTIR, en el caso de los materiales puzolánicos, se utiliza para su caracterización y la de los materiales de partida, como por ejemplo en el caso del caolín (figura 4), que presenta las bandas características de la caolinita ubicadas en 3.695, 3.652 y 3.620 cm^{-1} , correspondientes a las vibraciones de los enlaces OH tanto de los grupos Al-OH como del agua. Así mismo, de manera similar al DRX, permite dictaminar el grado de cristalinidad observando la desaparición de la banda a 3.670 cm^{-1} , lo cual se considera indicativo de mayor amorfización [12].

Al comparar este espectro con los obtenidos en muestras de caolín tratadas térmicamente (figura 4) se observa que a temperatura de 500 °C, la intensidad de las bandas ubicadas en 3.695, 3.620 y 911 cm^{-1} , correspondientes a las vibraciones asociadas con el grupo O-H, se reducen. También se produce engrosamiento de algunas bandas, en particular las ubicadas en la región de 1.000 cm^{-1} . La banda de 536 cm^{-1} , asociada al enlace $\text{Al}^{\text{VI}}\text{-O}$ (Al octaédrico), desaparece gradualmente, dando lugar al pico en 820 cm^{-1} , asociado al enlace $\text{Al}^{\text{IV}}\text{-O}$ (Al tetraédrico), lo cual corrobora la transformación a metacaolín. Coinciden estos resultados con los reportados por otros investigadores [6, 13]; además, van de acuerdo con lo que se encontró por medio de las técnicas de Difracción de Rayos X y de termogravimetría.

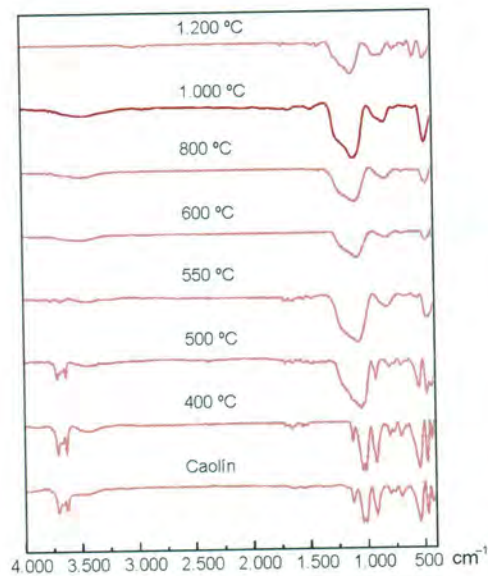


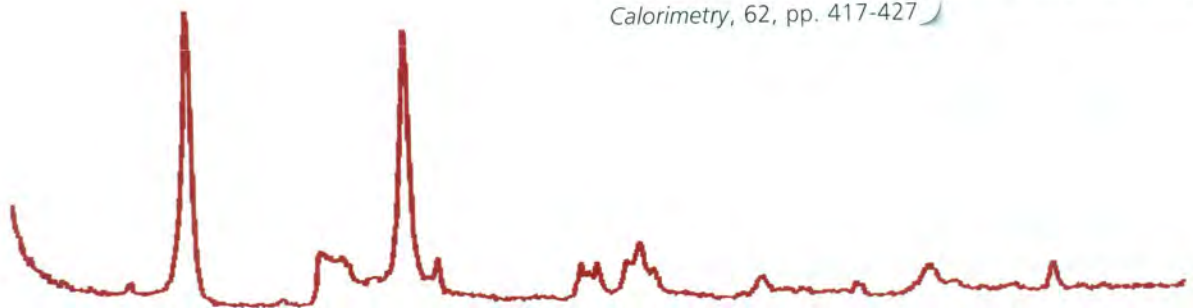
Figura 4. Espectros FTIR de caolín tratado térmicamente.

CONCLUSIONES

Las técnicas presentadas forman parte de una variedad de ensayos instrumentales que se pueden aplicar para la caracterización de materiales puzolánicos y la evaluación del proceso de hidratación de estos últimos con un cemento Pórtland. Vale la pena aclarar que estas técnicas son complementarias, es decir, que una sola de ellas no es concluyente para este tipo de análisis.

Para este caso específico, dichas técnicas permitieron evaluar la calidad de un caolín para la producción de una puzolana y estudiar el proceso de transformación que ocurre en la misma cuando es sometida a un tratamiento térmico. Así mismo, se encontró el rango de temperatura en el cual ocurre la transformación a metacaolín.

Para este caso específico, dichas técnicas permitieron evaluar la calidad de un caolín para la producción de una puzolana y estudiar el proceso de transformación que ocurre en la misma cuando es sometida a un tratamiento térmico.



BIBLIOGRAFÍA

- [1] Mejía de Gutiérrez, R. & Rodríguez, P. (1999). "Durabilidad y corrosión en materiales cementicios". Seminario Internacional Cyted, Costa Rica, p. 22.
- [2] Willard, H., Merrit, L., & Dean, J. (1981). *Métodos instrumentales de análisis*. México: Compañía Ed. Continental, S.A., pp. 287-326.
- [3] Mejía de Gutiérrez, R., Torres A. & Guerrero, J.C.E. (2004). "Análisis del proceso térmico de producción de puzolana". *Materiales de construcción*, 54, 274, pp. 65-72.
- [4] Tsvilis, S. et al. (2003). "Investigation on the Production and Use of Metakaolin, Originated from Poor Greek Kaolins as Cement Extender", Proc. 11th ICCO, Durban, South Africa, pp. 823-831.
- [5] Barger, G. et al. (2001). "Production and Use of Calcined Natural Pozzolans in Concrete". ASTM, pp. 73-80.
- [6] Kakali G. et al. (2001). "Thermal Treatment of Kaolin: The Effect of Mineralogy on the Pozzolanic Activity". *Applied Clay Science* 20, pp. 73-80.
- [7] Satre, E. & Ferreira, P. (2002). "Técnicas de análisis y caracterización de materiales. Análisis térmico". España: CSIC, pp. 250-252.
- [8] Shvarzman, A. et al. (2003). "The Effect of Dehydroxylation / Amorphization Degree on Pozzolanic Activity of Kaolinite". *Cement and Concrete Research*, pp. 405-416.
- [9] Payá, J. et al. (2003). "Determination of the Pozzolanic Activity of Fluid Catalytic Cracking Residue. Thermogravimetric Analysis Studies on FC3R-lime Pastes". *Cement and Concrete Research*, 33, pp. 1085-1091.
- [10] Bhatti, J.I. (1991). "A Review of the Application of Thermal Analysis to Cement - Admixture Systems". *Thermochimica Acta*, 189, pp. 313-350.
- [11] López de Lacey, A. & Álvarez M., C. (2002). "Técnicas de análisis y caracterización de materiales. Espectroscopia infrarroja". España: CSIC, pp. 250-252.
- [12] Ambroise, J., Martin-Calle, S. & Pera, J. (1992). "Pozzolanic Behavior of Thermally Activated Kaolin". *Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, pp. 731-747.
- [13] Rahier, H. et al. (2000). "Influence of the Degree of Dehydroxylation of Kaolinite on the Properties of Aluminosilicate Glasses". *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 62, pp. 417-427.

Restauración del servicio en sistemas de distribución de topología radial mediante reconfiguración de alimentadores

César Arango Lemoine*, Jesús María López Lezama**, Mónica Alejandra González Londoño*** y Mónica Fernanda Gaviria Giraldo****

En las redes de distribución es común que haya salidas del sistema, bien sea debido a una falla o por labores de mantenimiento programado. La práctica común en estas circunstancias es aislar el área afectada abriendo todos los interruptores alrededor de ésta. Para los sistemas de distribución radiales, esta operación provocará el aislamiento de algunas porciones del alimentador aguas abajo del área fallada; por tanto, el paso siguiente debe ser restaurar el servicio a los usuarios afectados. Dicha restauración debe hacerse tan rápido como sea posible, teniendo en cuenta restricciones de topología del sistema y capacidad de los alimentadores. En este artículo se describe un algoritmo que permite la restauración del servicio mediante la reconfiguración de alimentadores. Se presentan los resultados para un sistema de distribución de 16 barras y cuatro alimentadores.

Palabras claves: restauración del servicio, reconfiguración de alimentadores, optimización en sistemas de distribución, confiabilidad de sistemas de distribución.

* Ingeniero electricista, especialista en sistemas de distribución. Director del Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación de la Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales. carango@nevado.manizales.unal.edu.co.

** Ingeniero electricista, candidato a magister en ingeniería eléctrica. Docente temporal de la Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales. jesusmarialopezl@yahoo.com.

*** Ingeniera electricista de la Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales. monialeja119@hotmail.com.

**** Ingeniera electricista de la Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales. mfgaviria@hotmail.com.

INTRODUCCIÓN

El actual esquema de competitividad en el sector eléctrico exige a las empresas distribuidoras de energía operar los sistemas con criterios técnicos de confiabilidad y seguridad apropiados para garantizar la calidad del servicio a los clientes, cumpliendo con las normas técnicas exigidas, mínimo tiempo de interrupción del servicio y disminución de los niveles de pérdidas en las redes de distribución.

Para cumplir con estas exigencias y garantizar la competitividad de las empresas se requiere invertir en automatizar funciones en los sistemas de distribución, las cuales se implementan por medio de *hardware* y *software* especializado para mejorar aspectos como restauración del servicio, reducción de pérdidas y monitoreo de armónicos, entre otros [1].

Una característica importante de los nuevos mercados de energía eléctrica es la búsqueda de la eficiencia tanto en la gestión administrativa como en la técnica. Por esto, a las empresas del sector se las incentiva a promover

la calidad del servicio que prestan y a realizar su función de la manera más eficiente posible. La eficiencia técnica de una red se asocia no sólo con el nivel de pérdidas existentes sino con la confiabilidad del suministro; en este último aspecto, la restauración de servicio cumple un papel de importancia, la cual ha sido reconocida por autores y por grupos de investigación de di-

versas instituciones [2], [3], [4].

Cuando ocurre una contingencia en un sistema de distribución, la práctica común es aislar el área afectada abriendo todos los interruptores adyacentes a ésta. Para los sistemas de distribución radiales, esta operación hace que los usuarios aguas abajo del

alimentador afectado queden sin servicio; por tanto, el paso siguiente debe ser restaurar el servicio a las ramas afectadas mediante la reconfiguración de alimentadores (apertura o cierre de interruptores). Dicha restauración se debe hacer tan rápido como sea posible, teniendo en cuenta restricciones de topología del sistema y capacidad en los alimentadores [5].

El actual esquema de competitividad en el sector eléctrico exige a las empresas distribuidoras de energía operar los sistemas con criterios técnicos de confiabilidad y seguridad apropiados para garantizar la calidad del servicio a los clientes.

DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Los sistemas eléctricos de distribución de media tensión son, por lo general, redes de tipo radial. En casos como la ocurrencia de una falla o la salida de una parte del sistema por mantenimiento, existe la posibilidad de alimentar un tramo de alimentador desde distintos puntos a través de la operación abierto/cerrado de interruptores.

Cuando ocurre una falla en un sistema de distribución, se establecen dos zonas: la zona fallada y la zona afectada, siendo la primera un tramo o nodo del sistema donde ha sucedido la contingencia, y la segunda, la región que queda aislada (sin servicio) debido a la falla. En este caso, es necesario llevar a cabo un proceso por medio del cual se restaure el servicio a tantos usuarios como sea posible.

La restauración puede considerarse un problema de asignación, donde se plantea la transferencia de cargas del área afectada a alimentadores adyacentes por medio de interruptores fronterizos. Una vez localizada y aislada la falla, se formula una serie de conmutaciones de los interruptores de la red, de modo que el mayor número posible de usuarios afectados puedan atenderse de nuevo mientras se soluciona la contingencia y se regresa a la topología inicial.

ALGORITMO DE RESTAURACIÓN Y RECONFIGURACIÓN

Cuando ocurre una contingencia en un sistema de distribución, lo primero que debe hacerse es aislar la falla. Posteriormente, se identifica la zona afectada y se restaura el servicio a los usuarios comprometidos. La restauración se debe hacer de manera tal que el nuevo sistema conserve la topología radial y cumpla con restricciones de capacidad de los alimentadores. Para la restauración del servicio y posterior reconfiguración del sistema se usó una búsqueda heurística.

Las búsquedas heurísticas son aquellas en las que se tiene un dato adicional que permite que el algoritmo llegue a la solución con más rapidez. A este dato adicional se le denomina heurístico. El heurístico que se ha utilizado en este caso es la caída de tensión en los nodos finales de las trayectorias. El algoritmo consta de los siguientes pasos:

Paso 1

Dado un sistema de distribución radial, se ingresa una falla al sistema en cualquier tramo o nodo de la red.

Paso 2

Se aísla la falla mediante la apertura de interruptores adyacentes.

Paso 3

Se identifican los nodos que han quedado sin servicio debido a la contingencia.

Paso 4

Se crea una lista de nodos adyacentes a los nodos que han quedado sin servicio. Estos nodos son candidatos a recibir la carga de la zona afectada. El mejor candidato es aquel que tenga mayor tensión, siempre y cuando el alimentador al que pertenezca tenga suficiente capacidad de reserva.

Paso 5

Se hace la conmutación restaurando el servicio a los nodos afectados. Se corren los flujos de carga y se calcula la función objetivo. En este punto se ha cumplido con la primera parte del algoritmo, que es la restauración del servicio.

Paso 6

En este paso se inicia el proceso de reconfiguración. Es probable que el alimentador que ha recibido carga se encuentre muy cerca de sus límites de cargabilidad, o que alguno de sus nodos presente una tensión demasiado baja. Lo que se hace es tratar de balancear la carga entre los otros alimentadores, para lo cual se elabora una lista de nodos finales de cada alimentador y se selecciona el nodo final que tenga menor tensión (éste será el nodo candidato a entregar carga).

Paso 7

Para ese nodo se identifican los nodos adyacentes, los cuales se ordenan, según su tensión, de mayor a menor. De nuevo, el nodo candidato a recibir carga es aquel que presente la mayor tensión.

Paso 8

Se realiza la conmutación (el nodo de menor tensión de la red entrega su carga al nodo adyacente de mayor tensión).

La restauración puede considerarse un problema de asignación, donde se plantea la transferencia de cargas del área afectada a alimentadores adyacentes por medio de interruptores fronterizos.

Paso 9

Se evalúa la función objetivo. Si ésta ha mejorado, se vuelve al paso 6; de lo contrario, se borra de la lista el nodo candidato y se repite el proceso con el siguiente nodo de mayor tensión. El proceso se repite con todos los nodos finales y sus respectivos nodos adyacentes, hasta que no existan más nodos adyacentes en las listas o hasta que no se pueda mejorar más la función objetivo.

MODELO MATEMÁTICO DE LA FUNCIÓN OBJETIVO

La función objetivo es de la forma:

$$FO = k_1 A + k_2 B + k_3 C + P \quad (1)$$

Donde cada una de las variables (A, B, C) representa un parámetro de la red. A cada uno de estos valores se le asigna un factor de peso (k_1, k_2, k_3) y luego se suman, obteniendo un valor que representa el estado de la red. El objetivo es minimizar la función, y para tal fin se pueden aplicar diferentes criterios de optimización [6].

Parte de la formulación matemática para la función objetivo se tomó del trabajo desarrollado por I. Roytelman, V. Melnik, S.S.H. Lee y R.L. Lugtu, "Multi-objective Feeder Reconfiguration by Distribution Management System" [7].

Minimización de pérdidas de potencia

Las pérdidas de potencia se pueden escribir como:

$$A = \left(\sum_{i=1}^{nt} I_i^2 * R_i \right) (P_{sub}) \quad (2)$$

Donde:

nt: número de tramos

P_{sub} : potencia activa que entrega la subestación

R_i : resistencia del tramo i

I_i : corriente en el tramo i

Mejoramiento del perfil de tensiones

$$B = \sum_{i=1}^{nf} |1 - V_{if}| \quad (3)$$

Donde:

V_{if} : tensión del i -ésimo nodo final por unidad

nf: número de nodos finales

Balanceo de carga entre alimentadores

$$C = \sum_{j=1}^{nj} |H_j - Q| \quad (4)$$

$$Q = \frac{\sum_{j=1}^{nj} Pe_j}{\sum_{j=1}^{nj} Pnj} \quad (5)$$

$$H_j = \frac{Pe_j}{Pnj} \quad (6)$$

Donde:

n_j : número de alimentadores principales

Pe_j : potencia entregada por el alimentador j

Pnj : potencia nominal del alimentador j

Factor de penalización

$$P = k_4 N \quad (7)$$

Donde:

k_4 : constante de penalización

N : número de usuarios sin servicio

Fue necesario incluir un factor de penalización en la función objetivo que estuviera relacionada con el número de usuarios sin servicio, debido a que un sistema de distribución, al tener menos usuarios (y por tanto menos carga), presenta perfiles de tensión más altos, lo cual, si no se maneja en forma adecuada, puede incentivar el algoritmo a dejar usuarios sin servicio en aras del mejoramiento del perfil de tensiones.

Para realizar el proceso de reconfiguración se elaboró un programa en Visual Studio, el cual le permite al usuario ingresar en el sistema de distribución, ubicar una falla en cualquiera de sus nodos, correr flujos de carga, restaurar y reconfigurar.

EJEMPLO DE APLICACIÓN

Una red de distribución (figura 1) se compone fundamentalmente de una subestación, líneas de distribución, barras o nodos de carga e interruptores. Las líneas que permanecen abiertas se denominan líneas de enlace, cada una de las cuales se encuentra entre dos nodos. Los sistemas de distribución se operan normalmente en forma radial para minimizar las corrientes de cortocircuito y de esta manera hacer más sencillo el esquema de protecciones.

Los datos del sistema de distribución de 16 barras mostrado en la figura 1 son los siguientes:

- Potencia entregada por la subestación: 5.000 kVA
- Factor de potencia: 0,85 inductivo
- Tensión en la subestación: 13,2 kV
- Usuarios: 60 por nodo
- Conductor: 1/0 AWG
- Longitudes: 800 m líneas a y d
600 m líneas restantes

Por simplicidad, se han hecho los cálculos sobre un sistema simétrico en donde el número de usuarios es igual en cada nodo. Cada uno de los cuatro alimentadores principales tiene el mismo número de nodos y, por tanto, la misma carga.

Para los flujos de carga se han hecho cálculos por unidad, tomando como bases 5.000 kVA y 13.2 kV.

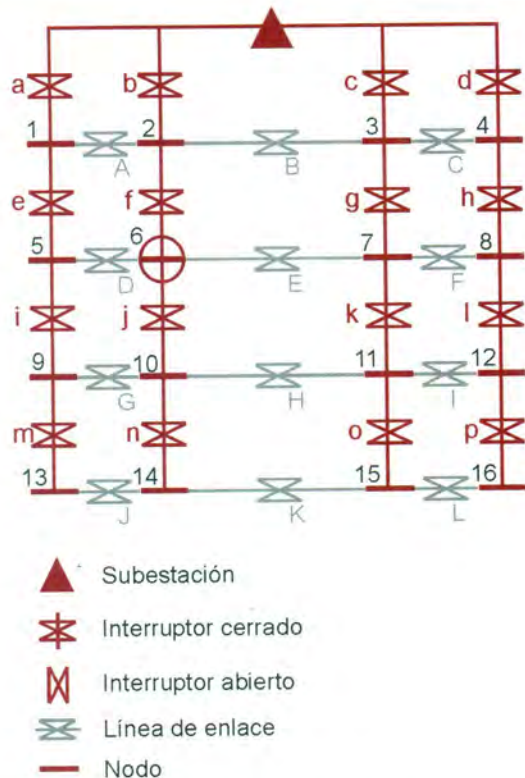


Figura 1. Sistema de distribución de 16 barras.

Para el sistema de distribución de la figura 1 se ha ingresado la falla en el nodo 6, representada como un círculo alrededor del nodo comprometido.

Una vez que se ha ingresado la falla, ésta se debe aislar como se muestra en la figura 2; para ello se abren los interruptores de las líneas f y j. Al hacer esto, los nodos 10 y 14 quedan sin servicio (ver algoritmo de restauración y reconfiguración, pasos 1 a 3).

El siguiente paso es restaurar el servicio a los usuarios de los nodos 10 y 14. Para ello se corre un flujo de carga, se identifica el nodo adyacente de mayor tensión y se conmuta como se muestra en la figura 3 (pasos 4 a 5).

Una vez restaurado el sistema se calcula la función objetivo, cuyos valores se pueden apreciar en la tabla 1.

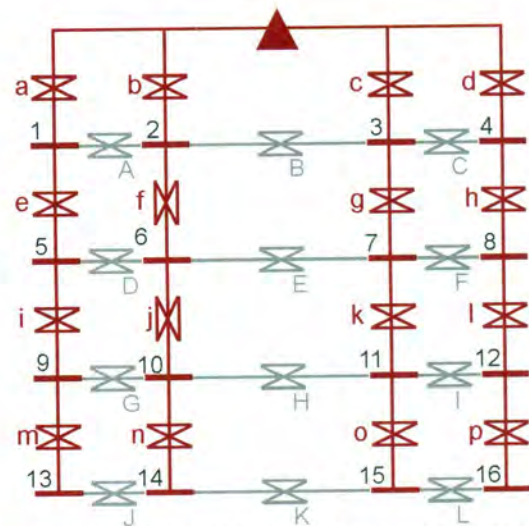


Figura 2. Sistema de distribución donde se ha aislado el nodo 6 abriendo los interruptores de las líneas f y j.

El número de usuarios sin servicio que inicialmente había era 120 (los correspondientes a los nodos 10 y 14). Los usuarios del nodo 6 no se tienen en cuenta para el cálculo del factor de penalización, ya que este nodo debió aislarse del sistema debido a la falla.

La constante de penalización que se usó para el cálculo de la función objetivo fue 10. Sin embargo, en la figura 3 se puede observar que se restauró el servicio a todos los usuarios aguas abajo de la falla, por lo que el factor de penaliza-

Tabla 1
Valor de la función objetivo antes de reconfigurar

Variable	Valor	Factor de peso	Nuevo valor
Pérdidas de potencia	4.08E-3	1000	4.08
Perfil de tensión	0.265	10	2.65
Balaceo de carga	0.5861	10	5.861

Valor de la función objetivo: 12.591

ción para la función objetivo en este caso vale cero (ecuación 3), sin importar el valor de la constante de penalización.

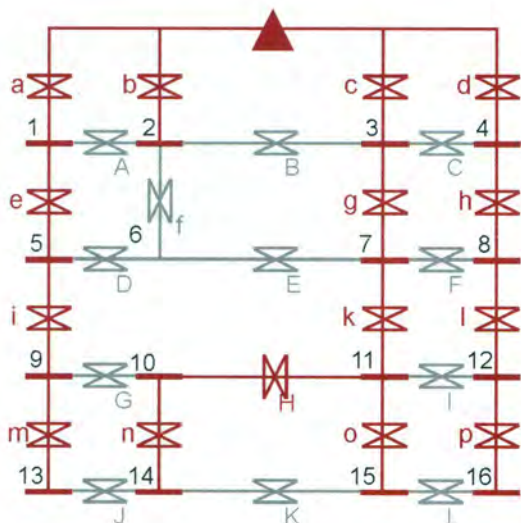


Figura 3. Sistema restaurado mediante la línea de enlace H (conmutando los nodos 10 y 11).

En la figura 3 se puede observar que el mismo alimentador atiende todos los nodos restaurados; el siguiente paso es reconfigurar el sistema para balancear la carga entre los alimentadores, mejorar el perfil de tensiones y disminuir las pérdidas (pasos 6 a 9).

En la figura 4 se muestra el sistema después de la reconfiguración. Se puede observar que los usuarios del nodo 14 ahora son atendidos por otro alimentador, mejorando de este modo el balanceo de carga entre alimentadores. En este caso, la conmutación entre los nodos 13 y 14 también ha contribuido a la reducción de pérdidas y al mejoramiento del perfil de tensiones.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El producto de este trabajo fueron el desarrollo y la implementación computacional de un algoritmo que permite la restauración del servicio en sistemas de distribución de topologías radiales. Dada una falla en el sistema de distribución, el algoritmo ha mostrado que cumple en forma eficiente con la restauración y posterior reconfiguración de la red.

Dado que se implementó un método heurístico para la reconfiguración, se ha garantizado un buen desempeño del algoritmo en cuanto a complejidad espacial, ya que no se necesita mucha memoria computacional para analizar sistemas de distribución de gran tamaño. Para cada iteración el algoritmo requiere sólo tener la información de la configuración inmediatamente anterior y no de todas las posibles configuraciones de la red, como ocurriría en una búsqueda sin contar con información (sin un heurístico).

El tiempo que toma la búsqueda heurística para encontrar una solución depende de la complejidad del sistema, ya que a mayor número de nodos se requiere un mayor número de iteraciones. En sistemas con más de 50 barras, el algoritmo puede tardar hasta cinco minutos en realizar el proceso de restauración y reconfiguración.

A causa de limitaciones de la interfaz, es difícil ingresar sistemas con más de 80 barras; a este nivel el tiempo requerido por el algoritmo para encontrar una solución óptima es aún mayor (hasta quince minutos).

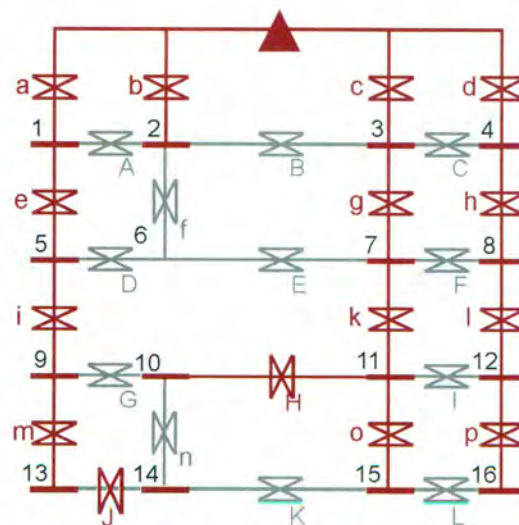


Figura 4. Sistema reconfigurado.

Tabla 2
Valor de la función objetivo antes de reconfigurar

Variable	Valor actual	Factor de peso	Nuevo valor
Pérdidas de potencia	3.88E-3	1000	3.88
Perfil de tensión	0.258	10	2.58
Balanceo de carga	0.5828	10	5.828

Valor de la función objetivo: 12.288.

Dada la naturaleza del algoritmo, es posible que se llegue a un mínimo local, ya que el criterio que se debe seguir es que la próxima configuración sea mejor que la anterior (no se permiten empeoramientos en la función objetivo); de esta manera se selecciona una ruta en donde, en cada iteración la función objetivo mejora. Si esto no sucede, entonces el algoritmo regresa a la iteración anterior y busca una nueva ruta que reduzca la función objetivo. Puede ocurrir que en una iteración no se obtenga ninguna reducción en la función objetivo, pero que siguiendo esta ruta en la próxima iteración se llegue al mínimo global; en este caso, la búsqueda heurística no lo encontraría. Es de aclarar, sin embargo, que el objetivo principal de este trabajo no es mejorar el estado de operación de la red (lo que efectivamente se hace con la reconfiguración) sino restaurar el servicio a los usuarios afectados después de una falla, lo cual es lo primero que hace el algoritmo.

Es probable que después de la restauración no sea posible reconfigurar el sistema, en razón de la ausencia de líneas de enlace con alimentadores adyacentes, o de la falta de capacidad de reserva de los alimentadores adyacentes, debido a esta situación, el algoritmo se diseñó para verificar las capacidades de los alimentadores que recibirán carga antes de realizar la restauración. De este modo, se garantiza que no se presenten fallas en cascada producidas por sobrecargas en los alimentadores que reciben nuevos usuarios.

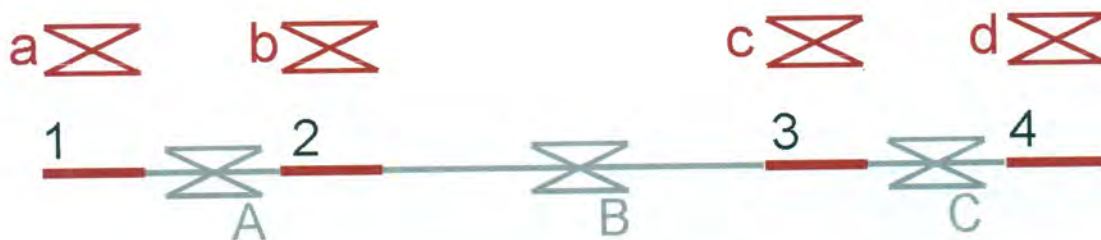
Se debe ser asertivo en la selección de los factores de peso, ya que éstos cumplen un papel determinante en el valor de la función objetivo y, por tanto, en el proceso de reconfiguración como tal. Se recomienda emplear factores

de peso similares a los que se utilizaron en los ejemplos de este trabajo. Para una buena escogencia de tales factores hay que tomar en cuenta el orden de magnitud de las variables que se van a optimizar y su rango de variación; nótese por ejemplo que el índice que mide el balanceo de carga entre alimentadores puede variar desde un número x (usualmente menor que 10) hasta cero, mientras que otros índices, como el de pérdidas de potencia o mejoramiento del perfil de tensiones, nunca tendrán un valor igual a cero. En las tablas 1 y 2 se puede observar que se han usado factores de peso tales que los órdenes de magnitud de las variables de la función objetivo sean iguales.

El producto de este trabajo fueron el desarrollo y la implementación computacional de un algoritmo que permite la restauración del servicio en sistemas de distribución de topologías radiales.

BIBLIOGRAFÍA

- Chen Ching Liu & Seung Jae Lee (1998). "An Expert System Operational Aid for Aid for Restoration and Loss Reductions of Distribution Systems". *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 3, No. 2, May, pp. 619-627.
- Grandobles, R., Díaz, J.F., & Caicedo, G. (2001). "Estado del arte en reconfiguración de sistemas de distribución". *Energía y Computación*, vol. 10, No. 1, primer semestre, pp. 50-58.
- López Lezama, J.M. (2001). "Reconfiguración de alimentadores en circuitos de topologías radiales mediante una función multiobjetivo". Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales, octubre.
- Morel, A.L. & Monticelli, A. (1989). "Heuristic Search Approach to Distribution System Restoration". *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 4, No. 4, October, pp. 2235-2241.
- Roytelman, I., Melnik, V., Lee, S.S.H. & Lugtu, R.L. (1996). "Multiobjective Feeder Reconfiguration by Distribution Management System". *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 11, No. 2, May.
- Shirmohammadi, D. (1991). "Service Restoration in Distribution Networks via Network Reconfiguration". San Francisco, CA: Pacific Gas and Electric Company, September, pp. 952-957.
- Yuan Yih & Han Shing Kuo (1994). "A Heuristic Based Fuzzy Reasoning Approach for Distribution Systems Service Restoration". *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 9, No. 2, April, pp. 949-953.



Caracterización de microactuadores mediante técnicas ópticas

Jorge Enrique Duarte*, Flavio Humberto Fernández Morales** y Mauricio Moreno Sereno***

En la caracterización de dispositivos que presenten la particularidad de modificar su estructura geométrica, tales como membranas de silicio y actuadores piezoeléctricos, es muy importante el poder extraer sus características de deflexión y desplazamiento de una manera precisa y fiable. Por tal razón, en este artículo se describe un método eficaz, de bajo costo y de breve realización, que permite la caracterización de microactuadores utilizando técnicas ópticas.

Palabras claves: aplicaciones metrológicas del láser, medida de desplazamientos, fotodetectores.

INTRODUCCIÓN

Gracias al avance en la micromecánica y la mecanización del silicio, en los últimos años han surgido una serie de microactuadores que se han sumado a los actuadores tradicionales. Entre estos dispositivos de reducidas dimensiones, llamados también sistemas microelectromecánicos (MEMS), cabe mencionar acelerómetros, microbombas, micromembranas y piezoeléctricos, los cuales presentan como principal característica el responder a una señal de alimentación con la modificación de su geometría.

En razón de su principio de funcionamiento, para conocer las características de operación de los microactuadores se hace indispensable el disponer de una técnica de medida para desplazamientos micrométricos, que

permita la caracterización individualizada de los dispositivos de manera fiable, eficiente y a un costo razonable.

Así las cosas, en este artículo se ilustra una técnica de medida de microdesplazamientos basada en el empleo de un rayo láser cuya deflexión, causada por la deformación de la estructura en estudio, es detectada por un dispositivo sensor de posición (PSD). Esta técnica se verificó con la caracterización de micromembranas de

silicio y actuadores piezoeléctricos (PZT).

ESTRATEGIA DE MEDIDA

Sin lugar a dudas, las técnicas ópticas son las que mayor precisión ofrecen en aplicaciones metrológicas, especialmente en la determinación de pequeños desplazamientos. Entre estas técnicas la más conocida es la interferometría láser, la cual suele emplearse en la medición de espesores y análisis de superficies. La interferometría proporciona precisiones por debajo de la longitud

de onda del láser que se emplea; es decir, por debajo de $0,5 \mu\text{m}$ cuando se utilizan láseres dentro del espectro visible. No obstante, uno de los principales inconvenientes de las técnicas interferométricas es que proporcionan una medida indirecta del espesor o desplazamiento deseado, ya que se deben contar los máximos o mínimos de la señal obtenida para extraer la distancia absoluta.

Con el fin de simplificar el proceso de la información obtenida, resulta interesante utilizar una técnica que proporcione una medida directa del desplazamiento del objeto. En tal sentido, una alternativa es la técnica empleada en el Microscopio de Fuerza Atómica (AFM) [1]. Un microscopio AFM proporciona imágenes

Gracias al avance en la micromecánica y la mecanización del silicio, en los últimos años han surgido una serie de microactuadores que se han sumado a los actuadores tradicionales.

* Licenciado y magíster en física de la Universidad Industrial de Santander. Doctor en física de la Universidad de Barcelona. Profesor titular de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, sede Duitama. Miembro del Grupo de Energía y Aplicación de Nuevas Tecnologías (Geant) julioenriqueuarte@latinmail.com

** Ingeniero electrónico de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Doctor en ingeniería electrónica de la Universidad de Barcelona. Profesor asociado de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, sede Duitama. Miembro del Grupo de Energía y Aplicación de Nuevas Tecnologías (Geant). flaviofm@telecom.com.co

*** Licenciado en física de la Universidad Politécnica de Cataluña. Doctor en física de la Universidad de Barcelona. Profesor titular de la Universidad de Barcelona, Facultad de Física, Departamento de Electrónica. moreno@el.ub.es

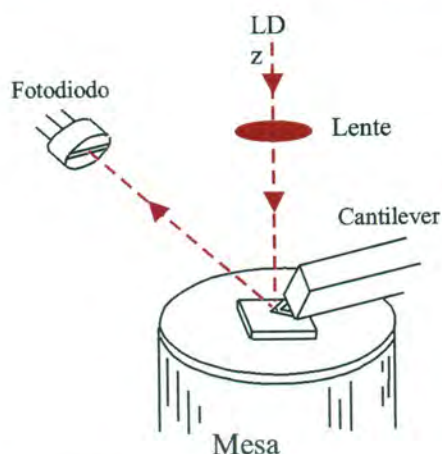


Figura 1. Esquema de un microscopio AFM. La luz del láser se focaliza sobre el cantilever, y el fotodiodo detecta su desplazamiento mediante el análisis de la posición del haz láser deflectado.

topográficas de la superficie de diversos materiales (conductores, no conductores, polímeros, etc.), escaneando dicha superficie con una fina punta o *cantilever*. La deflexión del cantilever se monitorea en forma óptica, como se observa en el esquema de la figura 1.

La ventaja que la utilización de un láser ofrece en este tipo de técnicas es que cuando su potencia es suficientemente baja (menor de 3 mW), no se alterará el comportamiento del dispositivo sobre el cual incide el haz lumi-

noso (siempre y cuando, claro está, dicho elemento no tenga propiedades optoelectrónicas). Además el haz se puede focalizar con gran precisión, lo que permite acceder a sectores extremadamente pequeños de la superficie en estudio.

Dadas las características y requerimientos de los dispositivos que se van a medir, en este trabajo se aplicó el método de triangulación con rayo láser, el cual se basa en la técnica descrita anteriormente.

CARACTERIZACIÓN DE MICROACTUADORES

Medida de la deflexión de membranas

El método de triangulación con rayo láser se verificó en la práctica con la medida de la deflexión de micromembranas de silicio, las cuales se fabricaron mediante ataque anisotrópico de las obleas de Si, en el Centro Nacional de Microelectrónica (CNM) de Barcelona (España). Las membranas son cuadradas, con áreas de 5 y 8 mm², y un grosor de 2 μm.

En la figura 2 se muestra el montaje empleado para la medida de deflexiones de micromembranas de silicio [2]. Con la ayuda de lentes se focaliza el haz láser sobre el centro de la membrana, formando así un ángulo

α con respecto a la normal a su superficie. El haz reflejado se proyecta sobre un PSD (*Position Sensor Device*); es decir, un fotodiodo con una geometría lineal que proporciona la posición en la que incide un haz de luz. Una vez que se convierte la señal luminosa en su equivalente eléctrico, se procede a su amplificación para finalmente obtener el valor del desplazamiento deseado.

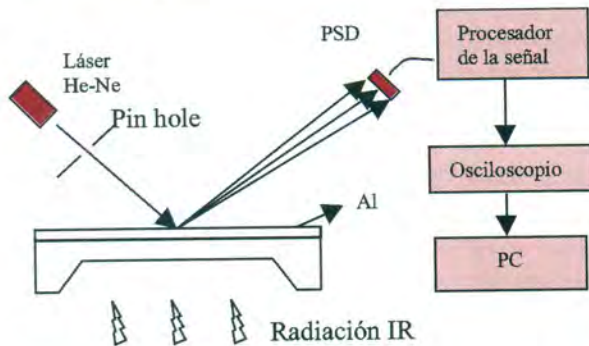


Figura 2. Corte transversal de la membrana de silicio, junto con el montaje sugerido para la medida de su deflexión.

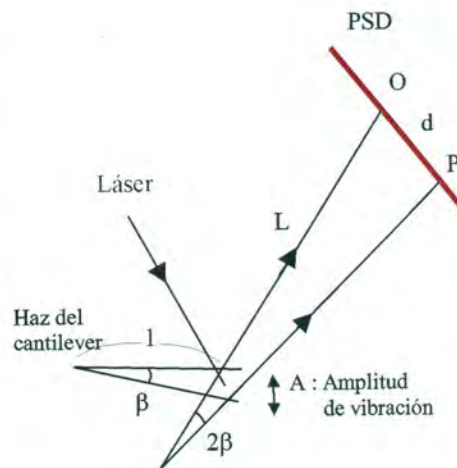


Figura 3. Descripción geométrica para la medida de la deflexión.

En la figura 3 se representa la geometría de la deformación de la membrana y su efecto en la deflexión del haz láser. El ángulo que describe el haz es 2β , siendo β el ángulo de deflexión de la membrana respecto a su situación de reposo. El haz se desplaza una amplitud d sobre el PSD, donde d viene dada por la expresión:

$$d = A \frac{2L}{l} \quad (1)$$

siendo A la amplitud de la deflexión de la membrana, L la distancia entre el PSD y la membrana y l el tamaño de la membrana (figura 3).

La deflexión de la membrana se consigue calentando con una fuente de infrarrojos (IR) la pequeña cámara de aire que queda encerrada entre la membrana y un portamuestras de microscopio. Los valores útiles de deflexión (A) son del orden de 1 a 10 μm para membranas cuadradas con un tamaño (l) de entre 5 y 8 mm. De la expresión (1) se deduce que para obtener desplazamientos (d) del orden de 1 a 2 cm, el dispositivo PSD se debe colocar a distancias (L) superiores a 1 m de la membrana.

La figura 4 corresponde al montaje real usado para la medida de deflexión

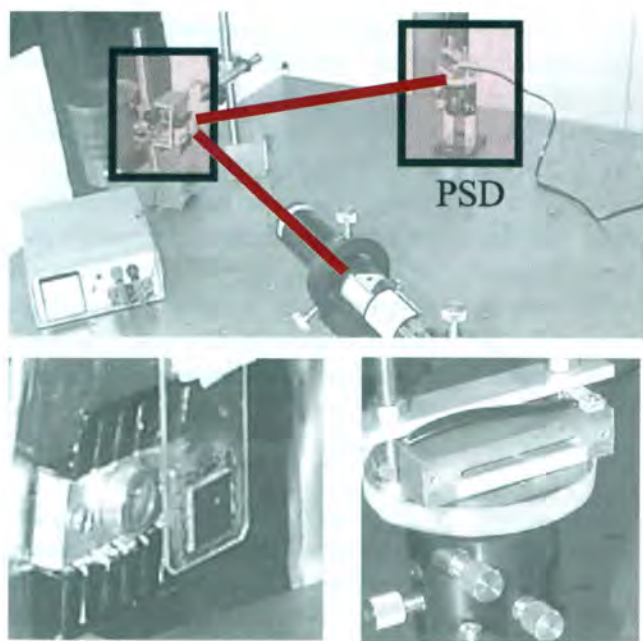


Figura 4. Arriba: fotografía del montaje experimental para medir deflexiones de membranas. Abajo, izquierda: bombilla térmica de IR y membrana. Abajo, derecha: PSD y haz láser.

de membranas. En primer plano se distingue el láser y se detalla la trayectoria del rayo, cómo incide sobre la membrana y cómo se refleja sobre el PSD, situado a la derecha de la fotografía. Adicionalmente se muestra una fotografía de la fuente de IR que se utiliza para calentar la cámara de aire cuya dilatación deforma la membrana, así como una fotografía del PSD usado.

Medida de la deflexión de un PZT

Con base en el mismo sistema de medida, se ha caracterizado un actuador piezoeléctrico (PZT), cuya deflexión en función de la tensión aplicada es de unas $300 \mu\text{m}$ por cada 50 V aplicados. Al montaje inicial se le añadieron dos lentes para mejorar la focalización sobre el extremo del piezoeléctrico y para tener una buena colimación de entrada al PSD.

El láser tiene una longitud de onda visible $\lambda=633 \text{ nm}$ y una potencia óptica de 1 mW . Aunque longitudes de onda mayores, dentro del infrarrojo, arrojan los mismos resultados, se presenta la dificultad añadida de la focalización del haz sobre el objeto.

El PSD utilizado es un modelo S-3270-01 de Hamamatsu. Su gran tamaño (40 mm de ventana de captación de luz) permite alejarlo suficientemente del objeto móvil a prueba, lo cual es muy importante cuando su desplazamiento es muy pequeño. La sensibilidad que posee es de 500 mA W^{-1} , por lo que su señal de salida debe amplificarse. La corriente de oscuridad es de 3 nA .

La electrónica requerida para el acondicionamiento del PSD consiste en dos convertidores corriente-tensión, uno para cada uno de los diodos PIN que forman el PSD. Una etapa sumadora y otra restadora proporcionan las señales suma y diferencia que se entregan a un divisor analógico (AD633), el cual retorna la señal de posición del haz de luz incidente respecto del centro de la ventana del PSD [3, 4].

Las etapas con amplificadores operacionales se han resuelto mediante el AD711, y el circuito obtenido es sencillo, fiable y de bajo costo. Debido a que la tensión final está sometida a una ganancia, existe una constante que relaciona el valor leído y el valor del desplazamiento real. Por tanto, se debe realizar la calibración del circuito con el fin de establecer la relación de amplificación. Para ello se desarrolló un equipo con un espejo móvil accionado por un motor paso a paso. La relación distancia-ganancia entre dicho equipo y la salida del PSD permite establecer el valor de la constante de calibración.

RESULTADOS

La extracción de la característica tensión-desplazamiento se ha automatizado a través de instrumentación controlada mediante HP-VEE. Al efecto, se ha desarrollado un programa que controla todo el conjunto instrumental. Un multímetro programable es el encargado de devolver al ordenador el valor de las medidas realizadas, de modo que se genere automáticamente un fichero con dos columnas donde la primera corresponde a la excitación y la segunda a la respuesta. Dicho fichero se somete posteriormente a un interpolador que devuelve la representación gráfica del comportamiento de cada actuador.

En la figura 5 se muestra la respuesta dinámica proporcionada por el PSD, una vez procesada, para la deflexión de una membrana de Si de 8 mm de lado. Se trata de un doble período de encendido y apagado de la lámpara infrarroja que induce el efecto termoneumático de actuación. En el eje x se representa el tiempo de res-

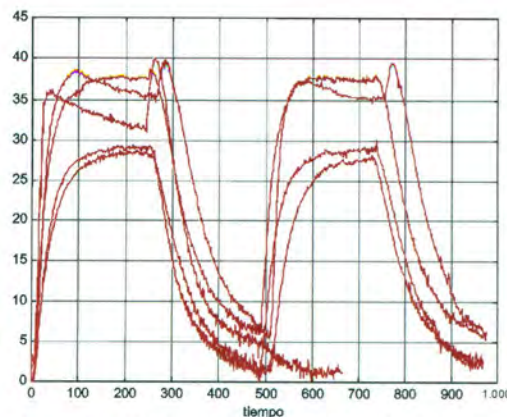


Figura 5. Respuesta temporal de la deflexión de una membrana de silicio. El eje de tiempo viene dado en segundos.

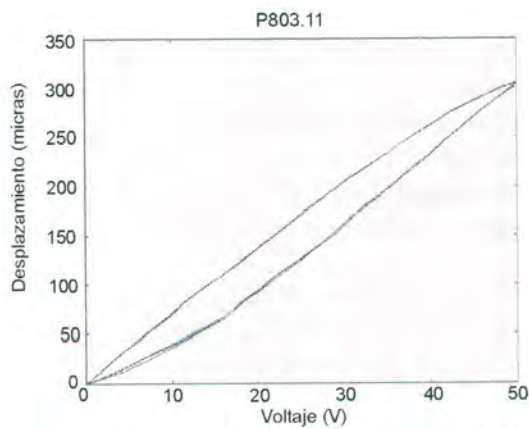


Figura 6. Característica V-d del PZT P803.11 de Physik Instrumente.

puesta de la membrana, correspondiente al encendido y apagado de la lámpara IR. En el eje y se representa la deflexión de la membrana en voltios equivalentes.

Las diferentes curvas corresponden a la respuesta temporal de una misma membrana, en cuya medición se ha variado la distancia de la bombilla IR. Aquí se puede concluir que la máxima deflexión corresponde a la distancia bombilla-membrana mínima, y viceversa. En otras palabras, la amplitud de la deflexión disminuirá en la medida en que se aleja la fuente de calor.

Con ayuda de la geometría del montaje (ángulo de medida y distancia membrana-PSD) y de la expresión (1), se puede realizar la conversión a los valores absolutos de deflexión, obteniéndose los valores esperados de entre 2 y 10 μm , según la distancia de la lámpara IR. Estos datos se corroboraron con otros métodos ópticos de tipo interferométrico [5, 6].

El resultado más directo que se obtiene de las medidas con el PSD es la respuesta dinámica de las membranas. En el ejemplo mostrado se observa una estabilización de la excursión del láser en aproximadamente cuatro minutos. Esta medida de tiempo también es coincidente con los métodos interferométricos.

Por otro lado, en la figura 6 se muestra el resultado obtenido por este método en la caracterización de piezoeléctricos. Específicamente, se ilustra la relación tensión-desplazamiento en $\text{V } \mu\text{m}^{-1}$, donde se puede concluir que el comportamiento del piezoeléctrico presenta histéresis, ya que para un mismo valor de voltaje corresponden dos valores de desplazamiento, dependiendo del estado inicial del piezoeléctrico. Así, la curva superior es la respuesta a partir de la posición de reposo, mientras que la curva inferior corresponde a la respuesta a partir de la situación de máxima deflexión.

CONCLUSIONES

En este artículo se ha planteado una técnica óptica para la medición de pequeños desplazamientos, basada en el método de triangulación con rayo láser.

En el montaje experimental se ha utilizado un láser con longitud de onda en el espectro visible, y aunque longitudes de onda en el infrarrojo también producirían los mismos resultados, la luz visible facilita el enfoque del haz sobre el objeto que hay que medir. Igualmente, como elemento sensor se empleó un PSD cuya señal de salida, una vez procesada, permite conocer directamente el valor del desplazamiento deseado.

La técnica propuesta se verificó con la caracterización de dos dispositivos: una micromembrana de silicio y un transductor piezoeléctrico. En las membranas fue posible determinar su respuesta dinámica, así como la excursión máxima de su deflexión, la cual varió entre 2 y 10 μm , según las condiciones experimentales. En el caso del PZT, fue posible determinar su curva característica de voltaje-desplazamiento.

La técnica presentada es versátil, fiable, reproducible, de fácil implementación y permite conocer con gran precisión desplazamientos del orden de las micras. Además tiene la ventaja añadida de ser un método no invasivo, ya que no altera la estructura, la geometría ni las propiedades físicas del dispositivo en estudio. Sin embargo, para la obtención de resultados de alta calidad, las mediciones se deben realizar en ambientes protegidos contra todo tipo de ruido, ya sea mecánico o eléctrico.

Por último, cabe destacar que debido a las características de ejecución, su carácter multidisciplinario y la cantidad de conceptos que intervienen en su realización, esta técnica se convierte en una alternativa que permite introducir temas de actualidad en los currículos de ciencias e ingeniería.

REFERENCIAS

- [1] Drake, B. *et al.* (1989). Imaging Crystals, Polymers and Processes in Water with Atomic Force Microscope. *Science*, 243, 1586-1589.
- [2] Ye, X. *et al.* (1995). Determination of the Mechanical Properties of Microstructures. *Transducers'95-Eurosensors IX*, 100-103.
- [3] Newcomb, C.V. & Flinn, I. (1982). Improving the Linearity of Piezoelectric Ceramic Actuators. *Electronic Letters*, 11, 442-444.
- [4] Croft, D. & Devasia, S. (1998). Hysteresis and Vibration Compensation for Piezoactuators. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 21, 5, September-October.
- [5] Duarte, J., Moreno, M., Martín-Bardosa, E., Esteve, J. & Acero, M. (1999). Design and Characterization of Thermally Actuated Bimetallic Membranes. *5th Thermic Workshop*, 3-6, October.
- [6] Duarte, J.E. (2001). Diseño y test de micromembranas actuadas ópticamente. *Tesis doctoral*. Universidad de Barcelona

Competencias: una forma de estandarización global

Luis Ernesto Blanco Rivero* y Cecilio Silveira Cabrera**

En este artículo se pretende destacar la importancia mundial que tiene actualmente el tema de las competencias como un medio que ayuda a la estandarización de las profesiones, de acuerdo con los trabajos realizados en la Unión Europea, en Estados Unidos y en Latinoamérica y el Caribe. Se presentan algunas definiciones de competencias y su clasificación, se señalan ciertas formas para implementar las competencias en los currículos de pregrado y se hacen algunos comentarios sobre su evaluación.

Palabras claves: competencias, tipos de competencias.

INTRODUCCIÓN

La educación superior colombiana se ha caracterizado por su dinámica y receptividad a los cambios en el sistema educativo impulsados desde el exterior y ha seguido temporalmente escuelas de pensamiento educativo como la española, la francesa, la alemana, la anglosajona y otras, sin detenerse a evaluar concienzudamente sus efectos. Las comunidades religiosas y las misiones extranjeras dejaron su impronta en generaciones de profesionales universitarios, sin que éstos tomaran conciencia de su marcada influencia.

ESTANDARIZACIÓN DE LAS PROFESIONES

Los cambios en los siglos XIX y XX se caracterizaron por ser lentos y porque sus efectos sólo se sintieron lustros después. Por el contrario, el siglo XXI

se distingue por el desarrollo vertiginoso de la ciencia y la tecnología, por grandes avances en los medios de comunicación y en el transporte, unidos a una elevada competitividad generada por empresas multinacionales y el interés estratégico por el control de los mercados mundiales, ejercido por los países desarrollados, produciendo el fenómeno de la globalización, que ha penetrado muy rápidamente en los sistemas educativos del mundo occidental y en el colombiano en particular.

En este nuevo contexto, la alta flexibilidad, la rápida respuesta al cambio, la visión global y la acción local son parámetros que deben tenerse en cuenta para la formación de las nuevas generaciones de profesionales.

Ya algunos profesores universitarios han tomado conciencia de que el fenómeno de la globalización llegó a Colombia, cuando en sus cursos de capacitación a empresas ven con sorpresa que 90% de sus alumnos son extranjeros, o cuando encuentran una amplia oferta de posgrados de universidades de otros países; otros, en cambio, ni siquiera lo han notado.

Como una tendencia marcada de la

Las comunidades religiosas y las misiones extranjeras dejaron su impronta en generaciones de profesionales universitarios, sin que éstos tomaran conciencia de su marcada influencia.

estructura de una sociedad globalizada, los bloques económicos como el Mercado Común Europeo, el Acuerdo de Libre Comercio de las Américas (Alca), el mercado asiático –incluyendo a China–, se han

venido consolidando, con exigencias internas tales como una elevada movilidad de profesionales generada por la oferta de servicios. Esto ha llevado a los líderes de los grupos de países a redefinir sus sistemas educativos, a estandarizarlos y a acreditarlos.

La sociedad actual es llamada *la sociedad del conocimiento*, para señalar la importancia de la formación continua de los profesionales, hasta el punto de considerar el conocimiento un cuarto factor de producción de los bienes

* Licenciado en matemáticas, ingeniero, magíster y candidato a doctor en ingeniería industrial. Profesor y decano de la Facultad de Ingeniería Industrial de la Escuela Colombiana de Ingeniería. lblanco@escuelaing.edu.co

** Licenciado en física, especialista en microelectrónica e inteligencia artificial y máster en informática. Profesor de la Escuela Colombiana de Ingeniería. esilveir@escuelaing.edu.co

materiales y los servicios, con papel preponderante dentro de una perspectiva globalizada.

Desde la Unesco se predicán cuatro directivas para la educación del mundo: “Aprender a conocer”, “Aprender a hacer”, “Aprender a vivir juntos”, “Aprender a ser” y “Educación para toda la vida”, que reta a los sistemas educacionales a *brindar a cada cual los medios entre el trabajo y el aprendizaje* para que cada ser humano pueda ejercer como *ciudadano de bien* (Delors, 1997)¹. Estos “aprenderes” no son otra cosa que las competencias.

La Comisión Europea, en el marco del programa Sócrates, ha venido ejecutando el proyecto Tuning², con la participación de 16 países europeos, para considerar los títulos universitarios europeos en términos de resultados del aprendizaje, particularmente en forma de competencias genéricas y específicas a cada área temática (González y Wagenaar, 2003)³, con el fin de estandarizar sus homologaciones académicas y las titulaciones.

Los jefes de Estado de la Unión Europea y de Latinoamérica recomendaron el desarrollo, aprobación y promoción de un plan de acción para la construcción de un Espacio Común para la Enseñanza Superior Unión Europea-América Latina y el Caribe (Uealc)⁴, en el cual participa Colombia por intermedio de la Asociación Colombiana de Universidades (Ascun). El objetivo general de dicho plan es “establecer las condiciones operativas que propicien una mayor *compatibilidad y convergencia* de los sistemas de educación superior de Latinoamérica y el Caribe, así como su *comparación y acercamiento* con los de la Unión Europea, mediante el diálogo y el trabajo cooperativo entre las instituciones y asocia-

ciones de ambas regiones”, que no es otra cosa que una nueva forma de estandarización global. En su tercera estrategia, el proyecto 6X4 Uealc se propone analizar cada profesión en forma integral, a través de cuatro ejes de análisis para la cooperación: *competencias profesionales*, créditos académicos, evaluación y acreditación, y formación para la innovación e investigación.

En Estados Unidos, el Accreditation Board of Engineering and Technology (Abet), entidad acreditadora de programas de ingeniería, impulsa la ac-

no competencias (cognitivas, comunicativas, interpretativas, argumentativas, propositivas, etc.) que aparecen inmersas en los indicadores de alta calidad del Consejo Nacional de Acreditación (CNA)⁵ y en las políticas del Ministerio de Educación Nacional.

Los Exámenes de Calidad de la Educación Superior (Ecaes), elaborados por el Instituto Colombiano para el Fomento de la Educación Superior (Icfes), pretenden medir competencias e inducir a las instituciones de educación superior a su práctica cotidiana.

Muchos profesores universitarios que se sorprendieron inicialmente con el término *competencia*, quizás por la novedad, al entenderlo concluyeron que realmente no es nada nuevo y que han venido trabajando con *competencias*, desde hace tiempo, sin mayor o menor grado de teorización acerca de ellas.

Por otra parte, los miembros de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (Acofi) están plenamente convencidos de la importancia y de la necesidad de afrontar con seriedad el tema de las competencias como un medio que ayudará a la estandarización de las profesiones, de acuerdo con las tendencias internacionales, razón por la cual ha dedicado y dedicará algunos de sus eventos regionales y nacionales para que los profesores de ingeniería tomen conciencia de la trascendencia de entender bien, desde el punto de vista conceptual y metodológico, el concepto *competencias*, su clasificación y especificidad en los programas de ingeniería.

Como se puede apreciar, en casi todo el mundo accidental y desde muchos frentes se está propiciando la generalización del uso de las competencias como una manera de estandarizar los resultados del aprendizaje, el saber hacer y las titulaciones.



Los Exámenes de Calidad de la Educación Superior (Ecaes), elaborados por el Instituto Colombiano para el Fomento de la Educación Superior (Icfes), pretenden medir competencias e inducir a las instituciones de educación superior a su práctica cotidiana.

tualización curricular permanente de sus miembros, a través de criterios anuales de acreditación cada vez más exigentes, así como la implementación de competencias y de su evaluación.

En Colombia, como se comentó anteriormente, se han aplicado muchas teorías sin una evaluación cuidadosa, entre las que se pueden mencionar la planeación estratégica y el despliegue en políticas y objetivos; la elaboración de perfiles profesionales; la fijación de objetivos, considerados éstos capacidades y habilidades que se adquieren al final de los cursos; el planteamiento de logros o desempeños al final de los cursos; y ahora se introduce el térmi-

QUÉ SON COMPETENCIAS

Históricamente, el término competencia ha tenido varios usos y ha cambiado de significados a través del tiempo. Son conocidos a escala mundial los trabajos sobre competencias laborales de McClelland (1998)⁶, así como los de competencias lingüísticas de Chomsky (1990)⁷ y de gestión de competencias de Levy-Levoyer (1997)⁸. En la literatura el término ha sido caracterizado, definido, descrito, clasificado por diferentes autores, para el campo educacional y productivo, donde la mayoría coincide en la forma de actuación del sujeto en interacción con el objeto, en su estructura y sus componentes. Se revisaron algunos trabajos para buscar una definición categórica que las sintetizara. Se propone la siguiente:

Concepto sistémico de competencia

La competencia es una categoría didáctica - dialéctica⁸ que describe el comportamiento y las características o atributos de una persona en interacción con su entorno, en un ambiente determinado y en un marco de tiempo. Está integrada por tres componentes: a) cognitiva, b) procedimental, c) afectiva o social.

La competencia se fundamenta en los tres pilares mencionados, pero ninguno de ellos es en sí mismo una competencia, porque ésta se concreta en una acción y en un ambiente. La competencia caracteriza la formación del individuo, que está determinada a su vez por la función que desempeña éste en la sociedad. El entorno son las asociaciones, comunidades, grupos, sociedades, etc., donde el individuo como ser social interactúa, se desarrolla, transforma y se transforma.

a) Componente cognitiva

La componente cognitiva son los conocimientos teóricos que posee el individuo para desempeñarse o para resolver problemas en un contexto determinado. Es la base del conocimiento: el cuadro científico del mundo, el sistema de conceptos, las leyes, los principios, las teorías, los modelos, los hechos y los fenómenos.

b) Componente procedimental

La componente procedimental es el sistema de habilidades, destrezas y hábitos que posee el sujeto para aplicar los conocimientos teóricos, desempeñarse o realizar una tarea con eficiencia probada en un ambiente determinado.

c) Componente afectiva

La componente afectiva relaciona al individuo con los demás seres sociales. Se identifica con las competencias ciu-

dadanas, como los conocimientos, las habilidades, aptitudes y actitudes que le sirven para convivir con otros, para comunicarse con otros y en unión con otros para transformar el ambiente, el contexto o entorno, que individualmente no podría.

Para la Unesco, la educación centrada en competencias es una estrategia educativa basada en la identificación, la evidencia, y el aprendizaje de los conocimientos, las capacidades, las actitudes y los comportamientos necesarios para cumplir un rol particular, ejercer una profesión y desempeñarse en una actividad determinada.

En el marco del trabajo que desarrolla Acofi para el Icfes, se utiliza la siguiente definición:

“Competencia es una combinación adecuada de conocimientos, habilidades y actitudes necesarias para realizar adecuadamente una tarea, acción o proceso intelectual propios del desempeño profesional en un contexto definido”⁹.

En esta definición de competencia, los conocimientos incluyen procesos memorísticos y de conceptualización. Esto sugiere que cada vez que se hable de conocimientos se requieran, además de procesos memorísticos, procesos de análisis, entendimiento, profundización y de síntesis (Sparkes, 1990)¹⁰.



CÓMO SE CLASIFICAN LAS COMPETENCIAS

La división de las actividades productivas y sociales constituye de hecho una modalidad necesaria de organización de la sociedad humana civilizada, apoyada en un criterio funcional de reparto de papeles o roles sociales. La atomización, cada vez mayor, de las *funciones* que los individuos deben cumplir ha provocado que los mismos tengan que poseer conocimientos, habilidades, destrezas, aptitudes y actitudes determinadas, es decir, unas *competencias* acordes con la actividad productiva o social que se va a realizar.

Las competencias se clasifican según el nivel de actuación del individuo en la estructura de la sociedad en:

- Competencias ciudadanas
- Competencias laborales o productivas
- Competencias profesionales

- Competencias genéricas profesionales
- Competencias específicas profesionales
- Competencias básicas profesionales

Competencias ciudadanas

La sociedad requiere un individuo con determinadas cualidades, que responda a sus intereses individuales y a los de la comunidad, para su subsistencia; unos individuos con ciertas competencias individuales imprescindibles para la supervivencia en sociedad, denominadas competencias Ciudadanas¹¹.

Las competencias ciudadanas se encuentran ligadas al desarrollo y estructura de la sociedad, pues son los individuos los poseedores de tales cualidades, para responder a unas determinadas exigencias sociales.

Las competencias *ciudadanas*, según Chauv [2004]¹² son los conocimientos, habilidades y actitudes que permiten que

el ciudadano actúe de manera constructiva en la sociedad democrática y la acción ciudadana es el objetivo fundamental de éstas. Este autor considera que los ciudadanos deben tener competencias ciudadanas *cognitivas, emocionales, comunicativas e integradoras* para poder interactuar en sociedad.

Las competencias ciudadanas *cognitivas* son capacidades para desarrollar diversos procesos mentales para el ejercicio de la ciudadanía, como las siguientes:

- Habilidad para comprender los diferentes puntos de vista de los demás y lograr acuerdos.
- Capacidad para evaluar las intenciones y propósitos de los demás.
- Capacidad para generar opciones de solución a un conflicto.
- Capacidad para evaluar la validez de creencias, afirmaciones o fuentes de información.

Las competencias ciudadanas *emocionales* son capacidades para responder ante las emociones propias y las de los demás. Entre éstas están:

- Capacidad para reconocer y dominar las emociones propias.
- Capacidad para dar respuesta a las emociones propias, tener dominio propio.
- Capacidad para identificar y sentir lo que otros sienten.

Las competencias ciudadanas *comunicativas* son capacidades para comunicarse con otros de manera efectiva. Entre éstas se encuentran:

- Saber escuchar y estar atento a comprender lo que los demás están tratando de decir.
- Capacidad de expresar las necesidades, intereses, posiciones, derechos e ideas, de manera clara y enfática.
- Capacidad de expresar y sustentar una posición, para que los demás puedan comprenderla y evaluarla.

Las competencias ciudadanas *integradoras* articulan las anteriores, como por ejemplo la capacidad de negociación y de resolución pacífica de conflictos.

Competencias laborales

La clasificación de las competencias responde al diferente carácter de las personas dentro de la actividad productiva en la sociedad, como trabajadores o profesionales

El psicólogo y profesor de la Universidad de Harvard, David McClelland, es considerado el pionero de las competencias laborales y fue quien manifestó por primera vez que “los tradicionales exámenes académicos no eran garantía para el trabajo y el éxito en la vida”. Afirmó que era necesario buscar otras variables –competencias– que podrían predecir cierto grado de éxito, o al menos, tener menor sesgo en el momento de evaluar a los individuos.

Competencias laborales¹³ es el conjunto de comportamientos, conocimientos teóricos, habilidades, destrezas, aptitudes y actitudes empleados por el trabajador en el desempeño de su ocupación o cargo, en correspondencia con el perfil profesional, los principios de idoneidad y los requerimientos técnicos, productivos y de servicios, así como los de calidad, que se le exigen para el adecuado desenvolvimiento de sus funciones¹⁴. Por ejemplo, en el Servicio Nacional de Aprendizaje (Sena) se tiene la descripción de competencias laborales de las técnicas que allí se enseñan, y en los perfiles laborales de los cargos de muchas empresas se describen las competencias que el aspirante a un cargo debe poseer.

Competencias profesionales

Las competencias *profesionales* se pueden considerar un subconjunto de las competencias laborales y están relacionadas con el ejercicio calificado de una profesión. Se definen como el conjunto de conocimientos, habilidades, destrezas y actitudes que debe poseer un profesional para el desempeño calificado de su actividad. Estas competencias responden a un perfil profesional en correspondencia con un objeto de estudio o campo del saber específico. Por ejemplo: ciencias naturales y exactas, ingeniería y arquitectura, ciencias médicas, etcétera.

Las competencias ciudadanas se encuentran ligadas al desarrollo y estructura de la sociedad, pues son los individuos los poseedores de tales cualidades, para responder a unas determinadas exigencias sociales.

Las competencias profesionales se pueden clasificar a su vez en competencias genéricas y específicas.

Competencias genéricas profesionales

Las competencias genéricas profesionales son comportamientos laborales relacionados con desempeños comunes a profesiones y ramas de la actividad productiva. Por ejemplo, las competencias genéricas de los ingenieros, las de los médicos o agrónomos.

La clasificación de las competencias genéricas hecha por los autores del proyecto Tuning identifica elementos

- Capacidad crítica y autocrítica.
- Capacidad de adaptarse a nuevas situaciones.
- Capacidad para generar nuevas ideas (creatividad).
- Capacidad de resolución de problemas.
- Capacidad de manejo y solución de conflictos.
- Capacidad para la toma de decisiones.
- Habilidades de trabajo en equipo.
- Habilidades en relaciones interpersonales.

No es difícil apreciar que algunas competencias genéricas también son competencias ciudadanas.



Las competencias genéricas profesionales son comportamientos laborales relacionados con desempeños comunes a profesiones y ramas de la actividad productiva.

Competencias específicas profesionales

Las competencias específicas están directamente relacionadas

con el ejercicio de una función concreta y no son fáciles de transferir de una profesión a otra, dadas las características tecnológicas. Por ejemplo, análisis y diseño de un sistema, diseño de un puente, diseño de procesos productivos, técnicas de muestreo y diseño de experimentos, etc.

Según el estudio Tuning, las competencias específicas que un estudiante debe poseer al terminar sus estudios de pregrado son:

- Capacidad de análisis y síntesis.
- Capacidad de aplicar los conocimientos en la práctica.
- Habilidades de planificación y gestión del tiempo.
- Comunicación oral y escrita, en la lengua propia.
- Conocimiento de una segunda lengua.
- Habilidades básicas en el manejo del computador.
- Habilidades de investigación.
- Capacidad de aprender autónomamente.
- Habilidades de gestión de información (buscar y analizar información proveniente de fuentes diversas).

con el ejercicio de una función concreta y no son fáciles de transferir de una profesión a otra, dadas las características tecnológicas. Por ejemplo, análisis y diseño de un sistema, diseño de un puente, diseño de procesos productivos, técnicas de muestreo y diseño de experimentos, etc.

Según el estudio Tuning, las competencias específicas que un estudiante debe poseer al terminar sus estudios de pregrado son:

- Demostrar familiaridad con las bases fundamentales y la historia de su propia disciplina de especialización.
- Comunicar en forma coherente el conocimiento básico adquirido.
- Incorporar información nueva e interpretar su contexto.

• Demostrar que comprende la estructura general de la disciplina y la conexión con las subdisciplinas.

• Demostrar que comprende y es capaz de implementar los métodos de análisis crítico y desarrollo de teorías.

• Implementar con precisión los métodos y las técnicas referentes a su disciplina.

• Demostrar que comprende la investigación cualitativa relacionada con su disciplina.

• Demostrar que comprende las pruebas experimentales y de observación de las teorías científicas.

Competencias básicas profesionales

Se definen como comportamientos profesionales elementales que deben mostrar los individuos, y se asocian a los conocimientos, habilidades, destrezas, hábitos, aptitudes y actitudes básicas para un desempeño eficiente y efectivo en su formación como profesional. Constituyen el soporte conceptual y metodológico de otras competencias. Tienen que ver con la capacidad de comunicación, de expresión, de leer e interpretar textos, y la capacidad numérico-matemática. En conclusión, es la capacidad de aprender a aprender, entre otras.

Las competencias *básicas profesionales*, que son los fundamentos de cada profesión, se tienden a confundir con las competencias genéricas. Por ejemplo, los conocimientos, habilidades y destrezas en química son competencias básicas para un ingeniero industrial y no necesariamente para un ingeniero de sistemas. Se puede hablar también de competencias *básicas comunes* de un área de estudio, como por ejemplo en la ingeniería: matemática, física, diseño y programación de computadores.

ORGANIZACIÓN DEL CURRÍCULO POR COMPETENCIAS

El título del artículo sugiere, de alguna manera, que las competencias podrán usarse para estandarizar las profesiones en el mundo y ese es precisamente uno de los objetivos del proyecto Tuning en Europa y Latinoamérica. Además, las entidades acreditadoras de alta calidad, como sucede con el CNA y Abet de manera implícita o explícita, a través de sus indicadores orientan su implementación. Habrá que discutir si estas políticas violan la autonomía de las universidades.

Por otra parte, las personas son bien diferentes; por ejemplo, en una familia hay hijos que tienen los mismos genes, la misma educación, el mismo ambiente y son totalmente distintos. La estandarización es propia de ambientes industriales y los seres humanos son difíciles de estandarizar. Sin embargo, detrás del proyecto Tuning y del acuerdo Uealc, como se comentó antes, se encuentran los mandatarios de los países firmantes y la Unesco.

La lógica y la experiencia que la mayoría de los profesores poseen en el diseño y organización de currículos, junto a un mediano entendimiento de la conveniencia de organizarlos utilizando las competencias como criterio de compatibilidad y estandarización, permiten pensar que el punto de partida debe ser la definición de un perfil profesional lo más detallado posible y la misión del programa o de la institución, seguidos por un listado muy completo de las competencias ciudadanas, profesionales, genéricas, específicas y básicas profesionales, que se pretende que el futuro profesional posea después de su trasiego por las distintas etapas del proceso de formación. Las competencias del egresado serán todos los conocimientos, las habilidades y capacidades para hacer o emprender

acciones relacionadas con la profesión (figura 1).



Figura 1. Competencias que deben quedar explícitas en el currículo.

En Europa, Estados Unidos y Colombia está sobre el tapete la discusión de si los programas de pregrado deben tener una duración de 160, 140 o 120 créditos, complementados con 30 créditos de maestría. Es evidente que la reducción en el número de créditos puede verse como un estúpido negocio para las universidades, pero queda siempre la pregunta de si se estará o no disminuyendo la calidad de la educación superior. El dilema se puede resolver definiendo muy bien las competencias que los estudiantes deberán cumplir al final de sus estudios, dejando de lado el tiempo que requieran para lograrlos.

UN EJEMPLO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

El grupo de trabajo de ingeniería industrial de Acofi, encabezado por Yezid Pérez¹⁵, presentó en Barranquilla una propuesta de competencias profesionales específicas para un ingeniero industrial.

“Se espera que el ingeniero industrial esté en capacidad de:

a) Aplicar críticamente conocimientos científicos, matemáticos, huma-

nísticos y de la ingeniería para mejorar el desempeño de las organizaciones y de sistemas complejos que involucran al ser humano.

b) Concebir, diseñar e implementar soluciones a problemas de las organizaciones y de otros sistemas complejos mediante el diseño e implementación de sistemas que involucren recursos y elementos de producción, de información, financieros, humanos, económicos, organizacionales, tecnológicos, entre otros. El fin primordial del ingeniero industrial es la optimización constante de los procesos productivos alrededor de los bienes y servicios, comprendiendo que cada uno de estos procesos se encuentra inmerso en una organización única, con diferentes tipos de recursos y con una misión y una visión propias.

c) Ser capaz de identificar y analizar los problemas organizacionales desde una perspectiva financiera y económica, para poder así proponer y evaluar alternativas de solución a dichos problemas.

d) Comprender y manejar la incertidumbre asociada a la toma de decisiones para la solución de problemas, y hacer uso de modelos probabilísticos y estadísticos que le permitan tomar decisiones más acertadas y razonadas.

e) Analizar información mediante el uso de técnicas cuantitativas y, a partir de ellas, concebir, evaluar y justificar alternativas de solución de problemas.

f) Identificar y formular problemas organizacionales a los que se enfrenta, planteando alternativas de solución de manera estratégica e incorporando la teoría organizacional y el pensamiento sistémico para evaluar integralmente dichas opciones, así como proponer mecanismos para su implantación.

g) Comprender los problemas básicos asociados a los procesos y la gestión de operaciones, al igual que aplicar modelos, principios y conocimientos apropiados para el análisis, el diseño y

la evaluación de estos sistemas y procesos con el fin de aumentar la eficiencia, eficacia y efectividad de la producción de bienes y servicios de calidad.

h) Interesarse por la apropiación y el desarrollo del conocimiento científico y tecnológico, y tener la capacidad de entender y aplicar las herramientas tecnológicas necesarias para el análisis de los fenómenos del mundo real con el fin de interpretarlos, valorarlos y dar soluciones a problemas del entorno con visión innovadora. Conocer, aplicar, implementar y evaluar tecnologías duras y blandas relacionadas con la ingeniería, necesarias para una efectiva, idónea y responsable práctica profesional.

i) Entender la responsabilidad ética, ambiental y profesional en el desempeño de la ingeniería, teniendo en cuenta la sociedad y su relación con el medio ambiente, enmarcada en la relación individuo-sociedad-ambiente.

j) Desarrollar las habilidades y destrezas para movilizar el talento humano, para diseñar, facilitar y liderar procesos de cambio en las organizaciones e instituciones, y para el emprendimiento y la creación de empresas. Así mismo, estar en capacidad de organizar, coordinar y participar en proyectos multidisciplinarios, interdisciplinarios y transdisciplinarios, y de mantener interacción permanente con profesionales de otras disciplinas.

k) Entender al ser humano como un elemento indispensable en todos los procesos productivos y preocuparse por alcanzar su máxima productividad, teniendo en cuenta sus dimensiones física, intelectual, psicológica y trascendente. Además, proteger continuamente su integridad y dignidad humana”.

El perfil de ingeniero industrial que se pretende lograr con estas competencias es el siguiente:

“Profesionales que apliquen sus conocimientos y habilidades para el diseño, planeación, gestión, optimización y control de sistemas de producción de bienes y servicios en organizaciones o en sistemas complejos, los cuales involucran personas, así como recursos financieros, técnicos, materiales y de información en busca de mejores indicadores de desempeño que contribuyan al desarrollo socioeconómico de la región y el país, teniendo en cuenta el entorno local, nacional e internacional”.

El trabajo que está realizando Acofi puede servir de base para el diseño de los contenidos curriculares de los programas de ingeniería industrial con base en competencias, como un intento de estandarización básico.

Una vez tomada la decisión sobre el número de créditos del programa, el siguiente paso consistirá en distribuir porcentualmente el plan de estudios¹⁶, en ciencias básicas (20-25%), ciencias básicas de ingeniería (20-25%), aplicaciones de ingeniería (25-35%), sociohumanísticas (10-15%), económico-administrativas (10-15%) para el caso de ingeniería industrial, y analizar con mucho cuidado cuáles deberán ser los conocimientos nucleares de dichas áreas y las competencias que se pretenden lograr en cada una de ellas.



La evaluación por competencias se utiliza para decidir qué acción tomar para lograr una misión y unos objetivos que se proponen. En este caso, el perfil del ingeniero en forma de competencias es importante en cuanto signifique acción.

El paso siguiente será armar las materias con sus créditos y contenidos programáticos específicos, señalando cuáles competencias se quieren cumplir, cómo

se evaluarán y cuáles serán los indicadores de cumplimiento.

EVALUACIÓN DE COMPETENCIAS

La evaluación por competencias es el proceso mediante el cual se reconocen los conocimientos, las habilidades y las actitudes de un sujeto, independientemente de cómo las haya adquirido.

La evaluación debe estar presente en todo el proceso de formación, como un proceso participativo y desarrollador. Debe ser dinámica porque se corresponde en la misma medida en que el estudiante desarrolla sus competencias, en la

comunicación que se establece entre estudiante y docente. Ha de ser sistémica porque se instauran diferentes formas de comprobación, retroalimentación, motivación y control. Debe ser formativa porque tiene que propiciar la motivación, la detección de deficiencias, la autoevaluación del estudiante, y permitir la retroalimentación del propio proceso de formación, el reajuste y comprobación del logro de la competencia prevista.

La evaluación por competencias se utiliza para decidir qué acción tomar para lograr una misión y unos objetivos que se proponen; en este caso, el perfil del ingeniero en forma de competencias es importante en cuanto signifique acción¹⁷.

Cuando se entienden el significado y el objetivo de una planeación del currículo por competencias, no es muy complicado entender que los exámenes estandarizados de evaluación, como los utilizados por el Icfes en los Ecaes, únicamente evalúan conocimientos desde la perspectiva de evocación memorística y algo de comprensión y entendimiento.

En la Escuela Colombiana de Ingeniería, desde 1998, se desarrolla un evento cada año, en principio local, que posteriormente ha logrado la participación de un buen número de instituciones educativas de niveles medio y superior, denominado ECIciencia, en el que mediante concursos, exposiciones, proyectos, se evalúa la creatividad de grupos de trabajo, en diseño de soluciones a problemas específicos como por ejemplo una canoa de hormigón que no se hunda en el lago de la Escuela, un aparato que lance una bola lo más lejos posible utilizando energía potencial, maratones de programación, concurso de pórticos y techos, concurso de robots, etcétera. Este tipo de proyectos, como conjunto de posibles soluciones a problemas específicos, puede ser una opción para evaluar competencias de creatividad, trabajo en equipo, conocimientos en forma de conceptos y toda una gama de habilidades artísticas, musicales, teatrales y otras.

CONCLUSIONES

Actualmente, cuando las universidades colombianas se enfrentan a tomar la decisión de disminuir o no el número de créditos de los programas académicos y a la revisión de sus currículos, es una buena oportunidad para ensayar una planeación curricular desde la perspectiva de las compe-

tencias, que puede ayudar a buscar cierta uniformidad en los contenidos que se enseñan y en las competencias que se pretende que los profesionales adquieran en cada disciplina.

Además, la moda y la imposición de modelos teóricos por parte de Unesco y de entes financieros como el Banco Mundial obligan a las universidades a evaluar el efecto de las nuevas propuestas, para apropiarse aquellas que pueden generar efectos positivos en el sistema educativo colombiano y desechar las que no aporten nada en la construcción de soluciones autóctonas a la problemática nacional.

Acofi, como entidad gremial de los programas de ingeniería y como proponente de nuevos exámenes estandarizados de evaluación de calidad, utilizando el modelo de competencias, debe buscar alternativas, como las pruebas, exposiciones y concursos que se evalúan en ECIciencia, si quiere liderar el trabajo con competencias y con su evaluación en un futuro no muy lejano.

El trabajo que está realizando Acofi puede servir de base para el diseño de los contenidos curriculares de los programas de ingeniería industrial con base en competencias, como un intento de estandarización básico.

REFERENCIAS

1. Delors, Jack (1997). *La educación encierra un tesoro*. Unesco.
2. Tuning.
3. González, Julia & Wagenaar, Robert (2003). "Tuning Educational Structures in Europe. Informe Final Fase Uno". Universidades de Deusto y Gröningen.
4. Uealc (2004). "Seis profesiones, cuatro ejes: un diálogo universitario". Plan 4X6. México: Ceneval y Unión Europea: Colombia, septiembre.
5. Indicador de competencias cognitivas.
6. McClelland, David (1998). *Human Motivation*. Cambridge University Press.
7. Chomsky, Noam (1990). *Estructuras sintácticas*. México: Editorial Siglo XXI.
8. Levy-Levoyer, Claude (2000). *Gestión de las competencias*. Barcelona: Ed. Gestión.
9. Didáctica: arte de enseñar. Dialéctica: arte de razonar metódica y justamente.
10. Sparkes, John (1990). "Quality in Engineering Education", *International Journal of Continuing Engineering Education*, vol. 1, N° 1.
11. Chau, Enrique et al. (2004). *Competencias ciudadanas: de los estándares al aula*. Bogotá: Uniandes.
12. Chau Enrique et al. (2004). *Competencias ciudadanas: de los estándares al aula. Una propuesta de integración a las áreas académicas*. Bogotá, Uniandes, MEN.
13. Modelo cubano para la formación por competencias laborales: una primera aproximación.
14. (Según la resolución ministerial 21/99 del CETSS). Cuba.
15. Pérez, Yezid, Berdugo, Carmen & Pinzón, Luis (2005). "Estándares para el desarrollo de marcos de fundamentación conceptual y especificaciones de prueba". Acofi, Reunión sobre competencias. Barranquilla, marzo.
16. Acofi (1997). "Proyectos de decreto - estructura curricular básica". Bogotá.
17. Smith, Carlos (2004). "Assessment, una herramienta para el mejoramiento de la calidad de los programas de ingeniería". Cartagena: Acofi, XXIV Reunión Nacional, septiembre

La función: una experiencia con estudiantes de cálculo diferencial en ingeniería

Sandra Gutiérrez O.*, Viviana Bernal C.**, Guiomar Lleras M.***, Clara Triviño P.****

En este artículo se presentan algunos aspectos relacionados con una investigación realizada en la Escuela Colombiana de Ingeniería en el año 2004, en el área de cálculo diferencial. El objetivo de ésta fue indagar sobre los alcances de la aplicación de una estrategia pedagógica en la adquisición del concepto de función. El estudio se apoyó en la teoría de aprendizaje propuesta por el profesor Dubinsky¹ y sus colaboradores, la cual se conoce como teoría Apoe.

Palabras claves: didáctica de la función, aprendizaje colaborativo, programación Isetl.

INTRODUCCIÓN

Entre los conceptos medulares de los cursos de matemáticas para ingeniería se encuentra el de función, considerado por algunos investigadores como de gran complejidad y uno de los causantes de las dificultades del aprendizaje del cálculo.

Este concepto no es desconocido por los estudiantes que inician el estudio del cálculo. Sin embargo, se observa que el manejo que tienen de él es inadecuado, como lo afirman diferentes investigaciones, y es precisamente esta asignatura, según Artigue (1998)^[1], la que permitirá conceptualizarlo.

Se espera que el estudiante adquiera una imagen madura del concepto de función, para así poder tener un manejo adecuado, tanto de éste como de los demás conceptos asociados al mismo, ya que es el eje de los cursos del área de matemáticas.

Vale la pena señalar que el aprendizaje y la enseñanza del concepto de función se han estudiado ampliamente, pero los resultados que se reportan están dirigidos al nivel de educación secundaria; de ahí el interés de buscar formas de enseñanza que permitan una mejor adquisición de este concepto a nivel universitario. Es así como se realizó un trabajo de investigación en cálculo diferencial, en el que se explo-

ra la adquisición del concepto de función con una propuesta pedagógica que incluye el uso de la programación de computadores y el aprendizaje cooperativo.

MARCO CONCEPTUAL

Entre las investigaciones que consideran la función, existen diferentes enfoques para su estudio. Algunas se centran en las dificultades con la identificación del concepto (Vinner,

1983, citado por Artigue^[1], Ruiz^[2]), las que consideran los obstáculos para pasar del concepto visto como *proceso* al concepto visto como *objeto* (Dubinsky & Harel, 1992; Sfard, 1989, citados por Artigue^[1]), las que

estudian la articulación de los registros de representación (Duvall^[3]), así como las que hacen propuestas para su enseñanza (Azcárate^[4], Shell Centre for Mathematical Education, citado por Font^[5]).

Nuestra investigación se inscribe dentro de la línea que considera la función como *proceso* y *objeto*, en la que han trabajado Dubinsky y sus colaboradores, quienes tomaron de la teoría de Piaget los perfiles que consideraron esenciales y los reorganizaron o reconstruyeron, dando origen a la teoría Apoe².

La hipótesis en que se basa esta teoría plantea que “el conocimiento ma-

El aprendizaje y la enseñanza del concepto de función se han estudiado ampliamente, pero los resultados que se reportan están dirigidos al nivel secundario.

* Licenciada en matemáticas de la Universidad Pedagógica Nacional. Ingeniera civil y profesora asistente de la Escuela Colombiana de Ingeniería. Estudiante de maestría en docencia de la matemática de la Universidad Pedagógica Nacional

sgutierr@escuelaing.edu.co.

** Ingeniera civil, especialista en estructuras y profesora asistente de la Escuela Colombiana de Ingeniería vbernal@escuelaing.edu.co.

*** Licenciada en matemáticas de la Universidad de los Andes. Magistra en investigación y tecnología educativa de la Pontificia Universidad Javeriana. Profesora asociada de la Escuela Colombiana de Ingeniería glleras@escuelaing.edu.co.

**** Ingeniera civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería. Especialista en planificación de sistemas energéticos del Instituto Nacional Politécnico de Grenoble (Francia). Profesora asistente de la Escuela Colombiana de Ingeniería ctriviño@escuelaing.edu.co.

temático de un individuo es su tendencia a responder a los problemas matemáticos para reflexionar sobre éstos en un ambiente social, construir o reconstruir las estructuras mentales y organizarlos en esquemas para tratar dichas situaciones” (Dubinsky, p. 4^[6]).

El propósito de la misma es ayudar a los estudiantes a construir las estructuras necesarias para que aprendan las matemáticas avanzadas (nivel postsecundario). Estas construcciones son *acciones, procesos y objetos*, que se organizan en *esquemas*, y que no necesariamente se presentan en un orden estricto, debido a que existen factores tales como los esquemas preexistentes en el individuo y el tipo de concepto que se construye.

Se define la *acción* como una transformación física o mental de objetos, que el individuo percibe hasta cierto punto como externos, por lo cual necesita indicaciones sobre los pasos que hay que seguir para realizar la transformación. Las acciones determinan en el sujeto el principio del entendimiento de un concepto. En particular para la función, se dirá que el estudiante domina el concepto como *acción* si es capaz de evaluar una función en puntos específicos, a partir de una expresión algebraica.

Cuando el sujeto repite y reflexiona sobre una acción, comienza a tomar control consciente de ella y la *interioriza*, la convierte en un *proceso*; es decir, se ha hecho una construcción interna que ejecuta la misma acción pero sin la necesidad del estímulo externo. Cuando se ha construido un proceso, es posible describirlo o aun *revertirlo*.

El estudiante maneja el concepto de función como *proceso*, cuando por ejemplo piensa la función como algo que recibe entradas (no necesariamente números) y da resultados. En el caso particular de las funciones trigonométricas, es necesario que maneje el concepto de función como un proceso; puesto que no son explícitas las operaciones que debe realizar, ha de tener claro que para cada entrada existe una salida dada por la función trigonométrica que esté trabajando.

Se dice que el individuo ha *encapsulado* un proceso como un *objeto* cognitivo, cuando al reflexionar sobre las acciones aplicadas al proceso y adquirir conciencia de éste como un todo, se da cuenta de que hay transformaciones (acciones o procesos) que actúan sobre el proceso y es capaz de construir las. Adicionalmente, el sujeto está en capacidad de desencapsular el objeto al proceso del cual se obtuvo.

El concepto de función se domina como *objeto*, por ejemplo, cuando se expresa una función como el resultado de la operación entre otras funciones, o se consideran funciones separadamente como objetos y se operan para obtener un nuevo objeto, es decir, una nueva función.

Por último, un *esquema* para un concepto matemático es el conjunto de acciones, procesos, objetos y otros esquemas que posee el individuo, que interrelacionados por principios generales constituyen un marco de referencia en la mente del sujeto para enfrentar los problemas que involucran el concepto. Este marco de referencia debe ser coherente en el sentido de dar los medios para determinar cuáles fenómenos están al alcance del esquema y cuáles no.

La principal dificultad que han encontrado Dubinsky y su grupo de investigación al extrapolar las ideas de Piaget radica en que “en la teoría de Piaget el entendimiento conceptual tiene su fuente en la manipulación de los objetos físicos. Conforme el nivel matemático de los conceptos aumenta, es necesario, según Piaget, construir objetos nuevos, no más físicos sino mentales, y manipularlos con el fin de construir las ideas matemáticas” (Dubinsky, p. 28^[7]).

Con el propósito de superar esta dificultad, proponen una *estrategia pedagógica* basada en el uso de la programación de computadores y el aprendizaje cooperativo. Una de las razones para utilizar la programación es que se considera que cuando se escriben las expresiones y se corren los programas las estructuras en las mentes se hacen más concretas. Además, cada uno de los pasos mentales: acciones sobre objetos, interiorizaciones de acciones en procesos, composición de procesos, inversión de procesos, encapsulación de procesos en objetos, pueden representarse en términos de tareas de computador, y cuando los estudiantes las ejecutan se cree que tienden a realizar las correspondientes actividades mentales y empiezan a hacer construcciones (Dubinsky^[8]).

En cuanto al aprendizaje cooperativo, es una metodología activa centrada en el estudiante; por medio del trabajo en pequeños grupos y de la interacción entre estudiantes, profesor y entorno, se generan habilidades cognitivas de orden superior y se desarrollan capacidades como la verbal, entre otras.

DISEÑO Y DESARROLLO DEL PROYECTO

La estrategia pedagógica propuesta en esta investigación es una adaptación de la propuesta pedagógica de Dubinsky, que conserva sus principios. En primer lugar, con la realización de *talleres* se busca desequilibrar las estructuras previas que traen los estudiantes para que, a través del trabajo

El estudiante maneja el concepto de función como *proceso*, cuando por ejemplo piensa la función como algo que recibe entradas (no necesariamente números) y da resultados.

en pequeños grupos, reflexionen y redescubran los conceptos involucrados. En segundo término –para fortalecer los conceptos–, se realizan *laboratorios* en la sala de cómputo, en los que a través de la programación de computadores³ y el uso de programas de graficación⁴, se interiorizan las acciones y se encapsulan los procesos. Por último, se desarrollan *ejercicios* fuera de clase para reforzar el concepto.

Con base en esta estrategia, se propuso como objetivo de la investigación indagar acerca de los alcances de ésta en la adquisición del concepto de función, desde dos perspectivas: la primera como acción, proceso u objeto⁵, específicamente en dos estudiantes, y la segunda en las categorías de análisis propuestas (las cuales se definirán más adelante) en todos los alumnos del grupo en estudio.

Para alcanzar este objetivo, la estrategia pedagógica se desarrolló durante seis semanas, con 27 estudiantes de ingeniería que cursaban la asignatura cálculo diferencial. Se realizó un diseño cuasiexperimental, con grupos control y experimental, con el fin de obtener información cuantitativa del manejo del concepto de función y de la bondad de la estrategia pedagógica. Para esto se aplicó, antes y después del tratamiento, una prueba escrita de diez preguntas abiertas (algunas con subdivisiones) en las que en ocasiones se pedía justificar y en la que no se permitió el uso de calculadora o de computador.

El análisis de los datos obtenidos en la prueba escrita se efectuó en primer lugar en forma cuantitativa-interpretativa, para explorar el manejo que tienen los estudiantes del concepto de función, a partir de las siguientes categorías de análisis: evaluar la función en un punto del dominio, determinar el dominio de una función, realizar operaciones entre funciones, componer dos funciones, determinar la inversa de una función y modelar situaciones. Con el objeto de analizar

estadísticamente la eficacia de la estrategia pedagógica, se aplicó una prueba *t* de dos colas.

En segunda instancia, teniendo como base la misma prueba, se indagó sobre la apropiación del concepto de función como acción, proceso u objeto, a través de entrevistas semiestructuradas a dos estudiantes del grupo experimental, ya que a través de las respuestas escritas no se pueden establecer todos los razonamientos que los conducen a éstas. Los dos tipos de análisis se efectuaron antes y después del tratamiento.

Para explorar la percepción de los estudiantes sobre la estrategia pedagógica utilizada, se aplicó una encuesta.

RESULTADOS

A continuación presentamos los resultados obtenidos en algunas de las categorías mencionadas:

• *Determinación del dominio de una función.* Con las preguntas relacionadas con este tema se busca establecer si a partir de la ecuación de una función o de las ecuaciones de funciones que se deben combinar, el estudiante reconoce las restricciones de dominio y lo determina correctamente. En seguida se presenta un ejemplo de las preguntas

incluidas en esta categoría y sus resultados.

En el análisis general de esta categoría se evidenciaron dificultades en el manejo del concepto de dominio desde lo algebraico antes del tratamiento, lo que se supera a la salida en ambos grupos, con un nivel más alto en el grupo experimental en el que se obtienen cifras de 60 a 85% de estudiantes que establecen correctamente las condiciones de dominio, mientras que en el grupo control fueron del 26 al 50%, en las diferentes preguntas.

• *Realizar operaciones entre funciones.* Para analizar este aspecto se hicieron preguntas que permitieran evidenciar el manejo del concepto, en funciones continuas y a trozos discontinuas, a partir de diferentes tipos de representación. Los resultados indican, desde la prueba de entrada, que los estudiantes conocen y manejan los algoritmos asociados a las operaciones entre funciones continuas, mientras que en las funciones a trozos discontinuas se presenta gran dificultad, como lo confirma uno de los estudiantes entrevistados:

“Yo pensé que eran a trozos, y por eso no podía hacerse la operación”.

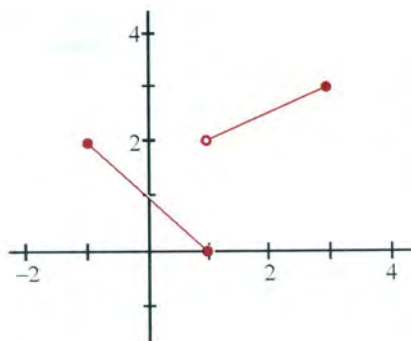
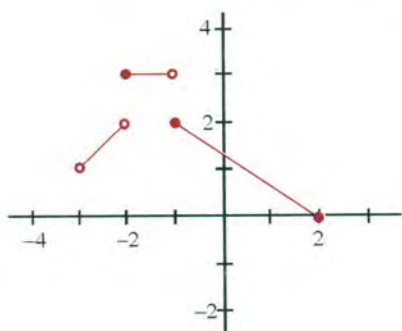
En la prueba de salida se supera en parte esa dificultad, el grupo experimental obtiene mejores resultados.

Hallar el dominio de la función h definida por $h(x) = \sqrt{2 - \sqrt{2 - x}}$. Justificar

Resultados	Prueba de entrada		Prueba de salida	
	Grupo experimental	Grupo control	Grupo experimental	Grupo control
Determina el dominio correctamente. Justifica	19%	12%	30%	8%
Determina el dominio correctamente. No justifica	7%	12%	15%	4%
Considera las dos condiciones del dominio en forma correcta. No llega a respuesta	4%	0%	26%	19%
Considera una de las dos condiciones del dominio en forma correcta. No llega a respuesta	30%	31%	26%	42%
No responde/responde incorrectamente	40%	45%	3%	27%

Para ilustrar estos resultados, se presentan las siguientes preguntas:

Utilizar las gráficas de las funciones f y g para evaluar la expresión dada, cuando sea posible. Si no se puede, justificar.



Pregunta	Porcentaje de estudiantes que contestan correctamente			
	Prueba de entrada		Prueba de salida	
	Grupo experimental	Grupo control	Grupo experimental	Grupo control
a) $f(g(3))$	63%	31%	93%	73%
b) $g(f(3))$	67%	38%	93%	69%
c) $f \circ g(1)$	11%	12%	67%	62%
d) $(f + g)(0)$	19%	23%	67%	69%
e) $(f - g)(-1)$	19%	31%	85%	73%
f) $(f + g)(-2)$	15%	19%	67%	65%

Dadas las funciones f y g definidas por las ecuaciones $f(x) = \sqrt{x+2}$ y $g(x) = x^2 - 3$, hallar: $f(g(x))$ e indicar su dominio.

Categorías de respuesta	Prueba de entrada		Prueba de salida	
	Grupo experimental	Grupo control	Grupo experimental	Grupo control
Compone función algebraicamente. Halla dominio.	11%	12%	48%	31%
Compone función algebraicamente. Establece condición de dominio pero no lo halla.	15%	15%	19%	12%
Compone función algebraicamente. No halla dominio.	56%	50%	30%	50%
No responde/responde incorrectamente.	18%	23%	3%	7%

Con respecto a esta pregunta, llama la atención que uno de los estudiantes entrevistados, que había demostrado un buen manejo de la función compuesta desde lo gráfico, en lo algebraico no puede dar explicación de los procesos que realiza, lo que parece indicar que domina el algoritmo pero no reconoce que los valores que entran en la función externa son las imágenes de la función interna.

Entrevistador

¿Cómo hace para hallar la compuesta?

Estudiante

La función $f(x)$ la tomo raíz cuadrada de x más dos, entonces toda la función $g(x)$, que es x al cuadrado menos tres, la meto a $f(x)$ como si fuera x , o sea donde está x pongo toda la función g

Entrevistador

¿Por qué hace ese procedimiento? ¿Cuál sería la explicación de tomar el $g(x)$ y ponerlo en $f(x)$? ¿Cuál es la explicación que le podría dar a ese proceso?

Silencio...

Estudiante

Ni idea.

Modelación de situaciones

Con esta pregunta se pretende que, a partir de una situación dada en lenguaje verbal, el estudiante establezca la ecuación de una función que la modele, y con base en ella debe encontrar la función inversa y darle significado. Finalmente, debe determinar para qué valores en el contexto son válidas estas dos funciones.

En la prueba de entrada se encuentra que ambos grupos determinaron sin dificultad la ecuación de la función que modela el problema, mientras que para la función inversa disminuye el porcentaje de aprobación y muy pocos dan significado a ésta dentro del contexto. Con respecto al dominio de ambas funciones, la gran mayoría no logra establecerlo.

Alfredo's Pizza asigna un precio base de \$21.000 para la pizza tamaño maxi, más \$2.500 por cada ingrediente adicional. Si usted ordena una pizza maxi con x ingredientes adicionales:

a) ¿Puede determinarse una función (en forma algebraica) que permita establecer el costo total de la pizza en términos del número de ingredientes adicionales?

Porcentaje de estudiantes que contestan correctamente			
Prueba de entrada		Prueba de salida	
Grupo experimental	Grupo control	Grupo experimental	Grupo control
93%	88%	89%	96%

b) Si se pudo encontrar una función que modele la situación, hallar la ecuación de la inversa de ésta y expresar el significado que tiene.

Categorías de respuesta	Prueba de entrada		Prueba de salida	
	Grupo experimental	Grupo control	Grupo experimental	Grupo control
Hallar y dar el significado correcto de la función inversa.	15%	8%	44%	46%
Hallar función inversa correctamente. No dar el significado de ésta.	37%	38%	41%	38%
No responde/responde incorrectamente	48%	54%	15%	16%

c) De acuerdo con el contexto del problema, para qué valores tienen sentido las funciones encontradas en los puntos a y b.

Categorías de respuesta	Prueba de entrada		Prueba de salida	
	Grupo experimental	Grupo control	Grupo experimental	Grupo control
Función directa				
Naturales	7%	8%	11%	15%
Reales positivos	8%	8%	59%	46%
No responde	85%	84%	30%	39%
Función inversa				
Subconjunto naturales	0%	0%	0%	0%
Reales positivos	4%	0%	33%	15%
No responde	96%	100%	67%	85%

En la prueba de salida se aprecia que un porcentaje alto determina la ecuación de la función directa e inversa, lo que indica que hay un buen dominio de la función afín en ambos grupos; no obstante, menos de la mitad de los estudiantes le encuentra significado a la función inversa dentro del contexto dado.

Con respecto a los dominios de estas funciones, en ambos grupos el nivel de estudiantes que halla el dominio de la función directa es muy bajo, mientras que para la función inversa solamente un estudiante logra un buen acercamiento a la respuesta correcta. Sin embargo, se observa que se apoyan en la representación algebraica de las funciones al establecer que el dominio de ambas funciones son los reales y luego tratan de contextualizarlo, restringiendo el resultado a los reales positivos.

Aunque la situación es sencilla en cuanto se modela mediante una función afín, la determinación tanto del dominio como del rango requiere un razonamiento más elaborado, que implica niveles cognitivos más altos. El estudiante que tuvo la mejor aproximación al dominio y rango de la inversa coincidió con uno de los entrevistados, por lo que a continuación se muestra un aparte de ésta:

Entrevistador

¿Cómo se imagina la gráfica de la función inversa?

Estudiante

Como una recta, una recta con dominio de cero a infinito.

Entrevistador

Pero entonces eso contradice que el dominio sean los enteros positivos...

Estudiante

Sí, pero yo puse los enteros positivos por lo de... que los ingredientes tienen que ser... que ser... un ingrediente o dos ingredientes, o sea un entero...

Entrevistador

Pero eso no concuerda con lo que dijo anteriormente...

Estudiante

No, pero... aquí para dar un dominio lógico, uno tiene que tomar, no puedo tomar decimales.

Entrevistador

Pero entonces cuando yo le pregunto por la gráfica, usted me dice que es una recta; si yo dibujo la recta, el dominio ahí serían los reales.

Estudiante

Sí.

Entrevistador

¿Entonces?

Estudiante

Teniendo en cuenta este dominio, la gráfica sería como una recta pero tomando unos puntos.

Entrevistador

Y, entonces, ¿cuál sería el rango?

Estudiante

De 21.000 a... infinito, pero teniendo en cuenta que no se tomarían unos puntos, el rango sería 21.000 más 2.500, aumentaría cada 2.500; por cada entero, acá aumentaría 2.500.



Con base en el análisis de los resultados de la prueba de entrada, se encontró que los estudiantes de ambos grupos tienen facilidad en el manejo operativo de los algoritmos de combinación y composición algebraica de funciones.

CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta que el objetivo de la investigación comprende el análisis de la adquisición del concepto de función desde dos puntos de vista, en primer lugar se presentan los aspectos más relevantes que se encontraron sobre el manejo del concepto en los dos grupos (antes y después de aplicar la estrategia) y, en segundo término, se mencionan las características que se evidenciaron en los dos estudiantes entrevistados, respecto a los niveles propuestos por la teoría Apoe.

Con referencia al manejo de función en ambos grupos, los resultados indican que el comportamiento de los dos fue similar, antes y después del tratamiento; sin embargo, en la prueba de salida, el grupo experimental tuvo porcentajes de aprobación más altos en la mayor parte de las preguntas.

Con base en el análisis de los resultados de la prueba de entrada, se encontró que los estudiantes de ambos grupos tienen facilidad en el manejo operativo de los algoritmos de combinación y composición algebraica de funciones, así como en el establecimiento de la ecuación de la función afín que modela un problema. También se detectó que muy

pocos estudiantes manejan los temas relacionados con evaluación de una función (dada gráficamente) en un punto en el que se presenta una discontinuidad, así como suma y composición puntual de funciones desde su representación gráfica, obtención de la ecuación de la inversa, combinación algebraica de funciones a trozos, articulación entre las funciones directa, inversa y compuesta, y determinación del dominio de una función a partir de su ecuación y en un contexto.

Los resultados anteriores revelan un manejo deficiente del concepto desde la correspondencia al iniciar el curso de cálculo, lo cual coincide con diversas investigaciones que afirman que además de que los estudiantes al ingresar a la universidad tienen una comprensión deficiente del concepto,

ésta no se supera en su totalidad en los cursos de los primeros semestres (Monk, 1992; Monk y Nemirovsky, 1994; Thompson, 1994, citados por Carlson^[10]). Esto hace un llamado a pensar en la necesidad de indagar, al comienzo del curso, sobre el manejo de la función desde la correspondencia, ya que se espera que al menos las preguntas asociadas a acciones se respondan acertadamente,

para luego poder realizar un trabajo desde la variación.

Las dificultades relacionadas con el manejo de la función a trozos en cursos previos al cálculo podrían atribuirse a un trabajo limitado con este tipo de funciones, ya que de acuerdo con investigaciones, los profesores tienen marcada preferencia por las funciones continuas definidas por una sola fórmula (Hitt, citado por Planchart^[11]).

En la prueba de salida se puede concluir que en ambos grupos la mayoría de los estudiantes superan las dificultades que tenían al iniciar el tratamiento, sin embargo, los temas relacionados con *álgebra de funciones* entre funciones a trozos, en la *modelación* el significado de la función inversa dentro de un contexto, así como dominio de las funciones directa e inversa cuando éstas son discretas y *composición de funciones* dadas en forma gráfica, quedan por reforzar, aunque se espera que se consoliden al considerar otros temas propios del cálculo.

El análisis muestra también la necesidad de los estudiantes de recurrir a la representación algebraica, para poder argumentar sus respuestas, lo que podría confirmar los estudios de Vinner (citado por Planchart^[11]), quien señala la preferencia de los estudiantes para trabajar con la repre-

sentación algebraica, producto de la creencia de que la prueba algebraica es más aceptada dentro de la matemática, así como de que los algoritmos y fórmulas los conducen de manera efectiva a resolver las pruebas académicas.

También se vio la falta de coordinación entre los registros gráfico y algebraico, ya que hay estudiantes que pueden hacer manejos desde lo gráfico, pero en lo algebraico no son capaces de dar explicación de sus procedimientos, o viceversa; esto coincide con los resultados reportados por Guzmán^[12].

Un aspecto que vale la pena destacar es la mayor diferencia entre los dos grupos, que correspondió a la determinación de las restricciones del dominio desde lo algebraico, siendo el grupo experimental el que obtuvo mejores resultados en la mayor parte de las preguntas asociadas a este tema. Esto podría estar relacionado con las actividades propuestas con el uso del computador, en las que se involucran la programación de funciones en el lenguaje Isetl, al igual que la predicción y verificación de resultados (entradas y salidas), lo que posiblemente permite al estudiante interiorizar los procesos asociados a la determinación del dominio, para luego hacer construcciones mentales asociadas a éste sin el uso del computador, como lo señala Dubinsky^[8]. Esto, sumado a que el concepto de dominio está presente en todos los temas abordados, creemos que pudo favorecer el manejo del mismo.

Respecto a los estudiantes entrevistados se concluye que hubo un gran avance en los dos, el cual no es comparable puesto que cada uno de ellos tenía, antes de iniciar el tratamiento, esquemas de la función muy diferentes: uno muy elemental y el otro estaba más estructurado. El primer estudiante, al contestar solamente dos preguntas en la prueba de entrada,

muestra un manejo pobre de la función, lo que se corrobora a través de la entrevista ya que ni siquiera evalúa una función puntualmente, lo que indica que se acerca al manejo de la función como *acción*. Al finalizar el tratamiento y por medio de la entrevista, encontramos que el estudiante supera la mayoría de las deficiencias y muestra un manejo de la función como *proceso*, pues puede establecer el dominio, encontrar imágenes en las funciones suma y diferencia desde lo gráfico, hallar la función suma a partir de dos funciones dadas en forma algebraica, identificar puntualmente imágenes en una función inversa mediante el uso de propiedades de la directa y la inversa, plantear la ecuación de una función afín que modela una situación en contexto, y a partir de ella encontrar su inversa, hallar la compuesta en forma puntual desde lo gráfico, así como desde lo algebraico.

En cuanto al segundo estudiante, desde el comienzo manifiesta el manejo de bastantes elementos propios del concepto como *proceso* y termina dando muestras de un manejo como *objeto*, lo que se evidencia por ejemplo en la composición de funciones cuando utiliza como recurso un cambio de variable que le permite presentar varias funciones que al componerlas den una función establecida, al igual que cuando determina el dominio de una función discreta en contexto.

Con respecto a la estrategia pedagógica aplicada, los estudiantes manifestaron su aceptación a través de la encuesta, y resaltaron entre otros los siguientes aspectos: logran mayor claridad de los conceptos, el proceso de

aprendizaje es más activo debido a la interacción propia del trabajo en grupo y el uso del computador, lo que los mantiene motivados; además, sugieren que se disponga de mayor tiempo para la realización de las actividades.

Como resultado de la aplicación de la estrategia, percibimos que ésta le permite al profesor tener una mayor interacción con el estudiante y evidenciar los razonamientos que está realizando, lo cual facilita la detección de dificultades y la retroalimentación inmediata, no sólo en el plano individual sino también en los grupos cuando

hay intercambio de ideas y negociación de significados.

Por último, consideramos necesario seguir investigando sobre la pertinencia de utilizar la programación en la adquisición de los conceptos matemáticos, así como establecer para cuáles conceptos es más conveniente su uso, ya que involucrar la programación en el aula es un proceso complejo y lento, que requiere entre otros aspectos un sustento teórico, para evitar que se implemente solamente por moda o por azar.

NOTAS

1. Profesor de la Universidad de Kent, Grupo Rumec.
2. En inglés se conoce como teoría Apos.
3. En esta experiencia se usó el lenguaje de programación Isetl (*Interactive Set Language*), entre otras razones porque la sintaxis involucra enunciados simples con expresiones y notaciones similares al lenguaje matemático. Con este programa el estudiante puede formular instrucciones,

Se vio la falta de coordinación entre los registros gráfico y algebraico, ya que hay estudiantes que pueden hacer manejos desde lo gráfico, pero en lo algebraico no son capaces de dar explicación de sus procedimientos.

evaluar expresiones o usar las funciones previamente definidas en la librería. Por ejemplo, para escribir la función de ecuación

$$p(x) = \begin{cases} |x+1| & \text{si } x \leq -1 \\ \sqrt{2x+3} & \text{si } x > -1 \end{cases} \text{ y evaluarla en algunos números, las}$$

instrucciones serían:

```
> p:=func(x);
>> if x<=-1 then return abs(x+1);
>> else return sqrt(2*x+3);
>> end;
>> end;
> p(-1);p(-2);p(3/2);
```

La última instrucción corresponde a la evaluación en los tres puntos indicados, a la que el programa arroja los resultados 0; 1; 2,449490;

4. Winplot.

5. Niveles propuestos por la teoría Apoe. El hecho de que un estudiante esté en alguno de estos niveles implica el que se haya dado cualquiera de las formas de construcción del conocimiento matemático, las cuales son una manifestación del nivel de abstracción del estudiante. Las formas de construcción del conocimiento según Piaget son (Dubinsky, [9]):

Interiorización: se refiere a la representación que hace el sujeto de los fenómenos externos que percibe.

Coordinación: tiene que ver con la composición de dos o más procesos para construir uno nuevo.

Encapsulación: es la conversión mental de un proceso (dinámico) en un objeto cognoscitivo (estático), (Dubinsky, 1991). Según Artigue (1998), la encapsulación se refiere al paso de una concepción del objeto de conocimiento donde se pueden manipular procesos particulares, a una concepción donde el objeto matemático se percibe como una entidad conceptual.

Generalización: es una manera simple de abstracción. El sujeto se limita a considerar atributos esenciales de varios objetos. Se presenta cuando el sujeto aplica un esquema existente a una colección mayor de fenómenos.

Reversibilidad: se produce cuando el sujeto es capaz de pensar y realizar el reverso de un proceso existente.

REFERENCIAS

- [1] Artigue, M. (1998). La enseñanza de los principios del cálculo: problemas epistemológicos, cognitivos y didácticos. En Pedro Gómez (ed.). *Ingeniería didáctica en educación matemática*. Una empresa docente.
- [2] Ruiz, L. (1993). Tesis doctoral. Concepciones de los alumnos de secundaria sobre la noción de función: análisis epistemológico y didáctico. Universidad de Granada.
- [3] Duval, R. (1992). *Gráficas y ecuaciones. La articulación de dos registros. Antología en educación matemática*. México: Cinvestav. IPN.

[4] Azcárate, C., Deulofeu, J. *Funciones y gráficas*. Ed. Síntesis.

[5] Font (2001). Expresiones simbólicas a partir de gráficas. El caso de la parábola. *Revista EMA*. 6(2), pp. 180-200.

[6] Dubinsky, E. (2000). Meaning and formalism in mathematics. Arizona State University, Colloquium.

[7] Dubinsky, E. (1996). Aplicación de la perspectiva piagetiana a la educación matemática. *Revista*

de Educación Matemática. 8(3), pp. 24-41.

[8] Dubinsky, E. (1996). Isetl: A programming language for learning mathematics.

[9] Dubinsky, E. (1991). Reflective abstraction. In *Advanced mathematical thinking*. Edited by David Tall. Netherlands: Mathematics Education Library. Kluwer Academic Publishers.

[10] Carlson et al. (2003). Razonamiento covariacional aplicado a la modelación de eventos dinámicos: un marco conceptual y un estudio. *Revista EMA*. 8(2), pp. 121-156.

[11] Planchart, O. (2000). Tesis doctoral. La visualización y la modelación en la adquisición del concepto de función. Universidad Autónoma del Estado de Morelos.

[12] Guzmán, I. (1998). Registros de representación, el aprendizaje de nociones relativas a funciones: voces de estudiantes. *Relime*. 1(1), 5-21



Como resultado de la aplicación de la estrategia, percibimos que ésta le permite al profesor tener una mayor interacción con el estudiante y evidenciar los razonamientos que está realizando.

Gestión del riesgo corporativo en Colombia

Ponentes

Enrique Aranguren Linzamon

Coordinador nacional de gestión de riesgo del Icontec y representante de gestión de riesgo ante ISO. Ingeniero industrial de la Universidad América y especialista en gerencia comercial de la Universidad de La Sabana.

Diego Alonso Gómez Villarreal

Gerente de la firma Riesgo y Estrategia, catedrático universitario e instructor en diferentes entidades como el Banco de Bogotá y el Banco Popular.

Alexander Campos Osorio

Director de estudios financieros de Asobancaria. Economista de la Universidad Nacional de Colombia con maestría en Economía de la Universidad Nacional y maestría en finanzas de la Universidad Carlos III de España.

Óscar Bravo Mendoza

Coordinador de Planeación y riesgos de Ecopetrol. Ingeniero de petróleos, tiene un MBA de la Universidad de Illinois y es profesor de la Universidad de los Andes.

Álvaro Moreno (moderador)

Decano de Economía de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

En el aula máxima de la Escuela Colombiana de Ingeniería se llevó a cabo recientemente un foro a lo largo del cual se expusieron diferentes puntos de vista sobre la gestión del riesgo corporativo en Colombia, tema que sin duda es de gran importancia para el desarrollo del país. Durante el encuentro los expertos invitados expusieron sus opiniones y sentaron sus posiciones, con miras a dar claridad sobre este aspecto y comenzar a crear espacios para que los profesionales del sector puedan estar al tanto de los últimos avances sobre gestión de riesgo corporativo en el ámbito internacional.



De izquierda a derecha: Álvaro Moreno (moderador), Diego Alonso Gómez Villarreal, Enrique Aranguren Linzamon, Óscar Bravo Mendoza y Alexander Campos Osorio.



GERMÁN SANTOS GRANADOS

En la Escuela Colombiana de Ingeniería nos hemos propuesto acercarnos más a las empresas y ofrecer foros, conferencias y seminarios sobre temas de interés nacional. Éste indudablemente lo es. Quiero agradecer especialmente a Enrique Aranguren, de Icontec; a Diego Alonso Gómez Villarreal, director de Riesgo & Estrategia; a Alexander Campos Osorio, de la Dirección de Estudios Financieros de la Asobancaria, y a Óscar Bravo, de la Dirección General de Planeación y Riesgos de Ecopetrol, por su participación en este foro.

Ustedes más que nadie saben que en la época actual es necesario organizar esta clase de encuentros y seguir aprendiendo a lo largo de la vida. Este es un compromiso que las instituciones de educación superior tenemos y que es más evidente día tras día, es decir, empezar a crear espacios donde los profesionales puedan actualizarse.

Este tema de la gestión del riesgo corporativo en Colombia es, sin duda, algo muy importante para el país, razón por la cual quiero agradecerles de nuevo su participación. Así mismo, deseo expresarles a todos los asistentes que la Escuela es su casa, que las puertas están abiertas y que atenderemos todas sus inquietudes, con miras a solucionar los problemas de nuestro entorno



ÁLVARO MORENO (MODERADOR)



Vamos a entrar en materia. El tema de gestión integral de riesgo corporativo es una tendencia que se ha regulado a escala internacional, dado que hay una serie de sectores, como el financiero, por ejemplo, que se han visto afectados por el riesgo de mercado, el riesgo de créditos, el riesgo operativo o el riesgo de liquidez. En Basilea se presentaron lineamientos sobre cómo cuantificar y administrar estos riesgos, pero a su vez las compañías empezaron a detectar que el tema de riesgo no es sólo financiero, sino que también compete al sector empresarial, sin importar la actividad económica.

Y Colombia no se ha quedado atrás. El país ya cuenta con una norma de calidad en materia de gestión integral de riesgo corporativo, la norma técnica colombiana 5254 de agosto del 2004, lo que apunta a que se está creando realmente una cultura de riesgo en todos los sectores de la economía.

Por tal razón la Escuela Colombiana de Ingeniería les presenta hoy a ustedes este foro, en desarrollo del cual se pretende dar una visión holística de la gestión de riesgo

Por tal razón la Escuela Colombiana de Ingeniería les presenta hoy a ustedes este foro, en desarrollo del cual se pretende dar una visión holística de la gestión de riesgo



ENRIQUE ARANGUREN

Básicamente, el Icontec es una entidad privada sin ánimo de lucro. Es el brazo de la ISO aquí en Colombia. Representamos al país en las deliberaciones de una norma técnica, por ejemplo, en un concepto de calidad.

El año pasado, el organismo nacional de Australia propuso crear una norma para gestión de riesgo de nivel internacional, así como hay una norma ISO 9901 para calidad.

En una primera instancia les dijeron que no, pero por fortuna ya se llegó a un acuerdo en ese sentido. Colombia va a participar en la elaboración de la norma, como miembro del comité encargado de esta tarea, que lidera Japón.

De igual modo, el Icontec es miembro de la Comisión Panamericana de Normas Técnicas (Copant), que es una entidad de normalización que va a empezar a sonar bastante cuando el Alca comience a regir. Además, el Icontec es el organismo de certificación acreditado por la Superintendencia de Industria y Comercio, asesora al gobierno en convenios de tipo internacional en lo que se refiere a normalización y está involucrado también en todo lo relacionado con proyectos de reglamentos técnicos.

Nosotros en el Icontec hacemos normas técnicas, que son normas de requisitos o guías técnicas colombianas; son documentos en los que se dan consejos sobre qué es lo que se debe hacer o cómo se deben hacer las cosas. Y todo esto se realiza mediante las diferentes partes que estén relacionadas con un negocio en particular.



En el caso de gestión de riesgo, nosotros tenemos a gente de finanzas, de aseguradoras, a gente del gobierno, a instituciones de educación, a ministerios; por ejemplo, Bavaria, Ecopetrol, Fiducolombia, Central de Seguros, son algunas de las empresas que participan en este momento en el Comité de Gestión de Riesgo.

En Colombia, la mayor parte de las empresas gestionan lo referente al riesgo, pero no de una manera sistemática. Entonces las normas simplifican procesos, uno de los tantos beneficios que éstas pueden ofrecer.

Las normas técnicas son también una herramienta de transferencia de tecnología. Por ejemplo, el grupo de auditores de Australia que hizo el AS4360 tuvo que realizar una gran labor de investigación antes de poner cada una de las frases que están en el estándar que nosotros acogimos como norma técnica colombiana. Esto es transferencia de tecnología, porque nosotros no vamos a tener que asumir toda la investigación que esta gente debió efectuar.

Así mismo, las normas evitan repetición de estudios, disminuyen el número de accidentes de trabajo y elevan la productividad, ya que en su proceso de elaboración se estudian el medio ambiente, la parte de seguridad y la salud de las personas.

Elaboración de una norma técnica

Como les dije al comienzo, una norma parte de un problema, de una necesidad, necesidad que nosotros llamamos estudio de factibilidad. Por ejemplo, hay un sector de la economía que está bastante deprimido por el contrabando, la óptica oftálmica, y ellos solicitaron unas normas técnicas por combatir el contrabando. A raíz de eso se hace un estudio preformativo, que es básicamente una encuesta, y luego se manda un anteproyecto, que sale por lo general de normas internacionales o de gente del gremio que está solicitando la norma.

A continuación, si se aprueba el documento, la norma pasa a un comité técnico; esta parte puede ser demorada, pues es posible que haya 20 o 25 reuniones, como me pasó en la elaboración de una norma de gestión de calidad en educación.



Las normas evitan repetición de estudios, disminuyen el número de accidentes de trabajo y elevan la productividad, ya que en su proceso de elaboración se estudian el medio ambiente, la parte de seguridad y la salud de las personas.

Posteriormente, por convenios que nosotros tenemos y por el código que hemos firmado con la Organización Mundial del Comercio (OMC), hay que pasar a consulta pública durante 60 días, a escala nacional; en especial a la base de clientes afiliados de Icontec y a personas que nos soliciten el documento.

Luego viene la posconsulta pública, que tiene que ver con el estudio de las observaciones de la gente; una vez tratadas en el comité, se pasa a un grupo de expertos en normalización, quienes la revisan, y por último el consejo directivo de Icontec aprueba la norma ratificada, para posteriormente divulgarla.

En cuanto a la calidad en la administración del riesgo, en este momento el objetivo es que la norma pudiera aplicarse en proyectos, en particular porque muchas empresas nos hacían conocer esa necesidad, sobre todo empresas de ingeniería civil.

El comienzo del estudio se basó en un enfoque de servicio al cliente, debido a que ésta es una norma que tiene algunos principios de mejoramiento continuo, algo parecido a lo que se maneja en la 9004.

Proceso de gestión del riesgo

En la nueva versión de la norma se recomienda dejar registros de cada una de las actividades durante el proceso de gestión de riesgo; con esto se

busca que se tomen decisiones transparentes, basadas en hechos concretos, y eso de cierto modo lo trae el sistema de gestión

Algunas actividades que están alrededor de la necesidad de manejar el riesgo son la medioambiental, la actualidad política, la competencia, la parte económica, la regulación, los inversionistas, los consumidores y las fusiones, como las que hemos visto últimamente.

Ya en lo que tiene que ver con la calidad de la administración del riesgo, nosotros lo hemos enfocado en la parte de calidad.

La norma hace hincapié en la utilización de riesgos y control de costos, con la idea de minimizar pérdidas y maximizar las oportunidades. En la última versión se enfatiza en la parte de la planeación y se aclaran conceptos como posibilidad y probabilidad, lo que de pronto hace que esta parte sea más concreta.

Esto también está ligado a las estructuras que se dirigen hacia la administración efectiva de las oportunidades potenciales y efectos adversos que pueda tener una compañía, medido en términos de posibilidad y de consecuencia.

Este es, fundamentalmente, el proceso de gestión de riesgo. A lo largo del proceso hay algo relacionado con la comunicación y consulta, como en cualquier otro tipo de sistema de gestión; existe también un monitoreo o revisión, que en otras normas se llamaría control; en lo primero, se establece un contexto, luego viene la parte de identificación del riesgo, luego se analizan los diferentes métodos y herramientas que uno utiliza luego de que usted ha identificado los riesgos, y posteriormente se hace la evaluación.

En una primera instancia, en lo que se denomina establecer el contexto, esto se lleva a cabo para mirar cómo hacen lectura de nuestra empresa y del riesgo en particular, desde el punto de

En la parte interna funcionan el clima laboral y la cultura, al igual que el rechazo al cambio; así las cosas, en el contexto vienen a involucrarse diferentes tipos de variables, como medio ambiente, la parte política, la parte económica, lo técnico, lo legal, lo financiero y lo social.

Así mismo, en la parte del contexto se debe elegir algún tipo de metas, de estrategias, para considerar el riesgo o encontrar las oportunidades que se pueden llegar a tener a través de la evaluación de este sistema.

Una de las cosas que busca la norma a través del estudio del contexto es mirar que haya un equilibrio entre costo y beneficio, o sea que no vaya a salir más caro gestionar el riesgo que asumirlo.

financieras, de mercado, de interrupción, de seguridad, algunos métodos de identificación a través de experiencias anteriores, las auditorías, análisis Dofa, análisis de sensibilidad y análisis de escenarios.

Las áreas que pueden verse afectadas dentro de la identificación de riesgos son aquellas relacionadas con la parte de la propiedad, la parte personal, la parte

de la comunidad, la parte social, sobre todo esta última, ahora que están empezando a estudiarse normas de responsabilidad social, donde las empresas también van a tener una cuota adicional de trabajo en la parte del medio ambiente.

Hay unas preguntas que trae la norma actual para identificar los riesgos. Éstas son cuándo, dónde, por qué, cómo, las consecuencias que entraña cada riesgo, sus costos potenciales, los controles, los recursos existentes y las expectativas de las partes interesadas.

Como siempre, en cualquier sistema de gestión de esta clase siempre debe haber registros de todo, y eso va ligado, obviamente, a la parte de monitoreo.

Hay dos tipos de factores que influyen dentro del sistema de gestión de riesgo: los internos y los externos. Los internos son los que dependen directamente de la gente que está trabajando dentro de una compañía, y los externos son los que resultan imposibles de controlar.

Dentro de los análisis de riesgo, la norma habla básicamente de análisis cualitativos, cuantitativos y semicuantitativos.

La idea es no contentarse con hacer un solo análisis de riesgo sino varios, con el objeto de que más adelante, en la evaluación, se comparen los

Una de las cosas que busca la norma a través del estudio del contexto es mirar que haya un equilibrio entre costo y beneficio.

Identificación de riesgos

En lo relacionado con la identificación de riesgos, se busca que se haga dentro de las compañías como un sistema o un proceso repetitivo, pero de manera que usted pueda efectuar un barrido por las diferentes variables que tenga el sistema de ges-

tión; fundamentalmente, en la identificación se deben hacer preguntas como qué puede ocurrir, dónde, cuándo, por qué y cómo puede suceder la parte del riesgo.

Básicamente, su función es encontrar las fuentes de riesgo; entre éstas se hallan las socioeconómicas, legales, comportamentales, organizacionales,

vista externo de la compañía, y también desde el punto de vista de los clientes internos.

Desde el punto de vista externo, son cosas como el ambiente del negocio, la parte de fortalezas y debilidades que tenga la compañía, las partes externas que estén involucradas y las directrices claves del negocio.



diferentes análisis para poder tomar una decisión sobre esos valores que nos han dado, todo esto evaluado efectivamente sobre la consecuencia y la posibilidad de que esto ocurra.

Cuando se hace la evaluación, lo que resulta es una lista pormenorizada de riesgos; lo que dicen las guías que trae la norma adjunta es que, básicamente, la norma primero se puede establecer en toda la compañía o por áreas; una vez que se han establecido estas dos cosas, la idea

es priorizar los riesgos, no tratarlos todos, porque eso sería una locura; la parte de la evaluación es para tomar las decisiones.

Y por último viene la parte del tratamiento, que son las estrategias que da la norma en el momento en que ya se ha decidido encarar un riesgo.

Igualmente, se deben considerar los requisitos legales, ambientales y sociales en la implementación de la gestión de riesgo, ya que una gestión de riesgo efectiva depende de la buena calidad

de la información; el proceso de gestión es sistemático, se debe volver un hábito, las acciones tomadas en este sentido deben integrar la planeación y la operación, así como también otros sistemas de gestión que existan dentro de una compañía.

Por el momento, el marco general que manejamos es el AS4360, pero nosotros ya formamos parte del grupo de países que empezamos a estudiar la norma internacional de gestión de riesgo.

DIEGO GÓMEZ

La idea es contarles un poco sobre cómo ha de implementarse la gestión de riesgos, qué elementos debe tener, dónde se concentra, cuáles son los retos principales que han de afrontar las diferentes organizaciones, y cuáles son los puntos que hay que tener en cuenta en una agenda de riesgo operacional, en una agenda de gestión de riesgos.

Una verdad irrefutable es que la gestión de riesgos golpea directamente el patrimonio de las organizaciones y el potencial de generación de valor de las mismas.

Hoy en día, la gestión de riesgos es una realidad y no es un tabú; en el plano internacional, las empresas que han perdido dinero por cuentas mal gestionadas, por funciones mal hechas, por errores en la parte comercial, son, entre otras, Citibank, Microsoft, General Electric y Parmalat, mientras que en Colombia podemos citar el Banco del Pacífico y el Banco de Crédito. Amén de las pérdidas de dinero y de generación de valor, se golpea el activo más valioso de una compañía: su reputación. Esa reputación básicamente orientará el mercado y las diferentes acciones de la compañía.

Si esa reputación no se gestiona, si esa reputación es golpeada por un mal manejo, se está poniendo en riesgo la existencia de la compañía. De ahí la importancia de empezar a gestionar los riesgos.

Este es un enfoque digamos plano de lo que antes pensábamos, es decir, que a mayor riesgo, mayor recompensa. Eso lo hemos visto bastante en el ambiente financiero, pero también se aplica muy bien a los proyectos; el punto es que

cuando una entidad tiene un sistema de recompensas o está haciendo crecer su margen operacional o el flujo de caja, tan valioso para los accionistas, está asumiendo un riesgo por el mismo. ¿Cuánto? Una compañía que no ha analizado sus riesgos no podrá responder esta pregunta.

Cómo aplicar el proceso

Este es un dicho interesante, de la filosofía china, que reza así: "Los hombres inteligentes aprenden de sus propios errores, los hombres sabios aprenden de los errores de otros, pero un necio nunca aprende". Con esto nos referimos a que si ya hay prácticas internacionales, si ya el Icontec está gestionando el tema en Colombia, si los diferentes estamentos están en este proceso, ya es hora de empezar a aprender de esas prácticas y crear marcos de gestión para desarrollarlos en nuestras compañías, para entender el proceso, apoyarnos, comenzar a mirar como sectores las alternativas de gestionar el riesgo, compartir información y no dejar el tema como un tabú, que es lo que ha pasado hasta el momento.

Así las cosas, ¿qué se ha podido aprender de esos casos para aplicar el proceso de gestión del riesgo? En primer lugar, hay que conocer el negocio. Sus debilidades, sus amenazas, los puntos centrales en los cuales se puede hacer una propuesta de valor al mercado. Esta es una de las reglas básicas que recomiendan las prácticas internacionales.

Una verdad irrefutable es que la gestión de riesgos golpea directamente el patrimonio de las organizaciones y el potencial de generación de valor de las mismas.

En segundo término, establecer chequeos y balances. Este punto se refiere a qué monitoreo se está haciendo en la organización, con qué periodicidad se está llevando a cabo ese monitoreo en todo el ambiente de negocios, y cuál es el balance que existe de los productos que tiene la entidad en el mercado sobre el riesgo y recompensa a que están expuestos.

En tercera instancia, fijar límites y fronteras. Esto es, hasta dónde llega cada quién; si se va a empezar a desarrollar un proceso en la compañía, quién es el llamado a hacer la gestión integral de riesgos pero cuál cumple las características en realidad de gestionarlo. Es como mirar la organización y decir qué áreas de negocios deben empezar a gestionar el riesgo, a causa de su perfil, de sus características, de su habilidad y de su preparación, y no que sea una elección a dedo.

En cuarto lugar, hay que mantener la vista en el efectivo. Esta es una consigna bien interesante, porque lo que se ha apreciado en la mayor parte de las empresas que han tenido crisis es que siempre ha habido una movilidad fuerte en el margen operacional que están manejando. Entonces, cuando se presentan esos movimientos hacia arriba o hacia abajo tan grandes del margen operacional o del flujo de caja operativa de una compañía, es porque hay algo raro en materia de riesgos.

En quinto término, se deben usar varas de medida correcta. Hay que saber cómo se están midiendo las cosas en la organización, cómo se está integrando eso a la gestión, cuál es realmente el compromiso que se tiene, qué elementos se están utilizando. Estas premisas se han de evaluar a la luz de la realidad y no de la suposición, con el objeto de comenzar a establecer los sistemas de medida en una organización.

Y sobre estos sistemas de medida hay un punto que vale la pena tocar, porque una preocupación de las diferentes entidades se refiere a cómo medir los riesgos. La respuesta es muy sencilla: si no hay datos, no tienen que medir nada todavía. Primero deben establecer unos criterios muy claros que apoyen toda la estructura de gestión de la compañía, que les permita valorar esos riesgos, con unos siste-

mas de participación donde la gente se exprese, y que no sea una unidad la que haga todo ese proceso. Los anteriores son elementos esenciales en la gestión integral del riesgo.

En sexto lugar, hay que pagar por el desempeño que se quiere. Un tema interesante relacionado con esto es el de la objetividad insensible y la subjetividad sensible. La objetividad insensible habla de que hay que conseguir los resultados y las metas a como dé lugar, mientras que la subjetividad sensible se basa en suposiciones, pero hay que cuestionarse sobre esas suposiciones.

Sin embargo, empresas como General Electric,

Sobre los sistemas de medida hay un punto que vale la pena tocar, porque una preocupación de las diferentes entidades se refiere a cómo medir los riesgos. La respuesta es muy sencilla: si no hay datos, no tienen que medir nada todavía.

Microsoft o Dell han demostrado que esos modelos están mandados a recoger, y que hay que empezar a trabajar en otro tipo de situaciones, como la objetividad, en qué estado se halla la organización, por qué no se cumplieron las metas, por qué la estrategia falló, porque se aumentó la parte de costos, por qué no se consolidaron las alianzas, por qué no se consideró el proceso de fusión. La idea es comenzar a preguntar el porqué antes de buscar un responsable. Ahí está la diferencia entre la objetividad insensible y la subjetividad sensible, donde lo que se busca es un mecanismo que se fundamente en la realidad, pero esa realidad debe tener también unos puntos claves, que las entidades



deben evaluar.

Y, por último, un balance entre el *yin* y el *yang*. *Yin* es la parte dura, son los sistemas, la tecnología, la parte de infraestructura. El *yang* son las creencias que tiene la organización. Por ejemplo, si en su organización creen que la gestión de riesgos no sirve, el proceso no va a funcionar; en cambio, si se tiene fe en el proceso, si se disfrutan las reuniones, el proceso va a ser exitoso.

Ahora, la pregunta del millón: ¿por qué gestionar el riesgo en las empresas?

Fundamentalmente, por cinco puntos:

1. Brinda respaldo a los accionistas sobre su inversión y a los clientes, y ese aspecto es fundamental. Una de las

mayores preocupaciones del consejo de dirección es básicamente cómo garantizar el recurso de los accionistas, cómo optimizar esos recursos.

2. Reduce la sensibilidad de las ganancias y el valor de mercado de la empresa. Si hay unos flujos de caja proyectados, ¿por qué no se pueden cumplir esos flujos? Esa es la mejor pregunta, qué puede fallar, y lo que puede fallar, qué impacto va a tener en la entidad, porque finalmente ese flujo de caja golpeará la sostenibilidad futura de la compañía.

3. Apoya el crecimiento de la economía bajando los costos de capital y reduciendo la incertidumbre de actividades comerciales.

4. Ayuda a la empresa a lograr los objetivos de la organización al cumplir esos puntos claves y, sobre todo, a maximizar el valor para el accionista.

5. Promueve la seguridad financiera y laboral. Sobre esto hay un aspecto interesante, porque una de las preocupaciones principales de las organizaciones es cómo garantizarles a esas personas que trabajan para ellas puntos fundamentales como el bienestar y la seguridad laboral. La gestión de riesgos tiene que apuntar indiscutiblemente en dicha dirección, y ese es uno de los argumentos válidos para empezar a venderla en la organización.

Clases de riesgo

Existen varios tipos de riesgos, pero los principales son los siguientes:

1. *Riesgo de mercado.* Cualquier precio que se mueva hacia abajo, que golpee el costo de ventas o las ventas proyectadas, es un riesgo de mercado, saliéndonos del enfoque financiero.

2. *Riesgo crédito.* Toda compañía que posea una cartera, es decir, unas cuentas por cobrar, corre el riesgo de que no le paguen.

3. *Riesgo operacional.* Toda empresa que realice transacciones, que haga negociaciones, que tenga diferentes operaciones donde están incluidas las personas, donde están incluidos los sistemas, corren este riesgo. En este orden de ideas, lo que deben hacer las organizaciones es gestionar en este marco, integrar estos riesgos, convertirlos en una política de empresa y mirar cuáles son los puntos más válidos para empezar a desarrollar ese esquema de gestión. Por fortuna, hay varios puntos que apoyan este proceso. Uno de éstos es el tema de gobierno corporativo, que se ha convertido en un elemento fundamental porque ha habido muchos fraudes internos en las organizaciones, los cuales llevaron a sus compañías a colapsar. La transparencia, la equidad, la resolución de conflictos, todo lo que tiene que ver con controles corporativos y cómo colocar esos valores en acción en la compañía, son el mejor control para los fraudes.

Otro tiene que ver básicamente con el tema de controles internos, que tienden a lograr los objetivos corporativos de una organización.

Otro punto es cómo unir esto con toda la estrategia de la compañía, qué elementos se han de considerar para ligarlo finalmente con la estrategia y empezar a interactuar en una organización.

Otro punto es cómo unir esto con toda la estrategia de la compañía, qué elementos se han de considerar para ligarlo finalmente con la estrategia y empezar a interactuar en una organización.

Por último, una gran pregunta: ¿cuál es el principal reto que enfrentan todas las organizaciones al implementar un sistema de gestión de

riesgos? A mi juicio, el tema de cultura, sobre todo a la hora de construir la compañía. La mayor parte de los procesos han fallado básicamente por un tema cultural, porque la cultura tiene unas características que se deben respetar y se deben entender. Si se comprende eso en cada organización, va a producirse un proceso exitoso de la gestión de riesgos, porque se está tocando la parte principal y es que la gente se movilice voluntariamente, que haga las cosas porque quiere y entienda el concepto de lo que se está efectuando.

De esta manera, aparecen varios puntos referentes a dicho asunto:

1. El lenguaje común del riesgo. Hay que generar una conciencia del riesgo para que la gente comprenda por qué es fundamental en las actividades que realiza diariamente, cuáles son esos beneficios, cuáles son esos puntos principales a los que quiere apostarle.

2. Lo que tiene que ver con un sistema organizado de participación. O sea, involucrar a las personas dándoles participación. Si la gente viene y aporta, da ideas, propone y discute, se

La mayor parte de los procesos han fallado básicamente por un tema cultural, porque la cultura tiene unas características que se deben respetar y se deben entender.



está empezando a generar un choque interesante, pero finalmente todo esto trascenderá en el tema cultural.

3. Lo relacionado con la gestión del cambio. La cultura de cada compañía es diferente, lo cual nos lleva a la siguiente conclusión: la gestión de riesgo para cada compañía, tenga o no un marco de trabajo, va a ser independiente e ínfima. Además, cada cultura tiene unas normas que se deben respetar. Si esos elementos no se tienen en cuenta a la hora de implementar, a la hora de hacer una gestión integral del riesgo, el esquema se va a romper.

4. Un esquema de recompensas. La recompensa no ha de ser necesariamente financiera, puede ser de otro tipo, como por ejemplo de beneficios para el equipo de trabajo de la organización.

5. Otro punto fundamental es la responsabilidad social interna y externa, es decir, cómo se va a responder ante los grupos de interés –tanto internos como externos–, cómo se va a promulgar la gestión de riesgos y de qué manera se va a mejorar todo esto para los diferentes grupos.

Finalmente, hay que garantizarle al equipo de trabajo una visión integral del proceso, esto es, conocerlo antes de empezar a implementarlo, tener las herramientas necesarias y conocer desde la parte de gestión hasta el tema de implementación, pasando por aspectos como el gobierno

corporativo, la gestión de procesos y las técnicas gerenciales.

Conclusiones

De todo lo anterior se pueden sacar varias conclusiones, entre ellas las siguientes:

La primera es que la gestión de riesgo se convierte en un generador de valor para las organizaciones, en el protector de ese patrimonio, en el protector de esos ingresos volátiles, en el protector de la imagen, en el impulsor del patrimonio.

La segunda es que hay que aprender de los errores de otros y empezar a aplicar esto en nuestra compañía, adaptando los modelos a nuestra empresa.

Una tercera conclusión es que hay que brindar respaldo a los inversionistas. Esa es una de las finalidades principales del tema de gobierno corporativo para Latinoamérica, impulsado en Colombia por Confecámaras, donde se busca tener unas mejores fuentes de financiación y darles unas garantías principales a los inversionistas.

La cuarta es que se debe proteger la reputación de la compañía, porque finalmente eso es lo que va a garantizar su sostenibilidad futura.

La quinta conclusión es que se deben integrar los riesgos para que interactúen en un marco de gestión.

Por último, hay que comprender la cultura de la organización para implementar una gestión de riesgo exitosa.

Eso es, básicamente, lo que quería comentarles acerca de la gestión de riesgos

Hay que comprender la cultura de la organización para implementar una gestión de riesgo exitosa.



ALEXANDER CAMPOS OSORIO

El objetivo fundamental de mi intervención es mostrar que la gestión de riesgos, el quehacer bancario y la forma como los bancos vienen operando en el ámbito internacional han cambiado. Es decir, se ha pasado de unos esquemas viejos, estandarizados, poco flexibles, a unos sistemas más sofisticados en donde las consideraciones de riesgo, los elementos de probabilidad, de información, de correlaciones, de todo lo que tiene que ver con los respaldos efectivos de las garantías de

crédito, desempeñan un papel fundamental.

Los bancos vienen implementando sistemas de gestión de riesgo de crédito, unos más activamente que otros, pero el mundo financiero se ha movido hacia allá y se va a mover en un futuro cercano a unas velocidades mucho más altas.

Con esto quiero decir que si el sector empresarial se mueve a la misma velocidad, posiblemente haya mayor acceso a los mercados financieros a unos mejores precios, que es un elemento de competitividad importante para la empresa colombiana.

Hacer gestión de riesgos como se planteaba anteriormente implica acce-

der al sector financiero en unas condiciones de mejores tasas de interés, de mejores plazos de financiación, obviamente en unas cantidades mucho mejores, lo que genera valor para cualquier organización.

Hay que considerar que los bancos están sujetos a un nivel de regulación bastante exigente. Ningún otro sector en la economía está tan sujeto a la regulación como el sector financiero, y una de esas piedras angulares en que descansa la regulación es el requerimiento del nivel de solvencia. Esto significa que los bancos deben mantener por lo menos un 9% de su capital frente al nivel de actividad de riesgo que

están asumiendo, cuando en el plano internacional es de 8%. Quiere decir esto que por cada cien activos ponderados por nivel de riesgo, el sector financiero debe tener por lo menos nueve para hacerle frente al riesgo de crédito, entendido como las posibles pérdidas que se puedan derivar por incumplimiento de sus clientes, y en este caso voy a centrarme solamente en el caso de los clientes corporativos.

Para medir este nivel de capital adecuado se está utilizando el acuerdo de capital adoptado en 1988, conocido como Basilea I. Este esquema se resume fundamentalmente como la necesidad de aplicar unas ponderaciones fijas por cada categoría de riesgo y se dividía en varias categorías, donde se aplicaba un porcentaje de ponderación del cero a los créditos que se otorgaban a gobiernos nacionales y, en el caso extremo, una ponderación del 100%, por ejemplo, para créditos de consumo, para créditos a pequeñas y medianas empresas que no contaran con suficientes garantías, etc. Es decir, si un banco le iba a otorgar un crédito a un gobierno nacional, no tenía necesidad de constituir ningún colchón mínimo de capital porque la ponderación para ese tipo de créditos era de cero, mientras que si le daba un crédito a una familia debía ponderarlo al 100% y constituir por lo menos el 9% de ese crédito en términos de capital.

Este acuerdo tenía varias limitaciones: una, que salta a la vista, es que no estaba ajustado al riesgo.

Esta discusión comenzó a presentarse a finales de los noventa, cuando estallaron las crisis financieras internacionales y se vio que muchos bancos no pudieron resistir las enormes pérdidas por créditos que se habían otorgado cuando estaban aplicando este tipo de tablas, absolutamente insensibles al tipo de riesgo.

Dadas esas dificultades, se propuso un acuerdo más sensible al riesgo,

conocido hoy en día como el acuerdo de capital de Basilea II, en el que se sugieren tres esquemas: una opción es utilizar unas matrices de calificaciones y de ponderaciones acordes con ese tipo de calificaciones.

Si uno tiene en cuenta la calificación de Colombia hoy, el país podría entrar en una categoría de ponderación del 100%, es decir, una ponderación creciente desde el punto de vista de la calificación: mientras menor sea la calificación de riesgo, pues mayor va a ser la ponderación para el crédito empresarial y el crédito soberano.



Los bancos están sujetos a un nivel de regulación bastante exigente. Ningún otro sector en la economía está tan sujeto a la regulación como el sector financiero.

Otra opción con la que cuenta Basilea II es la adopción de modelos internos.

El modelo básico interno, a diferencia del modelo avanzado interno, les permite a las entidades financieras hacer el cálculo de la probabilidad de *default*; en cambio, los modelos avanzados permiten hacer además el cálculo de la probabilidad de *default*, el cálculo de la pérdida a causa del incumplimiento, la exposición en el momento de *default* y el tratamiento de las garantías.

Acceso al crédito

Uno de los principales obstáculos que ha identificado la banca para llegar con

más créditos a las pyme es la falta de información confiable financiera y contable, es decir, el tema de las garantías, algo bastante delicado porque esta clase de empresas dependen en gran medida del crédito bancario para sus niveles de expansión.

Más o menos 37% de las fuentes de financiación para la pequeña y la mediana empresa proviene del crédito bancario, por lo que el tema de la adopción de técnicas más sofisticadas para la medición del riesgo de crédito, la necesidad de generar información de calidad y oportuna, de establecer

estándares de contabilidad internacional, aparejados con una mejor calidad y gestión de las empresas, resulta más urgente para la pequeña y mediana empresa.

Entre esas técnicas de medición de capital se consideran importantes las garantías, no solamente desde el punto de vista de cuánto valen, sino de su calidad como colaterales, asociada con la posibilidad de recuperarlas de manera rápida y a un menor costo. Colombia no es el mejor país en términos de tiempo en mora para recuperación de garantías, ni en donde hay menores costos para recuperarlos; avanzar en estos frentes implicará lograr una mejor calidad de garantías, que naturalmente les conviene más a las empresas que cuentan con ella.

Hacia dónde va Colombia

La Superintendencia Bancaria ha venido avanzando en la adopción de modelos internos para la medición de las provisiones, a diferencia del capital, dado que éste intenta cubrir las pérdidas extremas por riesgo de crédito, cuando se desvía más allá de lo esperado por parte de los bancos con pérdidas.

Recientemente, la Superintendencia Bancaria puso a consideración del mercado un modelo interno de referencia desarrollado por ella misma, y que las entidades financieras pueden acoger si sus modelos internos son objetados en el organismo de supervisión. Esto significa que Colombia ya se está moviendo en la dirección de adoptar modelos estadísticos que reflejen mucho más acertadamente el riesgo que se está asumiendo.

Lo que se busca con este modelo de riesgo para el caso de créditos corporativos es, como ya dije, calcular la pérdida esperada en un crédito y de esa manera tener en el estado de pérdidas y ganancias lo que se espera por ese riesgo.

Según algunos cálculos, el nivel de provisiones actual para el sector corporativo es del orden de \$1,4 billones, y si se adoptara la metodología nueva, o por lo menos el modelo de referencia de la Superintendencia Bancaria, este nivel debería ser de \$2,5 billones. Se supone que en el año 2007, cuando entren a operar ese tipo de modelos, la economía va a seguir en un ciclo alto en materia económica; esto significa

que los bancos tienen que aprovisionar más en la época de las vacas gordas y aprovisionar menos en la época de las vacas flacas, con miras a evitar ese enorme sesgo que se produce después que pasa una recesión, donde otorgar un crédito puede ser sumamente costoso, dados los altos niveles de provisión.

De todo lo anterior se puede concluir que los bancos están usando cada vez más modelos internos de riesgo, son cada vez más sensibles a los riesgos para la constitución de provisiones y de capital, y que tales adopciones estadísticas tienen implicaciones para las corporaciones en materia de acceso y de costo de crédito. Este hecho debería inducir a las empresas a mejorar su calidad crediticia para obtener mayor acceso y mejores precios en los mercados financieros.

Empresas que no cuenten con sistemas de contabilidad estandarizados, que no revelen información, que no posean sistemas de gestión interna, posiblemente van a tener unos menores niveles de calificación, unas mayores tasas de interés en los mercados financieros y su capacidad competitiva frente a las empresas que sí cumplen con esos requisitos se va a ver deteriorada.

La adopción de modelos internos para la constitución de provisiones va a empezar a hacerse efectiva a partir del año 2007, pero desde ahora es clave que las empresas y los bancos tomen conciencia de que para acceder en mejor forma a los mercados financieros va a ser mucho más importante la calidad de la información y de la gestión, pues solamente así se pueden superar algunas de las barreras que han distanciado al sector financiero del sector real.

La Superintendencia Bancaria puso a consideración del mercado un modelo interno de referencia desarrollado por ella misma, y que las entidades financieras pueden acoger si sus modelos internos son objetados en el organismo de supervisión.



ÓSCAR BRAVO

Para nosotros en Ecopetrol, la gestión integral de riesgos consiste en buscar que la empresa cumpla su misión sin contratiempos, que no es otra que garantizar el suministro adecuado de combustibles y de crudo para el país, así como también generar recursos abundantes para la economía colombiana.

Así las cosas, la empresa sin gestión de riesgo tendría una dispersión de los flujos de caja mucho más amplia, que en últimas es lo que más interesa.

Lo primero que hay que entender es qué riesgos vamos a gestionar, y en ese sentido nosotros tratamos de clasificarlos en categorías. El primer grupo es de los riesgos operacionales, manejados ampliamente; sin embargo, el

manejo de la situación social es algo para lo cual no hay muchas fórmulas, o la situación ambiental, aunque hemos avanzado bastante en ese aspecto en los últimos años. El manejo de los derechos humanos es otro riesgo bastante delicado, así como los riesgos típicos operacionales.

Otros riesgos bastante trabajados son los de entorno, y los de entorno ya no son los internos, sino los externos, entre los cuales están terremoto, huracán, variación de los precios del crudo, el Alca o el TLC, es decir, todo lo que nos pueda impactar.

Esos son los dos grupos de riesgos que más se trabajan, pero hay otros dos que tradicionalmente se ignoran: el riesgo de ejecución de proyectos y los riesgos estratégicos, esto es, los que atentan contra la supervivencia de la compañía.

El proceso en gestión de riesgos está muy amarrado al ciclo de gerenciamiento de riesgos, de administración de

riesgos, y que aplica desde el riesgo de accidentes laborales hasta el manejo de las coberturas para precios de crudo o el manejo de seguros, que en Ecopetrol llega al orden de US\$60 millones por año.

La estrategia

Una gestión integral de riesgos sin estrategia no es nada, porque esta última es el marco de referencia de la primera. Si no hay estrategia, no hay gestión integral de riesgos, porque así la empresa no sabe para dónde va, pues no tiene objetivos ni metas.

A partir de esos objetivos y metas se definen los riesgos del cumplimiento de la estrategia, y básicamente se trata de mirar qué cosas son las que afectan la supervivencia de la compañía.

El riesgo más importante para cualquier empresa petrolera es no tener reservas. El petróleo es la sangre en las venas de las compañías: si no hay petróleo, no hay nada; si no encontramos petróleo, estamos muertos. Ese es, de lejos, el principal riesgo. En Ecopetrol todavía hay gente que pregunta por qué ese es el riesgo más importante, pero lo dicen porque en este momento somos la empresa que produce más utilidades en este país. Me parece que esa es una posición un tanto facilista.

Por otra parte, hemos descubierto que el contrabando de gasolina desde Venezuela nos beneficia. Y es que al mirar el flujo de caja, advertimos que a los precios

que está la gasolina a Ecopetrol le resulta más rentable exportarla que venderla aquí; no obstante, hay que considerar que la gasolina de contrabando tiene plomo y azufre, lo que atenta contra el medio ambiente. Todo tiene sus más o sus menos.

Al mirar el flujo de caja, advertimos que a los precios que está la gasolina a Ecopetrol le resulta más rentable exportarla que venderla aquí.

En la Dirección General de Planeación y Riesgos debemos definir la probabilidad de cumplir con las metas propuestas, ya que eso es útil para los incentivos, pero sobre todo para no prometerles a los grupos de interés lo que no es posible. Por ejemplo, fijar la meta de producción de crudo anualmente es algo complicado, pues si no cumplimos todo el mundo nos cae encima, empezando por la comisión quinta del Senado, y es más lo que gastamos tratando de defendernos que el efecto real que esto tiene.

Otro aspecto interesante es el referente a la parte de gestión, y por lo general el valor de una compañía está asociado a valores financieros. Algo que estamos vendiendo es que al manejar riesgos conseguimos créditos más fácil, así como también que inversionistas internacionales vengan a hacer negocios con nosotros.

Mapa de riesgos

Algo que encontramos cuando hicimos nuestro primer mapa de riesgos fue que, para sorpresa nuestra, en todos los riesgos se estaba haciendo algo; sin embargo, la gran pregunta es la siguiente: ¿se está haciendo lo óptimo? En esto hay que considerar la relación

beneficio-costos, porque a veces uno gasta más de lo que debe en gestión de riesgos, pero igual debe ser una decisión informada. Para eso tenemos un comité de riesgos, que es el que decide hasta dónde

se puede llegar y qué acciones se deben tomar para llegar a esos niveles tolerables.

La ventaja de manejar los riesgos consiste, básicamente, en que se puede determinar el nivel de exposición de la empresa. Si vamos a conseguir



créditos y a manejar socios, resulta útil operar bajo un nivel de riesgo tolerable y con los riesgos controlados, al igual que tener estabilizado el flujo de caja. De este modo podemos obtener, cuando nos dejen endeudar, créditos más económicos.

Cultura organizacional

Finalmente, vamos a hablar de la cultura organizacional, tal vez el tema más importante. La verdad, para construir el mapa de riesgos nos fijamos en lo que hizo ISA, gracias a que el presidente de Ecopetrol está en la junta directiva de esa empresa. Entonces, en tres meses fusilamos su proyecto, aunque con el debido permiso.

Eso lo hicimos a finales del 2003, identificamos acciones a comienzos del 2004, mientras que el año pasado y parte de éste nos hemos dedicado a optimizar ese manejo de riesgos.


La meta que nos fijamos es poder medir todo y tenerlo en un sistema, ya que eso nos va a permitir tomar decisiones informadas para coberturas que valen mucho dinero, como seguros, por ejemplo.

Ésta es una ventaja competitiva para la empresa, puesto que nos per-

mite negociar en mejores condiciones. Nosotros esperamos poder disfrutar de estos beneficios en un par de años, si la cosa funciona bien.

Un reto que tenemos hoy es el manejo del riesgo de orden público, porque el tema de derechos humanos es cada vez más importante. Como somos un poco neófitos en este asunto, hemos preguntado cómo lo manejan otras

empresas, porque en algunas ocasiones se puede experimentar, pero no del todo.

El gran mensaje que les quiero dar es que este es un proceso doloroso, interesante, apasionante. Yo soy un apasionado del tema, me gusta mucho, hasta el punto de que terminé escribiendo un libro con mi esposa, que se llama *Gestión integral de riesgos* 

PREGUNTAS

¿A qué metodología de evaluación de riesgo le da mayor importancia cuando se trata del precio del petróleo?

Óscar Bravo

El precio del petróleo se comporta como un movimiento browniano, con saltos difusos y reversión a la media, y

eso está escrito en una ecuación matemática. Hay varios modelos que trabajan el tema, pero en Ecopetrol decidimos no usar el más sofisticado, porque no lo entiende nadie; utilizamos uno con manejo, autocorrelacionado, que tiene un comportamiento excelente a largo plazo.

Hay varios modelos que trabajan el tema, pero en Ecopetrol decidimos no usar el más sofisticado, porque no lo entiende nadie.

lacionado, que tiene un comportamiento excelente a largo plazo.

¿Se debe ponderar la gestión de riesgo estrictamente con respecto a la estrategia corporativa?

Si fuéramos a hablar hoy con el presidente de la compañía, diría que con respecto a la estrategia corporativa él tiene sus dudas, pero si ustedes me preguntan a mí yo estoy convencido de que es la correcta, porque es la única manera de detectar los riesgos estratégicos, que son en últimas los más

críticos, pero obviamente eso depende de las necesidades.

Una empresa en una industria madura tal vez no necesita tanto énfasis estratégico. Cuando no hay muchos competidores ni muchas amenazas, el enfoque estratégico no es tan importante. Yo diría que en 99,99% de los casos, recomendaría el enfoque arrancando por el tema estratégico.

¿Han tenido enfoques matemáticos para cuantificar riesgos financieros y optimizar flujos de caja?

Para el caso del sector financiero, se usan meramente modelos matemáticos; para el caso de la estimación del riesgo de mercado, hay metodologías desarrolladas por empresas de consultoría privada, que las han patentado como metodologías matemáticas de reconocido valor. Este es un proceso en el que la academia se viene integrando cada día más, ofreciendo modelos matemáticos y metodologías más sofisticadas.

En lo referente al riesgo de crédito ocurre exactamente igual. En este caso se utiliza otro tipo de enfoques, pero son modelos matemáticos y estadísticos los que soportan el cálculo del valor en riesgo, utilizando obviamente



algunos supuestos sobre el comportamiento de las variables objeto de análisis.

Para el caso de riesgo del mercado, se pueden suponer modelos y se pueden utilizar metodologías económicas de variantes condicionadas; para el caso del cálculo de las volatilidades de los precios, depende del enfoque conceptual que se tenga; sobre cada una de las variables que se van a estimar, se utiliza un enfoque matemático diferente, pero esto se sustenta sólo en este tipo de variables. Obviamente, el juicio de quien está diseñando los modelos y de quien los está utilizando es muy importante, ya que de él depende la escogencia de la herramienta más adecuada.

En cuanto al tema de cuantificación, se ha venido especializando a

través de las primeras apariciones del riesgo como riesgo de mercado, sobre todo para el tema de flujos de caja. Específicamente, en un esquema de gestión de riesgos llegar a una cuantificación es todo un reto, pues muchas veces no están los datos. El doctor Bravo planteaba una pregunta muy interesante: cómo se mide la parte de conocimiento en una organización. Esto es algo muy complicado de resolver. Un modelo es una aproximación a la realidad, y como tal estará expuesto a reformas y va a ser susceptible de mejoramiento durante su período de vida; el punto es definir primero los problemas muy bien, qué se quiere cuantificar, hasta dónde se quiere llegar, cuáles son esos puntos principales que se van a considerar dentro de ello.

Si se tiene una estructura lógica del problema, es mejor trabajar el tema con estadísticos y con matemáticos. Desde mi percepción, el problema de riesgos no es sobre las herramientas que tenemos para llegar a la cuantificación, porque de hecho hay personas experimentadas en el tema que tienen una larga trayectoria.

A mi juicio, sin los modelos no se pueden tomar buenas decisiones, en especial en el sector financiero, que es el que ha trabajado más duro en el tema; por tal razón es importante desarrollarlos.

Mi recomendación es no irse a los extremos de querer llegar a medir demasiado y que uno después ni entienda qué es lo que está haciendo. Eso es lo que no se puede perder de vista cuando se van a medir cosas.

¿Qué metodología recomienda para hacer un sistema de gestión de riesgos, calidad, información y seguridad?

Si de algo podemos estar seguros es de que en la actualidad no existe la metodología para manejar el tema, pero entre todos estamos construyéndola.

Diego Gómez

Digamos que una buena metodología es aquella que integre elementos estratégicos, elementos de calidad y elementos del sistema de información.

Sin embargo, creo que más que recomendar una metodología, se debe buscar cómo adaptarla a las necesidades de la entidad, qué elementos se van a tener en cuenta para adaptarla, porque los procesos están, pero una metodología como tal, que diga paso a paso y específicamente hasta dónde llegar en la entidad, no existe.

El punto es empezar a construirla, comenzar a mirar otras experiencias internacionales, estudiar por ejemplo el caso de Ecopetrol como un *benchmark* del mercado, mirar experiencias como las de algunas entidades del sector financiero, entre otras, e ir construyendo su marco de gestión, básicamente, porque recomendar una metodología es difícil.

Yo creo que si de algo carece el mundo hoy es de una metodología medianamente universal para el manejo del tema.

De pronto lo que habría que recomendar es comenzar poco a poco, ver qué se puede hacer; esto está todavía en la fase de aprender haciendo. Si de algo podemos estar seguros es de que en la actualidad no existe la metodología para manejar el tema, pero entre todos estamos construyéndola.

¿Cómo se puede adquirir o consultar la norma 5254?

Enrique Aranguren

Me pueden escribir al correo electrónico earanguren@icontec.org.co y yo se las hago llegar; también me pueden dar una base de datos de los inscritos y se la envío a todo el mundo, o a través de la universidad.)



Sin los modelos no se pueden tomar buenas decisiones, en especial en el sector financiero, que es el que ha trabajado más duro en el tema; por tal razón es importante desarrollarlos.

De regreso al punto de partida

Tomado y adaptado de *Science et Vie*, N° 1019

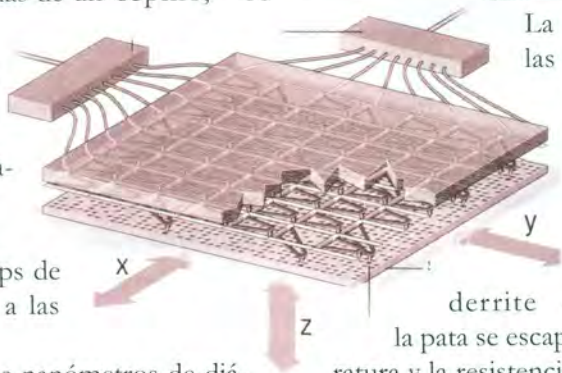
Según la IBM, parece que en unos pocos años regresaremos a los dispositivos de memoria basados en huecos, tal como se hacía con las tarjetas perforadas de los años prehistóricos de la informática. Sin embargo, hay una pequeña diferencia... de tamaño: las nuevas tarjetas serán soportes del tamaño de una estampilla de correo y allí habrá una capacidad de almacenamiento comparable a la de un disco duro de un PC. El secreto: microfábricas capaces de producir y de ver minúsculos huecos con capacidad de almacenamiento del orden de varios gigabytes.

En esta memoria del futuro, millares de punteros, alineados como los extremos de las cerdas de un cepillo, se desplazan sobre unos pocos milímetros cuadrados de una película plástica perforando millares de huecos, minúsculos pero reales. Es el principio de las tarjetas perforadas de antaño, pero en la escala nanométrica de hoy. Después de los discos magnéticos y los chips de memoria, es un extraño retorno a las fuentes originales.

Serán perforaciones de unos pocos nanómetros de diámetro que se alinean por miles en una malla de unos pocos milímetros de lado. Se necesitaron más de diez años de investigación del equipo de Zurich, dirigido por Peter Vettiger, para poner a punto un prototipo de esta nueva memoria revolucionaria llamada "milpiés". Así como un gusano ciempiés puede tener cerca de 750 patas, la célula de memoria desarrollada tiene 1.024 patas minúsculas, organizadas en una red de 32 filas con 32 patas cada fila. Uno de los secretos de esta nueva tecnología consiste en "leer" o "escribir" 1.024 bits cada vez. El paralelismo del milpiés y su capacidad de trabajar simultáneamente 1.024 bits compensan la lentitud relativa del proceso mecánico de lecto-escritura.

El principio de base del milpiés es simple. Cada una de sus patas está formada por dos brazos elásticos y conductores en V, unidos por un segmento más resistente con una punta acerada. Cuando se aplica una corriente eléctrica entre los dos brazos, el segmento terminal se calienta por el efec-

to Joule (producción de calor por el paso de una corriente eléctrica en un conductor). Cuando la temperatura alcanza los 400°, la punta aplicada sobre una delgada película de un polímero lo funde y produce un hueco. Los huecos se perforan en la película de polímero mientras la punta de cada una de ellas se desplaza con regularidad movida por un mecanismo de barrido que desplaza las 1.024 patas del milpiés, haciéndolas recorrer 92 micrómetros cada una en cada dirección, perforando así los huecos en una pequeña área de 92×92 micrómetros; el conjunto de estas minúsculas parcelas ocupa en total un cuadrado de tres milímetros de lado.



La lectura de los datos registrados con las miniperforaciones se hace con un nuevo recorrido del milpiés sobre la película, usando las patas como un cepillo de 1.024 cerdas. Aquí, cada pata penetra en el hueco y se aplica una corriente más débil hasta alcanzar 350 °C solamente, que no

derrite el polímero pero deja que el calor de la pata se escape por allí, lo cual hace caer la temperatura y la resistencia del extremo caliente y la lectura de este valor eléctrico permite detectar un hueco, es decir, un "1". Para "borrar" los huecos, el milpiés funde de nuevo el material alrededor del hueco hasta obtener la superficie plana inicial.

El equipo de Vettiger en Zurich ha construido varios prototipos comenzando por redes de 5×5 patas y luego de 32×32 patas. En milpiés de 32×32 patas ha sido posible registrar información con densidades del orden de los 30 gigabits por pulgada cuadrada.

Aún faltan muchos detalles para arreglar antes de tener un producto que pueda ofrecerse comercialmente. La siguiente etapa será la construcción de un milpiés de 64×64 , es decir, un total de 4.096 patas. Teniendo en cuenta los resultados actuales y la relativa posibilidad de una producción industrial, sólo faltan unos pocos años para que esta novedosa tecnología de lectura y almacenamiento de datos sea una realidad a precios aceptables.