

REVISTA DE LA ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA

Año 17 N° 67

Julio - Septiembre de 2007

ISSN 0121-5132

Propuesta de modificación de la ecuación para la estimación del módulo de elasticidad del concreto en función de la resistencia a la compresión para Bogotá

Entramados livianos de acero como aplicación a la vivienda

La enseñanza de la informática a través de escenarios basados en juegos discretos

Un modelo para la comprensión de los procesos de producción con base en los flujos de materia prima

Integración del sistema de planeación de recursos empresariales con un sistema de manufactura integrado

Cadenas productivas para el aprovechamiento de residuos sólidos.
Incorporación de los recuperadores a la solución

Aplicación de la teoría de registros de representación a situaciones de variación

Las redes organizacionales en la nueva forma de producción del conocimiento

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

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



ESCUELA
COLOMBIANA
DE INGENIERÍA
JULIO GARAVITO

Notas editoriales

JAVIER BOTERO ÁLVAREZ

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

Durante estos últimos años el país ha estado inmerso en procesos de planeación y prospectiva de largo plazo, tanto a nivel sectorial como regional y nacional. Un ejemplo claro del primer tipo y de gran importancia para nosotros es el Plan Nacional Decenal de Educación. En este proceso, a través de una estrategia de participación masiva, el país planteó durante los meses de enero a julio las principales metas y derroteros para el sector educativo para los próximos diez años. Temas como el bilingüismo, la formación técnica y tecnológica, la formación para el trabajo y su articulación con la educación formal, así como la formación y el fomento de la investigación y el desarrollo científico fueron temas de suma importancia en este proceso y en sus planteamientos finales. Otro ejemplo de prospectiva sectorial de mucho interés y trascendencia para nosotros y para nuestros lectores es el trabajo que Colciencias ha realizado dentro de la Visión Colombia Segundo Centenario, la Cartilla de Ciencia, Tecnología e Innovación Visión 2019: Fundamentar el Crecimiento y el Desarrollo Social en la Ciencia, la Tecnología y la Innovación, tema que hace parte del primer objetivo de la propuesta general de la Visión 2019: *Una Economía que garantice un mayor nivel de bienestar*, encaminado a consolidar a Colombia dentro de la sociedad del conocimiento. En este documento se proponen las estrategias para que el país disminuya el rezago tecnológico y científico que ha afectado enormemente el desarrollo, el bienestar social, la productividad y la competitividad del país, a través de cuatro principios básicos de acción: 1) *La ciencia, la tecnología y la innovación contribuyen sustancialmente a incrementar los estándares de vida de la sociedad y a generar riqueza y progreso económico sostenido*; 2) *La creación y consolidación de capacidades humanas es un factor esencial para construir una sociedad y una economía del conocimiento*; 3) *En la política de promoción de la ciencia, la tecnología y la innovación deben participar activa y coordinadamente los generadores, mediadores y usuarios de conocimiento*;

y 4) *La promoción de actividades científicas y tecnológicas por parte del Estado se debe orientar a la comprensión, prevención y solución de problemas nacionales y a dinamizar el desarrollo de las regiones* (Cartilla CT&I 2019, Colciencias).

La *Visión Colombia Segundo Centenario* propone metas ambiciosas en todas las áreas que impactan el desarrollo y el bienestar social, como justicia social, paz, infraestructura, calidad de vida, productividad, competitividad, democracia, etc. La propuesta, lanzada por el gobierno nacional en el 2005, ha sido discutida a nivel sectorial y regional. En educación, el Ministerio de Educación Nacional produjo el documento “Educación: Visión 2019”, que resume los principales planteamientos para el sector. De igual manera, la Agenda Interna para la Competitividad ha trabajado a niveles sectorial y regional estrategias a mediano y largo plazos para mejorar la competitividad del país y sus regiones en un mercado globalizado.

La Escuela no ha estado ajena a estas iniciativas. A través de sus directivas, ha participado en diferentes escenarios que se han creado en Asunción, el Ministerio de Educación Nacional, Colciencias y la Cámara de Comercio, entre otros. Además, ha iniciado su propio proyecto de direccionamiento estratégico, liderado por su máximo órgano de dirección, el Claustro de Electores, y con la participación de la comunidad. Mediante este proyecto, la Escuela realizará una construcción conjunta de su visión de largo plazo y los respectivos derroteros y la formulación del correspondiente plan de desarrollo 2009-2019.

La revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería invita a todos sus lectores a unirse a su proceso de planeación y prospectiva a través de los diferentes medios diseñados para ello (que dependen de si se es estudiante, profesor o egresado). Para mayor información, podrán comunicarse con la Oficina de Desarrollo Institucional de la Escuela.

Propuesta de modificación de la ecuación para la estimación del módulo de elasticidad del concreto en función de la resistencia a la compresión para Bogotá

DANIEL RUIZ VALENCIA

Ingeniero civil y M.Sc. en Estructuras y Sísmica. Jefe del Laboratorio de Pruebas y Ensayos. Profesor asistente e investigador del grupo Estructuras del Departamento de Ingeniería Civil de la Pontificia Universidad Javeriana. daniel.ruiz@javeriana.edu.co.

HERMES VACCA GÁMEZ

Ingeniero civil y especialista en Geotecnia Vial y Pavimentos. Ingeniero del Laboratorio de Pruebas y Ensayos. Profesor instructor e investigador de los grupos Estructuras y Cecata del Departamento de Ingeniería Civil de la Pontificia Universidad Javeriana. vacca@javeriana.edu.co.

MARÍA LEÓN NEIRA

Ingeniera civil y M.Sc. en Infraestructura Vial y Pavimentos. Ingeniera de calidad del Laboratorio de Pruebas y Ensayos. Profesora instructora e investigadora de los grupos Estructuras y Cecata del Departamento de Ingeniería Civil de la Pontificia Universidad Javeriana. mpleon@javeriana.edu.co.

Artículo recibido: 11/07/2007
Evaluación par interno: 10/10/2007
Aprobado: 04/12/2007

Resumen

Con el módulo de elasticidad del concreto (E) y con la geometría de los elementos estructurales, los diseñadores establecen los desplazamientos en estructuras de concreto reforzado. Dado que el control de calidad del concreto en obra normalmente se realiza por medio de ensayos de resistencia a la compresión y que no es común diseñar una edificación mediante el módulo de elasticidad, los calculistas deben contar con ecuaciones para calcular E . La expresión $E = 3.900\sqrt{f'c}$ ($f'c$ es la resistencia a la compresión; $f'c$ y E en MPa) se propone en la referencia AIS (1998) para estimar el módulo de elasticidad del concreto (valor medio para toda la información experimental nacional, sin distinguir por el tipo de agregado) no debe usarse en Bogotá, ya que dicha ecuación sobrestima el módulo de elasticidad de los concretos de la ciudad. La expresión propuesta en la misma referencia para concretos con agregado grueso de origen sedimentario ($E = 3.600\sqrt{f'c}$) también sobrestima los reales módulos de elasticidad de la capital. Los autores recopilamos información experimental de ensayos de resistencia a la compresión con medición de módulo de elasticidad para Bogotá (más de 1.300 ensayos de acuerdo con la norma NTC 4025) y encontraron que el coeficiente que multiplica a $\sqrt{f'c}$ debe ser inferior a 3.000 (unidades de MPa) para ser consistentes con la variabilidad del módulo de elasticidad y para tener niveles de seguridad acordes con los propuestos en la referencia AIS

(1998). Adicionalmente, los autores proponen reevaluar la expresión $E = 3.900\sqrt{f'c}$, ya que se calculó a partir de datos estadísticos con una alta variabilidad.

Palabras claves: módulo de elasticidad del concreto, ensayos de laboratorio, análisis estadísticos.

Abstract

With the modulus of elasticity of concrete (E) and the geometry of the structural elements the designers assess the displacements of reinforced concrete structures. Taking in mind that the quality assurance of the concrete is established by strength tests and that isn't common that the buildings were design by its elasticity modulus, the designers must have equations to calculate E . The expression $E = 3.900\sqrt{f'c}$ ($f'c$ is the compressive strength; $f'c$ and E in MPa) is proposed in the reference AIS (1998) to calculate the modulus of elasticity of the concrete (average value for all the national experimental information without distinguishing by the type of aggregate) must not to be used in Bogotá since this expression overestimate the modulus of elasticity of the concretes of the city. The proposed expression in the same reference for concretes made with sedimentary aggregate ($E = 3.600\sqrt{f'c}$) already overestimate the real elasticity modulus made in Bogotá. The authors compiled experimental information of concrete strength

tests with measurement of elasticity modulus (more than 1.300 tests according to the standard NTC 4025) for the Colombian capital and found that the coefficient that multiplies $\sqrt{f_c}$ must be inferior to 3.000 (units in MPa) to be consistent with the variability of the modulus of elasticity and to have security levels according to the reference AIS (1998). Additionally the authors propose to revalue the expression $E = 3.900 \sqrt{f_c}$ since it was calculated using statistical data with a high variability.

Keywords: Modulus of elasticity of concrete, laboratory tests, statistical analysis.

INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

El módulo de elasticidad del concreto (E) es uno de los parámetros más importantes que usan los calculistas para diseñar los sistemas estructurales. Al tener en cuenta simultáneamente el módulo de elasticidad y las dimensiones de los elementos estructurales, se estiman los desplazamientos horizontales de entrepiso con los que se calculan las derivas y se estiman las deflexiones debidas a las cargas gravitacionales. El módulo de elasticidad adquiere una mayor importancia, considerando que normalmente el diseño de edificaciones aporricadas o con sistemas duales en Bogotá está controlado por rigidez (deriva), y las dimensiones finales de columnas

y muros de concreto se establecen para que las derivas no superen el 1% de la altura del entrepiso. Si se considera que en la gran mayoría de los casos las edificaciones de concreto se han diseñado mediante procedimientos elásticos lineales (proporcionalidad inversa entre desplazamientos y E), una subestimación de E genera automáticamente incrementos en las derivas (figura 1).

Según la referencia (Gallego y Sarria, 2006), la incertidumbre en el módulo de elasticidad del concreto incrementa la incertidumbre en el cálculo de la rigidez de todos los elementos de una edificación. En la misma referencia se anota que estudios de confiabilidad indican que después de tener en cuenta sólo la variabilidad del módulo de elasticidad del concreto, los resultados de modelos numéricos pueden dar errores de hasta 30% de la estimación real de los desplazamientos. Esto puede ser la diferencia entre un desastre y la supervivencia de una edificación para sus elementos no estructurales o estructurales.

Por otro lado, de acuerdo con la referencia AIS (1998) el módulo de elasticidad para el concreto de peso normal debe determinarse experimentalmente a partir de las curvas esfuerzo deformación obtenidas para un grupo representativo de cilindros estándar de

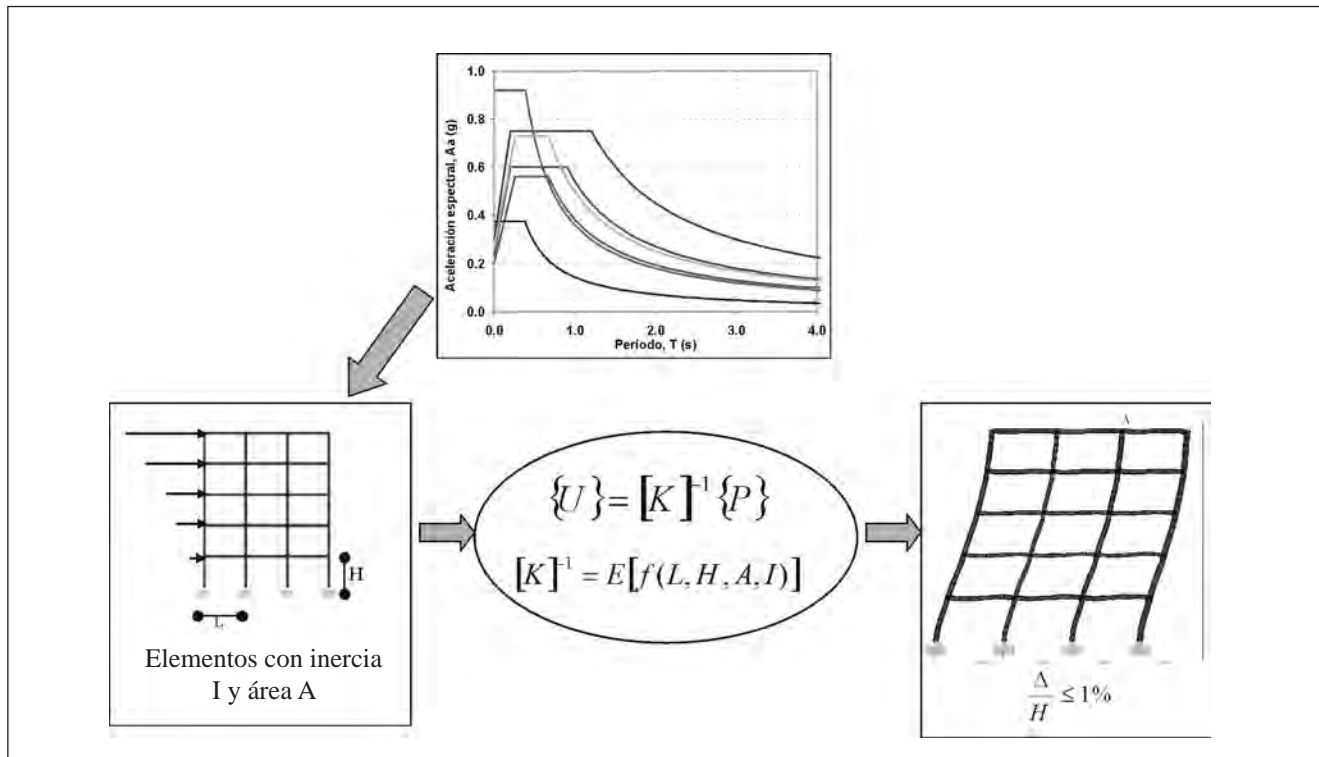


Figura 1 Esquema de cálculo de derivas de acuerdo con la referencia AIS (1998).

concreto, como la pendiente de la línea trazada desde el origen hasta el punto en la curva esfuerzo deformación correspondiente a un esfuerzo de $0,45f'c$ en compresión de acuerdo con Norma Técnica Colombiana (NTC) 4025 (Método de ensayo para determinar el módulo de elasticidad estático y la relación de Poisson en concreto a compresión). Esta norma técnica difiere de la definición dada en la referencia AIS (1998), ya que en la NTC 4025 se define E de la siguiente forma:

$$E_c = \frac{(40\%f'c) - \sigma_{\varepsilon=5E-05}}{\varepsilon_{40\%f'c} - 5E-05}$$

donde $f'c$ es la resistencia a la compresión, $\varepsilon_{40\%f'c}$ corresponde a la deformación unitaria para un esfuerzo del 40% de $f'c$ y $\sigma_{\varepsilon=5E-05}$ es el esfuerzo a la compresión asociado con una deformación unitaria de 50 millonésimas (5E-05). Aunque es probable que esta diferencia en la definición no tenga una marcada influencia en el valor final del módulo de elasticidad (por cuanto ambas alternativas de cálculo corresponden a líneas secantes), debería existir una unificación de criterios al respecto.

Por otro lado, en la referencia AIS (1998) se establecen diferentes ecuaciones para la estimación de E en función de la raíz cuadrada de la resistencia a la compresión del concreto. Estas ecuaciones dependen del origen de los agregados gruesos y se muestran en la tabla 1 (véanse las ecuaciones 1, 2 y 3). Para efectos comparativos, en esta tabla se muestran fórmulas similares usadas en otros países del mundo. Obsérvese que en España el módulo de elasticidad no depende de la raíz cuadrada de $f'c$ sino de la raíz cúbica.

La dependencia del módulo de elasticidad de la raíz cuadrada de la resistencia a la compresión tuvo su origen en Pauw (1960), donde se reporta que E puede estimarse como: $E = a_c \gamma_c^{3/2} \sqrt{f'c}$ donde γ_c es el peso unitario del concreto y a_c una constante adimensional. Debe anotarse que en la referencia AIS (1998) también existen expresiones para estimar el módulo de elasticidad con el mismo esquema de variables (ecuaciones C-8.1 de la referencia AIS (1998).

De acuerdo con Gallego y Sarria (2006), el parámetro $a_c \gamma_c^{3/2}$ toma valores que oscilan entre 9.000 y 14.000 en unidades de kg y cm, y anotan que ésta es una variación supremamente grande y peligrosa porque si el valor del módulo E usado en la obra final es menor que el usado en el diseño, necesariamente los desplazamientos,

rotaciones y deformaciones serán mayores que los calculados. No hay que olvidar que el daño de las edificaciones de concreto está fuertemente ligado a los desplazamientos que sufre durante un movimiento sísmico.

En la gran mayoría de las ocasiones los diseñadores estructurales en Colombia utilizan la ecuación 4 de la tabla 1, la cual corresponde al valor medio para toda la información experimental nacional, sin distinguir por el tipo de agregado. En Bogotá se usa normalmente la ecuación 4 o la ecuación 3 de dicha tabla. Como se presentará posteriormente, para la capital colombiana el uso de las ecuaciones presentadas en la Norma Sismo Resistente (referencia AIS, 1998) puede inducir a errores importantes en la estimación de las deflexiones y las derivas. Así mismo, teniendo en cuenta los resultados experimentales, el módulo de elasticidad es una variable aleatoria y por tanto es necesario que en la norma sismorresistente se presenten ecuaciones tanto para el estimador de la media (promedio) como para el estimador de su variabilidad.

Así mismo, en los últimos años se han diseñado puentes vehiculares donde el parámetro de control ha sido el desplazamiento (deflexiones) y no la resistencia a la compresión del concreto. Esto trajo como consecuencia que los constructores especificaran un concreto de alta resistencia, de modo que esta resistencia estuviera relacionada con un alto valor de módulo de elasticidad, teniendo en cuenta las fórmulas de la referencia AIS (1998). Sin embargo, al realizar pruebas de carga sobre los puentes ya construidos, se observó que las deflexiones medidas eran más altas que las estimadas, a pesar de que en las pruebas de laboratorio se verificaba que dichos concretos tenían efectivamente la resistencia a la compresión especificada. Por tal motivo se realizaron ensayos sobre cilindros de concretos en donde se determinaban la resistencia a la compresión y el E , observándose que los valores de E estimados a partir de la resistencia a la compresión por medio de las ecuaciones descritas en la norma sismorresistente NSR-98 (referencia AIS, 1998) eran inferiores a los medidos directamente.

El origen de la fórmula reportada en la referencia AIS (1998) para el valor medio de toda la información experimental nacional, sin distinguir por el tipo de agregado ($E = 12.500 \sqrt{f'c}$, en kg/cm²), se estableció en (Cortés, Zabaleta y Amézquita (1995) en donde se

Tabla 1
Ecuaciones para estimar el módulo de elasticidad del concreto en diferentes países

Ecuación	País	Módulo elástico	Observación
1	Colombia	$17.500 \sqrt{f'_c}$ (en kg/cm ²) $5.500 \sqrt{f'_c}$ (en MPa)	Agregado grueso de origen ígneo. Tomado de AIS (1998).
2		$15.000 \sqrt{f'_c}$ (en kg/cm ²) $4.700 \sqrt{f'_c}$ (en MPa)	Agregado grueso de origen metamórfico. Tomado de AIS (1998).
3		$11.500 \sqrt{f'_c}$ (en kg/cm ²) $3.600 \sqrt{f'_c}$ (en MPa)	Agregado grueso de origen sedimentario. Tomado de AIS (1998).
4		$12.500 \sqrt{f'_c}$ (en kg/cm ²) $3.900 \sqrt{f'_c}$ (en MPa)	Valor medio para toda la información nacional sin distinguir el origen del agregado. Tomado de AIS (1998).
5	México (Distrito Federal)	$14.000 \sqrt{f'_c}$ (en kg/cm ²)	Concretos con agregado grueso y calizo y peso volumétrico en estado fresco superior a 2,2 ton/m ³ . Tomado de Gobierno del Distrito Federal (2004).
6		$11.000 \sqrt{f'_c}$ (en kg/cm ²)	Concretos con agregado grueso basáltico y peso volumétrico en estado fresco superior a 2,2 ton/m ³ . Tomado de Gobierno del Distrito Federal (2004).
7		$8.000 \sqrt{f'_c}$ (en kg/cm ²)	Peso volumétrico en estado fresco entre 1,9 y 2,2 ton/m ³ . Tomado de Gobierno del Distrito Federal (2004).
8	México (Guadalajara)	$10.000 \sqrt{f'_c}$ (en kg/cm ²)	Para concreto de peso normal. Tomado de NTC de Guadalajara (2004).
9	España	$(8.500)^3 \sqrt{f'_c}$ (en MPa)	Árido: Cuarcita. Tomado de Ministerio de Fomento (2004).
10		$(5.950)^3 \sqrt{f'_c}$ (en MPa)	Árido: Arenisca. Tomado de Ministerio de Fomento (2004).
11		$(7.650)^3 \sqrt{f'_c}$ (en MPa)	Árido: Caliza normal. Tomado de Ministerio de Fomento (2004).
12		$(10.200)^3 \sqrt{f'_c}$ (en MPa)	Árido: Caliza densa. Tomado de Ministerio de Fomento (2004).
13		$(7.650)^3 \sqrt{f'_c}$ (en MPa)	Árido: Rocas volcánicas porosas. Tomado de Ministerio de Fomento (2004).
14		$(10.200)^3 \sqrt{f'_c}$ (en MPa)	Árido: Rocas volcánicas normales. Tomado de Ministerio de Fomento (2004).
15		$(9.350)^3 \sqrt{f'_c}$ (en MPa)	Árido: Granito y otras rocas plutónicas. Tomado de Ministerio de Fomento (2004).
16		$(11.050)^3 \sqrt{f'_c}$ (en MPa)	Árido: Diabasas. Tomado de Ministerio de Fomento (2004).
17	Estados Unidos	$15.000 \sqrt{f'_c}$ (en kg/cm ²)	Tomado de ACI (2005).

analizaron estadísticamente los resultados de algo menos de dos mil ensayos de resistencia a la compresión de concreto con medición de módulo de elasticidad, llevados a cabo con las recomendaciones del ACI de ese entonces. En este estudio el módulo se calculó como la pendiente desde el punto de cero esfuerzo y cero deformación, hasta el punto correspondiente al 45% de la resistencia última. Además, se realizaron ensayos sobre concretos provenientes de concreteras de las ciudades de Bogotá, Montería, Guamo, Ibagué, Valledupar, Barranquilla, Bucaramanga, Neiva, Tunja, Cartagena, Villavicencio y Cali. Así mismo, se analizaron concretos elaborados en obra. Aproximadamente 700 de dichos ensayos se efectuaron sobre concretos producidos en Bogotá. En esta referencia se llevó a cabo un completo estudio estadístico. La AIS incluyó algunas de tales fórmulas producto de esta investigación en el apartado C.8.5.4 de la referencia AIS (1998).

En el estudio realizado por Cortés, Zabaleta y Amézquita (1995) se reportó la curva de la figura 2, la cual relaciona E (eje y) con la raíz cuadrada de la resistencia a la compresión (eje x) para la totalidad de los datos experimentales a nivel nacional. En esta gráfica se incluye la regresión estadística efectuada, cuya ecuación corresponde a la reportada para el promedio nacional en la referencia AIS (1998) (ecuación C.8-2d).

La dispersión de los datos de esta figura es excesivamente alta y el factor R^2 es muy bajo (0,149). Esto

implica que la ecuación $E = 12.500\sqrt{f'c}$ (en kg/cm^2) no explica la relación existente entre el módulo de elasticidad y la resistencia a la compresión para el caso colombiano. Aún más crítico es el hecho de que si el concreto no tiene buenas propiedades mecánicas, la estimación del módulo elástico con base en la ecuación $E = 12.500\sqrt{f'c}$ (en kg/cm^2) puede inducir a errores no conservativos superiores al 80% (figura 2). Por ejemplo, para un concreto de 210 kg/cm^2 , la fórmula estima un E de 181.142 kg/cm^2 , mientras que en la gráfica de la figura 2 se observa una gran cantidad de datos con valores de E inferiores a este valor (hasta de 100.000 kg/cm^2).

Es claro que es responsabilidad de los diseñadores tener el criterio suficiente para escoger la fórmula con la cual pueden calcular E . Así mismo, las características de las fuentes de agregado de cada ciudad son diferentes y en función de esto los diseñadores deberían escoger la fórmula que más se ajuste a las características de los agregados. No obstante, existe una tendencia a usar la fórmula sugerida por el código para el promedio de los resultados experimentales a nivel nacional (aunque en Bogotá se emplea la recomendación para concretos con agregados sedimentarios). Por tal razón, dicho promedio debería ir acompañado de un estimador de la variabilidad de los resultados. En el estudio desarrollado por Cortés, Zabaleta y Amézquita (1995) se presentaron las ecuaciones descritas en la tabla 2, en donde se

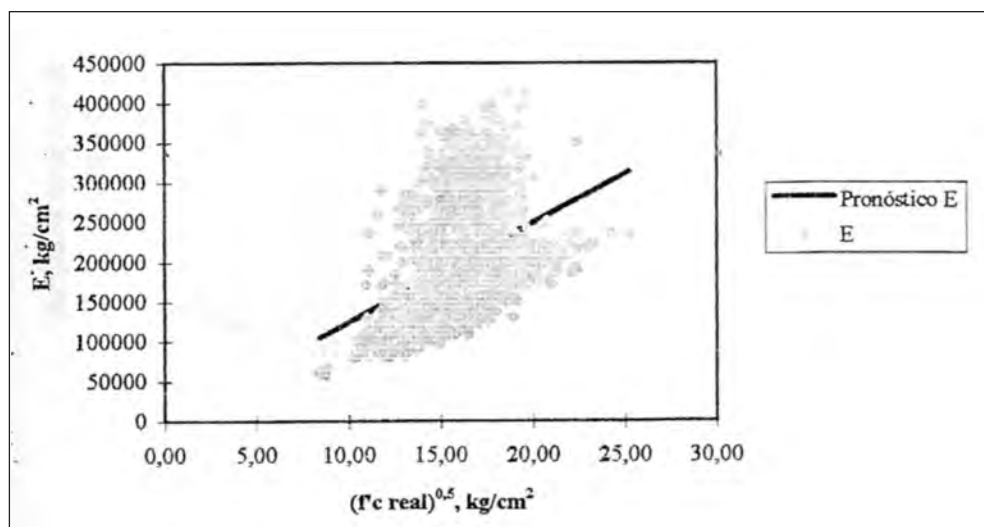


Figura 2 Regresión estadística que dio origen a la fórmula del módulo de elasticidad de la referencia AIS (1998) (promedio nacional). Extractado (escaneado) de Cortés, Zabaleta, y Amézquita (1995).

observa que los valores de correlación R² de todas las ecuaciones son muy bajos e incluso inferiores a 0,5.

La ecuación recomendada por Cortés, Zabaleta y Amézquita (1995) fue la ecuación 2 de la tabla 2, que tiene el R² más alto (0,49). Dicha referencia nunca recomendó la ecuación $E = 12.500\sqrt{f'c}$ (acogida por la AIS), ya que esta fórmula tenía el valor de R² más bajo de todas las ecuaciones analizadas (ecuación 3 de la tabla 2). Es importante anotar que la ecuación 2 de la tabla 2 predice, para el concreto convencional de 3.000 psi, el valor de módulo de elasticidad más bajo de las cuatro ecuaciones.

A raíz de los estudios reportados en la referencia (Cortés, Zabaleta, y Amézquita, 1995), en el año 1998 la fórmula para la estimación del módulo de elasticidad cambió de $E = 13.000\sqrt{f'c}$ (en kg/cm²) y contenida en la referencia SCI (1984) a ($E = 12.500\sqrt{f'c}$ en kg/cm²) contenida ahora en la referencia AIS (1998). Esta disminución del coeficiente no es suficiente para garantizar un adecuado nivel de seguridad, ya que si se consideran las implicaciones sísmicas, la alta variabilidad en el módulo elástico abre la posibilidad a la generación de derivas más grandes que las estimadas por los diseñadores.

A manera de ejemplo, se han presentado casos a escala mundial en los que se ha revaluado de modo sustancial la forma de calcular el módulo de elasticidad del concreto. Específicamente, en el código de construcciones de la ciudad de Guadalajara se pasó de usar la fórmula $E = 15.000\sqrt{f'c}$ (en kg/cm²) y derivada del ACI) a usar la fórmula $E = 10.000\sqrt{f'c}$ (en kg/cm²) (NTC de Guadalajara, 2004).

PROPUESTA DE FÓRMULA PARA LA ESTIMACIÓN DEL MÓDULO ELÁSTICO DEL CONCRETO PARA LA CIUDAD DE BOGOTÁ

Con base en lo anterior se recopilaron, únicamente para la ciudad de Bogotá, información de datos de ensayos de E y su respectiva resistencia a la compresión. En la muestra estadística se incluyen los resultados de ensayos efectuados sobre cilindros estándar (de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura), así como sobre núcleos extraídos de estructuras existentes con diámetros variables entre 50 y 76 mm, pero con relación alto a diámetro de 2,0, tal como lo estipula la Norma Técnica de Referencia.

Para ello se acudió a los datos de las siguientes referencias: Cortés, Zabaleta y Amézquita (1995) (760 datos); reportes de ensayos del Laboratorio de Pruebas y Ensayos del Departamento de Ingeniería Civil de la Pontificia Universidad Javeriana (210 datos entre los años 2002 y 2007); Ardila (1991) (348 datos); Díaz *et al.* (2004) (41 datos). Es importante mencionar que el laboratorio citado anteriormente se encuentra acreditado por la Superintendencia de Industria y Comercio. La densidad de los concretos ensayados se mantiene entre 2.000 y 2.500 kg/m³ (figura 3). El histograma de frecuencias para la resistencia y el módulo de elasticidad de los datos recopilados se presentan en la figura 4. Obsérvese que los datos de resistencia están concentrados entre los 200 y 360 kg/cm², aunque en la muestra estadística se cuenta con resistencias variables desde 20 hasta 820 kg/cm². Los valores más bajos de resistencia y E corresponden a ensayos efectuados sobre concretos de sistemas industrializados a edades tempranas (véase la referencia Díaz *et al.*, 2004). Los ensayos con resistencias más altas corresponden a

Tabla 2
Ecuaciones propuestas por Cortés, Zabaleta y Amézquita (1995)

Ecuación	Ecuación	A	B	C	R2	Calif	¿Cumple supuestos de regresión lineal?
1	$E = A(f'c)^B$	6230,43	0,62		0,24	BAJO	No. Los residuos no se distribuyen normalmente
2	$E = e^{A+B\ln(f'c)+C\ln(w)}$	-30,39	0,51	5,13	0,49	ALTO	Sí
3	$E = B(f'c)^{0.5}$		12.459		0,15	BAJO	No. Los residuos no se distribuyen normalmente
4	$E = B(f'c)^{0.5}w^{1.5}$		0,11		0,29	MEDIO	No. Los residuos no se distribuyen normalmente

núcleos de concreto extraídos de puentes vehiculares probados en el Laboratorio de Pruebas y Ensayos del Departamento de Ingeniería Civil de la Pontificia Universidad Javeriana. Por su parte, los datos del módulo de elasticidad están concentrados entre los 150.000 y los 230.000 kg/cm², aunque se cuenta con datos entre 24.000 y 350.000 kg/cm².

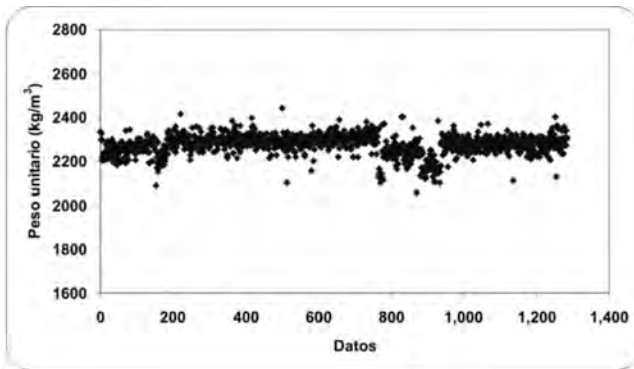


Figura 3 Peso unitario de los concretos de la muestra estadística analizada.

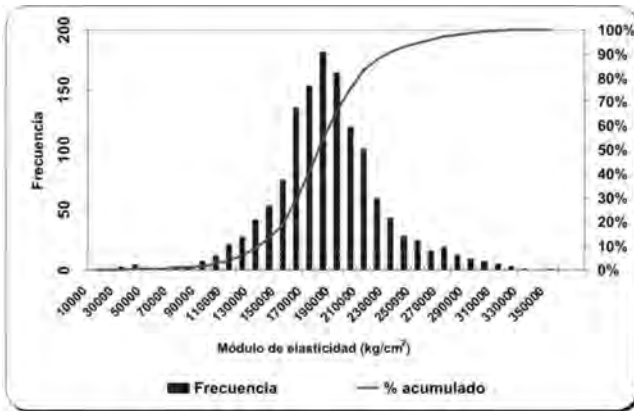
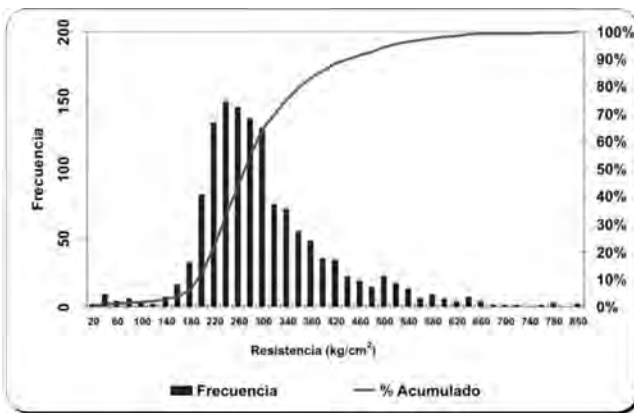
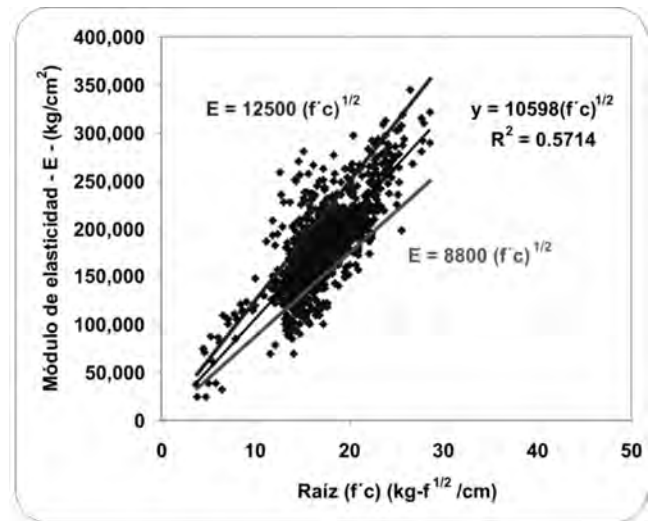
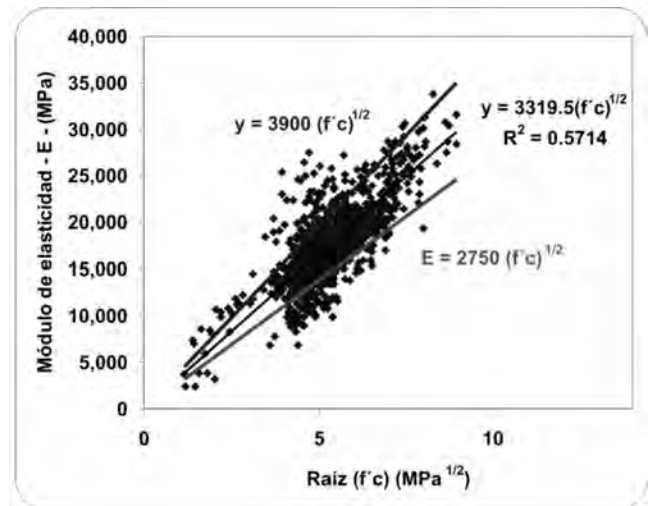


Figura 4 Histograma de frecuencias para a) Resistencia a la compresión. b) Módulo de elasticidad.

Por otro lado, en la figura 5 se resume la información del módulo elástico medido en función de la raíz cuadrada de la resistencia a la compresión, tanto en unidades de kg/cm² (figura 5A) como en MPa (figura 5B).



A)



B)

Figura 5 Resumen de resultados del módulo elástico en función de la raíz cuadrada de la resistencia a la compresión para datos de Bogotá. a) Sistema MKS. b) Sistema internacional.

En las figuras 5A y 5B se muestra la línea de ajuste (ubicada en el centro) con su respectivo R², el cual es de 0,57 (bajo). Con el fin de ajustar el nivel de riesgo aceptado en la referencia AIS (1998), el cual se refleja en los espectros de diseño (probabilidad de excedencia del 10% en 50 años), se muestran las líneas inferiores, por encima de las cuales se encuentra el 90% de los datos. A su vez, en el trazado superior se muestran las líneas

por debajo de las cuales se halla el 90% de los datos. Obsérvese que la cota superior propuesta coincide con el promedio nacional, demostrando que el usar un coeficiente de 12.500 (en kg/cm²) para Bogotá es muy poco conservativo. Aún más, emplear un coeficiente de 11.500 (recomendación para concretos con agregados gruesos, según la referencia AIS (1998) también es poco conservativo.

De acuerdo con estos resultados, se presenta la necesidad de realizar el ajuste a la ecuación de estimación de E , de modo que éste corresponda a niveles adecuados de seguridad y dispersión. Para el caso de Bogotá se propone usar las ecuaciones de las líneas rectas inferiores de la figura 5, que implican un nivel de confianza cercano al 90%, es decir, las expresiones $E = 8.800\sqrt{f'c}$ en unidades de kg/cm² y $E = 2.750\sqrt{f'c}$ en MPa para la estimación de E . Estas ecuaciones corresponderían al límite inferior para la información experimental de la ciudad, sin distinguir por el tipo de agregado, con un nivel de confianza del 90%.

Al comparar estas expresiones con las del promedio nacional de la referencia AIS (1998) ($E = 12.500\sqrt{f'c}$ en unidades de kg/cm² y $E = 3.900\sqrt{f'c}$ en MPa), implica una disminución del 42% en el módulo elástico estimado y del 23% si se compara con la ecuación $E = 11.500\sqrt{f'c}$ (concretos con agregados de origen sedimentario). Esta propuesta puede ser dramática si se tiene en cuenta que las derivas calculadas subirían automáticamente en el peor de los casos un 42%, y por esta razón las edificaciones diseñadas con la referencia AIS (1998) y con la microzonificación sísmica de la ciudad no cumplirían con el requisito de mantener las derivas por debajo del 1%.

Por otro lado, la referencia AIS (1998) propone la siguiente ecuación alternativa (ecuación C8-1d) para estimar el módulo elástico en función de la resistencia a la compresión ($f'c$ en MPa) y del peso unitario del concreto (Wc) en kg/m³:

$$E = 0,034(Wc^{1,5})\sqrt{f'c} \quad (\text{valor medio para toda la información experimental nacional, sin distinguir por tipo de agregado})$$

Para Bogotá, los autores del presente artículo proponen otra expresión que conserva niveles de seguridad adecuados. Es así como en la figura 6 se muestra una nueva regresión estadística que relaciona el módulo de

elasticidad (en MPa) con $(Wc^{1,5})\sqrt{f'c}$ para los datos de ensayos de la capital. En este caso, la pendiente de la curva de regresión media es de 0,0305, inferior (en un 10%) al valor de 0,034 recomendado en la referencia AIS (1998). Esta regresión adolece de los mismos problemas de dispersión y por tal motivo se propone el uso de un coeficiente de 0,0252 en vez de 0,034 (figura 6), con el fin de garantizar que el 90% de los datos esté cubierto de manera segura por la expresión.

Los resultados presentados muestran claramente la alta variabilidad en los resultados del módulo de elasticidad del concreto, por lo cual se sugiere que cada ciudad desarrolle una fórmula para E en función de la resistencia a la compresión y que se ajuste a las condiciones locales.

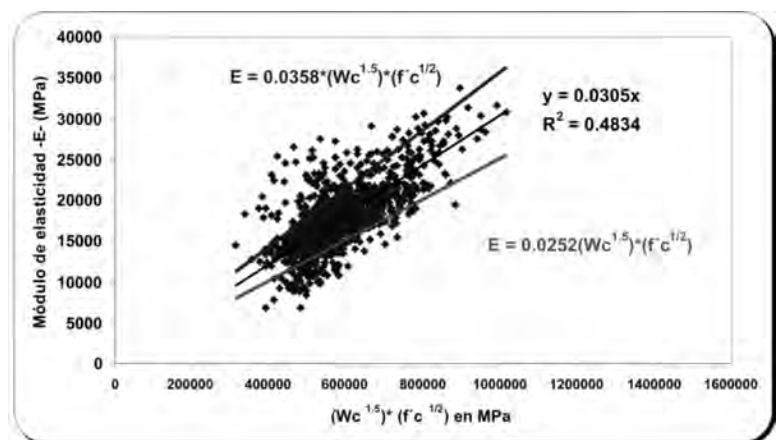


Figura 6 Resumen de resultados del módulo elástico en función de la raíz cuadrada de la resistencia a la compresión para datos de Bogotá.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

• Con base en los análisis efectuados se proponen las siguientes expresiones para la estimación del módulo de elasticidad del concreto (E) en Bogotá:

- $E = 8.800\sqrt{f'c}$ (en kg/cm²) o su equivalente en el S.I. $E = 2.750\sqrt{f'c}$ (en MPa).
- $E = 0,0252(Wc^{1,5})\sqrt{f'c}$ (unidades en el S.I.: Wc en kg/m³ y $f'c$ en MPa).

Estas ecuaciones corresponderían al límite inferior para la información experimental de la ciudad, sin distinguir por el tipo de agregado con un nivel de

confianza del 90% ($f'c$ es la resistencia a la compresión y Wc es el peso unitario del concreto).

- Aunque es claro que es responsabilidad de cada diseñador establecer el módulo elástico del concreto, el Código Colombiano de Diseño y Construcción Sismo-resistente debe brindar estimaciones conservativas. Por ello se sugiere que las expresiones del módulo de elasticidad E (en función de la resistencia a la compresión $f'c$) para el “promedio nacional” $E = 12.500\sqrt{f'c}$ (en kg/cm²) y $E = 3.900\sqrt{f'c}$ (en MPa) (ecuación C.8-2d del título C de la referencia AIS (1998) sean revaluadas, ya que fueron derivadas de análisis estadísticos con un R^2 bajo.

- Para ello se sugiere establecer un intervalo de confianza que permita determinar de manera conservadora las derivas y deflexiones en las estructuras de concreto. Lo propio se propone para la ecuación C.8-1d del título C de la referencia AIS (1998), en la cual el módulo elástico del concreto está en función tanto de $f'c$ como del peso unitario del concreto (Wc).

- Se propone adicionalmente que cada ciudad principal derive expresiones para el módulo de elasticidad adecuadas a las condiciones locales.

REFERENCIAS

- ACI (American Concrete Institute) (2005). ACI 318S-05. Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural y Comentario. Publicado en la República de Colombia por la Seccional Colombiana del Instituto Americano del Concreto. Mayo.
- Acis (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica) (1998). Normas colombianas de diseño y construcción sismo resistente. NSR.98. Título C: Concreto estructural.
- Ardila, O. (1991). Módulo secante de elasticidad del concreto. Tesis para acceder al título de ingeniero civil. Universidad de los Andes.
- Cortés, J.; Zabaleta, J. & Amézquita, A. (1995). Resumen final y conclusiones sobre el ciclo investigativo del módulo de elasticidad del concreto. Trabajo de grado para acceder al título de ingeniero civil. Pontificia Universidad Javeriana.
- Díaz, J.C.; Bautista, L.; Sánchez A. & Ruiz, D. (2004). Caracterización de mezclas de concreto utilizadas en sistemas industrializados de construcción de edificaciones. *Revista de Ingeniería*, N° 19. Bogotá: Universidad de los Andes.
- Gallego, M. & Sarria, A. (2006). *El concreto y los terremotos. Conceptos, comportamiento, patología y rehabilitación*. Asociación Colombiana de Productores de Concreto (Asocreto), Instituto del Concreto.
- Gobierno del Distrito Federal (México) (2004). *Gaceta Oficial del Distrito Federal*. Normas técnicas complementarias del reglamento de construcciones para el Distrito Federal. Octubre, pp. 103 y 104.
- NTC de Guadalajara (2004). *Reglamento de construcciones de Guadalajara*, art. 1661, p. 310.
- Pauw, A. (1960). Static Modulus of Elasticity of Concrete as Affected by Density. *ACI Journal*, vol. 57, N° 6, Dec.
- SCI (Sociedad Colombiana de Ingenieros) (1984). Código Colombiano de Construcción Sismo Resistente. CCCSR-84.

Entramados livianos de acero como aplicación a la vivienda

Artículo recibido: 27/02/2007
Evaluación par externo: 18/10/2007
Aprobado: 04/12/2007

GIOVANNI GARCÍA LEÓN

Ingeniero civil, estudiante de la Especialización en Estructuras de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

Resumen

En este artículo se presentan brevemente y en forma general algunos conceptos básicos de los sistemas de entramados livianos de acero aplicados a la vivienda, sus ventajas ante otros sistemas constructivos y su funcionamiento estructural.

Palabras claves: vivienda, entramados livianos, acero formado en frío, vivienda económica.

Abstract

This paper presents briefly and in a general way some basic concepts of light gage steel framing systems applied to housing construction, including their advantages over other constructive systems and their structural performance.

Keywords: housing construction, light gage steel framing systems, housing.

INTRODUCCIÓN

El uso del acero laminado en frío en el campo de la construcción se ha venido implementando progresivamente, planteando nuevas posibilidades que se abren a un mercado que día tras día exige características apropiadas de funcionamiento, seguridad, belleza y economía. Uno de los mejores ejemplos de aplicación del acero laminado en frío es su uso para la construcción de entramados livianos con diversos propósitos ya que, en combinación con otros materiales, forma un sistema totalmente eficiente. En el campo de la vivienda (figura 1), la utilización del entramado liviano de acero se convierte en una posibilidad que permite reducción de costos, tanto en tiempos de ejecución como en materiales, sin comprometer la seguridad estructural de la edificación, y permitiendo una gran versatilidad en el manejo de los espacios interiores y en los acabados, tanto exteriores como interiores.

ANTECEDENTES

Remontémonos hacia mediados del siglo XIX, cuando la migración en Estados Unidos llegó hasta la costa del océano Pacífico. En aquellos años la población se multiplicó por diez, y para solucionar la demanda de viviendas se recurrió a la utilización de los materiales disponibles en el lugar, como la madera (figura 2), y a conceptos de velocidad y productividad originados en la revolución industrial. La combinación de estos conceptos y materiales generó el sistema constructivo que hoy conocemos con el nombre de entramado global o integral (*balloon framing*).

El concepto básico del entramado global es la utilización de montantes que tienen la altura total del edificio, con las vigas del entrepiso sujetas en forma lateral a los montantes, quedando así el entrepiso contenido dentro del volumen total del edificio. Esta forma constructiva evolucionó hacia lo que hoy se conoce como entramado



Figura 1. Viviendas con entramados livianos de acero.

de plataforma (*platform framing*) (figura 2), que se basa en el mismo concepto constructivo que el global, con la diferencia de que los montantes tienen la altura de cada nivel o piso, y por tanto el entrepiso que los divide es pasante entre los montantes.

De esta manera, el entrepiso transmite sus cargas en forma axial y no en forma excéntrica, como en el caso del entramado global, resultando en montantes con secciones menores. La menor altura de los montantes del entramado de plataforma es otra ventaja de esta variante, ya que permite implementar su modulación en un taller fuera de la obra, dado que no hay limitaciones para el transporte, obteniendo así una mejor calidad de ejecución y un mayor aprovechamiento de los recursos.

El paso siguiente fue remplazar la madera como material estructural y asignar su función a otro material que tuviera sus mismas características funcionales y de resistencia. Así, el acero entró a formar parte fundamental de las nuevas obras realizadas con entramados livianos.

El acero utilizado en los entramados livianos es acero formado en frío, que permite una mejor relación

de peso a resistencia; los estudios hechos sobre el comportamiento del acero formado en frío reiteraron las bondades que éste tiene como material estructural y la eficiencia total con la que se pueden plantear las edificaciones.

POR QUÉ USAR ENTRAMADOS LIVIANOS DE ACERO

Estos entramados pueden fabricarse en los tamaños específicos de la obra, evitando cortes y desechos innecesarios en el sitio de construcción. Las estructuras livianas permiten construcciones más rápidas, cargas reducidas en los cimientos y alta resistencia a los movimientos sísmicos. El acero es competitivo en precio y abundante para responder a la demanda. Las estructuras livianas en acero eliminan la necesidad de equipo pesado de construcción y permiten a los trabajadores aprender técnicas fáciles de ensamblaje. La solidez inherente y las propiedades incombustibles de las estructuras metálicas livianas las hacen bastante resistentes en caso de calamidad, como incendios, terremotos o huracanes. Las estructuras metálicas



Figura 2. Vivienda con entramado liviano de madera.



Figura 3. Adecuación de cines en el Centro Andino, Bogotá (fotos cortesía de Ingeniería Óptima Ltda.).

livianas no requieren tratamientos contra ataques de plagas u otros problemas biológicos. Los sistemas de estructuras metálicas livianas se adaptan a las diferentes regiones climáticas, sin dejar de lado la comodidad. Las estructuras metálicas livianas requieren poco mantenimiento y están diseñadas para durar. El acero es 100% reciclable y puede utilizarse varias veces, sin degradarse ni perder ninguna de sus propiedades.

SU USO EN COLOMBIA

El uso del entramado liviano de acero se ha extendido ampliamente alrededor del mundo, con gran auge en Estados Unidos, donde ha tenido su mayor desarrollo. En Colombia su empleo se viene extendiendo cada vez con más fuerza en un gran número de proyectos que involucran no sólo proyectos de vivienda sino edificios comerciales (figura 3) y de oficinas, y hasta edificaciones de uso industrial.

En principio, los entramados livianos de acero cumplían funciones no estructurales y su utilización se limitaba únicamente a sistemas de divisiones livianas y sistemas de construcción liviana en seco (CLS, *Drywall*). Posteriormente, su responsabilidad como elemento estructural fue en aumento y se planteaba como solución para entresijos (figura 4), cubiertas (figura 5) y edificaciones de baja altura.

Hoy en día su utilización como sistema estructural completo, con responsabilidad no sólo ante cargas gravitacionales sino ante cargas sísmicas o eólicas, puede verse en muchos proyectos que van desde una sencilla casa (figura 6) hasta sistemas de urbanizaciones completas (figura 7).



Figura 4. Entresijo para alojamiento militar (foto cortesía de Ingeniería Óptima Ltda.).



Figura 5. Cerchas de cubierta en alojamiento militar (foto cortesía de Ingeniería Óptima Ltda.).



Figura 6. Casa familiar en La Calera, Cundinamarca (fotos cortesía de Ingeniería Óptima Ltda.).

Se ha planteado también como una solución eficiente en su uso como parte total o parcial de rehabilitaciones sísmicas. Reemplazar elementos estructurales tradicionales o divisiones pesadas en mampostería (figura 8), por elementos de acero livianos o divisiones de construcción en seco, ha permitido la reducción de grandes cargas muertas y por tanto una menor demanda sísmica, que se traduce en un mejor comportamiento de la edificación.

COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DEL ENTRAMADO LIVIANO

El entramado liviano se puede definir como aquel sistema conformado por un esqueleto estructural compuesto por elementos livianos, diseñados para dar forma y soportar las solicitaciones a las que se vea sometido. Las

cargas se transmiten por contacto directo entre un perfil y el otro, viajando por el alma de los mismos. El entramado liviano de acero utiliza parales (perfiles estructurales “C” con rigidizador de borde), que se mantienen en su posición durante el armado por medio de canales (perfiles “C” sin rigidizador de borde) atornillados entre sí (figura 9). Ante la necesidad de abrir un vano en la estructura, se debe colocar un dintel que transfiera las cargas superiores a los montantes inferiores adyacentes al vano. Los dinteles pueden ser dos perfiles “C” enfrentados entre sí, o armados telescópicamente —encajando uno dentro del otro— y colocados en forma ortogonal a los parales de la estructura.

Los perfiles que componen la estructura de cubierta y la del entrepiso también deben transmitir sus cargas a los parales en forma axial (figura 10).

Se sabe que la energía de un sismo se disipa por medio de diferentes mecanismos dentro de las es-



Figura 7. Urbanización La Cumbre en Manizales (fotos cortesía de Speedco S.A.).



Figura 8. Rehabilitación del convento de Santo Domingo en Bogotá (foto cortesía de Ingeniería Óptima Ltda.).

estructuras; de esta manera, los efectos de las cargas laterales se distribuyen a los diferentes componentes estructurales. Uno de los factores más importantes que afectan la respuesta de las estructuras en condiciones sísmicas de carga es la ductilidad de sus componentes. Las estructuras sometidas a fenómenos sísmicos difícilmente conservan su comportamiento en el rango elástico, por lo que es clave contabilizar la capacidad que puedan desarrollar para disipar energía con niveles altos de deformación. Si se define la ductilidad como la relación entre la respuesta elástica máxima y la inelástica máxima, independientemente de la intensidad de la carga, entonces las estructuras que tienen valores altos de ductilidad pueden sostener grandes deformaciones plásticas y, por consiguiente, ofrecen mayor resistencia sísmica. De este modo, las fuerzas que se involucran

en el equilibrio dinámico de una estructura son las fuerzas inerciales, derivadas directamente de la masa; la rigidez del sistema, las fuerzas de amortiguamiento y las fuerzas externas. Cada uno de estos parámetros se puede considerar de diversas maneras y será decisión del diseñador adoptar el criterio que más le favorezca. La estructura, entonces, se ve sometida a una serie de movimientos que producen deformaciones y esfuerzos internos en sus miembros. Para controlar estos movimientos, la estructura de cubierta y los entrepisos se ligan a los muros de tal manera que dichos esfuerzos se puedan transmitir hasta el nivel de cimentación. El armado de estructuras con entramado liviano consiste en colocar perfiles “C” alineados verticalmente, desde arriba hacia abajo, separados a distancias que están dadas en función de las solicitaciones presentadas y la lámina de recubrimiento que se van a colocar. Tanto la

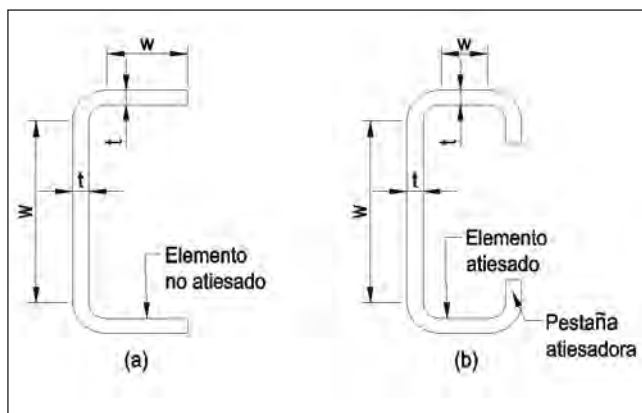
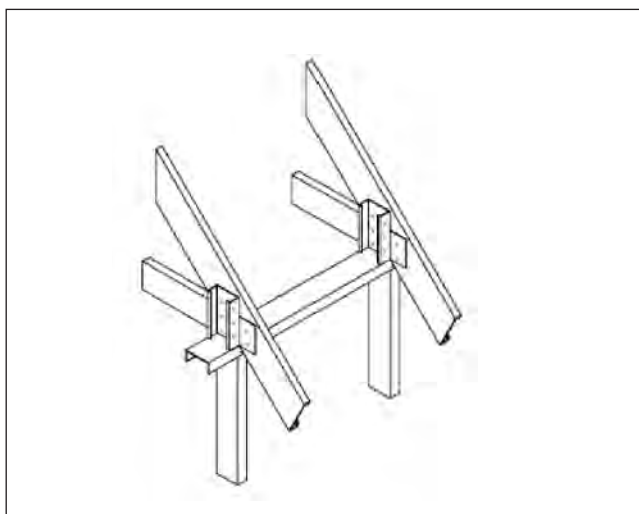


Figura 9. a) Perfil “C” sin pestañas atiesadoras (canal). b) Perfil “C” con pestañas atiesadoras (paral).

disposición de los parales dentro de la estructura, como sus características geométricas y resistentes, hacen que la estructura resultante sea apta únicamente para la absorción y transmisión de cargas verticales axiales (en la dirección del eje de la pieza). Para poder resistir cargas horizontales, se requiere proveer a las estructuras de otros elementos que tomen estos esfuerzos.

Para resistir las cargas horizontales, debidas principalmente a la acción del viento y los sismos, es necesario colocar algún elemento estructural capaz de absorber dichos esfuerzos. Éstos deberán transmitirse desde los distintos puntos de aplicación sobre la estructura de cu-

bierta y paredes, hasta la cimentación que son el destino final de todas las cargas. Los anclajes que fijan la estructura a las fundaciones no sólo absorben los esfuerzos laterales, sino que también resisten los efectos de volcamiento y de arrancamiento, producidos por todas las cargas que actúan sobre la construcción (figura 11).



Figura 11. Detalle de anclaje sísmico (foto cortesía del ingeniero Alejandro Rico, ref. 1).

COMPONENTES DEL SISTEMA EN VIVIENDAS TÍPICAS

Un entramado para vivienda consta de una serie de subsistemas que actúan de manera integral para formar un sistema estable y estructuralmente resistente. Los principales subsistemas son los muros, la estructura de cubierta y los entrepisos.

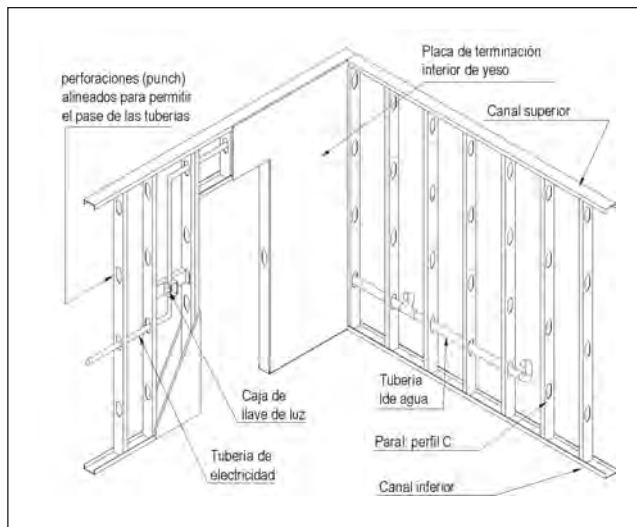


Figura 12. Panel de muros exteriores sin arriostramiento y con instalaciones interiores.

Muros

Los muros son los encargados de transmitir las cargas de gravedad a la estructura de cimentación. También son responsables de la estabilidad sísmica de la edificación y, por supuesto, dividen los espacios y aseguran un aislamiento contra las condiciones climáticas exteriores. De acuerdo con la ubicación y función de los muros, éstos se pueden clasificar en muros exteriores, muros interiores y muros de corte o rigidez. Los muros exteriores (figura 12) están formados por canales horizontales y parales verticales con la separación requerida por el diseño, estructura a la que se le atornillan las láminas: por un lado, fibrocemento, y por el otro, yeso (forma usual en Colombia).

Los muros interiores están formados por canales horizontales y parales verticales, y generalmente a una separación mayor que la dispuesta en muros exteriores; los muros de corte o rigidez son los encargados de tomar las fuerzas laterales inducidas a la estructura por fenómenos sísmicos o de viento. Estos muros llevan, en todos los casos, arriostramientos en cruz con “flejes” diagonales en platinas y sus respectivos anclajes a la cimentación. Las consideraciones que hay que tener en cuenta cuando se plantean estos muros son las mismas que para una estructura tradicional con muros de corte o en mampostería estructural; tales consideraciones se refieren a la disposición en planta de dichos muros, conservando una simetría estructural y evitando las concentraciones de rigidez en un solo costado de la estructura. Los ensayos de estos muros han demostrado que las placas de recubrimiento colaboran con la estructura metálica del entramado, aumentando su rigidez y resistencia final.

Entrepisos

Construir entrepisos (figura 4) con entramados livianos de acero es una tarea sencilla, práctica, rápida, limpia y económica. Algunas consideraciones que se deben tener en cuenta para su utilización son las siguientes:

Los perfiles que actúan como vigas se deben pre-dimensionar por arquitectura, lo que significa que se deberá optar por un perfil cuya altura de alma no sobrepase las posibilidades físicas del entrepiso terminado. La altura del alma del perfil será una parte importante del espesor final del entrepiso, pudiendo variar el calibre del perfil para lograr la resistencia requerida. En caso de que al variar el calibre no se lo-

gren los valores necesarios, se pueden colocar perfiles dobles, unidos alma con alma o, si la arquitectura lo permite, aumentar la altura del alma.

Los perfiles más utilizados para estos entramados son los del tipo “C”, y dada su asimetría respecto de uno de sus ejes y la no axialidad de las cargas aplicadas, éstos tienden a rotar alrededor de su eje si no se los arriestra debidamente (figura 13). El arriestre del patín superior está dado por la placa de recubrimiento que se coloque como entrepiso. Para estabilizar el patín inferior habrá que emplear un fleje metálico tipo platina que los vincule e inmovilice a unos respecto de los otros. En casos de grandes luces entre apoyos o de cargas elevadas, se deberá agregar un elemento en forma transversal a las vigas, cumpliendo las funciones de riostra.

Cubiertas

La utilización de cerchas es la metodología más rápida y sencilla para la materialización de la estructura de cubierta (figura 14). Las cerchas están compuestas por un conjunto de elementos que, al ser unidos entre sí, permiten cubrir grandes luces libres entre apoyos, sin necesitar puntos de apoyo intermedios.

Su análisis es básicamente el mismo que el que se hace a cualquier cercha. Bajo la acción de cargas verticales se considera al cordón superior trabajando a compresión y al cordón inferior trabajando a tensión,

y los montantes y diagonales se encargan de tomar las fuerzas de corte. La placa de recubrimiento que sirve como superficie de apoyo a la teja, o en algunos casos la misma teja, actúa a su vez como elemento de control de esbeltez en los miembros a compresión.

CONCLUSIONES

La aplicación del sistema en el campo de la vivienda ofrece ventajas notorias sobre otros sistemas constructivos. El bajo peso de estas estructuras permite una significativa reducción en costos de cimentación, transporte de materiales y utilización de maquinaria.

Todos los elementos del sistema son dimensionalmente estables, por lo que muros y pisos permanecen siempre rectos, no se tuercen ni deforman con el tiempo, ni tampoco dependen, como con otros materiales, de cambios de humedad que causan fisuras, deformaciones y en general deterioro.

Los plazos de obra se disminuyen notoriamente con respecto a la construcción tradicional en concreto o mampostería, ya que gran cantidad de tareas se pueden realizar en forma simultánea. No es necesario construir muros que luego se romperán para permitir el paso de instalaciones. Los procesos de cimbrado y fraguado se eliminan, reduciendo los tiempos muertos.

El sistema de construcción se basa en el concepto de repartición de cargas a muchos elementos, logran-

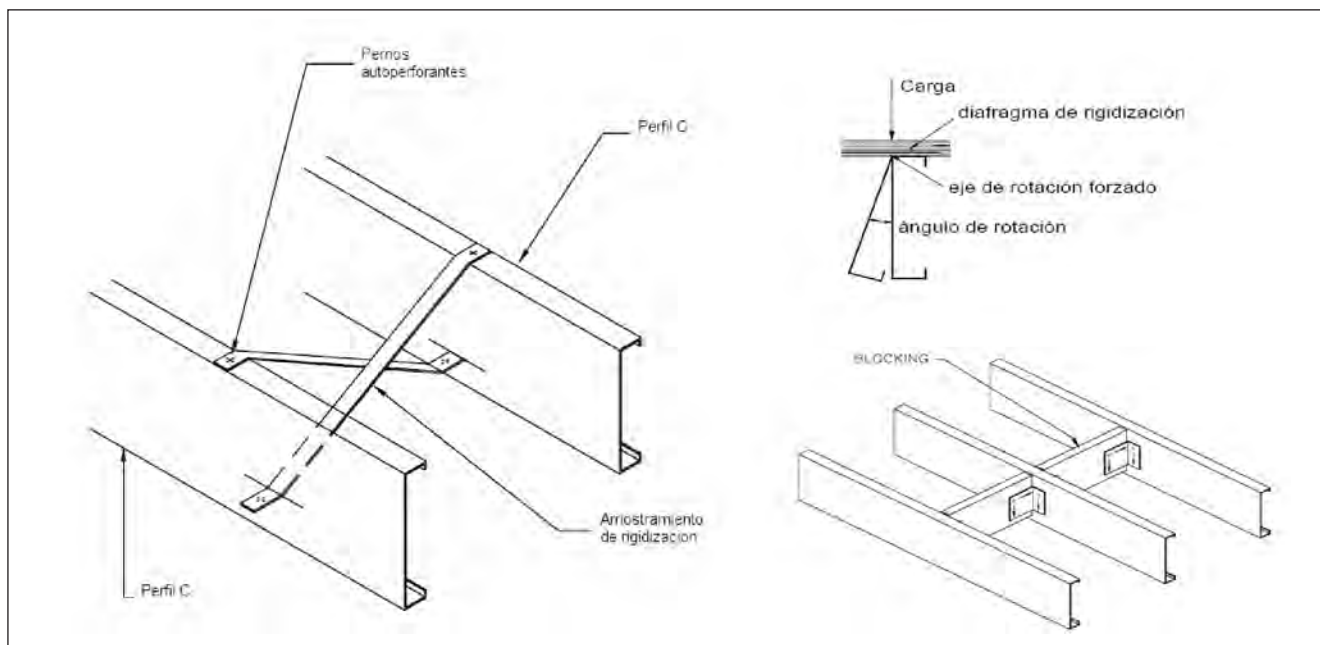


Figura 13. Rotación por acción de la carga y rigidización con riostra metálica.

dose con ello un sistema muy eficiente en el manejo de las fuerzas a las que se somete la estructura, al poder emplear componentes de alta resistencia con dimensiones y pesos bajos. Con ello se eliminan cargas muertas muy costosas, que no aportan mucho a la estabilidad de la estructura.

Agradecimientos

El autor desea expresar sus reconocimientos a empresas como Speedco S.A. e Ingeniería Óptima Ltda., que han sido grandes promotoras de la construcción y diseño de obras con entramados livianos de acero en el país y fuera de él, así como agradecer los valiosos aportes que han servido para la realización del presente artículo y el proyecto de grado vinculado a él.

Al doctor Jairo Uribe Escamilla, por el valioso aporte que representa su experiencia en el tema y la tutoría dada durante la realización no sólo de este artículo sino del proyecto final de especialización.

REFERENCIAS

- AIS, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (1998). Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente NSR-98, tomo 3, título F. Bogotá: ISBN 958-96394-0-2, obra completa. ISBN 958-96394-3-7, tomo 3.
- AISI, American Iron and Steel Institute (2001). Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members. Primera impresión. Washington: American Iron and Steel Institute. Diciembre.
- AISI, American Iron and Steel Institute (2001). Commentary on North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members. Primera impresión. Washington: American Iron and Steel Institute. Diciembre.
- AISC, American Institute of Steel Construction (2005). Specification for Structural Steel Buildings and Commentary. Chicago: American Institute of Steel Construction, Inc. 9 de marzo, 439 pp.
- IAS, Instituto Argentino de Siderurgia (1998). *Estructura de acero galvanizado para viviendas, guía para el diseño y cálculo*. Buenos Aires: editorial IAS. 118 pp.
- Nasfa, North American Steel Framing Alliance (2000). Low Rise Residential Construction. Washington D.C. North American Steel Framing Alliance. Marzo, 104 pp.
- Rico, Alejandro (2006). Muros en sistema *drywall* como elementos estructurales ante cargas sísmicas. Tesis de maestría en ingeniería civil. Bogotá: Universidad de los Andes, 52 pp.

La enseñanza de la informática a través de escenarios basados en juegos discretos

JUAN ALBORNOZ

Escuela Colombiana de Ingeniería
Bogotá, Colombia
jalborno@escuelaing.edu.co

RAÚL CHAPARRO

Escuela Colombiana de Ingeniería
Bogotá, Colombia
rchaparr@escuelaing.edu.co

Artículo recibido: 20/06/2007
Evaluación par externo: 22/10/2007
Aprobado: 04/12/2007

Resumen

El desarrollo de competencias básicas en informática resulta cada vez más necesario para los profesionales de las diversas disciplinas. Para ello es importante investigar en torno al aprendizaje de los principios básicos de la informática por parte de estudiantes de todos los niveles. La utilización del computador y los lenguajes algorítmicos requiere una madurez matemática y computacional por parte de los estudiantes, que no siempre se tiene. En el artículo se muestra cómo los juegos discretos resultan un medio natural donde se pueden estudiar los conceptos y estrategias de informática, sin la preocupación por el aprendizaje de un lenguaje técnico. Así mismo, se muestra cómo utilizar la máquina de Turing con el propósito de presentar conceptos básicos de la programación de computadores. Para este propósito se han creado escenarios para el aprendizaje, cuyo eje central es la experimentación con modelos físicos y virtuales de los juegos. El diseño de estos modelos responde a características especiales, que facilitan su manejo en el aula y posibilitan la experimentación de una manera natural, a partir de la manipulación física y la interacción sensorial. En consecuencia, el estudiante puede conjeturar y profundizar en sus resultados con mayor facilidad, y llegar a una conceptualización más natural. Además, se abren posibilidades didácticas a diversos juegos populares y a la máquina de Turing, los cuales se han aprovechado muy poco con este propósito desde la informática.

Palabras claves: programación de computadores, educación en informática, ambientes de aprendizaje, máquina de Turing.

Abstract

The development of basic skills in computing is mandatory for professionals of diverse disciplines. For this reason it is important to do research related to the learning process of the basic principles of computing, by students at all levels. The use of computers and algorithmic languages requires mathematical and computational maturity by the students, which is not always the case. This article discusses how discrete games are a natural means by which the concepts and strategies of computation can be studied, without the additional difficulty of learning a computer language. Likewise, it is shown how to use the Turing machine to illustrate basic concepts of computer programming. For this purpose, scenarios based on experimental models using physical and virtual games have been designed for learning. The design of these models responds to special characteristics that assist in their application in the classroom and make it possible for the student to experiment in a natural way, from the physical manipulation and sensorial interaction. As a result the student may conjecture and explore thoroughly his results with ease and conceptualize in a natural manner. In addition, other didactic possibilities with the Turing Machine and various popular games, which have not been explored with the purpose of teaching computing principles, are illustrated.

Keywords: computer programming, computer education, learning environment, Turing machine.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo tecnológico requiere cada día más que los estudiantes y profesionales de cualquier área estén en capacidad de apropiarse y adaptar conocimiento que les permita resolver, diseñar y construir soluciones basadas en tecnología. Por tal razón se debe prestar mucha atención a las competencias en informática que deben desarrollar los estudiantes de las diversas disciplinas y niveles educativos.

La ciencia informática es muy joven si se la compara con otras ciencias, en las cuales por siglos se viene investigando y reflexionando sobre su pedagogía, metodologías de enseñanza y formas de aprendizaje. Es así como numerosos matemáticos, filósofos y pedagogos han invertido mucho tiempo en el estudio de sus fundamentos teóricos, su historia y su filosofía, y en este marco se aborda el aspecto pedagógico y didáctico. Se ha llegado a resultados interesantes, como la convicción de que no hay una pedagogía universal para la enseñanza y aprendizaje de las ciencias, sino que desde la epistemología propia de las diferentes disciplinas se debe abordar su estudio. Como lo enuncia el profesor R. Flórez, “Precisamente, el contenido más importante de una ciencia son sus interrogantes, sus problemas y sus hipótesis de solución... Un factor desencadenante, imprescindible para la pedagogía, es la reflexión sobre las condiciones de enseñabilidad de cada saber, y sobre los obstáculos epistemológicos que se oponen a su aprendizaje”¹. Son entonces los profesores, especialistas en las diferentes áreas del conocimiento, a la luz de un contexto pedagógico, filosófico y didáctico, y con una vasta experiencia y reflexión en su quehacer cotidiano, quienes están en mejores condiciones para realizar investigaciones en el aula que den resultados, tales como el diseño de material didáctico, metodologías de enseñanza, escenarios de aprendizaje para la experimentación y la conjetura, etc. En esta dirección, existen diversas teorías educativas, como el “Aprendizaje significativo” de Ausubel (Novak:teoría) cuya premisa fundamental es el aprendizaje con sentido, que se basa en partir del conocimiento previo del estudiante y relacionar con éste el nuevo conocimiento.

En el caso de las matemáticas todas las personas son introducidas a las nociones básicas desde los pri-

meros niveles escolares, pues aunque no todos vayan a ser matemáticos, todos se valen de la matemática. Es claro que la enseñanza de los números naturales es la que permite entrar al mundo de la matemática y es el piso didáctico al mundo de la abstracción. Pero los números naturales por sí solos no son el camino hacia la abstracción, pues ellos mismos pueden dar lugar a abstracciones tan complejas, que involucran muchos de los problemas más difíciles en matemáticas. Lo que ha permitido potenciar un lenguaje de enseñanza y aprendizaje del mundo de los números naturales, ofreciendo un piso concreto, es el material didáctico consistente en metáforas, juegos y retos, complementados con modelos físicos de experimentación y conjetura, como el ábaco, los *puzzles*, etc.².

En el caso de la informática, aunque no todos son científicos de la informática, casi todos se sirven de ella hoy en día. Esto ha creado la necesidad de involucrar la enseñanza de bases informáticas en los distintos niveles educativos. Por este motivo se emprendió la tarea de diseñar y construir material didáctico que sirva de base para la conformación de escenarios de aprendizaje en torno a la informática, dirigidos a un público general no especialista en el tema. En estos escenarios se busca que el estudiante se acerque a los conceptos básicos de informática por medio de la solución de problemas, expresados con metáforas naturales y lúdicas, sin la necesidad de manejar lenguajes formales o técnicos.

En este marco se propuso como meta el desarrollo de escenarios de aprendizaje de conceptos fundamentales y estrategias de solución de problemas de informática, centrados en metáforas lúdicas que sean elementos con mucha riqueza conceptual en informática, en los que tanto personas ajenas al estudio de la informática como estudiantes de ésta puedan tener su propio laboratorio. Como resultado vale la pena destacar los siguientes:

- Identificación de los juegos discretos como modelos naturales de concreción en informática.
- Diseño y construcción de un modelo físico y virtual del concepto abstracto de lo que matemáticamente

1. Flórez (Flórez:pedagogía), p. 84.

2. Se pueden encontrar ejemplos numerosos en: (Paulos:números), (Snape:puzzles) y (Guzman:tendencias).

es un computador: la máquina de Turing. Por su metáfora sencilla pueden usarlo niños y adultos en general.

- Diseño y construcción de modelos físicos y virtuales para la interacción con juegos discretos, aptos para que estudiantes y profesores lo utilicen en el aula.
- Presentación de conceptos y estrategias de solución de problemas en informática en el lenguaje sencillo y familiar de los juegos discretos.
- Múltiples acertijos, retos y talleres que hacen uso de los modelos desarrollados, dirigidos a estudiantes de niveles básico, universitario y de posgrado.

METÁFORA DE LOS JUEGOS DISCRETOS

Los juegos discretos tienen una naturaleza finita y formal³. Finita, porque su solución se realiza mediante una secuencia finita de movimientos. Formal, porque son independientes del medio en el cual se encuentran materializados. Es decir, el mismo juego puede materializarse en cualquier número de medios distintos, sin ninguna diferencia esencial significativa. Tómese por ejemplo el ajedrez. Una partida podría realizarse en tableros de diversos tamaños, con fichas de diferentes materiales, o incluso mediante una representación puramente simbólica, y seguiría siendo la misma partida.

Un juego discreto se caracteriza por:

- Un conjunto de elementos (fichas, tablero, etc.).
- Una situación o estado inicial.
- Un conjunto de reglas que definen movimientos permitidos en cada situación.
- Un criterio para decidir si se ha llegado a una situación final u objetivo.

Al tener una naturaleza formal y finita, los juegos discretos se pueden entender como sistemas formales. Un sistema formal se emplea para producir fórmulas válidas en algún contexto, mediante reglas puramente sintácticas⁴. Los sistemas formales se caracterizan por:

- Un alfabeto de símbolos.
- Unas fórmulas iniciales o axiomas.
- Un conjunto de reglas para generar, o inferir, nuevas fórmulas a partir de las preexistentes.
- Una fórmula a demostrar o teorema.

Como se puede ver en estas caracterizaciones, existe una analogía de los juegos discretos con los sistemas formales, pues de hecho todos los juegos discretos se pueden expresar mediante sistemas formales, donde hallar una solución al juego se reduce a encontrar una demostración de algún teorema. Dado que todos los modelos del computador se pueden entender como sistemas formales, los juegos discretos resultan ser un medio natural donde se pueden exponer y experimentar conceptos fundamentales y estrategias de solución de problemas de informática.

Por otro lado, es tradicional utilizar lenguajes de programación del computador como el medio para aprender, enseñar y, en general, conceptualizar aspectos de la informática. La solución de problemas en algún lenguaje de programación resulta de un valor formativo muy grande y es indispensable para quienes se van a dedicar a ella. Sin embargo, para un gran número de estudiantes que no tienen la suficiente madurez matemática y computacional, se presentan las siguientes desventajas:

- El computador es una caja negra: la complejidad electrónica de su construcción hace que sea difícil comprender su funcionamiento.
- No se maneja una abstracción del computador: cuando se le pregunta a alguien qué es un computador, generalmente no hay una claridad conceptual, por lo que se resulta trabajando sobre un piso incierto.
- El medio se convierte en el fin: los conceptos de informática son el verdadero fin y el medio no debe causar ruido, pues obstaculiza el aprendizaje de los conceptos. A menudo la dificultad de los problemas con el medio resulta consumiendo la mayor cantidad de atención y esfuerzos, y en este sentido el medio se convierte en el fin.

Como una analogía con este problema, es posible imaginar lo que sería jugar ajedrez sobre un tablero donde no se distinguen los cuadros negros de los blancos, o donde mover las piezas resulta difícil, no por la

3. Estos juegos se han estudiado y conceptualizado en las investigaciones en inteligencia artificial, tales como (Haugeland:artificial).

4. Un tratamiento didáctico del tema se encuentra en (Gómez:formales).

partida misma, sino porque las fichas son muy pesadas, o se desarmen cuando se mueven.

Comparados con el computador, los juegos tienen la ventaja de permitir el manejo de elementos tangibles y el uso de metáforas naturales para las personas, por lo que resultan más sencillos de abstraer. De esta manera, proporcionan un piso más firme y generan menos ruido para estudiar y experimentar los conceptos esenciales que se quieren exponer.

BUSCANDO INVARIANTES CON UN JUEGO DISCRETO

La experimentación con modelos físicos y virtuales es la base para encontrar las regularidades dentro de la solución de un problema. A estas regularidades se les llama invariantes. Es con la ayuda de los invariantes como se pueden simplificar o dominar por completo los problemas. Con el fin de facilitar la detección de invariantes, los modelos desarrollados poseen características especiales de manipulabilidad, incorporación de restricciones del problema y coloración de los elementos. A continuación se presenta la experiencia con un juego discreto popular, el juego de las ranas y sapos, el cual ha sido tratado por reconocidos entusiastas de los juegos matemáticos, como John Conway (Conway:winning).

El juego de las ranas y sapos puede describirse así: a través del lecho de un río se encuentran nueve piedras alineadas que permiten pasar de un lado al otro. En el lado izquierdo del río hay cuatro ranas y en el lado derecho, cuatro sapos. Cada grupo necesita cruzar al otro lado. Las ranas se ubican en las tres piedras del lado izquierdo y los sapos en las tres del lado derecho, quedando una piedra libre en la mitad. Las ranas siempre van a saltar de izquierda a derecha y los sapos de derecha a izquierda. Todos pueden saltar de una piedra a la piedra vecina, o en caso de que ésta se encuentre ocupada, a la que le sigue si está libre. Nunca pueden saltar a más de dos piedras de distancia ni a una piedra ocupada. Por supuesto, no pueden caer al río, pues se los lleva la corriente. El objetivo es, entonces, llevar a las ranas a las piedras del lado derecho y a los sapos a las del lado izquierdo, dejando la piedra central libre.

Para este juego se han construido modelos físicos y virtuales, los cuales conforman un laboratorio de experimentación y conjetura, donde se reflexiona sobre conceptos como representación y solución algorítmica,

generalidad de la solución, eficiencia y simplicidad de la solución, modelado del problema, etc.

En el modelo físico utilizamos un riel de madera con orificios, en los que se pueden insertar palitos de dos colores. Una representación del modelo se puede apreciar en la figura 1, en la que para efectos de facilitar la publicación se han usado los colores blanco y negro. Los palitos negros harán el papel de ranas y los palitos blancos el papel de sapos. Cada orificio en el riel corresponderá a una piedra. Se colocan los palitos negros a la izquierda y los blancos a la derecha, dejando un orificio libre en la mitad. Podría jugarse con distintas cantidades de palitos, pero siempre comenzando con los negros en el lado izquierdo, los blancos en el derecho y al menos un orificio entre ellos. El objetivo es llevarlos a la situación contraria, es decir, dejar los blancos a la izquierda y los negros a la derecha, utilizando el mínimo número de saltos. Recuérdese que los palitos negros siempre deben saltar hacia la derecha y los blancos hacia la izquierda.

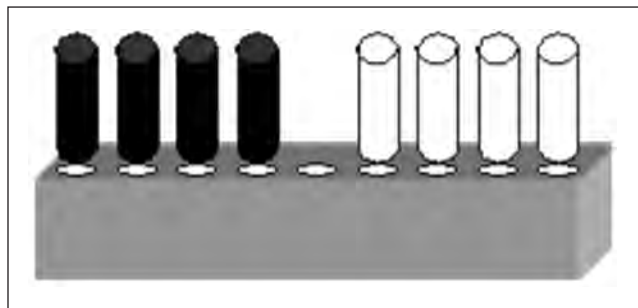


Figura 1. Modelo para el juego de ranas y sapos.

Después de un tiempo de jugar con el modelo se puede encontrar la solución, la cual consta de quince pasos. Sin embargo, muchas de las estrategias para solucionarlo son muy específicas y no ofrecen la posibilidad de solucionar una versión generalizada del juego. Adicionalmente, expresar estas estrategias a nivel algorítmico puede no resultar sencillo.

Para este juego se diseñaron y construyeron varios modelos físicos y virtuales. El estudio de la solución en uno de los modelos físicos ayudó a descubrir un invariante que permite trivializar el juego, del cual no tenemos referencias previas. El modelo que sirvió para encontrar el invariante tiene pintados intercaladamente, con colores negro y blanco, rectángulos pequeños

en la tabla de orificios (figura 2). Para trabajar con el invariante debe tenerse en cuenta la siguiente regla adicional:

En cada paso, escoja el movimiento en que se maximice el número de palitos que están en una casilla de su color. Es decir, en el que el color del palito de la parte superior sea el mismo del rectángulo correspondiente inferior.

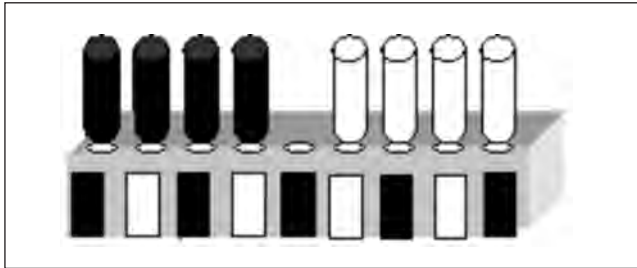


Figura 2. Modelo acondicionado para la visualización del invariante.

Por ejemplo, para el primer movimiento hay cuatro posibilidades, una de las cuales maximiza la condición anotada anteriormente. A continuación se muestran dos de las jugadas posibles y se analiza el caso. En la figura 2 se observa que el número de fichas en su color, es decir, las fichas donde el color del rectángulo inferior y del palito es el mismo, es cuatro. Si se hace la jugada ilustrada en la figura 3, el número de fichas con la condición anotada anteriormente sería cuatro, mientras que con la jugada ilustrada en la figura 4 sería cinco. Por esta razón se deduce que se prefiere la última jugada.

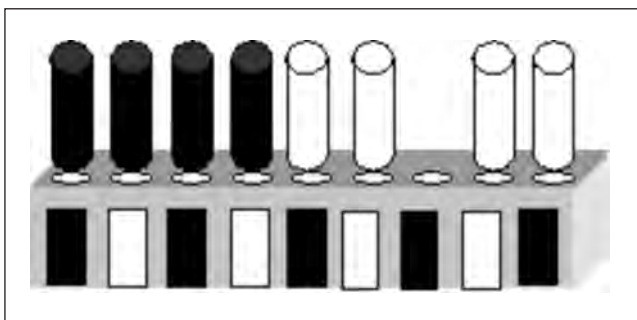


Figura 3. Jugada sin aplicar la regla del invariante.

Si se continúa desarrollando el juego con esta regla, resulta que para cada paso no hay sino una jugada que maximiza la correspondencia de colores anotada, por lo que se puede resolver el juego sin ninguna dificultad.

Este mismo invariante funciona si se juega usando cualquier número de fichas blancas y negras separadas por un orificio. Con este método resulta muy sencillo programar en el computador una solución general para el problema.

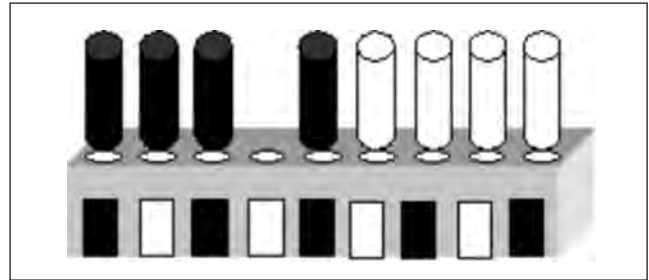


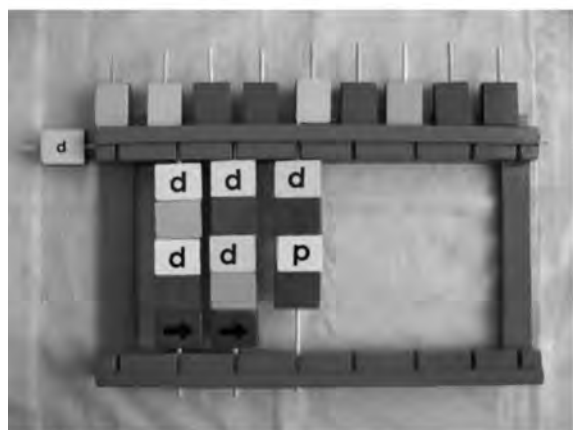
Figura 4. Jugada aplicando la regla del invariante.

METÁFORA DEL COMPUTADOR CON LA MÁQUINA DE TURING

La máquina de Turing es un modelo conceptual de computador, propuesto en 1936 por el matemático inglés A. M. Turing (Turing:computable), en su empeño por dar respuesta a una pregunta sobre la naturaleza de las demostraciones matemáticas, la cual hacía parte de la famosa lista de grandes retos de las matemáticas planteados por D. Hilbert a comienzos del siglo XX. La máquina de Turing es la formalización de lo que es un algoritmo, y lo hace de una manera sencilla y elegante⁵. A pesar de ser tan básica a la informática, algo así como los números naturales lo son a las matemáticas, es sorprendente el escaso uso que se ha hecho de ella para introducir los conceptos esenciales de la programación.

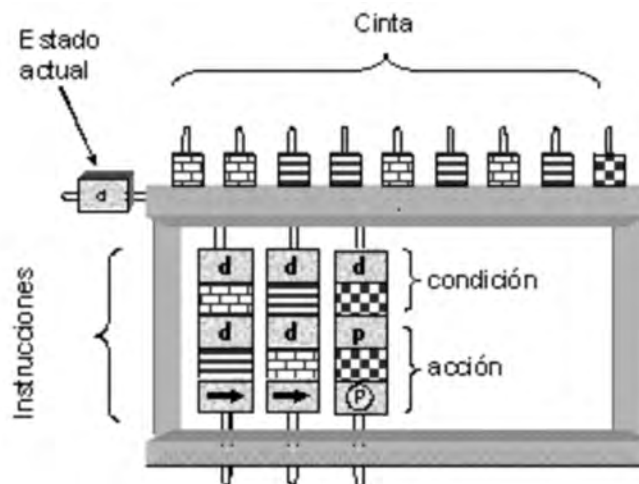
Una máquina de Turing consiste en una unidad de control que puede leer y escribir en una cinta, valiéndose de un cabezal móvil de lectura y escritura. La cinta sirve para representar la entrada y la salida de los problemas, y está dividida en celdas, cada una de las cuales puede contener un símbolo o estar vacía. En cualquier momento durante su operación, la máquina de Turing debe estar en uno, de entre un número finito de estados,

5. En la teoría de la computación se estudia la máquina de Turing como el modelo abstracto sobre el que se pueden analizar las posibilidades y limitaciones de la computación. Una buena referencia es (Papadimitriou: elements).



Fotografía

Representación



con el cabezal posicionado sobre una de las celdas de la cinta. Un cálculo, o ejecución, de la máquina de Turing comienza en un estado especial llamado estado inicial y concluye cuando la máquina llega a otro estado especial, llamado estado de parada. La actividad de la máquina está descrita por una tabla (o programa), donde cada línea contiene una instrucción. Una instrucción tiene dos partes: condición y acción. La condición consta de un estado y un símbolo, que si coinciden con el estado y símbolo actual de la máquina, permiten la ejecución de la acción. La acción indica el nuevo estado al que debe pasarse, el símbolo que hay que escribir y el desplazamiento del cabezal, el cual puede ser hacia la derecha, hacia la izquierda o permanecer en la misma celda. Cada instrucción es independiente de las demás, y su posición en la tabla no afecta el comportamiento de la máquina.

Para efectos de trabajar en el aula con la máquina de Turing, se ha construido un modelo físico. Éste consta de un conjunto de fichas y un marco de madera, el cual se presenta en la figura 5. En la parte superior del marco se ubican las fichas que corresponden a las celdas de la cinta. En la posición lateral izquierda se maneja la ficha de estado de la máquina. En el interior del marco se colocan verticalmente las instrucciones, cuyas dos primeras fichas indican la condición y las tres siguientes la acción. Se utilizan colores en la cinta, pues éstos son símbolos universales, que facilitan una comunicación natural. En las figuras de este artículo se han empleado diferentes tramados en las fichas, en lugar de colores, con el objeto de facilitar su publicación.

La máquina de la figura 5 invierte una cinta con celdas de dos tramados; es decir: dada una cinta con celdas de ladrillos y rayas, convierte los ladrillos en rayas y viceversa. Para delimitar el fin de la entrada se usa un tramado diferente, en este caso cuadros de estilo ajedrez. Como estado inicial se empleó la letra *d*, y como estado de parada la letra *p*. Para ejecutar el programa es necesario ocultar todas las celdas de la cinta, salvo la primera. En la figura 6 se muestra cómo se ve la máquina antes de comenzar la ejecución. En seguida, la persona hace las veces de unidad de control: en cada paso busca en cuál de las instrucciones coincide su condición con el estado y celda actual, y procede a efectuar la acción. En el ejemplo planteado, para el primer paso la instrucción que se puede aplicar es la primera, puesto que la máquina se halla en el estado *d*, y la celda visible corresponde al tramado de ladrillos. La acción que se ejecutará entonces es: continuar en estado *d*, cambiar en la celda actual el tramado de ladrillos por rayas, y finalmente posicionarse en la celda contigua a la derecha, lo que se logra ocultando la actual y descubriendo la nueva. Una vez realizada la acción, la máquina se ve como en la figura 7.

La ejecución continúa paso a paso mediante el mismo proceso. En algún momento se llegará a la celda con el tramado de ajedrez, y se activará la tercera instrucción, lo que conduce al estado de parada. En ese momento termina la ejecución, y se descubre toda la cinta para ver el resultado. Si se sigue el proceso cuidadosamente, comenzando con la cinta descrita en la figura 6, al fina-

lizar la ejecución y descubrir la cinta la máquina estará tal como se muestra en la figura 8.

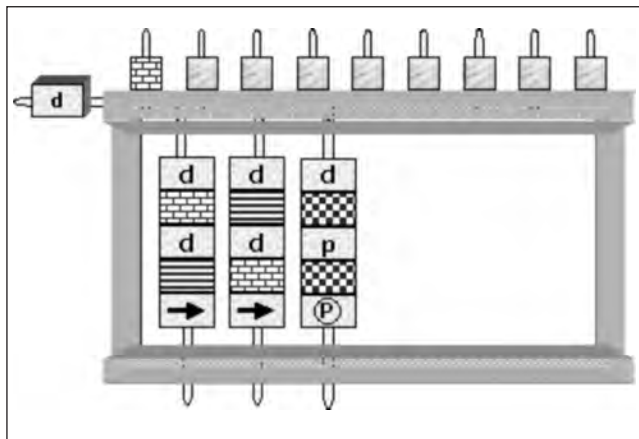


Figura 6. La máquina antes de comenzar la ejecución.

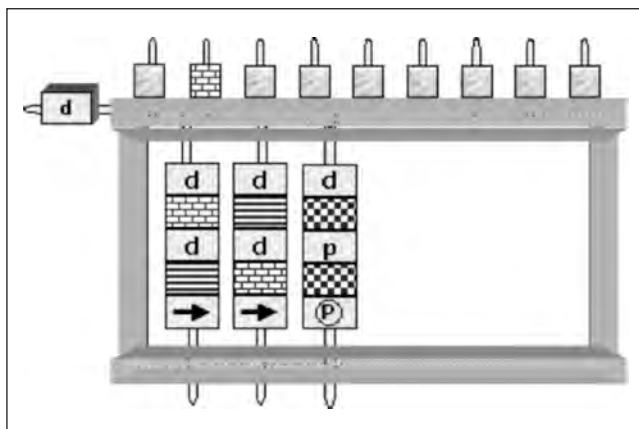


Figura 7. La máquina después de un paso.

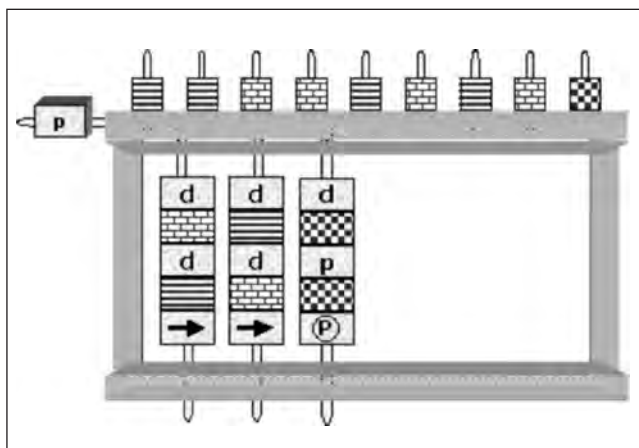


Figura 8. Una vez finalizada la ejecución.

Considérese ahora el siguiente ejemplo: como entrada se tiene en la cinta primero un grupo de celdas con tramado de ladrillos, luego una celda con tramado de ondas y finalmente otro grupo con tramado de ladrillos; el objetivo es cambiar cada celda del último grupo de tramado de ladrillos por tramado de rayas. Para solucionar este problema va a ser necesario que la máquina diferencie de alguna manera entre el primer grupo y el segundo grupo de ladrillos, pues la acción que debe tomar es diferente en cada caso. Es aquí donde va a resultar útil el concepto de estado, pues permite tomar acciones diferentes aun con información igual en la celda actual. Una estrategia para solucionar el problema es moverse siempre de izquierda a derecha hasta sobrepasar el primer grupo de ladrillos, sin alterarlos. En cuanto se encuentran las ondas, se sabe que el primer grupo ha terminado y se pasa a un nuevo estado. Continuando con el movimiento a la derecha, se sabe que se está ya sobre el segundo grupo de ladrillos y se va reemplazando cada ladrillo por rayas, hasta alcanzar la celda del límite con el tramado de ajedrez. A continuación se puede apreciar una máquina que soluciona el problema con la estrategia que se describió (figura 9). Este tipo de ejercicios facilita una aproximación al concepto de estado de una computación, de una manera natural y motivada.

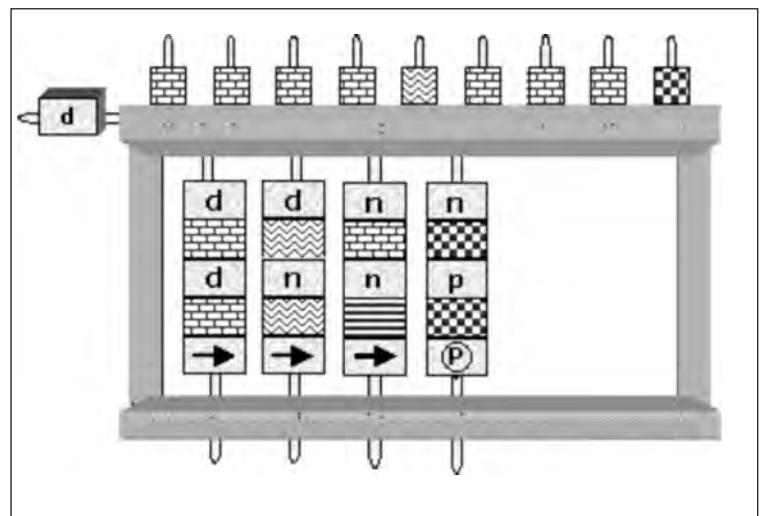


Figura 9. Máquina que requiere mínimo dos estados.

En cuanto se dominan los conceptos básicos en el modelo físico, se puede empezar a usar el modelo virtual. Éste conserva las características de manipula-

bilidad y las posibilidades de manejo de color, para que la transición sea natural. Posee la ventaja de no tener las limitantes en número de instrucciones, número de estados o tamaño de la cinta. Además, la persona no tiene que hacer la ejecución a mano sino que se realiza automáticamente, con la posibilidad de hacer un seguimiento paso a paso. Otra facilidad que posee el modelo virtual es la posibilidad de almacenar y recuperar los programas realizados.

Lo interesante de los ejemplos anteriores es observar cómo con estos modelos la máquina de Turing resulta muy fácil de introducir y manipular, dados los elementos tangibles que se utilizan: fichas, colores, etc. Con la máquina se puede pasar muy rápido a desarrollar programas para resolver problemas de la complejidad que se quiera, y a discutir de un modo muy concreto aspectos esenciales tales como la simplicidad, la eficiencia, la estrategia utilizada, la especificación del programa y la prueba de las soluciones. Mayores detalles sobre el trabajo con este escenario de aprendizaje se pueden encontrar en (Chaparro:learning).

EXPERIENCIAS

Se han tenido varias experiencias con modelos de múltiples juegos, las cuales han motivado y nutrido el diseño de material y los escenarios de aprendizaje. A continuación se comentan dos de ellas.

En uno de los cursos de fundamentos en los aspectos matemáticos de la informática, que toman los estudiantes de ingeniería de sistemas, se utilizaba el juego de las ranas y sapos como ratón de laboratorio para explorar ciertos conceptos relacionados con el tema de sistemas formales. Aunque la riqueza conceptual era buena, no se llegaban a encontrar soluciones generales del juego. Por tal razón no se conseguía modelarlo simbólicamente y tampoco proponer una solución algorítmica buena. Entonces se involucró a los estudiantes en la construcción de modelos físicos y la experiencia fue muy gratificante. De ella se pueden resaltar los siguientes aspectos:

- Los profesores pudieron efectuar preguntas de mayor calidad conceptual.
- Por las posibilidades de manipulación de los modelos fue posible trabajar varias versiones del juego y generalizar la solución.

- El trabajo fue más productivo al permitir profundizar más en la conceptualización, con la misma dedicación de tiempo.
- Se detectaron invariantes novedosos para domesticar el problema.
- Se pudo llegar al modelado simbólico del problema y a desarrollar algoritmos de solución del juego.
- Se logró integrar conceptos de informática que tradicionalmente se presentaban aislados.

Otra experiencia interesante se ha tenido con estudiantes de la Especialización en Diseño Multimedial de la Universidad Nacional de Colombia. La especialización la cursan profesionales de diferentes áreas del conocimiento, tales como artistas, comunicadores sociales, profesores, diseñadores, ingenieros, etc. Es decir, personas con experiencias muy diversas en informática. Se ha participado con un módulo de conferencias y talleres, cuyo objetivo es reflexionar sobre los aspectos fundamentales de la computación. Para ello se han desarrollado escenarios de aprendizaje en informática, apoyados en la experimentación y conjetura con modelos físicos y virtuales de juegos discretos y de la máquina de Turing. La experiencia ha sido muy gratificante, pues la participación es activa y los estudiantes se han involucrado en el desarrollo de los temas. Además, esta forma de trabajo ha permitido enriquecer la actividad con el conocimiento que cada uno tiene desde su profesión. La evaluación de este trabajo por parte de los estudiantes y directores del programa ha sido muy favorable, por lo que se ha establecido un ciclo de





trabajo durante la iniciación de cada cohorte con las siguientes conferencias-taller:

- “La computación y el mundo discreto, contrastado con el mundo continuo”.
- “La naturaleza de la computación y la máquina de Turing”.
- “La solución de problemas en informática a través de la máquina de Turing”.
- “La solución heurística de problemas en el computador”.

CONCLUSIONES

Se ha trabajado en el aula mediante el montaje de escenarios de aprendizaje en los que se utilizan modelos físicos y virtuales de juegos discretos. En estos escenarios se puede experimentar con los conceptos y estrategias de solución de problemas de informática, sin las barreras de los lenguajes simbólicos y de programación. Las personas sin experiencia previa en computación pueden abordar problemas de algoritmia y discutir acerca de sus propiedades esenciales, sin todo el andamiaje conceptual que requiere un lenguaje algorítmico.

Sobre la utilización de modelos físicos y virtuales se puede concluir lo siguiente:

- La interacción con los modelos potencia el lenguaje de comunicación de estudiantes y profesores.
- La flexibilidad y manipulación de los modelos de experimentación es clave para la detección de estruc-

turas e invariantes. Para ello es importante pensar en:

- Vistas desde diversos ángulos.
- Coloración de los elementos.
- Manipulabilidad de las piezas.
- El trabajo mismo de diseño y construcción de los modelos crea el entorno para la detección de invariantes. En este proceso se han detectado múltiples invariantes para domesticar o trivializar varios modelos de juegos populares.
- Pasar por la experimentación con los modelos físicos y virtuales favorece el desarrollo de modelos simbólicos, que facilitan el análisis de los problemas y su solución algorítmica.
- Desarrollar buenos modelos es un proceso iterativo de propuesta, uso y mejora. Las mejores innovaciones surgen en este proceso.
- Los desarrollos anteriores son posibles sólo si los profesores se involucran activamente en la construcción y experimentación con los modelos.

Se ha encontrado que los juegos discretos son un escenario natural para la experimentación en informática. Dado que se pueden entender como sistemas formales, en ellos se pueden reflejar muchos de los conceptos básicos y estrategias de solución de problemas. En el aula se han trabajado conceptos y estrategias de informática tales como:

- Detección de invariantes para la solución de problemas.
- Solución de problemas por analogía.
- Simplicidad de una solución.
- Eficiencia de una solución.
- La estrategia de dividir y conquistar.
- La estrategia del reintento.
- La modularidad de una solución.
- Soluciones recurrentes y soluciones iterativas.
- Modelado formal de problemas.
- Especificación y corrección de programas.

Se han tenido experiencias con distintos juegos discretos, para los cuales se han desarrollado modelos tanto físicos como virtuales, cada vez más aptos para su uso en el aula. Entre los juegos que se han trabajado, tenemos:

- Las torres de Hanoi.
- Ranas y sapos, o saltarín.
- Solitario de cruz o Hi-Q en distintas variantes.
- La máquina de Turing presentada como un juego.

Se han desarrollado y madurado una serie de programas de computador como apoyo a los escenarios de aprendizaje. Entre éstos se cuenta con los siguientes:

- Turing-Color: *software* de simulación de una máquina de Turing, flexible y manipulable, que permite manejar retos de coloración de una cinta. Su manejo no requiere conocimientos previos.
- Movi: *software* gráfico para experimentar con varios juegos discretos.
- Anferal: *software* gráfico para diseño de versiones del solitario.
- Soliheurístico: *software* de interacción para la solución heurística del solitario de cruz, apoyada por el computador.

Los juegos discretos son una mina de analogías informáticas que favorecen la experimentación y la conceptualización. Lo que hace falta son modelos físicos y virtuales adecuados, y el planteamiento de problemas apropiados que permitan pensar en la informática desde los juegos.

BIBLIOGRAFÍA

(Flórez:pedagogía)
 Flórez, R. (1996). *Hacia una pedagogía del conocimiento*. Bogotá: McGraw Hill.

(Chaparro:learning)
 Albornoz, J. & Chaparro, R. (2005). *The Learning of Fundamental Concepts and Problem Solving Strategies in Informatics, through the Experimentation and Classroom Research with Physical and*

Virtual Models of the Turing Machine. ITHET-2005 Conference Proceedings. Ithet. July.

(Paulos:números)
 Paulos, J. (1998). *Más allá de los números*. Barcelona: Editorial Tusquets.

(Gómez:formales)
 Gómez, P. & Gómez, C. (1992). *Sistemas formales, informalmente*. Bogotá: Una empresa docente, Universidad de los Andes.

(Guzmán:tendencias)
 De Guzmán, M. (1991). *Tendencias y experiencias innovadoras en educación matemática*. Barcelona: Editorial Labor S.A.

(Novak:aprendiendo)
 Novak, J. & Gowin, B. (1998). *Aprendiendo a aprender*. Barcelona: Editorial Martínez Roca.

(Novak:teoría)
 Novak, J. (1992). *Teoría y práctica de la educación*. Madrid: Alianza Universidad.

(Turing:computable)
 Turing, A. (1936). On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem. *Proc. London Math. Soc.*, vol. 42, N° 2, july, pp. 230-265.

(Snape:puzzles)
 Snape, Ch. & Scout, H. (1995). *Puzzles, Mazes and Numbers*. Gran Bretaña: Cambridge University Press.

(Haugeland:artificial)
 Haugeland, John (1985). *Artificial Intelligence: The Very Idea*. Cambridge Mass. MIT Press.

(Conway:winning)
 Conway, J.H.; Berlekamp, E.R. & Guy, R.K. (2001). *Winning Ways for Your Mathematical Plays*. Massachusetts: A K Peters Natick.

(Papadimitriou:elements)
 Papadimitriou, C.H. & Lewis, H. (1997). *Elements of the theory of computation*, 2nd ed. Prentice-Hall.

Un modelo para la comprensión de los procesos de producción con base en los flujos de materia prima

CÉSAR A. CASTELLANOS G.

Ingeniero Electrónico de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas y físico de la Universidad Nacional. Profesor de la Decanatura de Ingeniería Electrónica y de la Dirección de Ciencias Básicas de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
ccastell@escuelaing.edu.co

Artículo recibido: 23/04/2007
Evaluación par externo: 15/06/2007
Aprobado: 04/12/2007

Resumen

Se expone en este artículo un nuevo modelo matemático para la comprensión de la relación entre procesos de producción basado en el análisis de los flujos de materia prima a través del proceso general de fabricación. Este modelo permite una representación rápida y detallada de las interacciones entre procesos que componen un proceso general de fabricación, estableciendo las velocidades de procesamiento en cada etapa y para la totalidad del proceso en general. Esto permite identificar y cuantificar los “cuellos de botella”, las capacidades de producción y determinar el impacto de los cambios o mejoras en los procesos sobre la capacidad general de fabricación. Caracteriza igualmente cada proceso con índices que permiten “modelar” y calcular capacidades de producción en organizaciones de procesos “por proceso”. Con base en el modelo y a diferencia de otros[3] se genera un método de captura de información independiente de seguimientos a través del proceso, de cantidades fijas de materia prima o de secuencias de procesos, que permite la captura en cualquier momento por la duración –más cómoda para quien captura–, disminuyendo el tiempo de intervención en una empresa y facilitando los cálculos respectivos. El método se ha aplicado con éxito en más de diez empresas del sector metalmeccánico a través del Centro Red Tecnológico Metalmeccánico CRTM (1998-2001), y en una empresa de biotecnología a través de la Universidad de los Andes (2004).

Palabras claves: proceso, materia prima, producto final, flujos de materia prima y productos.

Abstract

This paper shows a mathematical model for the comprehension of the relationship between production processes based upon the raw material flow through the general fabrication process.

Keywords: process, raw material, final product, raw material flow, products.

INTRODUCCIÓN

Como resultado de trabajos de consultoría llevados a cabo por el autor en el campo de la automatización industrial entre 1997 y 2001, se requería un método que permitiera determinar rápidamente, donde en un proceso general de fabricación es más eficiente automatizar. Se modelaron los procesos de producción a través del concepto de flujo de materia prima y se creó una representación gráfica utilizando una combinación de símbolos gráficos estandarizados de la Asociación Americana de Ingenieros Mecánicos (Asme, por su sigla en inglés) y de la lógica booleana que conducen a una descripción “natural” del proceso general como una “interconexión” entre los procesos. Se hallaron igualmente ecuaciones que facilitan la intervención en las fábricas para captar la información y el cálculo de resultados respectivo. Se ha logrado identificar y cuantificar los “cuellos de botella”, así como establecer las capacidades de producción de pymes y grandes compañías con intervenciones en fábrica de dos a 24 horas (tres días en horas hábiles).

MÉTODO DE REPRESENTACIÓN GRÁFICA

Toda actividad que se lleva a cabo en la fabricación de un producto puede interpretarse como un proceso. El conjunto de actividades para la fabricación constituye un conjunto de procesos. Un proceso puede concebirse como un conjunto de acciones que logran una transformación de algún tipo sobre una materia prima que entra a dicho proceso, se procesa y sale transformada en su totalidad. En este sentido podemos considerar que la materia prima “fluye” a través del proceso, recibiendo transformaciones hasta obtener su estado final, considerada así un producto final.

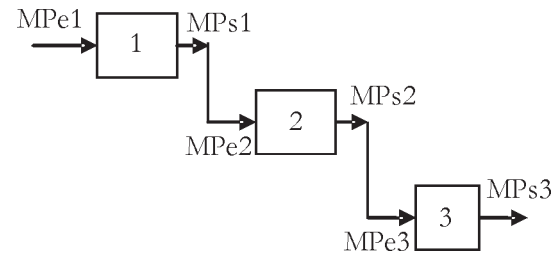
Una representación simple inicial de un proceso es imaginar que es todo lo que ocurre dentro de una caja:



Cada proceso hace “fluir” la materia prima a una determinada velocidad.

Un proceso general de fabricación puede representarse entonces reuniendo “cajas” de acuerdo con las diversas posibilidades, que básicamente son tres:

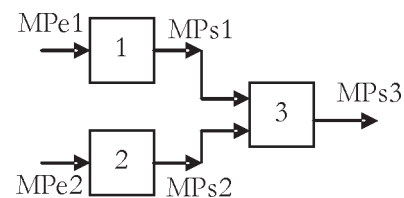
Reunión secuencial de procesos



La materia prima que sale de un proceso entra a continuación a otro proceso después de un transporte (representado por la flecha simple), con duración despreciable en comparación con los tiempos de procesamiento contiguos. En consecuencia,

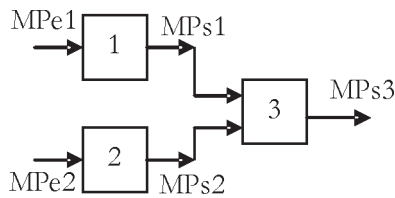
$$MPs_{j-1} = MPE_j$$

Reunión paralela de procesos



Las materias primas que salen de los procesos 1 y 2 (MPs1 y MPs2) y la materia prima saliente del proceso 3 (MPs3) deben ser diferentes. Esta condición se cumple si alguna de las características físicas o químicas, como el tipo de material, su densidad, conductividad, color, temperatura, forma, cantidad asociada a cada producto final y otras que caractericen la materia, es distinta. Las salidas de los procesos 1 y 2 entran al proceso 3, que es de ensamble o mezcla (física o química). Esta condición define a los procesos 1 y 2 como paralelos.

Reunión alternativa paralela de procesos



Las materias primas salientes de los procesos 1 y 2 (MPs1 y MPs2) y la materia prima saliente del proceso 3 (MPs3) deben ser iguales en todas sus características, excepto en la cantidad, que puede ser diferente en las entradas al proceso 3. El proceso 3 es, entonces, un proceso de reunión o recolección (ejemplo: el empaque de productos finales), mientras que los procesos 1 y 2 se denominan procesos alternativos paralelos.

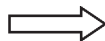
Combinaciones de los tres grupos de procesos anteriores pueden describir las relaciones entre procesos y los flujos de materia prima en los diversos procesos de producción.

Los procesos en sí mismos pueden clasificarse y representarse también así:

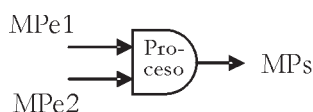
a) **Transporte [1]:** Traslado de la materia prima de un lugar a otro **con tiempos empleados despreciables** respecto a tiempos de procesamiento de procesos contiguos (anterior y posterior). Símbolo:



b) **Transporte [1]:** Traslado de la materia prima de un lugar a otro con tiempos empleados **no despreciables** respecto a tiempos de procesamiento de procesos contiguos (anterior y posterior). Símbolo:

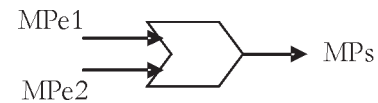


c) **Ensamble o mezcla [2]:** Toda operación de ensamble de piezas o mezcla de materiales (física o química). Símbolo:



MPe1 debe ser diferente de MPe2 y de MP. Este símbolo, traído de la lógica booleana, operación AND, alude al significado de que el proceso de ensamble o mezcla requiere para su ejecución tanto MPe1 como MPe2 y todas las entradas a que dé lugar el proceso (MPe1 y Mpe2 deben ser ciertas para que MP sea cierta).

d) **Recolección [2]:** Toda operación de recolección de una misma materia prima.



MPe1, MPe2 y MP son materias primas del mismo tipo y sólo pueden diferir en las cantidades que representan. El símbolo traído de la lógica booleana es un OR (puede ser cierta MPe1, O, MPe2, para que MP sea cierta, o con una cualquiera de las dos entradas ciertas la salida es cierta).

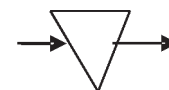
e) **Operación [1]:** Toda acción directa de transformación sobre la materia prima, diferente del ensamble o mezcla (física o química), y de la recolección o empaque que tienen una representación diferente. Ver c) y d). Símbolo:



f) **Verificación [1]:** Toda acción de revisión de la materia prima. Símbolo:

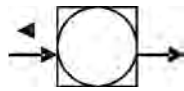


g) **Almacenamiento [1]:** Cualquier localización temporal de la materia prima que implique una orden de almacenamiento. Símbolo:



h) **Operación combinada [1]:** Operaciones simultáneas en un mismo proceso. Por ejemplo, una

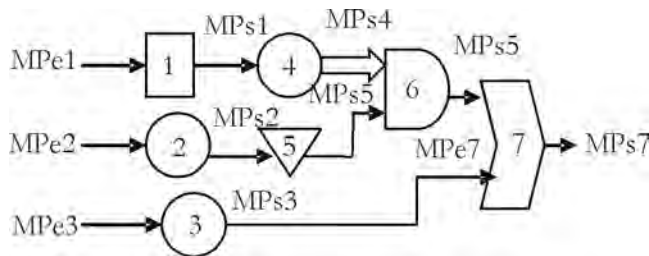
revisión combinada con cualquier otra operación.
Símbolo:



i) **Espera** [1]: Localización temporal de la materia prima sin una orden de almacenamiento. Símbolo:

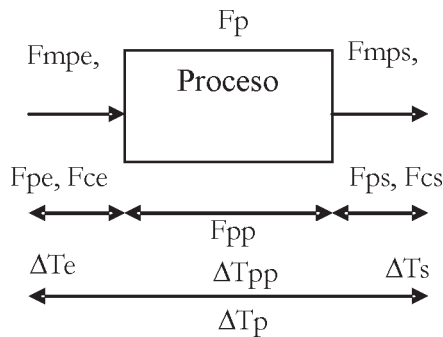


Un ejemplo de representación de un proceso general de fabricación es el siguiente:



Entran tres tipos de materia prima al proceso general, 1 y 2 son procesadas secuencialmente, y los procesos 1 y 4, 2 y 5 son secuencias paralelas, 6 ensambla o mezcla y MP_{s6} es igual a MPe₇ y a MP_{s7}, excepto posiblemente en cantidad. MP_{s7} es el producto final.

MODELO MATEMÁTICO



Definición de términos

1. **MPe** = Materia prima de entrada al proceso.
2. **MPs** = Materia prima de salida del proceso.

3. **Pf** = Cantidad de producto final asociado con la materia prima que se procesa en cada proceso particular.
4. **Fmpe** = Flujo de materia prima de entrada
= $MPe / \Delta Te$.
5. **Fmpss** = Flujo de materia prima de salida
= $MPs / \Delta Ts$.
6. **Fpp** = Flujo de productos en el proceso
= $Pf / \Delta Tpp$.
7. **Fpe** = Flujo de productos de entrada
= $Pf / \Delta Te$.
8. **Fps** = Flujo de productos de salida
= $Pf / \Delta Ts$.
9. **Fp** = Flujo de productos en el “proceso”
= $Pf / \Delta Tp$.
10. **Fce** = Factor de conversión de entrada
= Pf / MPe .
11. **Fcs** = Factor de conversión de salida
= Pf / MPs .
12. ΔTe = Intervalo de tiempo para la entrada al proceso de la MPe.
13. ΔTs = Intervalo de tiempo para la salida del proceso de la MP_s.
14. ΔTpp = Intervalo de tiempo transcurrido en el propio proceso.
15. ΔTp = Intervalo de tiempo de procesamiento total asignado al “proceso”.

Características del modelo

a) La materia prima entra y sale del proceso, empleando en la entrada o salida cierto tiempo especificado por ΔTe o ΔTs , y en el procesamiento propiamente dicho se emplea el tiempo ΔTpp . En consecuencia, el tiempo empleado en todo el “proceso” es $\Delta Tp = \Delta Te + \Delta Tpp + \Delta Ts$. En algunos procesos la diferenciación de estos tres tiempos puede no ser necesaria y se hace sólo una medida ΔTp que los incluye. En otros casos, estos tiempos ΔTe y ΔTs pueden incluir tiempos de espera debidos a procesos contiguos más lentos. El concepto de materia prima está definido por una magnitud física (longitud, área, volumen, masa, unidades) y un sustantivo que describe la clase o tipo de materia prima. Ejemplo: 3 kg de bronce, 5 metros de tela negra, 8 litros de alcohol, etc.

- b) La materia prima de entrada se mide en unas unidades físicas que pueden ser diferentes de las de salida (ej.: metros a la entrada y kilogramos a la salida).
- c) El producto (Pf) es la cantidad de productos finales que se obtienen a partir de una cantidad de materia prima dada que entra a un proceso y ésta se va transformando proceso a proceso, pero siempre tiene asociado el mismo número de productos finales, sin importar el “desperdicio” o pérdida de materia prima. Los productos finales asociados con una cierta cantidad de materia prima al comienzo del proceso de fabricación es una magnitud constante que, en consecuencia, no se modifica.
- d) El factor de conversión de entrada o salida (Fce o Fcs) indica el número de productos finales asociados a cada unidad de materia prima de entrada o salida y varía normalmente de proceso a proceso, bien sea por el cambio de unidades de medida para la “misma” materia prima o por desperdicio o pérdidas de la misma en el respectivo proceso.

Algunas ecuaciones fundamentales que se cumplen:

- El factor de conversión inicial (Fce):

$$F_{ce} = P_f / M_{Peo} \quad (1)$$

M_{Peo} = Materia prima inicial o en el origen del proceso general de producción.

P_f = Productos finales que se pueden obtener con la M_{Peo}.

Normalmente es una cantidad conocida por el fabricante y es, en consecuencia, una información de entrada que se utiliza en los cálculos de flujo de productos.

- El factor de conversión inicial (F'ce) con desperdicio de materia prima:

$$F'_{ce} = P_f / M_{Pfo} \quad (2)$$

M_{Pfo} = Materia prima original restante en el producto final.

- Definimos a **M_{Pnut}** = Materia prima no utilizada.

M_{Pnut} = Materia prima desperdiciada + Materia prima perdida (no transformada en el proceso, la desperdiciada sí experimenta transformación).

Podemos mostrar que:

$$F_{ce} = F'_{ce} (1 - M_{Pnut} / M_{Peo}) \quad (3)$$

En los casos en que se conozcan más F'ce y los desperdicios o materia prima no utilizada, se puede deducir Fce a través de (3).

Podemos ahora definir la cantidad **F_p**:

$$F_p = P_f / \Delta T_p = P_f / (\Delta T_e + \Delta T_{pp} + \Delta T_s)$$

$$\rightarrow F_p = 1 / (F_{pe}^{-1} + F_{pp}^{-1} + F_{ps}^{-1}) \quad (4)$$

Este es el flujo de productos finales a través del proceso respectivo (inicial, final o intermedio) y caracteriza la velocidad de procesamiento.

En cada proceso inicial, final o intermedio, debemos conocer los productos finales asociados con la materia prima que “circula” a través del mismo. Esto lo podemos conocer con la siguiente expresión:

- Definimos:

P_{fn} = Productos finales asociados procesados en el proceso n-ésimo (de n o más conectados secuencialmente).

$$\rightarrow P_{fn} = F_{ce} \prod_{j=1}^n M_{Pej} / M_{Ps(j-1)} \quad (5)$$

(Ver demostración en Apéndice)

Con **M_{Ps0} = 1**, es decir, por definición M_{Ps0} = 1 (adimensional).

Comentario:

M_{Pej} y M_{Ps(j-1)} se miden en las mismas unidades y sus valores son diferentes si la misma cantidad de producto final no se cuenta en los procesos contiguos.

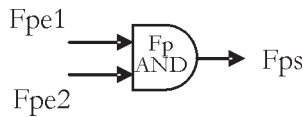
La utilidad de esta ecuación (5) es que permite deducir la cantidad de productos finales asociados que se procesan en procesos intermedios, sin necesidad de seguirle la pista a una misma cantidad de materia prima proceso tras proceso. Sólo se requiere hacer

mediciones “locales” en cada proceso, sin relación con los anteriores.

Si n procesos están interconectados secuencialmente, su flujo equivalente de productos finales asociados (F_{pt}) viene dado por el flujo menor de proceso que haga parte de la secuencia. Entonces, si el k -ésimo proceso de la secuencia es el de menor flujo F_{pk} , tendremos:

$$F_{pt} = F_{pk} \tag{6}$$

Esto implica que los procesos en la secuencia de mayor velocidad, en términos reales, “marcharán” a la misma velocidad que el k -ésimo, generando esperas y acumulaciones de producto o materia prima en las entradas de los procesos más lentos. Si en un proceso de mezcla o ensamble (AND) la velocidad de entrada de materia prima es mayor que la velocidad de mezcla, el flujo del proceso será el dado por el ensamble. Lo mismo pasa con la Recolección (OR). Si fuera lo contrario, es decir, entradas de materia prima más lentas que la velocidad de ensamble o recolección, esta velocidad será la equivalente del proceso de mezcla:



Entonces:

$$F_{ps} = \text{al menor de } F_{pe1}, F_{pe2}, F_p \tag{7}$$



Entonces:

$$F_{ps} = F_{pe1} + F_{pe2} \text{ si } F_p = F_{pe1} + F_{pe2} \tag{8}$$

$$\text{o } F_{ps} = F_p \text{ si } F_p < F_{pe1} + F_{pe2} \tag{9}$$

En consecuencia, podemos afirmar que en un proceso general de fabricación si éste no posee procesos de recolección (alternativos) la velocidad de procesamiento general (F_{pg}) es la del proceso más lento (el k -ésimo, por ejemplo), pues éstos están compuestos de procesos secuenciales o de mezcla:

$$F_{pg} = F_{pk} \tag{10}$$

Si hay procesos de recolección al final del proceso general de fabricación:

$$F_{pg} = F_{ps} \tag{11}$$

Bien sea que se cumpla (8) o (9).

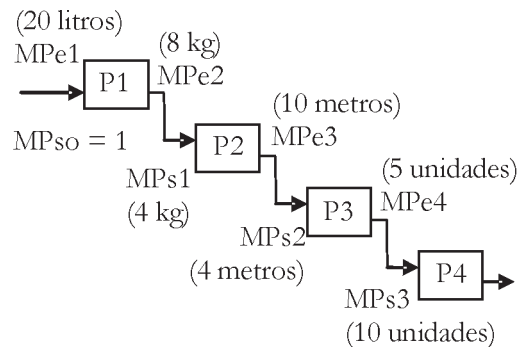
Anotamos finalmente que el tiempo total de procesamiento (T_{pt}) lo establece la mayor suma de tiempos por producto de cada proceso ($T_{pj} = 1 / F_{pj}$) en el camino o la ruta desde el ingreso de materia prima original hasta la obtención de producto final.

$$T_{pt} = \sum_{j=1}^m T_{pj} = \sum_{j=1}^m (1 / F_{pj}) \tag{12}$$

F_{pj} = Velocidad de procesamiento de cualquier proceso perteneciente al camino, en particular el j -ésimo.

Un ejemplo

En el siguiente ejemplo se ilustra el uso de las ecuaciones anteriores. Supongamos el siguiente proceso secuencial de fabricación:



Es decir, entra una materia prima en el origen del proceso general medida en litros (100 l), de los cuales se sabe que se obtienen diez productos finales medidos en unidades. Sabemos en este ejemplo que la materia prima a medida que se va transformando, va cambiando la magnitud física que la describe: litros > kg > metros > unidades. Deseamos conocer el número de productos finales (unidades) que se procesan en cada uno de los procesos P1 a P4. Para ello aplicamos la ecuación (5) así:

$$Pf_4 = F_{ceo} \times (MPe_1/MP_{so}) \times (MPe_2/MP_{s1}) \times (MPe_3/MP_{s2}) \times (MPe_4/MP_{s3}) = 0,1 \text{ un} / 1 \times 201 / 1 \times 8 \text{ kg} / 4 \text{ kg} \times 10 \text{ m} / 4 \text{ m} \times 5 \text{ un} / 10 \text{ un} = 5 \text{ un}$$

Con un cálculo similar, hallamos los productos finales Pf_1 a Pf_3 procesados en los procesos P1 a P3, entonces:

$$Pf_3 = 10 \text{ Un}$$

$$Pf_2 = 4 \text{ Un}$$

$$Pf_1 = 2 \text{ Un}$$

Deducidas estas cantidades, y con un conjunto de medidas de tiempos de proceso ΔT_{pj} supuestos, podemos construir la siguiente tabla:

Pfj Deducido de (5)	ΔT_{pj} Medidos (supuestos)	Fpj Deducido de las dos columnas anteriores	Tpj = 1/Fpj Deducido
Pf1 = 2 Un	3 seg	2 / 3 un/seg	3 / 2 seg/un
Pf2 = 4 Un	8 seg	1 / 2 un/seg	2 seg/un
Pf3 = 10 Un	10 seg	1 un/seg	1 seg/un
Pf4 = 5 Un	6 seg	5 / 6 un/seg	6 / 5 seg/ un

Cada uno de los Fpj define la velocidad de procesamiento en términos de producto final para cada proceso inicial, final o intermedio. **En esta forma podemos comparar velocidades entre diferentes procesos.** Igualmente, se puede tomar cada Fpj como un índice que caracteriza al proceso respectivo.

De la ecuación (6) podemos deducir el flujo equivalente del proceso Fpt:

$$F_{pt} = F_{pk} = F_{p2} = 1/2 \text{ un/seg} = 0,5 \text{ un/seg}$$

El tiempo de procesamiento en el proceso más lento es:

$$T_{p2} = 1/F_{p2} = 2 \text{ seg/un}$$

El tiempo total de procesamiento (T_{pt}) es:

$$T_{pt} = \sum_{j=1}^4 T_{pj} = 3/2 + 2 + 1 + 6/5 \text{ seg/un} \\ = 57/10 \text{ seg/un} = 5,7 \text{ seg/un}$$

Este tiempo de procesamiento debiera ser igual al número de procesos secuenciales ($N_s = 4$) multiplicado por T_{p2} :

$$T_{pt} = N_s \times T_{p2} = 4 \times 2 \text{ seg/un} = 8 \text{ seg/un}$$

Este valor es superior al valor deducido de (12), es decir, 5,7 seg/un; la razón es que en el ejemplo no se han tenido en cuenta las esperas y consecuentes acumulaciones de producto a que obliga el proceso más lento de la secuencia (P2), lo que conduce en realidad a que $F_{pt} = F_{p2}$ y, por tanto, $T_{p2} = 1/F_{p2}$, sea el valor de tiempo promedio de procesamiento por producto final (unidad) en cada uno de los cuatro procesos que componen la secuencia.

Este flujo F_{pt} se puede tomar como un índice que caracteriza el conjunto de los cuatro procesos secuenciales, los cuales podemos remplazar por una sola "caja" que procesa a la velocidad F_{pt} .

Podemos deducir igualmente la capacidad de producción de una fábrica con base en el conocimiento de F_{pg} , ya que este valor es en sí mismo una capacidad de producción dada en una escala de tiempo que puede ser poco común en algunos casos (por ejemplo, en unidades/segundo). Al multiplicar F_{pg} por la escala "normal" de tiempo obtendremos el valor de la producción diaria, semanal, mensual o anual deseada. Del mismo modo los esquemas gráficos de interconexión de procesos nos permiten identificar y cuantificar a través de los Fp de cada proceso los más lentos ("cuellos de botella") y deducir los efectos en las capacidades de producción de cualquier cambio o modificación de los procesos. Específicamente si se desea automatizar un proceso y lograr el mayor impacto posible en el mejoramiento de la capacidad de producción, las acciones respectivas deben llevarse a cabo en los procesos más lentos (F_p mínimos), lo cual debe disminuir las gestiones de acumulaciones de producto (transportes, almacenamientos), así como el costo asociado.

El modelo en otras organizaciones de producción

En los procesos organizados "por producto" o "línea de producción", los respectivos procesos se pueden caracterizar mediante el F_p de cada uno, lo que nos permite deducir la velocidad general F_{pg} de todo el proceso de producción. Si existen procesos alternativos

el menor F_{pt} asociado a cada secuencia alternativa define la velocidad general, según se describe en (8) y (9).

En el caso de procesos organizados “por proceso”, este índice F_p debería asociarse a un mismo producto, lo que lo hace impráctico, pues si hay muchos productos diferentes que experimentan el mismo proceso y su número está indefinido, es conveniente otro tipo de índices.

Para ello podemos simplificar las situaciones variadas que se presentan a aquellas en las que podemos diferenciar claramente dos conceptos: acciones características (A_c), y unidades físicas asociadas a cada acción característica o simplemente unidades características (U_c). Una acción característica en un proceso es por ejemplo la de corte de lámina, y el proceso puede implicar múltiples acciones de corte ($N_a =$ número de acciones requeridas de corte en el respectivo proceso), así como medir el efecto de la acción en unidades que lo caractericen como la longitud del corte (N_{uc}). Podemos hacer estas dos mediciones (N_a y N_{uc}) y **caracterizar el proceso mediante los tiempos promedio empleados por el “montaje o alistamiento” respectivo requerido para la ejecución de cada acción (T_{pma}), y por el tiempo promedio por unidad característica (T_{puc});** en el caso del ejemplo, tiempo promedio por centímetro de corte. Otro ejemplo diferente del de un proceso metalmecánico puede ser por ejemplo un proceso “químico” que requiera el calentamiento de una mezcla determinada. El alistamiento puede ser el llenado del tanque o reactor, la acción, el calentamiento de la mezcla, y la unidad característica la temperatura a la cual debe llevarse la mezcla. T_{puc} sería en este caso tiempo empleado por grado centígrado de incremento en la temperatura de la mezcla.

En general, podemos expresar el tiempo equivalente de ejecución del proceso (T_{eq}) como:

$$T_{eq} = N_a * T_{pma} + \left(\sum_{k=1}^{N_{uc}} N'_{uck} \right) * T_{puc} + \mu \quad (13)$$

Siendo:

$\mu = \Delta T_e + \Delta T_s \approx$ Aproximadamente constante para cada tipo de producto.

$N_a =$ # de acciones características requeridas por la materia prima en el proceso respectivo.

$N'_{uck} =$ # de unidades características requeridas en la acción k -ésima del proceso respectivo.

Las mediciones que se toman para caracterizar cada proceso son T_{pma} y T_{puc} :

$$T_{pma} = T_{pm} / N_a \quad (14)$$

Con:

$T_{pm} =$ tiempo empleado en montaje de N_a acciones (*Set Up*)

$$T_{puc} = T_{pac} / \left(\sum_{j=1}^{N_a} N_{ucj} \right) \quad (15)$$

Con :

$T_{pac} =$ tiempo empleado en la ejecución de N_a acciones características

Con estos índices, y luego de establecer N'_a y N'_{uck} para cada producto, podemos deducir el tiempo de proceso para un nuevo producto: (T_{eqt})

$$T_{eqt} = \sum_{i=1}^m T_{eqi} \quad (16)$$

Con m procesos conectados secuencialmente desde el origen hasta el final del proceso general de producción.

Igualmente, de acuerdo con la interconexión particular de los procesos requeridos, podemos asignar o deducir un flujo equivalente general para el procesamiento de múltiples productos del mismo tipo (ec. (6)).

Respecto de la ecuación (13), se puede presentar un tipo de casos en los que las acciones implican el mismo número de unidades características ($N'_{uci} = N'_{uck}$). En ese caso podemos definir un índice I_{ca} así:

$$I_{ca} = N_a * N_{uc} / \Delta T_{pp} \quad (17)$$

El proceso entonces se caracteriza por el producto (acciones características-número de unidades características por unidad de tiempo de procesamiento), y por el tiempo promedio por montaje T_{pma} . Para el ejemplo citado, el proceso de corte de lámina se caracteriza por [3]:

$[I_{ca}] = [\text{Acciones corte} \times \text{centímetro} / \text{minuto (o segundo)}]$.

Para un producto nuevo, el Teq es:

$$Teq = N'a * Tpma + N'a * N'uc / Ica + \mu \quad (18)$$

Con N'a y N'uc el respectivo número de acciones y unidades características del nuevo producto en el respectivo proceso.

Un flujo equivalente puede deducirse entonces interpretando los Teq como el ΔTp de la ecuación (4) y asociar un Fp a cada proceso relacionado con cada producto final.

ALGUNOS EJEMPLOS EN FÁBRICAS

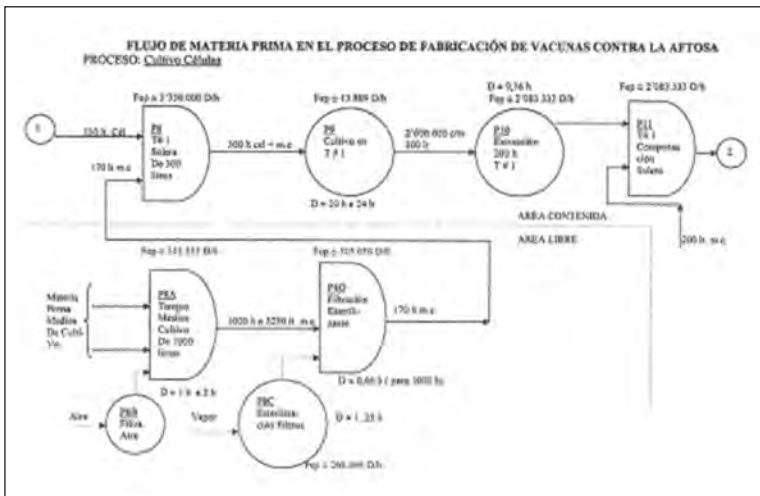


Figura 1. Parte del proceso de fabricación de vacunas (empresa de biotecnología en Bogotá, D.C.).

CONCLUSIONES

El método presentado hasta aquí se constituye en una herramienta sencilla y útil, que facilita la comprensión rápida de las relaciones entre procesos de producción tanto para el ingeniero de automatización industrial como para el ingeniero industrial. Formatos de captura de información, aplicaciones en empresas y ejemplos pueden verse en [4].

Se ha explorado la posibilidad de utilizar herramientas gráficas como Simulink de Matlab para sistematizar la captura de información y el análisis de la misma. Este trabajo está pendiente.

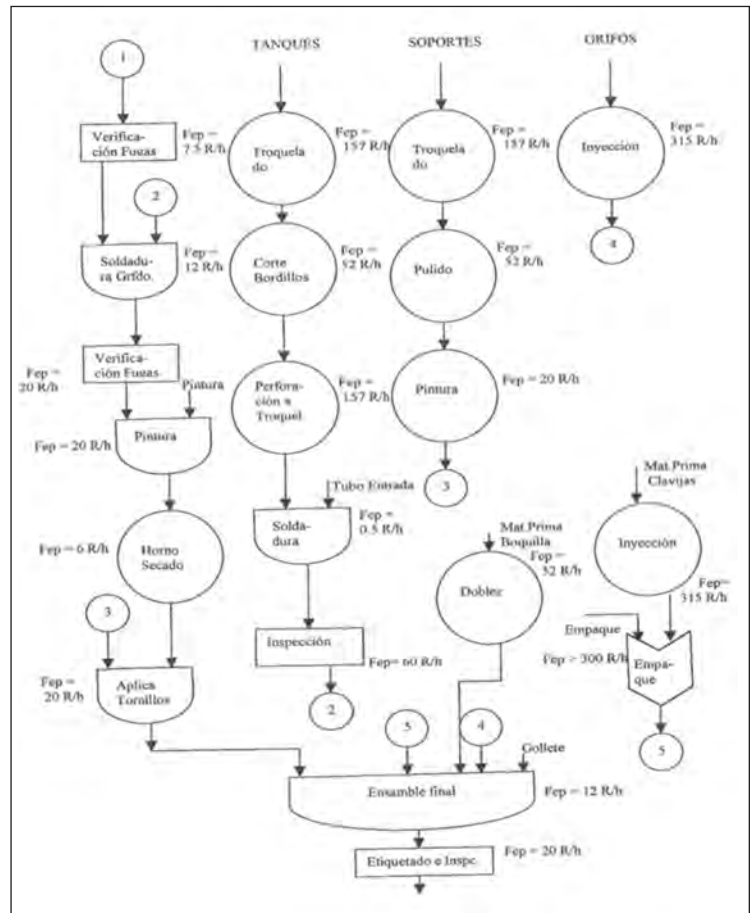


Figura 2. Parte del proceso de fabricación de radiadores (fábrica en Barranquilla).

APÉNDICE

Demostración de la ecuación (5):

Por definición (ver III.1) :

$$Fcej = Pfj / MPEj \quad (A.1)$$

Pero

$$Fcej = Fcs_{j-1} = Pf_{j-1} / MP_{s_{j-1}} \quad (A.2)$$

De (A.1) y (A.2) :

$$P fj = MPEj \times Fcej = Pf_{j-1} \times Mpej / MP_{s_{j-1}} \quad (A.3)$$

Pero

$$P fj_{j-1} = MPE_{j-1} \times Fcej_{j-1}$$

$$P fj_{j-1} = Pf_{j-2} \times MPE_{j-1} / MP_{s_{j-2}} \quad (A.4)$$

Remplazando (A.4) en (A.3):

$$P_{fj} = P_{f_{j-2}} \times M_{pe_{j-1}} / M_{ps_{j-2}} \times M_{pej} / M_{ps_j}$$

(A.5)

Si $j=3$, de modo que obtengamos los productos finales en el origen (P_{f1}):

$$P_{fj-2} = P_{f3-2} = P_{f1}$$

$$P_{f3} = P_{f1} \times (M_{pe2} / M_{ps1}) \times (M_{pe3} / M_{ps2}) \quad (A.6)$$

$$\begin{aligned} P_{f1} &= \text{Productos finales en el origen del proceso} \\ &= F_{ce1} \times M_{pe1} = F_{cso} \times M_{pe1} \\ &= (P_{fo} / M_{ps'o}) \times M_{pe1} = F_{ceo} \times M_{pe1} / \\ &M_{ps'o} \end{aligned} \quad (A.7)$$

Con $M_{ps'o} \equiv M_{peo} \times M_{ps'o}$ y $M_{ps'o} \equiv 1$

Otra forma de ver el valor de P_{f1} es:

$$\begin{aligned} P_{f1} &= F_{ce1} \times M_{pe1} = F_{ceo} \times M_{pe1} \\ &= F_{ceo} \times M_{pe1} / M_{ps'o} \end{aligned} \quad (A.8)$$

Con $M_{ps'o} = 1$

Remplazando (A.8) en (A.6)

$$P_{f3} = F_{ceo} \times M_{pe1} / M_{ps'o} \times (M_{pe2} / M_{ps1}) \times (M_{pe3} / M_{ps2})$$

$$P_{f3} = F_{ceo} \prod_{j=1}^3 M_{pej} / M_{ps(j-1)} \quad (A.9)$$

En consecuencia, este resultado lo podemos generalizar a una serie cualquiera de n -procesos secuenciales, obteniendo la ecuación (5).

REFERENCIAS

- [1] American Society of Mechanical Engineers (Asme). (1998). www.asme.org Y32.11 - 1961 Graphic Symbols For Process Flow Diagrams In Petroleum and Chemical Industries Product Type: E-Book, N° of pages: 15.
- [2] Mowle, Frederic J. (1997). *A Systematic Approach to Digital Logic Design*. Addison-Wesley.
- [3] Universidad Politécnica de Valencia (1997). Método de diagnóstico empresarial.
- [4] Castellanos, César A. (2000). CRTM Método Estandarizado de Diagnóstico Integral. 1° de marzo.

Integración del sistema de planeación de recursos empresariales con un sistema de manufactura integrado por computador

SANTIAGO AGUIRRE MAYORGA

Ingeniero industrial de la Pontificia Universidad Javeriana. Magíster en Ingeniería Industrial de la Universidad de los Andes. Profesor asistente del Departamento de Procesos Productivos de la Pontificia Universidad Javeriana. saguirre@javeriana.edu.co

CARLOS EDUARDO FÚQUENE RETAMOSO

Ingeniero industrial de la Pontificia Universidad Javeriana. Máster en Gestión Ambiental de Portland State University. Profesor asistente del Departamento de Procesos Productivos de la Pontificia Universidad Javeriana. cfuquene@javeriana.edu.co

Artículo recibido: 09/11/2006
Evaluación par externo: 04/04/2007
Evaluación par externo: 02/10/2007
Aprobado: 04/12/2007

Resumen

En este artículo se describe el proceso seguido y las repercusiones de la integración del sistema de Planeación de Recursos Empresariales (ERP¹) de SAP®, con un sistema de Manufactura Integrada por Computador (CIM²) en el Centro Tecnológico de Automatización Industrial (CTAI) de la Facultad de Ingeniería de la Pontificia Universidad Javeriana. Para esto se va a presentar el proceso desarrollado para el diseño de los productos que se van a elaborar en una fábrica modelo creada para realizar la integración de estas dos tecnologías.

A continuación se presentan los procesos de la cadena de valor de la fábrica modelo, de los cuales se partió para poder realizar la implantación de SAP R/3® a través de la configuración, pruebas y puesta en producción del sistema. Adicionalmente, se van a explicar los pasos en la integración del sistema ERP con el sistema CIM por medio del desarrollo de una interfaz mediante la cual se integraron la planeación y programación de la producción realizados en SAP R/3® con los procesos de ejecución y control de la producción realizados en el CIM. Finalmente, se analiza el impacto de este desarrollo a nivel académico e industrial.

Palabras claves: sistemas de planeación de recursos empresariales, ERP, SAP®, sistemas de manufactura integrada por computador, CIM, automatización, integración de sistemas.

Abstract

In this article it is described the process followed and the repercussions of the integration of the Enterprise Resource Planning system (ERP) of SAP® with a Computer Integrated Manufacturing system (CIM) at the Technology and Automatization Center (CTAI) of the Engineering Faculty at the Pontificia Universidad Javeriana. The article begins with the description of the product design methodology of a model factory that was created for the integration of these two technologies.

The value chain processes of the factory are also presented and the SAP R/3 implementation methodology that includes the configuration, test and go live, steps that was followed for the ERP implementation. In addition the interface by which the production planning process of the ERP was integrated with the shop floor control process in the CIM, is described. Finally the academic and industrial impacts of the integration are analyzed.

Keywords: enterprise resource planning, ERP, SAP, computer integrated manufacturing (CIM), automatization, systems integration.

1. ERP: *Enterprise Resource Planning.*
2. CIM: *Computer Integrated Manufacturing.*

INTRODUCCIÓN

Hace un poco más de dos décadas, Michael Porter afirmaba que “Las tecnologías de la información están transformando la naturaleza de los productos, procesos, compañías y la competitividad como tal” (Porter, 1985). Este cambio es cada vez más evidente en las empresas y en este proceso los avances en la tecnología informática han servido de apoyo en la ejecución de las estrategias empresariales, las cuales han tenido que ser revaluadas ante las nuevas exigencias tecnológicas y de mercado.

Con respecto a estas tecnologías, la industria colombiana no ha sido indiferente y se reconoce que “la automatización se comienza a aplicar en Colombia de manera intensa, especialmente en ciertas cadenas productivas industriales, como metalmecánica-automotriz, fibras-textiles y cementos... En Colombia, algunas empresas fabrican sistemas de control, robots industriales y sistemas automáticos de almacenamiento, que dan soluciones innovativas exportables”³.

Considerando las necesidades del sector productivo y de la academia, y con el objeto de contribuir a la transformación y adopción tecnológica de las empresas del país, la Facultad de Ingeniería de la Pontificia Universidad Javeriana consolida, con la adquisición e instalación del sistema de Manufactura Integrada por Computador (CIM) de Festo en el 2003, el Centro Tecnológico de Automatización Industrial (CTAI) de la Facultad de Ingeniería, cuyos objetivos resumidos son satisfacer las necesidades de formación en automatización industrial y en todas las demás áreas relacionadas de los programas académicos tanto de pregrado como de posgrado de la Facultad de Ingeniería, constituirse en una infraestructura para propósitos de investigación de los diferentes departamentos y grupos de investigación y servir como centro de transferencia de tecnología⁴.

Por otro lado, la Facultad de Ingeniería y SAP, el proveedor más grande a nivel mundial de soluciones ERP, iniciaron un acercamiento concretado en el año

1999 con la firma de una alianza académica para que, por medio de actividades de investigación y capacitación, los estudiantes adquieran conocimiento sobre estas herramientas para su formación y actualización en estos temas que involucran tecnología de punta.

Estas dos tecnologías, el sistema ERP de SAP y el sistema de manufactura integrado por computador (CIM), no estaban integrados en el CTAI, pero para este fin se desarrolló un proyecto de investigación. En este artículo se describe el proceso mediante el cual se llegó a integrar el sistema ERP de SAP con un sistema de manufactura integrada de computador (CIM) en el CTAI, para llegar a tener una fábrica totalmente automatizada mediante la tecnología informática.

MARCO CONCEPTUAL Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

ERP es la sigla de *Enterprise Resource Planning*, que se podría traducir como Planeación de los Recursos de la Organización. Este término se adoptó para un tipo de *software* de gestión empresarial que resulta de la extensión lógica de MRP II* y MRP**, que con el transcurso del tiempo se ha ido expandiendo, integrando más funciones en torno al sistema de información. Con el sistema ERP se tiene la tecnología para manejar todos los procesos organizacionales de una empresa, como los procesos de planeación y control de producción, abastecimiento, ventas, distribución, entre otros (González, 1998).

SAP, por otro lado, es una empresa alemana fundada en 1972 que desarrolló el sistema ERP, denominado SAP R/3 en 1992 (Brady *et al.*, 2001). Este es un sistema basado en la tecnología cliente/servidor, que les facilita a todas las áreas de negocio acceder a la misma base de datos, eliminando la redundancia en la información y permitiendo conseguir la integración de los procesos, así como tener información oportuna para la toma de decisiones. Este sistema está organizado en módulos como el módulo de Planeación de la Producción (PP), Ventas y Distribución (SD), Administración de Materiales (MM), entre otros. A partir de los años noventa, a estos sistemas ERP iniciales se les integraron otros siste-

3. Colciencias. Plan Estratégico del Programa Nacional de Desarrollo Tecnológico Industrial y de Calidad 2000 – 2010. Documento en mimeo. Bogotá: mayo de 2000.

4. Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Ingeniería. Centro Tecnológico de la Facultad de Ingeniería. Documento de trabajo. Bogotá: 2002.

* Sigla del inglés *Manufacturing Resource Planning*, que traduce Planeación de los Recursos de Manufactura.

** Sigla del inglés *Materials Requirements Planning*, que traduce Planeación de Requerimientos de Materiales.

mas, tales como los sistemas para la Administración de Relaciones con los Clientes (CRM) o los sistemas para la Administración de las Relaciones con el Proveedor (SRM), llegando actualmente a tener un ERP extendido o el denominado ERP II.

Para la implantación de los sistemas ERP en las organizaciones, hay que seguir un proceso mediante el cual se debe configurar el sistema para que soporte adecuadamente los procesos de la organización. Mediante la configuración se personaliza (en cierta medida) el *software* de acuerdo con los procesos, estructura organizacional y políticas y reglas de cada negocio. SAP desarrolló la metodología de implantación *Asap (Accelerated SAP)* para organizar y acelerar los proyectos de implantación (Brady *et al.*, 2001), que tienen una duración variable de acuerdo con el número de módulos que se van a implantar y con el tamaño y complejidad de la organización.

Así mismo, el CIM permite diseñar un producto y ejecutar las actividades de producción del mismo en un sistema totalmente automatizado (Baumgartner, 1991). Este término, que se viene trabajando en las últimas décadas, ha sido desarrollado por varios autores. La generalidad de las definiciones se centra en la integración de la información y automatización de la manufactura, administración y las funciones de soporte donde se involucren su diseño, elementos transaccionales y las aplicaciones idóneas de soporte para la toma de decisiones en la compañía (Ragowsky & Stern, 1997).

El CTAI de la Universidad Javeriana dispone de los dos sistemas, pero éstos se encontraban desintegrados, como sucede en la gran mayoría de las empresas que cuentan con estas tecnologías, lo que trae como consecuencia el fraccionamiento de los procesos de planeación de la producción y su respectiva ejecución y control, donde los datos de la planta de producción se quedan en ese nivel y no se llevan a un sistema donde puedan servir para construir indicadores que retroalimenten y permitan mejorar continuamente los procesos.

Con el fin de integrar estas dos tecnologías en el CTAI, se creó una fábrica modelo con productos y procesos que sirvieron para simular la operación de una empresa del sector real, donde se coordinan e integran los procesos de planeación con la ejecución de la producción y de las actividades de la cadena de valor, con miras a su empleo en actividades docentes, de servicio y de investigación. A continuación se describe la metodología seguida para la integración del sistema SAP R/3 con el sistema de manufactura CIM de Festo.

DISEÑO DE LOS PRODUCTOS DE LA FÁBRICA MODELO

Para el diseño de los productos de la fábrica modelo se realizaron estas actividades:

Se partió de identificar las restricciones para la manufactura de productos que presenta el CIM, dado que éste es un sistema académico que tiene limitaciones que se deben considerar para poder establecer los posibles productos que se van a fabricar, como restricciones de material, tamaño de la pieza, mecanismo de sujeción de las máquinas, entre otras.

Una vez establecidas las restricciones del CIM, se procedió a identificar los posibles productos que se pueden fabricar en este sistema, tomando en cuenta que los productos tengan un uso específico en el sector real. De acuerdo con esto, se identificaron cuatro productos a los que se les realizó una evaluación en términos de su funcionalidad, mercado real y facilidad de maquinado y manipulación, resultando las uniones roscadas el producto elegido para el diseño y manufactura en la fábrica modelo.

El diseño de los productos se realizó con la herramienta CAD SolidWorks®. En este programa se requiere partir de la representación sólida de la parte, para lo cual se debe hacer un dibujo con dimensiones determinadas, como se especifica en las figuras que aparecen seguidamente.



Figura 1. Proceso seguido en el diseño de los productos de la fábrica modelo.



Figura 2. Unión roscada tipo 1.



Figura 3. Unión roscada tipo 2.

A partir de los dibujos de sólido se derivan los planos, los que se especifican a continuación.

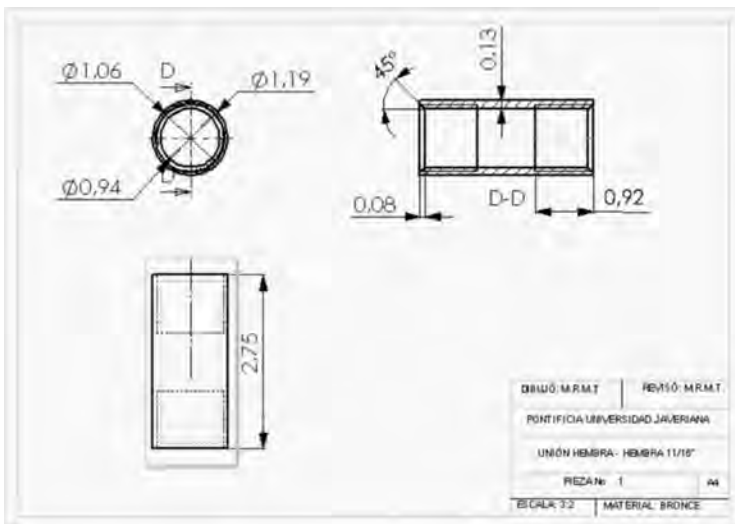


Figura 4. Plano unión roscada tipo 1.

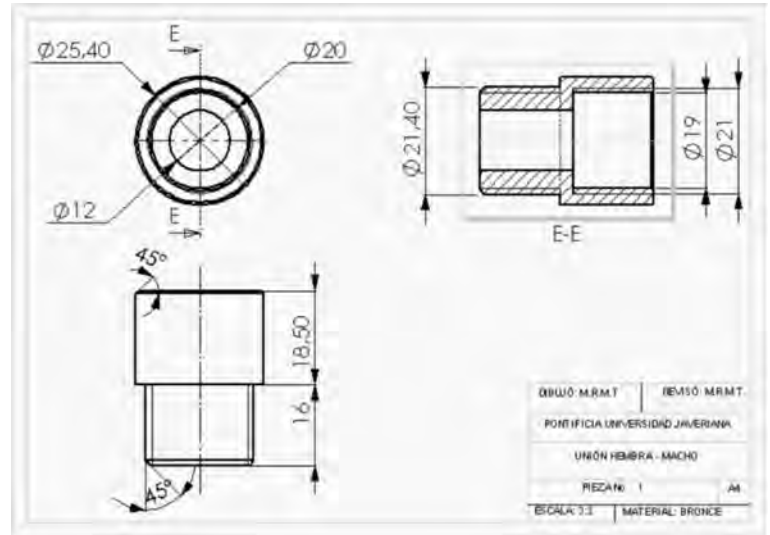


Figura 5. Plano unión roscada tipo 2.

CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA DE MANUFACTURA INTEGRADO POR COMPUTADOR CIM

Una vez elaborados los planos de las piezas, se procedió a programar las máquinas necesarias para la fabricación de las mismas. Para el caso particular de las uniones elegidas, se requiere el torno CNC⁵. La programación de la máquina se hizo en función de los planos, a partir de los cuales se determinaron los procesos, herramientas y máquinas necesarios para obtener las piezas.

Adicionalmente, se realizó la configuración del CIM en el *software* Cosimir Control a través de *planes de proceso*⁶, donde se especificaron las rutinas que ha de seguir cada uno de los componentes del CIM (almacén automatizado, robot, banda transportadora y torno CNC) para la producción del producto.

La ejecución de las pruebas piloto requirió el seguimiento de un protocolo con tres fases: la primera de iniciación de la máquina, la segunda de digitación y simulación del programa y la tercera de ejecución del programa y, por ende, de las muestras. El resultado concreto de las pruebas fueron los productos manufacturados en el CIM, como se puede apreciar más adelante (figuras 7 y 8).

5. CNC: Control Numérico Computarizado.
6. Los planes de proceso (*process plans*) son programas desarrollados en el *software* Cosimir Control, que es el controlador de todas las actividades del CIM.

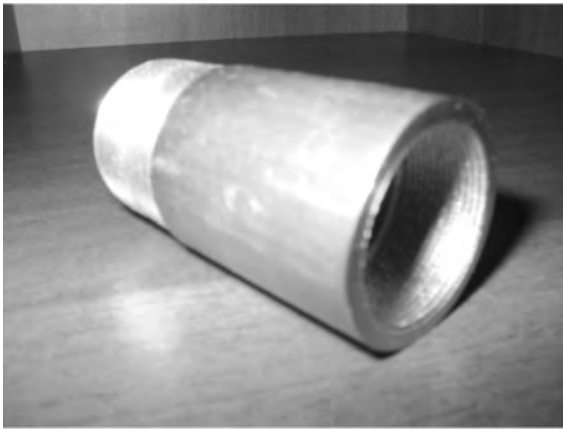


Figura 7. Acople roscado tipo 1 en bronce.



DISEÑO DE LOS PROCESOS DE LA FÁBRICA MODELO

Para diseñar los procesos de la fábrica modelo se partió de definir la cadena de valor para la empresa. Como resultado de esto se estableció que los procesos primarios de la compañía son diseño y desarrollo de productos, abastecimiento, producción, ventas y distribución. Como proceso estratégico está la planeación de la cadena de suministro, como se especifica más adelante (figura 9).

A partir de la cadena de valor se diseñó la secuencia de actividades que hay que realizar para ejecutar cada uno de estos procesos, lo que se especificó en diagramas de flujo. Esto se realizó teniendo como referencia las mejores prácticas propuestas por el sistema SAP R/3 y por el modelo SCOR (*Supply Chain Council*, 2004). Estos procesos diseñados fueron los que se modelaron en SAP R/3, como se explica a continuación.

IMPLANTACIÓN DE SAP EN LA FÁBRICA MODELO

Para la implantación de SAP R/3 en la fábrica modelo, se siguieron las actividades generales de la metodología de implantación de SAP denominada Asap (SAP. Implementation Guide. En: <<http://help.sap.com>>), la cual consta de determinados pasos (figura 10).

Preparación del proyecto de implantación de SAP R/3

En esta etapa se llevaron a cabo las siguientes actividades:

- a) *Planeación del proyecto.* Se establecieron los roles en el proyecto y se realizó el proceso para contratar la asesoría de un consultor técnico con conocimientos en programación de SAP R/3. En esta etapa se establecieron los módulos que se van a usar y se determinaron las necesidades de capacitación.



Figura 8. Acople roscado tipo 2 en bronce.



PLANEACIÓN DE LA CADENA DE SUMINISTRO



Figura 9. Mapa de procesos de la fábrica modelo.

b) *Capacitación específica.* Como parte del convenio académico entre la Universidad Javeriana y SAP Andina y del Caribe, se obtuvo acceso a capacitación específica en SAP R/3 en los siguientes temas:

- BPI I (*Business Process Integration I*). En este curso se analizaron los procesos financieros, de abastecimiento y de ventas.
- BPI II (*Business Process Integration II*). En este curso se analizaron los procesos de costeo y planeación y control de producción

Plano empresarial

En esta etapa se identifican los procesos y reglas de negocio que se van a configurar en SAP R/3, los que corresponden a los diseñados y explicados en el punto 3. Más adelante se especifican los procesos incluidos en el plano empresarial y su módulo correspondiente en el sistema (figura 11).

Realización

En esta etapa se configuró el sistema con base en los procesos definidos, y se prepararon y ejecutaron los casos de prueba funcionales para verificar que los procesos se ejecuten de acuerdo con el plano empresarial. Específicamente, se llevaron a cabo los siguientes pasos:

a) Creación del mandante para el proyecto

Para el proyecto se creó un mandante, que es el ambiente en el que se configuraron los procesos de la fábrica modelo. La información del mandante creado se especifica a continuación:

Versión:	4.7 Enterprise
Mandante:	402
Servidor:	10.6.7.11

b) Configuración del sistema

Se configuraron la estructura organizacional, datos maestros y reglas de negocio de cada uno de los módulos de SAP R/3 que intervienen en la implementación. Para esto se tomaron como guía los manuales de los cursos de BPI (Rushmore Group, 2004) mencionados anteriormente.

A continuación se describen estos módulos y los tipos de datos configurados:

- *Módulo Finanzas (FI)*. En este módulo se ejecutan todas las transacciones financieras. Además, es el punto de partida de cualquier implantación de SAP R/3, ya que en éste se configura la estructura contable de las transacciones de los procesos de negocio implantados. Seguidamente se especifican los aspectos configurados (cuadro 1).

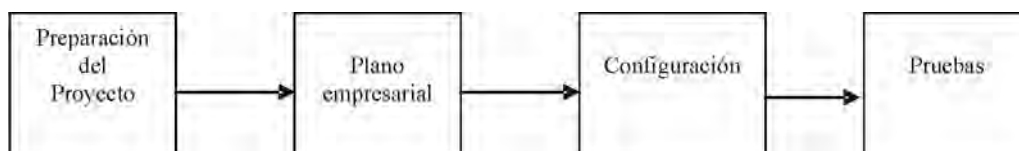


Figura 10. Proceso seguido para la implantación de SAP R/3 en la fábrica modelo.

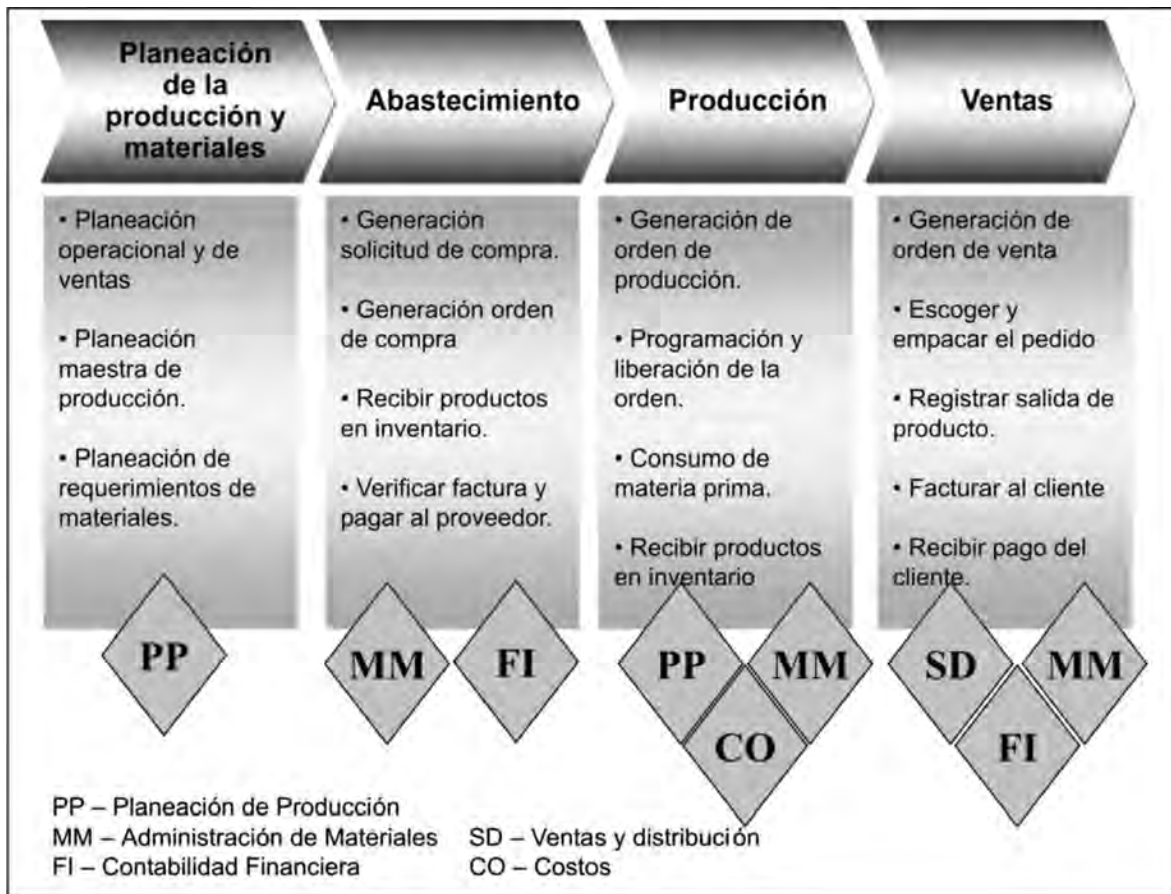


Figura 11. Procesos configurados en SAP R/3 y los módulos involucrados.

Cuadro 1
 Datos y reglas configuradas en el módulo FI de SAP R/3

Datos organizacionales	Reglas de negocio	Datos maestros
Mandante	Períodos contables abiertos y cerrados	Cuentas contables
Grupo empresarial	Asignación del período contable al código de compañía	
Plan de cuentas		
Sociedad FI	Creación de grupos de tolerancia para contabilización	
Área de control de crédito		
Grupos de cuentas	Configuración del programa de pagos	
Variante de estado de campos	Creación de grupos de tolerancia para CxC y CxP.	
Variante año fiscal		
Versión de impuestos	Creación de números de documento (FI)	

- *Módulo Administración de Materiales (MM).* En el módulo de MM se ejecutan los procesos de abastecimiento y administración de inventarios. En el cuadro 2 se especifican los aspectos configurados.

Cuadro 2

Datos y reglas configuradas en el módulo MM de SAP R/3

Datos organizacionales	Reglas de negocio	Datos maestros
Centro	Valores por defecto para la reserva de inventarios	Maestro de proveedores
Nivel de valoración	Límites de tolerancia para compras	Maestro de materiales
Almacenes	Límites de tolerancia para recibo de mercancía	
Organización de compras	Límites de tolerancia para recibo de facturas	
Grupos de compras	Control de valoración	
	Configuración de la contabilización automática para el movimiento de inventarios	
	Configuración de la contabilización automática para impuestos	
	Configuración de parámetros para verificación de facturas	

- *Módulo de Ventas y Distribución (SD)*. En el módulo de SD se ejecuta todo el proceso de ventas. En el siguiente cuadro se especifican los aspectos configurados (cuadro 3).

Cuadro 3

Datos y reglas configuradas en el módulo SD de SAP R/3

Datos organizacionales	Reglas de negocio	Datos maestros
Organización de ventas	Definición de valores por defecto para reserva de inventarios	Maestro de clientes
Canales de distribución		Precios de los artículos
Sectores (división)	Definición de las reglas de disponibilidad de inventarios para la orden de venta	
Áreas de ventas		

- *Módulo de Costos (CO)*. En el módulo de CO se ejecutan los procesos de costeo de los productos. A continuación se especifican los aspectos configurados (cuadro 4).

Cuadro 4

Datos y reglas configuradas en el módulo CO de SAP R/3

Datos organizacionales	Reglas de negocio	Datos maestros
Área de costos	Definir la jerarquía de los centros de costos	Crear los elementos primarios de costos
	Definir los rangos de números para <i>Controlling</i>	Crear los elementos secundarios de costos
	Rangos de número para documentos	Crear los grupos de elementos de costos
	Establecer CO rangos de documentos	Crear factor para distribución de

- *Módulo de Producción (PP)*. En el módulo de producción se ejecutan todos los procesos de planeación, programación y control de producción. Los aspectos configurados aparecen en el cuadro 5.

Cuadro 5

Datos y reglas configuradas en el módulo PP de SAP R/3

Datos organizacionales	Reglas de negocio	Datos maestros
Planta de producción	Parámetros de planta	
	Creación perfil de programador de producción	Listas de materiales
	Creación del programador de producción	Centros de trabajo
	Parámetros de control para MRP	Rutas de producción
	Asignar la regla de chequeo de disponibilidad para el tipo de orden	
	Definir parámetros de programación	
	Definir parámetros de control para el tipo de orden	
	Crear parámetros de confirmación	
	Definir método de costeo para los productos terminados.	

c) Pruebas de la configuración

Se crearon unos casos de prueba, mediante los cuales se probó que el sistema funciona de acuerdo con lo establecido. Para su ejecución se tomaron como referencia los casos especificados en los manuales proporcionados en los cursos de BPI (The Rushmore Group, LLC, 2004). Una vez que se verificó el funcionamiento de cada uno de los procesos de acuerdo con lo especificado en los casos, se aprobaron y liberaron los procesos y sus módulos asociados.

INTEGRACIÓN DEL SISTEMA ERP CON EL SISTEMA CIM

Después de configurar SAP para soportar los procesos de la fábrica modelo, se procedió a realizar la integración de los dos sistemas, para lo cual se siguieron estos pasos:

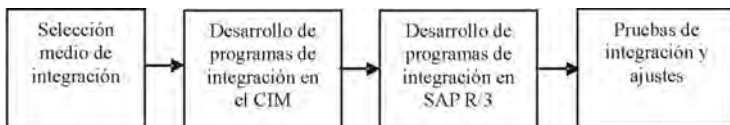


Figura 12. Proceso seguido para la integración de SAP R/3 con el CIM.

Selección del medio de integración

Para la integración de estos dos sistemas se seleccionó una base de datos de Microsoft Access® que realiza las funciones de un servidor de capa media o entre los sistemas finales, que son las tablas de base de datos con las que interactúan el CIM y el sistema de archivos, de los cuales lee y a los cuales escribe la información intercambiada con SAP R/3, haciendo uso de archivos de texto plano. Este desarrollo dentro de Access evita tener que desarrollar un componente intermedio, que sea una pieza más para articular dentro de la solución, y que agregue complejidad al sistema.

El desarrollo de la base de datos en Access está compuesto por macros y formularios que permiten intercambiar la información entre estos dos sistemas. En la figura 13 se encuentran los componentes de la base de datos desarrollada y la interacción entre los componentes.

Configuración de la integración en el CIM

Para operar de manera integrada el sistema de información se trabajó en dos aspectos: uno para la integración

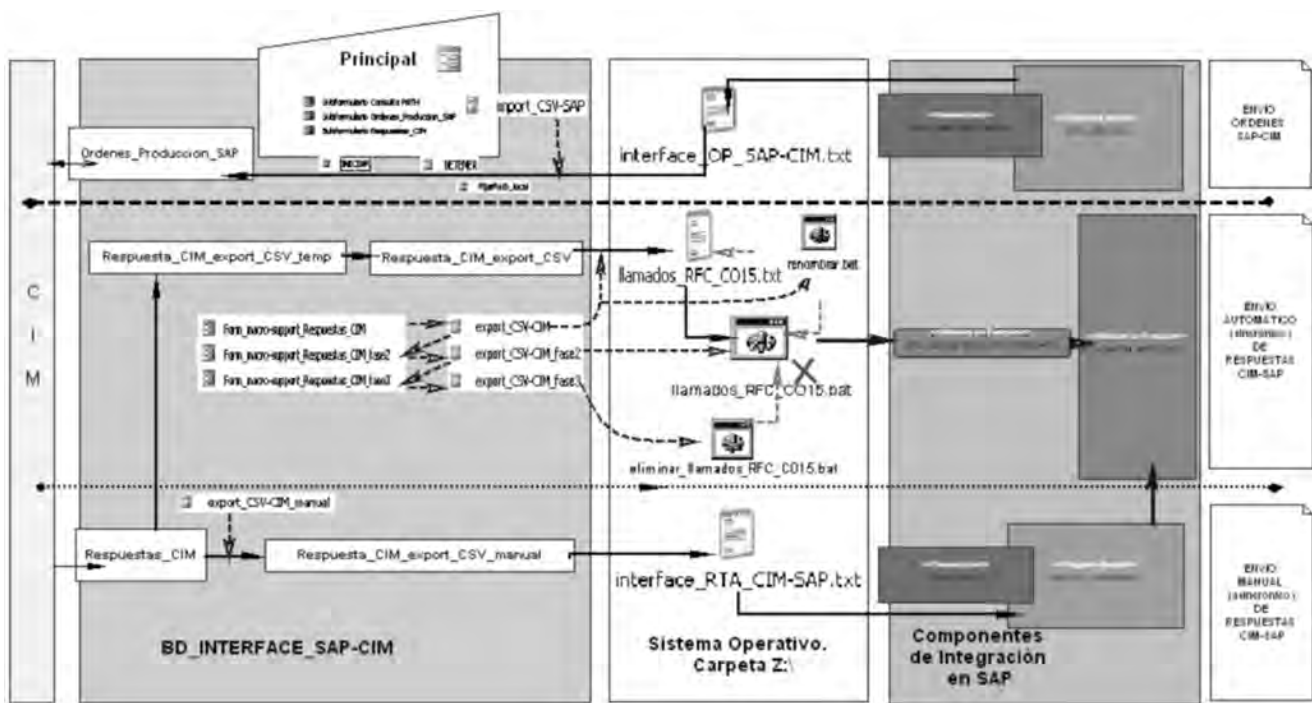


Figura 13. Componentes de la base de datos desarrollada e interacción entre los componentes.

y otro para la producción de los productos. Dentro del aspecto de integración se crearon *planes de proceso*, cuyas funciones son las siguientes:

- Leer la información de las órdenes de producción proveniente de la base de datos. Su función principal es leer los datos básicos de las órdenes de producción que se generan en SAP R/3 y que se almacenan en la base de datos, de manera que el CIM empiece la producción de los órdenes de los productos programados para determinadas fecha y hora.
- Enviar respuesta a la base de datos por cada orden de producción ejecutada en el CIM sobre la cantidad producida, y la hora y fecha de inicio y hora y fecha de terminación reales. Esta información es posteriormente leída por SAP R/3 para su correspondiente actualización.

Configuración de los programas de integración en SAP R/3

Para la integración de SAP con el CIM se procedió a desarrollar en SAP R/3 dos programas que para la ejecución del usuario requieren dos transacciones que se especifican a continuación:

a) Transacción ZPUJ_DWN_SAP_CIM_OP

Esta transacción ejecuta el programa denominado ZPUJ_DWN_CSV, que realiza el envío de órdenes de producción programadas en SAP R/3 para su correspondiente ejecución en el CIM. Esta información se envía hacia un archivo plano que se administra en la base de datos desarrollada para la interfaz.

b) Transacción ZPUJ_CO15

Esta transacción ejecuta el programa tipo Report ZPUJ_UPL_RESPONSE, que permite la carga de respuestas del CIM en SAP R/3 mediante *Batch-Input* sobre la transacción CO15 en SAP R/3, que es donde se confirma la terminación de las órdenes de producción en SAP R/3. A través de este programa se leen las respuestas producidas por el CIM sobre las órdenes de producción ejecutadas para su correspondiente actualización en SAP R/3.

Pruebas de la integración de los dos sistemas

Para las pruebas de integración entre estos dos sistemas se procedió a determinar unos casos de prueba que se subdividen en los dos procesos básicos de la integración, envío de las órdenes de producción y confirmación de la terminación de las órdenes, y pruebas generales. A continuación se especifican los detalles de cada prueba, los que se consiguieron después de realizar ajustes en la base de datos, y los programas desarrollados en el CIM y en SAP R/3.

a) Envío de órdenes de producción

A través de estas pruebas se verificó el proceso de envío de órdenes de producción programadas en SAP R/3 y su correspondiente ejecución en el CIM, que se debe realizar de acuerdo con los parámetros establecidos por la información de la orden.

b) Confirmación de las órdenes de producción

Por medio de estas pruebas se verificó que los resultados de la ejecución de la producción en el CIM estuvieran correctamente en la base de datos y el correspondiente proceso de cargue de esta información en SAP R/3, para obtener información de las cantidades producidas para la actualización de inventarios.

c) Pruebas generales

Una vez que se realizaron los ajustes correspondientes para obtener una ejecución correcta de las pruebas del proceso, se generaron casos de prueba para verificar el funcionamiento de los programas desde otros computadores (clientes), mandantes y con otros usuarios.

RESULTADOS OBTENIDOS

Con el desarrollo de cada uno de los objetivos del proyecto se obtuvo una empresa modelo, donde se encuentran completamente integrados los procesos de la cadena de valor con la ejecución de la producción a través de la integración de las tecnologías de automatización CIM y las de soporte e integración de procesos, como el sistema ERP de SAP.

Los resultados específicos obtenidos son los que se detallan a continuación:

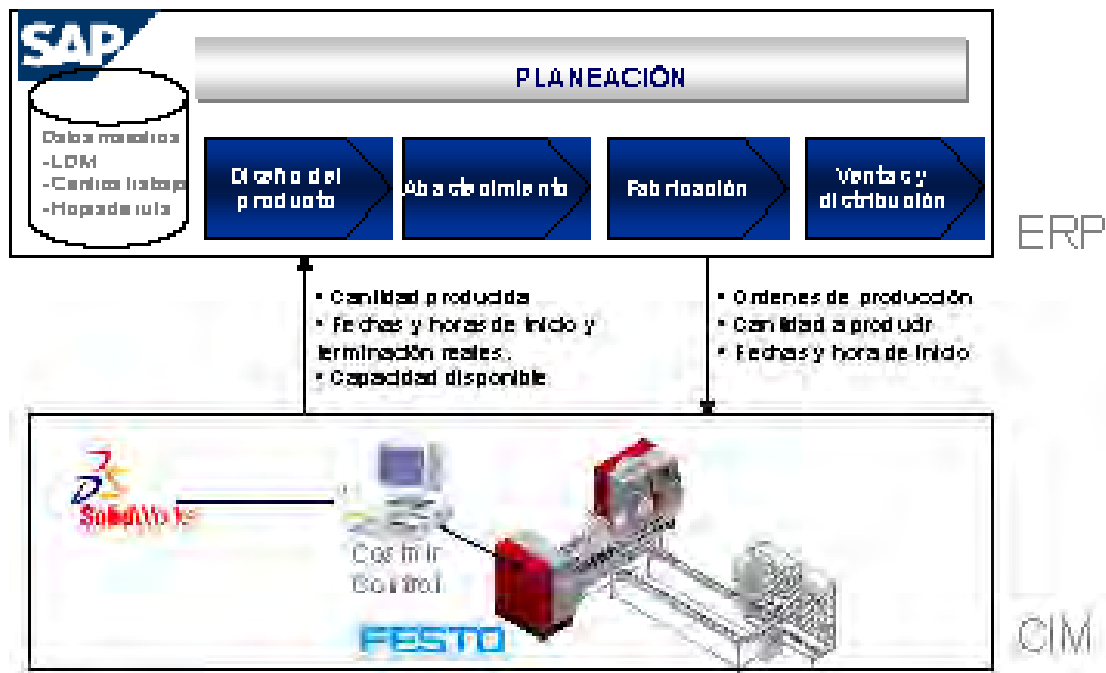


Figura 14. Integración lograda entre el sistema ERP SAP R/3 y el CIM.

- Una fábrica modelo con unos productos diseñados para su respectiva fabricación en el sistema integrado de manufactura CIM.
- La implantación del sistema ERP de SAP (SAP R/3) para soportar los procesos de la cadena de valor de la fábrica modelo.
- La integración del sistema ERP de SAP con el sistema integrado de manufactura CIM. Con respecto a este último punto, se integraron las siguientes actividades:
 - Proceso de programación y generación de las órdenes de producción en SAP R/3, con su ejecución en el CIM.
 - El reporte de tiempos utilizados y de cantidades de producto terminadas por orden de producción del CIM hacia el control de manufactura de SAP R/3.
 - El proceso de planeación de producción, capacidad y requerimientos de materiales.

En la figura 14 se especifica la integración lograda a través de este proyecto. Se pasó entonces de tener dos sistemas sin ninguna integración a tener una fábrica modelo, con productos y procesos cuya ejecución se encuentra totalmente automatizada a través de la tecnología de los sistemas ERP y CIM.

REPERCUSIONES DEL PROYECTO Y DESARROLLOS POSTERIORES

Los resultados del proyecto, conseguidos a través de las actividades mencionadas anteriormente, permitieron los siguientes desarrollos en los ámbitos académico e investigativo.

- Implementación del curso denominado “Integración de procesos con tecnología informática”, que actualmente es una asignatura de énfasis del Programa de Ingeniería Industrial de la Universidad Javeriana que se ha venido dictando desde el 2005.
- Diseño de las prácticas y material de soporte para la asignatura de la Especialización en Ingeniería de Operaciones y Servicios de la Facultad de Ingeniería, denominada “Taller de planeación de recursos mediante ERP”.

Así mismo, se planea llevar a cabo el máximo número de talleres a través de equipos de trabajo correspondientes a las áreas funcionales de una organización, simular los procesos de diseño de producto, planeación operacional y de ventas, abastecimiento, producción, compras, ventas y distribución en la fábrica modelo. Por otro lado, se encuentra en desarrollo una investigación sobre el diseño de una metodología de mejoramiento de procesos para las empresas medianas, con miras a usarlas antes de la implantación de un sistema ERP.

En ésta se tiene planeado utilizar la fábrica modelo para determinar la aplicabilidad de estas tecnologías en empresas pequeñas y medianas en Colombia.

CONCLUSIONES

- La integración de los sistemas ERP con los sistemas de ejecución de producción automatizados provee una plataforma tecnológica donde se puede ejercer un mejor control e integración entre la planeación, programación y ejecución de las actividades de producción, así como facilitar la obtención de indicadores de producción que sirven para el análisis y mejoramiento continuo de las operaciones.
- Para la integración de sistemas ERP y sistemas de ejecución de producción automatizados se debe partir de identificar los procesos (ciclos de negocio) que van a integrarse para luego identificar los datos que deben pasar de un sistema a otro. Es de vital importancia definir unos indicadores de mejoramiento de procesos que se deben medir después de la integración.
- Los cursos en ambientes donde los estudiantes pueden simular y ejecutar los procesos organizacionales de abastecimiento, ventas, planeación y ejecución de producción en una fábrica modelo con sistemas ERP y CIM integrados, contribuyen al aprendizaje y asimilación de los conceptos dado su sentido práctico. Los estudiantes se motivan al ver la materialización de sus decisiones en los sistemas de información y en los resultados de la producción.
- Para la implantación de SAP R/3 en una fábrica modelo, es crítico tener una adecuada capacitación del personal involucrado en la estructura y requerimientos del sistema en cuanto a datos y reglas de

negocio que es necesario configurar para que el sistema soporte los procesos diseñados. Mediante las pruebas se debe garantizar que el sistema funcione de acuerdo con los requerimientos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Baumgartner, H.; Knischewski, K. & Wieding, H. (1991). *CIM: Consideraciones básicas*. Barcelona: Siemens.
- Brady, J.; Monk, E. & Wagner, B. (2001). *Concepts in ERP*. Thomson Learning.
- Colciencias. Plan Estratégico del Programa Nacional de Desarrollo Tecnológico Industrial y de Calidad 2000 - 2010. (2000). Documento en mimeo. Bogotá. Mayo.
- The Rushmore Group, LLC (2004). *Business Process Integration I. Manual para el estudiante*.
- The Rushmore Group, LLC (2004). *Business Process Integration II. Manual para el estudiante*.
- Festo. iCIM Overview, en www.festo.com/didactic.
- Galvis, Lina; Pérez, María & Córdoba, Nazly (2004). Diseño de una fábrica modelo que permita la integración de los sistemas ERP de SAP R/3 y CIM en el Centro Tecnológico de Automatización Industrial. Trabajo de grado. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.
- Keller, G. & Teuffel, T. (1998). *SAP R/3 Process Oriented Implementation*. Addison-Wesley.
- Knolmayer, G.; Mertens, P. & Zeier, A. (2002). *Supply Chain Management Based on SAP Systems*. Springer.
- González, S. (1998). Planificación de recursos de la empresa (ERP): ¿un nuevo modelo de gestión asistido por ordenador?, en *Alta Dirección*, N° 201. Sep-Oct, p. 83.
- Manual de operación de Cosimir@Control. Alemania: Institute of Robotics Research.
- Pontificia Universidad Javeriana (2002). Facultad de Ingeniería. Centro Tecnológico de la Facultad de Ingeniería. Documento de trabajo.
- Porter, Michael (1985). How information gives you competitive advantage, en *Harvard Business Review*, p. 33.
- Ragowsky, A. & Stern, M. (1997). The Benefits of IS for CIM applications: a survey, en *Journal Computer Integrated Manufacturing*, vol. 10, N°s 1-4, pp. 245-255.
- SAP Exchange Infrastructure, en <http://help.sap.com>.
- SAP Implementation Guide, en <http://help.sap.com>.
- Supply Chain Council (2004). SCOR Model version 6.1. Pittsburgh.

Cadenas productivas para el aprovechamiento de residuos sólidos. Incorporación de los recuperadores a la solución

LUZ ANGÉLICA RODRÍGUEZ BELLO

Ingeniera industrial, M.Sc. en Gestión y Políticas Ambientales del IIIEE de la Universidad de Lund (Suecia). Especialista en Informática Industrial y en Aseguramiento de la Calidad. Docente en pregrado y posgrado y directora del Centro de Estudios en Sistemas de Gestión de la Escuela Colombiana de Ingeniería. Experiencia en la implementación de sistemas de gestión de calidad y gestión ambiental, con énfasis en desarrollo sostenible. larodrig@escuelaing.edu.co.

Artículo recibido: 10/03/2006
Evaluación par interno: 09/11/2007
Aprobado: 04/12/2007

Resumen

Los residuos sólidos se pueden aprovechar en cadenas productivas que permitan su procesamiento para ser utilizarlos nuevamente como materias primas de otros procesos industriales. Las ventajas de generar un sistema de gestión integral de residuos, como se propone en este documento, son: 1) Reducción del 50 al 70% de los residuos que van al relleno sanitario de Doña Juana. 2) Disminución del costo de recolección de basuras en proporción igual al reciclaje. 3) Generación de empleo. 4) Reducción de problemas ambientales. 5) Incorporación de los recuperadores al sistema, permitiendo elevar su calidad de vida. 6) Incentivo constante a reciclar por parte de todos los generadores. 7) Disposición adecuada de los residuos peligrosos. 8) Separación en la fuente, la cual incrementa la tasa de reciclaje. 9) Distribución de ingresos y, en general, el beneficio para todas las partes interesadas. Esta propuesta se puede replicar con el propósito de lograr dichos beneficios en las comunidades donde se implemente.

Palabras claves: residuos sólidos, reciclaje, aprovechamiento de residuos, cadenas productivas, gestión ambiental, desarrollo sostenible.

Abstract

Solid wastes can be used in productive chains, which let to process it, for using again as raw materials in others industrial processes. Integral waste management system advantages, as it is proposed in this document, are: 1) Wastes reduction between 50-70%, avoiding it goes the Doña Juana landfill. 2) Reduction cost of waste recollection, in the same quantity as it is recycled. 3) Generate employment. 4) Reduction of the environmental problems. 5) Participation of the recycler people in the system, allowing increase their life style. 6) Permanent incentive to recycle. 7) Proper disposition of dangerous wastes. 8) Source separation, which increase the recycled rate. 9) Income distribution and benefit for all stakeholders. This proposal can be replicated in order to get benefits in all communities where it be implemented.

Keywords: solid wastes, recycled, productive chairis, environmental management, development.

INTRODUCCIÓN

Las 5.860 toneladas de residuos sólidos que se depositan diariamente en el relleno sanitario de Doña Juana, provenientes de Bogotá (5.500 t/día) y de los 20 municipios cercanos (360 t/día), podrían generar beneficios y no sólo problemas, como sucede en la actualidad. La necesidad de reducir la cantidad de residuos es apremiante por varias razones: 1) Doña Juana, después de funcionar por 17 años, tiene sólo dos años más de capacidad. 2) Las 482 hectáreas que tiene el relleno no se ampliarán según declaraciones del alcalde mayor de Bogotá. 3) El relleno está generando problemas de malos olores, proliferación de insectos, especialmente moscas y roedores en los barrios aledaños, como Mochuelo Alto, Mochuelo Bajo y La Aurora. 4) Está ocasionando enfermedades de la piel y respiratorias. 5) Los lixiviados están afectando las aguas subterráneas y las corrientes de aguas superficiales con el río Tunjuelo.

La opción propuesta por la Alcaldía y la Unidad Ejecutiva de Servicios Públicos (UESP) es la creación de plantas de reciclaje y el inicio de una campaña de educación a la comunidad sobre los efectos que trae la mala disposición. Esta propuesta suena muy bien. Los inconvenientes surgen en la forma como se conciben y como se van a implementar las plantas de reciclaje. Dicha propuesta afecta a todos los actores o partes involucradas en el sistema de gestión de residuos, sobre todo a los recuperadores y a sus familias, que son quienes rescatan algunos materiales para llevarlos a bodegas de reciclaje, antes de ingresar la basura al relleno sanitario. El camino entre lo actual y lo propuesto genera situaciones nuevas y preguntas como: 1) ¿Qué pasará con estas familias de recuperadores? 2) ¿Cuál es el ingreso y el nivel educativo de estas familias? 3) Las propuestas concentrarán el ingreso o permitirán la distribución del mismo? 4) ¿Qué materiales son los que se recogen? 5) ¿Cuáles son las condiciones de recolección de los residuos para su aprovechamiento? 6) ¿Qué cadenas productivas se podrían trabajar? 7) ¿Qué está sucediendo con los residuos peligrosos? 8) ¿Cómo afectará la legislación existente a los recuperadores y a los diferentes actores? 9) ¿Cuál será la reacción de los ciudadanos ante el cobro del servicio de recolección de basuras por peso a partir de enero de 2007? 10) ¿Qué alternativas se pueden proponer y cuáles de ellas se han implementado con buenos resultados en otros países? Basados en un estudio realizado con un

grupo de recuperadores de la localidad de Suba, ésta es la situación que se vislumbra y en contraposición se presentan opciones, sus ventajas y análisis en relación con lo propuesto inicialmente.

LOS RECUPERADORES

Mientras en algunas localidades de Bogotá son habitantes de la calle quienes se dedican a la labor de recuperación, en Suba son familias enteras las que buscan su sustento diario a través de dicha actividad. Los recuperadores –o recicladores, como comúnmente se les llama– están agrupados en varias asociaciones, tales como Asociación de Recuperadores de Suba (ARS), Remec, Carbonera, Corsuba, Asofrain. Ellos buscan cambiar su figura jurídica por la de cooperativa para ser reconocidos como institución de carácter gremial y así poder participar activamente en el Plan de Gestión Integral de Residuos.

Suba es una de las 20 localidades más pobladas de Bogotá. Cuenta actualmente con 846.655 habitantes, que corresponden al 10% de toda la población de la ciudad; aunque allí vive gente de todos los estratos, los que más predominan son el 2 y el 3. Tiene 1.765 barrios. La mayoría de las cooperativas de recicladores viven en Suba y recuperan el material en los barrios de estratos más altos de la misma localidad o en Usaquén. Los miembros de la ARS viven en el barrio Santa Cecilia, donde se entrevistó a 33 familias y se obtuvieron los siguientes datos: en promedio por familia hay 2,9 niños y 1,5 adultos, cuyas edades oscilan entre 7 y 32 años, respectivamente. Esto permite concluir que el 65% de la población que depende de la recuperación de residuos sólidos son niños (tabla 1 y figura 1).

Tabla 1

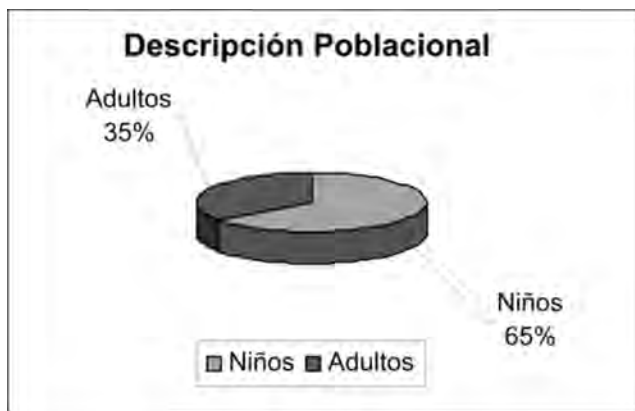
Población dedicada a la recuperación de residuos sólidos

Aspecto	Niños	Adultos
Cantidad de habitantes	94	51
Promedio por familia	2,9	1,5
Edad promedio	7,0	32,7

Fuente: Encuesta Asociación de Recuperadores de Suba.

Una semana normal para cada una de estas familias transcurre así: salen a realizar la labor de recuperación durante tres o cuatro días, ya que previamente se han

organizado para cubrir una ruta determinada y llegar a un barrio de estrato 5 o 6 a realizar la recuperación dentro de las canecas de conjuntos residenciales, antes de que pase el carro recolector de basuras. Quienes están más organizados ya han suscrito convenios con los administradores de los conjuntos residenciales para reciclar en los cuartos de depósito de basuras y dejarlos limpios.



Fuente: Encuesta Asociación de Recuperadores de Suba.

Figura 1. Distribución de la población de recuperadores.

El desplazamiento desde el barrio Santa Cecilia hasta el lugar de recuperación puede tomar más de cuatro horas. Salen a la 1:00 p.m. y llegan antes que empiece la hora de pico y placa, aprovechando que en este horario les está permitido transitar. El traslado lo hacen usando una carroza de tracción animal llamada “zorra” y luego se dedican al proceso de recuperación, que consiste en seleccionar el material que van a recobrar; dicha actividad se puede extender hasta las 10:00 p.m., hora en la cual retornan a sus hogares. La clasificación del material recolectado se realiza al día siguiente, o los días en que no salen a hacer el recorrido; en otras ocasiones lo hace el miembro de la familia que permanece en casa. Para dicha labor de clasificación y almacenamiento, cada familia ha acondicionado un espacio cercano a sus viviendas o lo acopian en el primer piso de sus casas.

INGRESO Y EDUCACIÓN

Hasta tres familias viven en una sola vivienda. Cada familia dispone de dos habitaciones: una la usan como

dormitorio, tanto para los adultos como para los niños, y la otra para cocinar, comer y guardar los alimentos. Generalmente, los cuartos están ubicados en la segunda planta de la vivienda y la planta baja se dispone como bodega de los materiales recuperados.

El ingreso mensual que obtienen las familias que se dedican a la recuperación de residuos es de \$259.188,7, lo que significa que obtienen \$58.901,6 por persona/mes (tabla 2).

Tabla 2
Distribución del ingreso de la población de recuperadores

Aspecto	Valores (pesos colombianos)	Valores (dólares)*
Personas por familia	4,4	4,4
Ingreso mensual promedio por familia	\$259.166,7	US\$103,7
Ingreso mensual per cápita	\$58.901,6	US\$23,6

Fuente: Encuesta Asociación de Recuperadores de Suba.

* Tasa de cambio \$2.500.

Mirando el ingreso de estas familias de recuperadores, podemos decir que están bajo el límite de la línea de pobreza. Este indicador en la versión 1998 se ubicó en \$257.009 y el de indigencia fue de \$99.145 mensuales; en la versión del 2005, con los nuevos indicadores dados por la Presidencia de la Republica, el límite es de \$208.889 mensuales para la línea de pobreza, y la de indigencia es de \$97.248. Al confrontar esta situación con los indicadores internacionales del Banco Mundial, podemos concluir que toda esta población vive con menos de un dólar diario por persona (US\$1 día), por lo cual están muy por debajo de los dos dólares diarios por persona (US\$2/día persona), estipulado por el Banco Mundial como línea de pobreza para Latinoamérica.

En cuanto al nivel educativo, la población de los recuperadores en un 60% está cursando algún grado de nivel de básica primaria, sólo el 6% está cursando algún grado de secundaria y ninguno de ellos ha realizado estudios superiores a nivel técnico, tecnológico o profesional. Los recuperadores reúnen tres generaciones, es decir, trabajan los abuelos, quienes enseñaron el oficio a sus hijos, y ahora son ellos quienes les enseñan a sus nietos esta forma de sustento. Según el estudio del Banco Mundial titulado “Reducción de la pobreza y crecimiento: círculos virtuosos y círculos viciosos”, la

probabilidad de que el hijo de padres con sólo educación primaria llegue a la universidad es de 10,5% y de que termine el bachillerato es de apenas 14%. “Estos resultados muestran un círculo vicioso en el que están atrapados los pobres con baja educación”, por lo que podemos vislumbrar que las próximas generaciones seguirán realizando dicha labor en iguales condiciones, a menos que se intervenga dicho proceso.

Sin embargo, con el propósito de organizarse como cooperativa han tomado cursos de cooperativismo, manejo y recuperación de residuos por más de un año y medio, manifestando muchas veces “que somos nosotros quienes más conocen sobre el tema, aun más de quienes los han acompañado en el proceso de capacitación” (ARS, 2006), lo cual es cierto en gran parte.

Los recuperadores argumentan que si entran en funcionamiento las plantas de reciclaje contempladas por la Unidad Ejecutiva de Servicios Públicos (UESP) no se les garantiza que sigan en el mercado. Ellos manifiestan que “antes nadie reciclaba y como ahora dicen que esto es una mina de oro sin explotar, quieren acaparar todo” (ARS, 2006). Los recuperadores quedaran por fuera, el ingreso se centralizará en los ganadores de las licitaciones y así la falta de descentralización continuará aumentando la brecha entre ricos y pobres. De este modo el bienestar social no se verá representado ante la forma inequitativa de distribuir los ingresos por estar

favoreciendo la eficiencia económica de unos pocos (Arrow, 1963).

MATERIALES RECUPERADOS

Los materiales recuperados son aquellos que tienen mercado en los centros de acopio y en las cadenas productivas. Estos materiales son papel, vidrio, plástico, metales, caucho. En la tabla 3 está el listado de materiales recuperados en un día de trabajo de cuatro personas en una ruta a conjuntos residenciales estrato 5.

Tabla 3
Materiales recuperados en un día de trabajo por cuatro personas

Materiales recuperados	Volumen/Diario (kg)
Papel	48
Cartón	33
Vidrio botella transparente	42
Vidrio botella ocre	39
Vidrio botella verde	32
Plástico botella de gaseosa	72
Bolsas de papas, chitos	30
Plásticos en general (juguetes, frascos)	55
Metales ferrosos (<i>Cold rolled</i> , acero)	40
Metales no ferrosos (aluminio)	40
Caucho	30
Orgánicos	19
Total	480

Fuente: Expedición por los residuos, Ruta Río Molino.

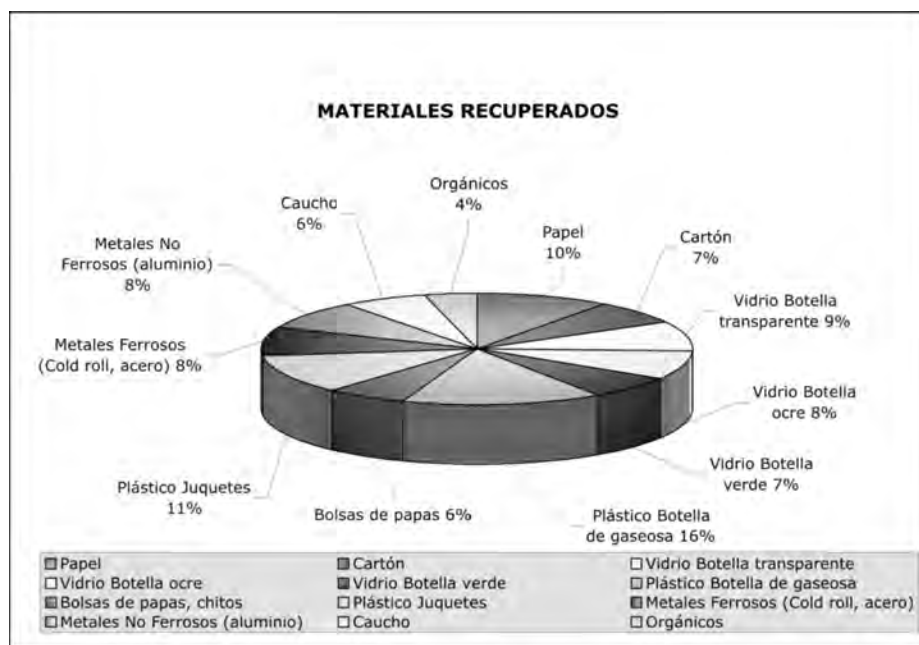


Figura 2. Materiales recuperados en un día de trabajo por cuatro personas.

Fuente: Expedición por los residuos, Ruta Río Molino.

En la figura 2 se muestra la participación de los diferentes materiales: el 24% corresponde a vidrio tanto transparente como de color, 16% de lo que se recoge es PET representado en botellas de gaseosa, el 11% plástico en general, 10% papel, 8% metales, 8% aluminio, 7% cartón, 6% caucho y 4% orgánicos.

CONDICIONES PARA EL ABANDONO DE MATERIALES

Muchos materiales no se recuperan, se dejan abandonados por diferentes circunstancias; esto sucede cuando el material está demasiado sucio, los recipientes contienen residuos de pintura, líquidos grasos o compuestos químicos, los materiales se encontraban rotos o demasiado deteriorados; otros se dejan porque no tienen un valor representativo para el recuperador o porque tienen demanda en los centros de acopio; esto no significa que no se puedan aprovechar sino que se desconoce cómo hacerlo. La cantidad de material abandonado se muestra en la tabla 4.

Tabla 4
Materiales abandonados en un día de trabajo por cuatro personas

Materiales abandonados	Volumen/Diario (kg/día por ruta)
Papel	12
Cartón	6
Vidrio botella transparente	19
Vidrio botella ocre	19
Vidrio botella verde	29
Plástico botella de gaseosa	30
Bolsas de papas, chitos	29
Plásticos en general (juguetes, frascos)	30
Metales Ferrosos (<i>Cold roll</i> , acero)	27
Metales no ferrosos (aluminio)	29
Caucho	27
Orgánicos	34
Total	326

Fuente: Expedición por los residuos, Ruta Río Molino.

Los materiales abandonados constituyen 326 kilogramos, que representan un 40% de materiales que se hubiesen podido recuperar; éste es un porcentaje muy alto si se considera que irán a relleno sanitario, ya no se recuperarán y a la vez representan una posibilidad de aumento del ingreso de los recuperadores en igual porcentaje al material abandonado.

Muchos materiales recuperables son abandonados, su participación en porcentaje es la siguiente: 21% corresponde a vidrio, 11% a icopor, 9% a paquetes de pasabocas –como papas, chitos–, 9% a plásticos, 9% a aluminio, 8% a metales ferrosos y otros materiales en porcentaje menor, correspondiente a orgánicos, caucho, papel y cartón. Dichos porcentajes se pueden apreciar más adelante con mayor detalle (figura 3).

CADENAS PRODUCTIVAS DE LOS MATERIALES RECUPERADOS

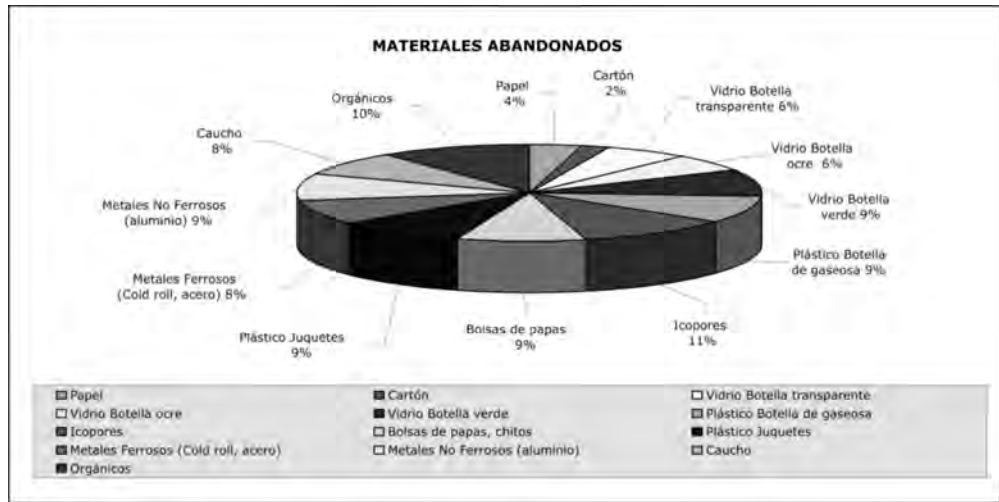
La demanda del mercado de dichos materiales es la que hace que éstos sean recuperados y clasificados por los recuperadores. Los precios que pagan por ellos dependen de la instancia de la cadena productiva a la que se vendan: si es a un intermediario, éste pagará un menor valor; si es al usuario final, éste pagará más. Otro factor que afecta el precio es el nivel de procesamiento que tenga el material: mientras más proceso se les realice (selección, compactación, lavado), éstos cobrarán mayor valor.

La cadena productiva actual está compuesta por las siguientes etapas: 1) Selección en la fuente por el recuperador y posterior clasificación. 2) Almacenamiento y comercialización en centro de acopio. 3) Procesamiento primario. 4) Transformación industrial. Entre cada una de estas etapas se presenta la necesidad de transporte de una a otra instalación.

El recuperador es quien dedica el mayor tiempo de trabajo en toda la cadena de transformación, pero muchas veces es quien recibe menor valoración por su labor. Quienes obtienen la mayor ganancia son los intermediarios, que en la mayoría de casos son quienes tienen capacidad de negociación al por mayor y pueden esperar por el pago posterior hasta 30 días.

En la tabla 5 se muestran los precios de venta de los materiales por parte de los recuperadores a los centros de acopio y los precios a los que estos centros venden una vez que han realizado alguno o todos los procesos de selección, compactado, picado y lavado a los diferentes materiales. La variación entre el precio de venta del recuperador al centro de acopio y del precio de compra del material ya procesado por parte de las industrias puede ser más del 100%. Los materiales con mayor valor en el mercado son las baterías de carro, el cobre rojo, el cobre amarillo y el aluminio. Así mismo, los materiales que dejan mayor ganancia son el cobre

Figura 3. Materiales abandonados en un día de trabajo por cuatro personas.



Fuente: Expedición por los residuos, Ruta Río Molino.

rojo, después de dejarlo listo para fundición al retirar el plástico que lo recubre; las baterías de carro, que obtienen un gran valor por la posibilidad de recuperar el plomo, y el PET y el PVC, que luego de ser seleccionados, compactados y picados adquieren gran valor como insumo para producir fibra textil. Por volumen, el cartón y el papel blanco representan una buena ganancia, por lo cual también se tiene predilección para su recuperación, sin despreciar el volumen de plástico en general y vidrio, que igualmente generan ganancias.

Según el Plan de Manejo Integral de Residuos Sólidos, de las 5.112 toneladas que llegan diariamente a Doña Juana el 64% son orgánicos y el 36% inorgánicos, de los cuales el 18,7% son plásticos y cauchos y el 8,2% son papel y cartón (tabla 6). Esto demuestra que los residuos orgánicos no tienen demanda y que algunos residuos aprovechables, como los plásticos, cauchos, papel y cartón, no son recuperados probablemente por las causas ya mencionadas.

Tabla 5
Precios de compra y venta de los materiales recuperados a los centros de acopio

MATERIAL	UNIDADES	PRECIO DE COMPRA PROMEDIO EN EL CENTRO DE ACOPIO (Peso \$/kg)	PRECIO DE VENTA PROMEDIO EN EL CENTRO DE ACOPIO (Peso \$/kg)																				
			Papel	Cartón	Plástico Botella verde	Plástico Botella de gaseosa	Plástico Juguetes	Caucho	Orgánicos	Metales Ferrosos (Cold roll, acero)	Metales No Ferrosos (aluminio)	Bolsas de papas, chitos	Vidrio Botella transparente										

Fuente: Presidente de la Asociación de Recuperadores de Suba.

Tabla 6
Promedio histórico de residuos que ingresan a Doña Juana, desagregados por tipo de material

Tipo de material	% promedio	Número promedio (ton/mes)
Residuos totales		153.346,5
Materia orgánica	64,3	98.801,9
Plásticos y cauchos	18,7	28.495,9
Textiles	4,0	6.119,3
Papel y cartón	8,2	12.567,0
Metales	0,8	1.175,3
Vegetales putrescibles	0,0	0,0
Cuero	0,3	435,8
Minerales	0,1	132,0
Vidrio y cerámica	1,0	1.577,2
Ladrillo y cenizas	0,0	0,0
Huesos	0,3	437,3
Madera	0,6	932,7

Fuente: Plan de Manejo Integral de Residuos Sólidos (PMIRS), 2006.

El sector que produce mayor cantidad de residuos es el residencial con un 64%, seguido del sector de escombros con un 11% y de grandes productores con un 10% (tabla 7). El sector residencial y el de grandes productores son los sectores a los cuales se dedican las diferentes asociaciones de recuperadores, por lo que constituyen una gran oportunidad de disminuir las 115.684,60 ton/mes que van a Doña Juana.

Tabla 7
Promedio histórico de residuos que ingresan a Doña Juana, desagregados por tipo de origen

Origen de los residuos	Camiones / mes	Peso total (ton/mes)	%
Barrido	1.656	10.274,22	6,7
Desecho de origen desconocido	1.035	7.099,94	4,63
Escombros	1.942	17.266,82	11,26
Grandes productores	2.328	16.346,74	10,66
Hospitalarios	269	368,03	0,24
Corte de césped	129	812,74	0,53
Recolección domiciliaria	9.996	99.337,86	64,78
Residuos privados	330	996,75	0,65
Servicios especiales	79	843,41	0,55
Total	17.764	153.346,50	100

Fuente: Plan de Manejo Integral de Residuos Sólidos (PMIRS), 2006.

RESIDUOS O DESECHOS PELIGROSOS

Definitivamente, los grandes ausentes en la desagregación de materiales que llegan a Doña Juana y en el reporte de los materiales que recuperan o abandonan los

recuperadores son los residuos peligrosos, los cuales por sus características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables, infecciosas o radiactivas pueden causar riesgo o daño para la salud humana y el ambiente. Así mismo, se consideran residuos o desechos peligrosos los envases, empaques y embalajes que hayan estado en contacto con ellos (Decreto 4741).

Tal vez son ausentes porque están excesivamente mezclados para diferenciarlos o peligrosos por desconocimiento. Aunque la mayoría de los residuos peligrosos son industriales, como filtros de aceite, líquidos de frenos, componentes orgánicos volátiles, otros son de origen domésticos, como baterías para electrodomésticos, lámparas fluorescentes, envases de plaguicidas, pinturas y químicos en general. Estos residuos no se manipulan adecuadamente, por lo que causan problemas de salud pública a corto plazo y daños ambientales a largo plazo.

El Ministerio de Ambiente prohíbe disponer en los rellenos sanitarios residuos líquidos y tóxicos, y en el Decreto 4741 de 2005 lista los residuos peligrosos, así como las condiciones de prevención y manejo de los mismos. Según el Decreto 2676 de 2001, los residuos hospitalarios se deben llevar, en lo posible, a incineradores y no disponerse con los residuos domésticos, los cuales son los únicos reglamentados y prohibidos en rellenos sanitarios de manera explícita.

LEGISLACIÓN APREMIANTE

El manejo y disposición de residuos sólidos conlleva una serie de reglamentaciones y normalización. Hay leyes, decretos y resoluciones sobre políticas y planes de manejo integral de residuos, de reglamentación técnica y de instituciones prestadoras de servicio, así como regulación de aspectos ambientales.

Entre la legislación que afecta a los recuperadores o recicladores está la Ley 511 de 1999, que establece el día del reciclador, y el Decreto 2595 de 2000, que reglamenta la condecoración del reciclador. Por otra parte, la Ley 142 de 1994 describe el marco general para los servicios públicos domiciliarios, entre los cuales está el aseo. El Decreto 838 de 2005 y el Decreto 1505 de 2003 modifican el Decreto 1713 de 2002, según el cual “el aprovechamiento de la gestión integral de residuos sólidos debe ser el proceso mediante el cual los residuos sólidos recuperados se incorporan al ciclo económico y productivo en forma eficiente, por

medio de la reutilización, el reciclaje, la incineración con fines de generación de energía, compostaje o cualquier otra alternativa que genere beneficios sociales, económicos o ambientales". Y el aprovechamiento en el marco de servicios públicos domiciliarios de aseo son todas las actividades de recolección, transporte y separación para lograr el aprovechamiento de los residuos sólidos. Además, el Decreto 1505 modifica el artículo 81, el cual dice que cuando sea posible se debe incorporar a los recicladores en las actividades de aprovechamiento de los residuos sólidos una vez que se formulen, evalúen y entren en ejecución los planes de gestión integral de residuos sólidos (PGIRS). Esto deja abierta la posibilidad de exclusión, ya que está supeditado al análisis que hagan los prestadores del servicio de aseo.

Por otra parte, según el proyecto de acuerdo 084 de 2003 del Concejo de Bogotá, D.C., por el cual se reglamenta la circulación de vehículos de tracción animal por vías del Distrito, se estipula que las 10.000 "zorras" utilizadas para el reciclaje y acarreo de mercancías las deben conducir personas mayores de edad en un horario específico y en condiciones autorizadas, garantizando el estado adecuado de los animales. Estos aspectos llevaron a que la Ley 769 de 2002, por la cual se expidió el Código Nacional de Tránsito Terrestre, tocara el tema de los vehículos de tracción animal y se especificó que se determinarían las vías por las cuales no

podrán circular los vehículos de tracción animal, siempre y cuando las autoridades municipales y distritales en asocio con el Servicio Nacional de Aprendizaje (Sena), hayan promovido actividades alternativas y sustitutivas a este tipo de vehículos. Si llegan a prohibir su uso, sin dar alternativas, los recuperadores no tendrán medio de transporte, pero dicha medida puede generar la multiplicación de carretas de tracción humana, que tal vez es peor opción.

PAGO DE BASURAS DOMICILIARIAS POR PESO

El aforo o cobro por volumen se inició a multiusuarios según la Resolución 236 de 2002 de la CRA (Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico), pero no necesariamente porque los multiusuarios (conjuntos residenciales, edificios) generen menor cantidad de basura que los unifamiliares sino porque permitía ahorrar más, debido al menor número de paradas y el costo de transporte. Dicha medida ha disminuido la cantidad de residuos en multiusuarios en un 50%. El propósito ha sido generalizar el aforo, pues los pequeños generadores pagan por 1 m³ pese a que algunos no alcanzan a producir dicha cantidad, mientras que los grandes generadores sí pagan por aforo. Igualmente, mediante la Resolución 235 de 2002 de la CRA, se establecieron condiciones de prestación de servicio de aseo para la recolección y transporte de residuos hospitalarios por aforo.



Fotografías de la Expedición por los residuos, Ruta Río Molino.

1. Habitación de una familia de recuperadores.
2. Vivienda de recuperadores.
3. Recuperando materiales.
4. Desplazándose hacia la casa.
5. Clasificando el material recuperado.
6. Residuos peligrosos no discriminados.
7. Material para centros de acopio.

Al entrar en vigencia el cobro por volumen para usuarios unifamiliares en enero del próximo año, mediante el Decreto 353 de 2005 (y complementarios), se espera que brinde las mismas ventajas que se han generado en los multiusuarios. Por esto se ha propuesto que se haga aforo por tres meses seguidos de las basuras a cada usuario para determinar el valor que debe pagar. Dicha medida genera preguntas como: ¿el aforo realizado en un período fijo significa que se consideran las familias constantes y que no tienen o tendrán movilidad? ¿Cuál será el incentivo para que se recicle, si el aforo es anterior al reciclado? Y aun si fuese posterior, ¿cuál sería el incentivo para que los usuarios continuaran reduciendo el nivel de basuras, o esta medida lo que implica es un trabajo de medición continua que conlleva un alto costo administrativo?

Todo lo anterior genera otro cuestionamiento: ¿por qué no adoptamos sistemas que muestran grandes ventajas y se han implementado con éxito en otros países? Por ejemplo, en muchas naciones se usan bolsas plásticas con código de barras que están disponibles en varios tamaños, para que el usuario las compre de acuerdo con el volumen de residuos que produce. Los beneficios que garantiza son: 1) El usuario mide su volumen real y paga por éste no por un promedio fijo. 2) La medición lo incentiva a reducir constantemente. 3) Hay registro de lo que se genera en realidad, por el código de barras. 4) Permite que el usuario reaccione a las políticas e incentivos de reciclaje, ya que permanentemente puede cambiar su volumen de basura. 5) Los costos administrativos del sistema son mínimos. 6) Los multiusuarios pagan una tarifa individual y no una colectiva, incentivando su mejoramiento particular. 7) Es aplicable para pequeños y grandes productores, generando las mismas ventajas.

¿QUÉ NOS PROPONEN CON LAS PLANTAS DE RECICLAJE?

El sistema, planeado por la UESP, está centrado en los operadores de servicio público domiciliario de aseo, los cuales tienen la posibilidad de presentarse a licitación para la construcción de las plantas de reciclaje; éstos recogerán los residuos de parte de los generadores y luego los llevarán a plantas de reciclaje, donde harán su separación y adecuación, para luego ser procesados y aprovechados en las cadenas productivas. Ellos ofrecen la posibilidad de vincular como trabajador de la planta

de reciclaje a un recuperador por familia. Dicha propuesta puede presentar las siguientes desventajas: 1) No se genera incentivo para reciclar, ya que el usuario recibirá cobro tanto por la basura como por lo que separe como reciclaje. 2) El material puede contaminarse uno a otro, haciendo más difícil y costosa su recuperación. 3) Desestímulo para la clasificación por parte del generador, pues el operador de aseo recogerá todo de manera mezclada; esto podría cambiar si se adaptan los carros recolectores para recolección separada. 4) La tasa de recuperación de materiales puede ser baja y seguirá llegando mucho material a Doña Juana. 5) La vinculación de un reciclador o recuperador por grupo familiar es insuficiente para garantizar el sustento de su familia. 6) Hay concentración del dinero en los operadores de servicio de aseo. 7) No se separan los tóxicos y se presenta multiplicación de los mismos al entrar en contacto con otros materiales.

¿CÓMO DEBERÍA SER EL SISTEMA INTEGRAL DE RESIDUOS?

Definitivamente, el enfoque sistémico ayudará a dar una solución óptima. La gestión integral de residuos es un sistema compuesto por actores o elementos que funciona cuando todos sus elementos están en marcha. El estado ideal del sistema es que todos sus componentes funcionen y que la sinergia de interacción entre los mismos genere crecimiento y mejoramiento. Sin embargo, el peor escenario se visualiza cuando uno o varios de sus componentes no funcionan y generan resultados nulos, aun cuando algunos componentes estén trabajando adecuadamente.

Los elementos participantes del sistema son: 1) Los generadores o consumidores, quienes producen las basuras. 2) El centro de recolección, como espacio para recolección de materiales recuperables o peligrosos. 3) Los operadores de servicio de aseo, quienes deben recolectar los residuos de manera separada. 4) Los centros de procesamiento, que deben recuperar los materiales o disponerlos adecuadamente. 5) La cadena productiva o compradores de los materiales, quienes incluyen dichos materiales en ciclos productivos. 6) Los rellenos sanitarios, que deben disponer de los residuos no aprovechables controlando y mitigando los impactos ambientales (figura 4).

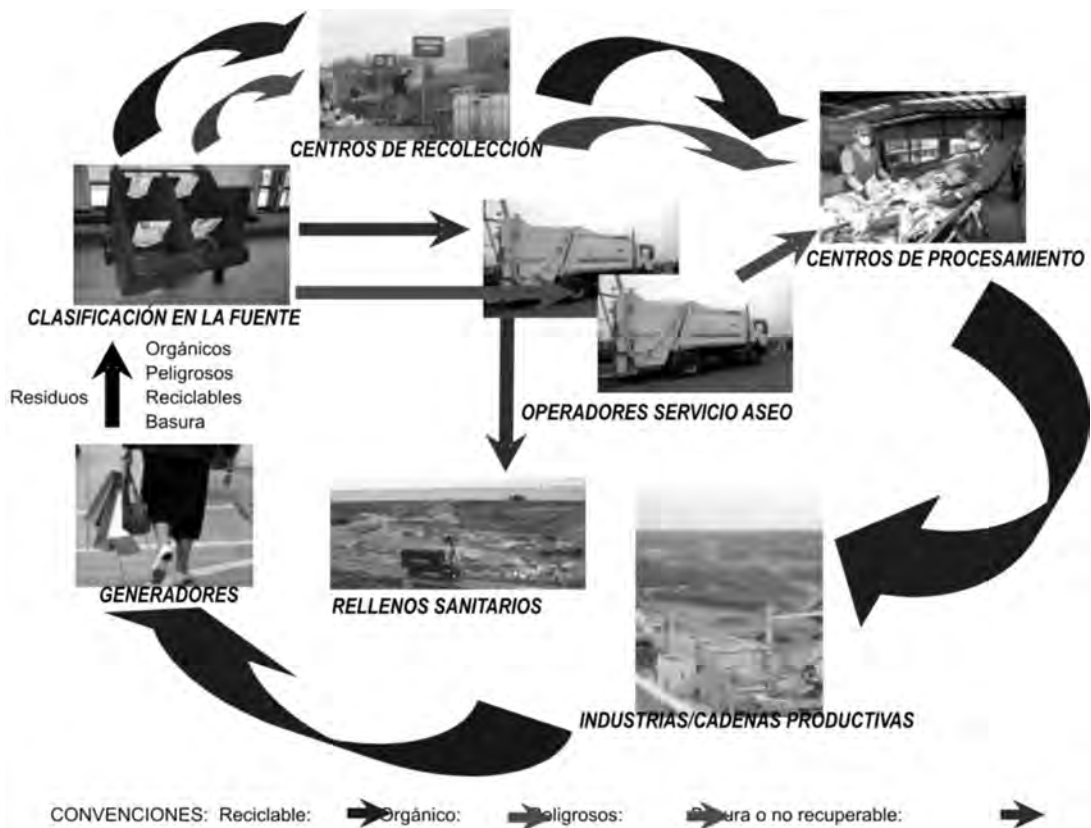


Figura 4. Sistema de gestión integral de residuos sólidos.

La implementación de este sistema requiere elementos de cambio cultural, cambio de infraestructura, campañas de educación, creación de cadenas de procesamiento, establecimiento de mercados, empoderamiento de los actores, como los recuperadores y mecanismos financieros, y de incentivo para que los componentes o actores cumplan la función dentro del sistema y se logre la sinergia esperada.

Los generadores, ya sean multiusuarios, unifamiliares, pequeños generadores (comerciantes pequeños), o grandes generadores (industrias), deben clasificar sus residuos en reciclables, orgánicos, tóxicos y basura. Las condiciones de separación deben ser parte de la campaña de educación. Ésta debe incluir la identificación de los materiales recuperables y condiciones generales para su recuperación, almacenamiento y transporte. Igualmente, se deben identificar los residuos peligrosos y separarlos para evitar que contaminen otros residuos. Tanto los residuos recuperables como los peligrosos deben llevarse al centro de recolección para que se puedan aprovechar o disponer adecuadamente. Los residuos orgánicos, por el gran volumen que representan

—más del 50% del total de residuos por habitante—, deberían recogerse y llevarse directamente a centros de procesamiento para la producción de abonos, compostaje, forraje, energía, recuperación de canteras o suelos erosionados. Y finalmente los residuos restantes, que constituyen la basura, los deben recoger operadores de servicio de aseo para llevarlos a los rellenos sanitarios.

Esta opción involucra la creación de centros de recolección donde se reciba el material y se clasifique, para enviarlo luego a los centros de procesamiento. Los recuperadores organizados en cooperativas pueden ser quienes manejen los centros de recolección, así como los centros de procesamiento, una vez que estén dotados de la infraestructura adecuada, que garantice que los materiales se incorporarán de nuevo como materias primas a las cadenas productivas. Buscar espacios públicos para la recolección de materiales puede ser difícil por el valor de los terrenos y por la baja aceptación que tienen en la comunidad, puesto que se los percibe como sitios de proliferación de inseguridad, por lo que realizar un programa piloto puede mostrar las ventajas de dicha alternativa, permitiendo lograr la aceptación de

la comunidad. Así mismo, se mostrará la conveniencia de usar vehículos automotores para el transporte del material, realizando una sola parada y reduciendo considerablemente las emisiones al ambiente, ya que el transporte es una de las etapas más críticas del reciclaje, cuando se considera el ciclo de vida de todo el sistema.

Los centros de procesamiento pueden ser específicos para cada uno de los tipos de materiales que se manejan; por ejemplo, para el aprovechamiento de plásticos éstos se deben clasificar, lavar y pelletizar; el papel blanco, papel periódico y cartón se procesan de manera independiente; el aluminio se compacta y comercializa directamente como materia prima; el cobre –así como otros metales– se separa y algunas veces se funde; el vidrio se separa por colores, algunas veces lavado y triturado; las bolsas de pasabocas comestibles se recolectan para producir un nuevo material; así mismo, el icopor se recolecta para utilizarlo en la producción de *drywall*; con los envases de tetrapak se pueden procesar o elaborar productos como cartón gris, el cual se usa como tapas para libros, agendas y cuadernos; con los residuos orgánicos se pueden producir abonos, forraje, energía, o también se pueden emplear para la recuperación de áreas de canteras. Las condiciones mínimas para que el sistema funcione se listan en la tabla 8.

Por otra parte, deben establecerse centros de procesamiento de tratamiento y disposición de residuos peligrosos, puesto que envases de pintura pueden contener plomo y los balastos de luz tienen mercurio; a los envases de insecticidas, herbicidas o productos químicos de limpieza se les debe dar un tratamiento específico, con el objeto de evitar que afecten la salud humana y el ambiente.

Las ventajas, una vez que el sistema esté funcionando, son: 1) Se aprovecharán los productos recuperados, como materias primas o productos. 2) Se generará empleo ante la creación de los centros de recolección y procesamiento. 3) La separación en la fuente permite recuperar todos los materiales, ya que evitará que se contaminen unos con otros. 4) La ventaja para el generador es que reducirá en igual proporción el costo del servicio de aseo con el reciclaje que realice. 5) La disminución total de residuos a rellenos sanitarios podría ser de entre 50 y 70%, aunque su logro es paulatino de acuerdo con los resultados de funcionamiento del sistema. 6) El aprovechamiento de residuos orgánicos disminuirá la producción de residuos a rellenos sanitarios en más de un 50%. 7) Los residuos tóxicos se dispondrán adecuadamente. 8) Se evitarán problemas ambientales. 9) Se requerirá menos espacio en relleno sanitario, se

Tabla 8
Función y condiciones mínimas de los elementos del sistema de gestión integral de residuos

Elemento/actor	Función dentro del sistema	¿Qué se requiere?
Generador/ciudadano	Separación en la fuente	<ul style="list-style-type: none"> · Educación · Bolsas y canecas para residuos reciclables, orgánicos, basura y peligrosos · Espacio para ubicación de canecas/bolsas
Centros de recolección/ recuperadores reciclaje	Disposición de espacio y condiciones para centro de reciclaje	<ul style="list-style-type: none"> · Creación de centros de recolección con infraestructura adecuada · Espacio público para ubicación de los centros de recolección · Educación para generadores y para actores de la cadena productiva
Operadores de servicio de aseo	Recolección separada de residuos	<ul style="list-style-type: none"> · Adecuación de camiones de recolección · Horarios de recolección · Educación
Centros de procesamiento	Recuperación y adecuación de materiales	<ul style="list-style-type: none"> · Creación de un centro de procesamiento · Infraestructura para la recuperación o disposición de residuos · Conocimiento y educación para el manejo adecuado de cada material
Cadena productiva/ Industrias	Establecimiento de compradores en la cadena productiva de cada material	<ul style="list-style-type: none"> · Red de compradores nacionales e internacionales
Relleno sanitario	Disposición adecuada de los residuos no recuperables	<ul style="list-style-type: none"> · Control adecuado de lixiviados y gases. · Aprovechamiento de gases y obtención de bonos de

producirán menos lixiviados y se podrán aprovechar los gases con proyecto de mecanismos de desarrollo limpio en la mitigación de gases efecto invernadero. 10) Al incorporar a los recuperadores agrupados en cooperativas, se permitirá elevar la calidad de vida de dichas familias.

¿QUÉ ALTERNATIVAS SE HAN IMPLEMENTADO EN OTROS PAÍSES?

Estos sistemas ya funcionan en otros países. Mientras que en Alemania el sistema de reciclado empezó por iniciativa de la comunidad, en Suecia nació de un acuerdo entre los fabricantes y el gobierno, donde el fabricante se compromete a extender su responsabilidad sobre su producto hasta la disposición del mismo. El consumidor paga en el precio de compra parte del valor de disposición del producto y el productor se compromete a recogerlo para usarlo de nuevo como materia prima o para disponerlo adecuadamente, si se trata de un material peligroso. Si el productor no se encarga de la responsabilidad física, siempre tiene la responsabilidad financiera de su disposición. Así mismo, se incentiva al consumidor a devolver el producto con un sistema de depósito o “finca”, después que devuelva el envase de aluminio, PET o vidrio. El valor de dicho depósito es fijo. Sin embargo, este valor se ha modificado para motivar a los consumidores a incrementar la cantidad de producto que retornan.

Los centros de recolección se localizan en espacios públicos, o algunas veces se utilizan *curbsides* o cajas metálicas de disposición, las cuales son transportables. Por otro lado, los centros de depósito se ubican cerca de supermercados. Todos ellos están localizados en el camino diario de las personas, con el propósito de evitar desplazamientos innecesarios para depositar el material reciclado. Una vez acumulado el material en dichos centros, se transporta en camiones o por movilización de *curbsides* hasta los centros de procesamiento.

CONCLUSIONES

Extender la responsabilidad del productor para la disposición adecuada de los residuos peligrosos, especialmente cuando éstos provienen de productores internacionales y el costo de disposición puede ser alto, como es el caso del equipo eléctrico y electrónico

(televisores, computadores, baterías). Además, dichos productores aplican estas políticas en otros países, por lo cual se podrían aplicar en Colombia; igualmente los *curbsides* de ropa, los depósitos de pilas y baterías en los supermercados.

Los centros de recolección se deben tomar como referentes. Los cuales permitirán el uso de camiones por el gran volumen que se maneja, permitiendo la eliminación de los vehículos de tracción animal.

Un programa piloto que permita mostrar las ventajas del sistema de gestión integral propuesto a la comunidad y a todas las partes involucradas e interesadas, convirtiéndose en una vitrina de venta para la réplica del mismo en diferentes comunidades.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arrow, Kenneth (1963). *Social Choice and Individual Values (Decisiones sociales o valores individuales)*.
- Asociación de Recicladores de Suba (2006). Expedición por los residuos, Ruta Río Molino.
- Banco Mundial (2006). Reducción de la pobreza y crecimiento: círculos virtuosos y círculos viciosos. Disponible en línea: <http://web.worldbank.org/WBSITE/EXTERNAL/BANCOMUNDIAL/>
- Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico, CRA (2002). Resolución 235 de 2002, “Por la cual se crea el Comité Técnico de Saneamiento Contable de la Secretaría de Obras Públicas de Bogotá, D.C.”.
- Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico, CRA (2005). Resolución 353 de 2005, “Por la cual se establece la metodología de cálculo de los descuentos en las tarifas de los usuarios de estratos subsidiables por aportes bajo condición de las entidades estatales a las personas prestadoras de los servicios públicos domiciliarios de acueducto y alcantarillado, y se fijan aplicables a tales aportes en el servicio de aseo”.
- Concejo de Bogotá, D.C. (2003). Proyecto de acuerdo 084 de 2003, “Por el cual se reglamenta la circulación de vehículos de tracción animal por las vías del Distrito Capital”.
- Congreso de Colombia. Ley 511 de 1999, “Por la cual se establece el Día Nacional del Reciclador y del Reciclaje”.
- Departamento Administrativo de Medio Ambiente (Dama). (2006). Plan de Manejo Integral de Residuos Sólidos.
- Ministerio de Medio Ambiente (2000). Decreto 2676 de 2000, “Sobre la gestión integral de los residuos hospitalarios y similares”. Modificaciones posteriores.
- Ministerio de Ambiente (2003). Decreto 1505 del 4 de junio de 2003, “Sobre planes integrales de residuos y otras disposiciones”. Modifica el Decreto 1713 de 2002.
- República de Colombia. Gobierno nacional (1994). Ley 142 de 1994, “Por la cual se establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios y se dictan otras disposiciones y modificaciones posteriores”.
- República de Colombia. Gobierno nacional (2002). Ley 769 de 2002. Código Nacional de Tránsito Terrestre. Modificaciones posteriores.
- Unidad Ejecutiva de Servicios Públicos (UESP). 2006. Declaraciones.

EDUCACIÓN

Aplicación de la teoría de registros de representación a situaciones de variación

SANDRA ISABEL GUTIÉRREZ OTÁLORA

Licenciada en matemáticas de la Universidad Pedagógica Nacional. Ingeniera civil y profesora asistente de la Escuela Colombiana de Ingeniería. Magíster en docencia de las matemáticas de la Universidad Pedagógica Nacional. sgutierr@escuelaing.edu.co

Artículo recibido: 11/05/2007
Evaluación par externo: 12/10/2007
Aprobado: 04/12/2007

Resumen

En este artículo se presentan algunos elementos abordados al caracterizar las transformaciones que realiza un grupo de estudiantes de cálculo diferencial de la Escuela Colombiana de Ingeniería, cuando se les proponen situaciones de variación que se modelan mediante la función afín. El estudio¹ tiene como soporte la teoría de registros de representación de Raymond Duval. El análisis de las respuestas revela un bajo nivel de articulación entre registros de representación, así como una escasa utilización de la función lineal como herramienta en la solución de situaciones de variación.

Palabras claves: función afín, registros de representación semiótica, fenómenos de congruencia y no congruencia entre registros, tratamientos, conversiones

Abstract

In this article we considered some elements as we were characterizing transformations done by a group of differential calculus students of the Escuela Colombiana de Ingeniería, when they were given variation situations modelled using linear function. The study is supported by the theory of registers of semiotic representations developed by Raymond Duval. The analysis of the answers reveals a low coordination between registers, as well as a scarce use of the linear function as a tool to solve situations of variation.

1. La investigación corresponde a la tesis de maestría en docencia de las matemáticas titulada “Caracterización de tratamientos y conversiones: el caso de la función afín en el marco de las aplicaciones”, realizada con el profesor Diego Parada Landazábal, en la Universidad Pedagógica Nacional.

INTRODUCCIÓN

Muchas de las investigaciones en educación matemática relacionadas con el aprendizaje y la enseñanza, con y para la comprensión, consideran elemento fundamental las representaciones de los conceptos. El enfoque cognitivo desarrollado por Duval tiene como base la noción semiótica de *registro de representación*, que corresponde a un sistema de signos (trazos, símbolos, íconos, figuras, etc.) que comporta reglas que permiten combinarlos de modo que el resultado tenga sentido, y con lo cual se logra evocar un objeto. Es así como podemos hablar, por ejemplo, del registro gráfico, del algebraico, del aritmético, en donde cada uno de ellos tiene sus propias reglas de conformidad. Adicionalmente, todo registro de representación debe dar la posibilidad de transformar una representación semiótica en otra, tanto de manera interna (*tratamiento*), es decir, en el mismo registro, como en forma externa (*conversión*), cuando se produce una nueva representación en un registro diferente del de partida.

Font (2005) menciona que en el caso particular de la función, los estudios sobre las representaciones asociadas a este objeto matemático han contribuido radicalmente en la forma de enseñarlas. Sin embargo, las investigaciones han dejado de lado algunos aspectos que consideramos esenciales en la búsqueda de la solución a las dificultades del aprendizaje del concepto de función afín, como la presentación que hacen los textos guía del concepto, lo cual puede dar idea tanto del enfoque como de las representaciones que se promueven en el aula; la construcción de situaciones de variación dadas en registro verbal que no expliciten ni el registro de llegada ni el tipo de función que la modela, y que no remitan a algoritmos o procedimientos determinados, así como que presenten diferentes grados de complejidad respecto a los fenómenos de congruencia entre registros de representación; estos elementos podrían dar indicios de las representaciones que espontáneamente eligen los estudiantes, al igual que del dominio que tienen de la función afín como herramienta.

Teniendo como base lo anterior, se presentan en este artículo algunos hallazgos y aspectos considerados al caracterizar los tratamientos y conversiones que hace un grupo de estudiantes de cálculo, al proponerles situaciones de variación que se modelan mediante la función afín y que contemplan los aspectos mencionados anteriormente.

ALGUNOS ELEMENTOS DE LA TEORÍA DE DUVAL

Duval (2004) sostiene que la actividad cognitiva ligada a las matemáticas presenta dos características que la diferencian de otros dominios de conocimiento: la primera está relacionada con la naturaleza de los *objetos matemáticos*², que hace que no sean asequibles a través de los sentidos, de ahí que sólo se pueda llegar a ellos a través de las representaciones semióticas, puesto que no se dispone de objetos reales (o cosas) para exhibir en su lugar; la segunda tiene que ver con la movilización de diversos registros de representación, que dan la posibilidad de efectuar transformaciones sobre los objetos matemáticos, pero a su vez exigen una coordinación entre ellos.

Desde esta perspectiva, la comprensión de un objeto matemático implica la apropiación y coordinación de numerosos registros de representación, dado que las diversas representaciones de un mismo objeto revelan contenidos (o características) parciales de éste. Por ejemplo, la ecuación de una recta $ax + by + c = 0$ y la gráfica de la misma, aunque se refieren al mismo objeto, no muestran exactamente las mismas características. Duval sostiene que “ningún sistema de representación puede producir una representación cuyo contenido sea completo y adecuado al objeto representado” (2004, p. 38).

De lo anterior surge lo que el autor citado denomina la *paradoja cognitiva de la actividad matemática*, la cual resume en la siguiente pregunta: ¿cómo puede aprender un estudiante a no confundir un objeto matemático con la representación particular que le da acceso (por ejemplo, un número y su escritura, una figura y la situación representada, un grafo y la función...), si para acceder a los objetos matemáticos representados no hay más que representaciones semióticas para manipular? (2004, p. 28). Como consecuencia de ésta se ha evidenciado que muchos estudiantes no reconocen el mismo objeto matemático en diversos registros de representación.

Un intento por dar respuesta a la pregunta anterior aborda principalmente las transformaciones de las representaciones, es decir, los tratamientos y las conversiones, que son las que permiten que se produzca un avance en las matemáticas.

2. Entendemos por objeto matemático aquel que no tiene un representante real perfecto, de ahí que una representación nunca agote al objeto.

Un *tratamiento* es una transformación de una representación dentro de un mismo registro, así las reglas que permiten realizarla son propias de cada registro de representación (por ejemplo, la simplificación de una ecuación o la reflexión de una gráfica), mientras que la *conversión* es una transformación de una representación dada en un registro en otra representación en un registro diferente, que mantiene parte del significado de la representación inicial pero al mismo tiempo presenta otras significaciones del objeto representado. A diferencia del tratamiento, en ésta no existen reglas que permitan hacer el paso entre los registros. Se realiza una conversión, por ejemplo, cuando se construye la gráfica de una recta a partir de su ecuación. En el caso de los problemas de aplicación, *la tarea de conversión consiste en convertir las informaciones que presenta un enunciado en lengua natural, en la de todos los días, en una forma que permita la aplicación de un tratamiento matemático* (Duval, 2004).

En ocasiones, el traslado de un registro a otro puede hacerse de manera espontánea, producto de la *congruencia* entre los registros de partida y de llegada; esto ocurre cuando a cada unidad significativa del registro de salida se le puede asociar *una única* unidad significativa en el registro de llegada y además las unidades significantes en las dos representaciones de los dos registros conservan el mismo orden. Cuando fallan estos criterios, se dice que los registros de representación son *no congruentes* o que no hay correspondencia entre las representaciones.

Para ilustrar el concepto de congruencia entre registros consideramos el ejemplo que propone Duval (2004, p. 79): “El conjunto de los puntos cuya ordenada es superior a la abscisa”. A las unidades elementales “puntos cuya ordenada”, “es superior” y “abscisa” les corresponden en el registro algebraico las unidades “*y*”, “*>*” y “*x*”, respectivamente, y la conversión se hace de manera transparente, siguiendo el orden de la descripción verbal.

En el caso de la no congruencia “El conjunto de los puntos cuya abscisa y ordenada tienen el mismo signo”. Se observa que a la unidad “mismo signo” no se le puede asociar una unidad significativa elemental en el registro algebraico, no obstante, podría interpretarse como “el producto de la abscisa y la ordenada es mayor que cero”, es decir, $x \cdot y > 0$, pero esta unidad no conserva el mismo orden de los términos de la frase inicial; adicionalmente, cabe la posibilidad de utilizar otra representación ($x >$

0 y $y > 0$) o ($x < 0$ y $y < 0$), con lo que no se cumple la unicidad.

Duval (1999, p. 46) afirma que la *conversión de las representaciones semióticas constituye la actividad cognitiva menos espontánea y más difícil de adquirir para la gran mayoría de los alumnos*. Entre los aspectos que dificultan esta *transformación* menciona el desconocimiento de las reglas propias de alguno de los registros de representación, la falta de coordinación entre los registros³ y el hecho de que la comprensión de un contenido algunas veces queda limitada a la representación en que se aprendió. Además, la enseñanza favorece por lo general el trabajo relacionado solamente con los tratamientos, abandonando los procesos que involucran la conversión (Guzmán, 1998; Duval, 1999).

Suponiendo que existe una interacción entre las representaciones semióticas y las mentales (internas), pero que no necesariamente las primeras son manifestación de las segundas, se encuentra que las representaciones semióticas son una herramienta que permite indagar, en cierta forma, por los procesos de conceptualización de los estudiantes; según Hiebert y Carpenter (1992, p. 2), “la manera en la cual un estudiante trata las representaciones externas o genera dichas representaciones revela algo de cómo el estudiante ha representado tal información internamente”.

REGISTROS DE REPRESENTACIÓN Y UNIDADES SIGNIFICANTES DE LA FUNCIÓN AFÍN

Janvier (2001, citado por Font) menciona cuatro registros de representación asociados a la función verbal, tabular, gráfico y algebraico, cada uno de los cuales pone en funcionamiento diferentes procesos cognitivos. *La representación verbal se relaciona con la capacidad lingüística de las personas, y es básica para interpretar y relacionar las otras tres; la representación en forma de tabla se relaciona con el pensamiento numérico; la representación gráfica se conecta con las potencialidades conceptualizadoras de la visualización y se relaciona con la geometría y la topología; mientras que la expresión analítica se conecta con la capacidad simbólica y se relaciona principalmente con el álgebra*. (Font, 2001, p. 182).

3. Según Duval (2004), no es suficiente mostrar el objeto en sus diferentes representaciones; es necesario enseñar cómo se hace el paso de una a otra y cómo se coordinan entre sí las diferentes unidades significantes de los registros.

Tabla 1
Adaptación de la tabla propuesta por C. Janvier (Font, 2001, p. 182)

Desde	Hacia	Situación, Descripción verbal	Tabla	Gráfica	Expresión analítica
Situación, Descripción verbal		Distintas descripciones	Estimación/cálculo de la tabla	Boceto	Modelo
Tabla		Lecturas de las relaciones numéricas	Modificación de la tabla	Trazado de la gráfica	Ajuste numérico
Gráfica		Interpretación de la gráfica	Lectura de la gráfica	Variaciones de escalas, unidades, origen, etc.	Ajuste gráfico
Expresión analítica		Interpretación de la fórmula (interpretación de parámetros)	Cálculo de la tabla dando valores	Representación gráfica	Transformaciones de la fórmula

En la tabla 1 se presentan las posibles transformaciones entre los registros de representación mencionados, las cuales corresponden, en términos de la teoría de Duval, a tratamientos (casillas sobre la diagonal de la tabla) y a conversiones.

Por otra parte, para poder realizar conversiones, así como para articular diferentes registros de representación, es indispensable discriminar las unidades significantes propias de los registros que intervienen. Se entiende por *unidades significantes* los valores que pueden tomar las diferentes variables en un registro, aunque cabe señalar que no necesariamente son las mismas en todos los registros.

Para el caso de la función afín en el registro gráfico se pueden identificar tres variables, mientras que en el algebraico, bajo la estructura $y = f(x) = mx + b$, se reconocen dos variables que son el coeficiente m y el término independiente b , que pueden tomar los valores que aparecen en la tabla 2, los cuales están asociadas con las correspondientes variables visuales del registro gráfico.

Según Duval (1999), el hecho de utilizar diferentes registros de representación no significa que se produzca la coordinación de los mismos; adicionalmente, cuando la adquisición de conocimiento se efectúa en un solo registro queda limitada a éste, trayendo como consecuencia que cuando se sale del contexto en el que se realizó el aprendizaje se presente cierta incapacidad de movilizar los conocimientos, esto es, no se puede realizar transferencia. De ahí la importancia de efectuar conversiones entre registros, lo cual presupone la discriminación de las unidades significantes de los mismos.

Tabla 2
Variables y unidades significantes de la función afín en los registros gráfico y algebraico (Duval, 1992, p. 128)

Variables visuales	Unidades significantes	Unidades correspondientes en el registro algebraico
Sentido de la inclinación del trazo	El trazo sube de izquierda a derecha ⁴	$m > 0$
	El trazo desciende de izquierda a derecha	$m < 0$
Los ángulos del trazo con los ejes	Hay una partición simétrica del cuadrante atravesado	$m = 1$
	El ángulo formado con el eje horizontal es menor que el formado con el eje vertical	$m < 1$
	El ángulo formado con el eje horizontal es mayor que el formado con el eje vertical ⁵	$m > 1$
La posición del trazo respecto al origen del eje vertical	El trazo corta al eje y arriba del origen	$b > 0$
	El trazo corta al eje y abajo del origen	$b > 0$
	El trazo corta al eje y en el origen	$b = 0$

4. “La referencia izquierda derecha es el sentido normal del recorrido visual de una página escrita en caracteres latinos” (Duval, 1992, p. 128).
5. “Cuando la recta trazada no pasa por el origen, es suficiente desplazar el eje vertical, por ejemplo, hasta el punto de intersección de la recta con el eje horizontal” (Duval, 1992, p. 128).

DISEÑO DE LAS SITUACIONES DE VARIACIÓN

Con el ánimo de enfrentar a los estudiantes a situaciones no convencionales, que permitieran aflorar las representaciones que realmente manejan, sin estar influenciadas por elementos explícitos en el enunciado, como el registro de llegada, el modelo lineal o un algoritmo conocido, se consideró pertinente tener en cuenta cuatro aspectos en el diseño:

- Contextos de variación que se modelan mediante funciones afines. Se eligieron desocupado de un tanque, posición de un atleta y temperatura en un proceso industrial.
- Nociones asociadas al enfoque variacional de la función. Se indagó por intervalos de covariación (en relación directa e inversa) y razón de cambio.
- Unidades significantes asociadas a la función afín en los diferentes registros.
- Características de las situaciones:
 - Están dadas en registro verbal.
 - Se modelan mediante funciones afines continuas, dadas por una o más condiciones, pero este modelo no se explicita en el enunciado.
 - No remiten a un algoritmo o procedimiento determinado, obligan a realizar una interpretación y a seleccionar otro registro de representación.
 - Presentan diferentes grados de complejidad en cuanto a su estructura, es decir, contemplan fenómenos de congruencia y no congruencia entre registros.

De acuerdo con estos aspectos se diseñaron tres situaciones, cada una con cinco preguntas abiertas, que se propusieron a 36 estudiantes de cálculo diferencial de la Escuela Colombiana de Ingeniería, quienes habían trabajado con el tema de función afín en el bachillerato, en el curso de precálculo y en el de cálculo diferencial. Para la aplicación de las situaciones se conformaron tres grupos de doce estudiantes, cada uno de los cuales respondió solamente una de las tres situaciones.

A continuación se presentan algunos elementos tenidos en cuenta en el diseño de la situación de desocupado⁶.

6. Por razones asociadas con la extensión del documento, se decidió exponer solamente una de las tres situaciones propuestas en el estudio; el diseño y el análisis de las otras dos se realizaron de manera análoga.

SITUACIÓN DE DESOCUPADO

El administrador de un edificio quiere desocupar uno de los tanques de reserva para hacerle mantenimiento, el cual tiene una capacidad de 90.480 litros y se encuentra completamente lleno. Comienza a desocuparlo a razón constante, de tal forma que al cabo de dos horas quedan en el tanque 62.640 litros de agua. En ese momento se da cuenta de que debe desocuparlo en tres horas menos de lo previsto, por lo cual decide abrir más la llave, manteniéndola abierta a esa razón.

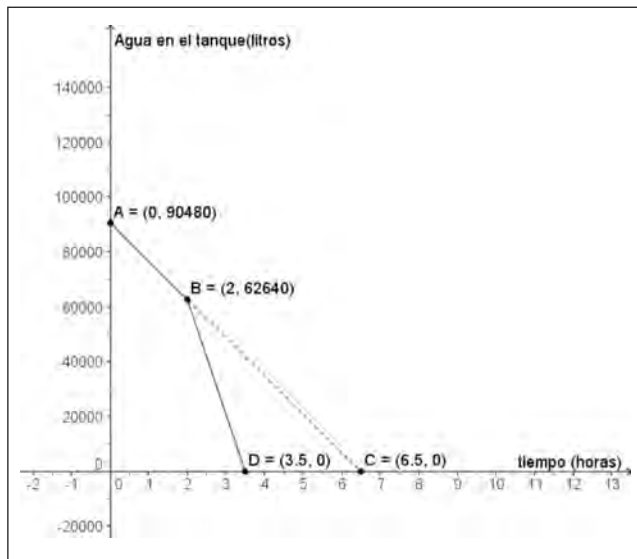
1. Comparar la cantidad de agua (en litros) que sale por hora antes y después de abrir más la llave.
2. Conociendo el volumen de agua que ha salido, ¿cómo se podría determinar el tiempo que hace falta para que el tanque se desocupe completamente?
3. ¿En qué intervalo de tiempo la cantidad de agua que queda en el tanque cambia de 80.400 a 25.056 litros?
4. Si a las dos horas de haber empezado a desocupar el tanque, el administrador debe tomar una decisión para que el tiempo total de desocupado sea exactamente de ocho horas, ¿qué debe hacer?
5. Si el volumen del tanque fuera el doble y el administrador empieza a desocuparlo a razón constante, de tal forma que al cabo de dos horas quedan los mismos 62.640 litros de agua, ¿qué debe hacer para que el tanque se desocupe exactamente en el mismo tiempo descrito en la situación inicial?

En el enunciado se pusieron en juego dos variables: la primera relacionada con la forma en que se desocupa el tanque y la segunda con la cantidad inicial de agua en el mismo; a éstas les corresponden las unidades significantes que aparecen en el cuadro de la página siguiente.

Las unidades significantes en los registros gráfico y algebraico son, respectivamente: inclinación y corte de una recta, coeficiente $m < 0$ y término independiente $b > 0$ en la ecuación de la recta. Así por ejemplo, a la unidad “Se desocupa a razón constante. Inicia con 90.480 litros y al cabo de dos horas quedan 62.640 litros”, le corresponde en el registro gráfico un segmento de recta que comienza en el punto de coordenadas $A(0,90480)$ y

Variables	Unidades significantes en el registro verbal
Forma en que se desocupa el tanque	Se desocupa a razón constante. Empieza con 90.480 litros y al cabo de dos horas quedan 62.640 litros.
	Se desocupa a razón constante. Al cabo de dos horas quedan en el tanque 62.640 litros de agua. En ese momento se da cuenta de que debe desocuparlo en tres horas menos de lo previsto, por lo cual decide abrir más la llave.
Cantidad inicial de agua en el tanque	90.480 litros.

finaliza en el punto $B(2,62640)$, el cual tiene una inclinación negativa y corta al eje y en A . Una representación en este registro es la siguiente:



Igualmente, en el registro algebraico le corresponde una expresión de la forma $V(t) = \begin{cases} 90480 - 13920t & t \leq 2 \\ 146160 - 41760t & 2 < t \leq 3.5 \end{cases}$ en la que $m = -13.920$ representa la razón de desocupado y el término independiente $b = 90.480$ el volumen inicial de agua en el tanque para el primer tramo, y de manera análoga en el segundo tramo.

Pregunta 1. Comparar la cantidad de agua en litros que sale por hora antes y después de abrir más la llave

Esta pregunta se planteó para explorar las comparaciones cualitativas o cuantitativas que establecen los estudiantes entre la razón de desocupado en los dos tramos de la función que modela la situación. Vale la pena señalar que la determinación de la razón en la

primera parte obedece a un fenómeno de congruencia entre registros que permite pasar de manera directa del registro verbal a los otros (gráfico y algebraico), ya que se satisfacen los tres criterios de congruencia mencionados anteriormente. Por ejemplo, en la conversión de lo verbal a lo gráfico al volumen inicial (90.480 l) le corresponde la unidad (0,90480) en el gráfico; a la unidad “al cabo de dos horas quedan en el tanque 62.640 litros de agua” le corresponde la unidad (2,62640) en el gráfico, y la unidad “desocupado a razón constante” establece en el gráfico la relación entre estos dos puntos, que es lineal; adicionalmente, la representación en el registro gráfico es única y la obtención del segmento en este registro puede hacerse en el mismo orden en que se describe en el registro verbal.

Por otra parte, la determinación de la razón de desocupado después de abrir más la llave produce un fenómeno de *no congruencia* entre el registro verbal y los demás (aritmético, algebraico, gráfico), ya que a la unidad “tres horas menos de lo previsto” no se le puede asociar una unidad en el registro gráfico; además, la construcción de la representación en este registro implica cambiar el orden de lo descrito verbalmente, por lo que es necesario encontrar el tiempo previsto y luego restarle tres, de donde las unidades significantes no conservan el orden.

Pregunta 2. Conociendo el volumen de agua que ha salido, ¿cómo se podría determinar el tiempo que hace falta para que el tanque se desocupe completamente?

A través de esta pregunta se busca explorar la manera en que el estudiante establece relaciones entre magnitudes que covarían, en una función a trozos dada por dos condiciones. Para responder, el estudiante puede tener en cuenta el volumen de agua que queda en el tanque o el volumen de agua que ha salido. La determinación de la relación genera un fenómeno de no congruencia

entre el registro verbal y los otros (aritmético, gráfico y algebraico). Por ejemplo, en el registro gráfico a la unidad *volumen de agua que ha salido* no le corresponde de manera directa o transparente una unidad, por lo que para obtener la gráfica de tiempo contra volumen de agua que ha salido es necesario realizar tratamientos auxiliares, como la obtención de la gráfica diferencia entre volumen total y volumen que queda; también se debe determinar la inversa de esta última.

Pregunta 3. *¿En qué intervalo de tiempo la cantidad de agua que queda en el tanque cambia de 80.400 a 25.056 litros?*

El propósito de esta pregunta es explorar el manejo de intervalos de covariación, que demandan la determinación de relaciones inversas. Se consideran intervalos con sus extremos en diferente momento de desocupado, lo que supone una mayor interpretación del fenómeno de covariación.

Pregunta 4. *Si a las dos horas de haber empezado a desocupar el tanque, el administrador debe tomar una decisión para que el tiempo total de desocupado sea exactamente de ocho horas, ¿qué debe hacer?*

Con esta pregunta se quiere examinar el manejo que tienen los estudiantes sobre la razón de cambio, cuando se involucra un punto de anclaje⁷. Para responder es necesario hacer una interpretación global de la situación que permita identificar el punto de anclaje correspondiente al momento en que se obliga a cambiar la razón de desocupado.

El paso del registro verbal al algebraico y al aritmético no es congruente, ya que para determinar el valor de la pendiente o de la razón es necesario involucrar un tiempo diferente ($8 - 2 = 6$ horas) del que se expresa en el enunciado. Por otra parte, la conversión al registro gráfico sí es congruente; esto muestra una característica importante de la congruencia y es que depende de los registros involucrados.

7. Según Duval (2004, p. 75), un *Punto de anclaje* es toda marca a partir de la cual se determina una diferencia o se describe una situación. Para esta situación, el punto de anclaje se relaciona con el instante $t=2$ horas.

Pregunta 5. *Si el volumen del tanque fuera el doble y el administrador empieza a desocuparlo a razón constante, de tal forma que al cabo de dos horas quedan los mismos 62.640 litros de agua, ¿qué debe hacer para que el tanque se desocupe exactamente en el mismo tiempo descrito en la situación inicial?*

El propósito de esta pregunta es indagar si el estudiante reconoce la invarianza de la situación, determinada por el instante en el que queda la misma cantidad de agua mencionada inicialmente. Al igual que en la pregunta anterior, se requiere una interpretación global de la situación, de modo tal que se identifique la invarianza de la misma teniendo como referencia el punto de anclaje.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Tomando en cuenta que el principal objetivo del estudio se centró en caracterizar los tratamientos y conversiones que hacen los estudiantes en situaciones de variación, a continuación se presentan las categorías de respuestas construidas en cada una de las cinco preguntas; vale la pena señalar que en algunas preguntas se construyó más de una categoría de análisis.

Pregunta 1. *Comparar la cantidad de agua en litros que sale por hora antes y después de abrir más la llave*

Para hacer el análisis de las respuestas a esta pregunta se establecieron tres categorías de análisis:

- Conversiones para determinar la primera razón de desocupado, la cual corresponde a un fenómeno congruente.
- Conversiones y tratamientos para determinar la segunda razón de desocupado, que corresponde a un fenómeno no congruente.
- Comparaciones que establecen los estudiantes entre las razones.

La primera categoría permite indagar por las representaciones espontáneas que muestran los estudiantes cuando no se explicita el registro de llegada en una situación asociada a un fenómeno de congruencia entre registros. Se encontró que la totalidad de los estudiantes hace conversiones adecuadas para determinar de manera correcta la razón de desocupado del tanque antes de abrir más la llave. El 91,7% escoge el registro aritmético

y sólo el 8,3% muestra la articulación de varios registros (algebraico, gráfico, verbal) para modelar la situación y dar la razón de desocupado.

En la categoría relacionada con las conversiones y tratamientos para determinar la segunda razón de desocupado que involucra un fenómeno de no congruencia, clasificamos las respuestas de los estudiantes en la siguiente forma:

Categorías de respuesta asociadas con las transformaciones para determinar la razón de desocupado en una situación no congruente	Porcentaje del total
R ₁ : Hacen transformaciones ⁸ en el registro aritmético que involucran operaciones o regla de tres.	50,0
R ₂ : Hacen transformaciones en el registro algebraico funcional y posteriormente al aritmético en el que usan regla de tres.	8,3
R ₃ : Hacen transformaciones inadecuadas.	33,3
R ₄ : No responden.	8,3

Dentro de la categoría R₁ se realizan transformaciones como la siguiente:

$$6 \cdot 5h - 3h = 3 \cdot 5h - 2h = 1.5h$$

$$\frac{62640L}{1.5h} = 41760L/h \rightarrow \text{Después de abrir la llave.}$$

Cabe señalar el descenso en el porcentaje de éxito respecto a la primera parte de la pregunta, el cual podría estar relacionado con el fenómeno de no congruencia existente entre los registros, así como con la necesidad de hacer una interpretación global de la situación que permita establecer las diversas relaciones que se generan entre el tiempo y la razón de desocupado.

Se advierte que en las conversiones hay un marcado uso del registro aritmético, en el que la relación entre magnitudes se expresa a través del planteamiento de operaciones o reglas de tres. Esta estrategia muestra una *modelización proporcional y no funcional* de la situación. En relación con esto, Ruiz (1993, p. 406) sostiene que

8. Como se mencionó anteriormente, al hablar de transformaciones se incluyen las conversiones y los tratamientos.

“al igual que en la evolución histórica la proporción se puede considerar como un obstáculo epistemológico para el desarrollo de la noción de función, el aspecto funcional queda oculto por el carácter escalar de la proporción”.

Para determinar las comparaciones que realizan, se clasificaron las respuestas en la siguiente forma:

Categorías de respuesta asociadas con las comparaciones que se hacen entre las razones de desocupado del tanque	Porcentaje de estudiantes
R ₅ : Hacen comparaciones en el registro verbal a partir de las razones de desocupado obtenidas.	16,6
R ₆ : No hacen comparaciones a partir de las razones de desocupado obtenidas.	75,0
R ₇ : No responden.	8,3

Encontramos que el 75% de los estudiantes, a pesar de haber obtenido valores para las razones de desocupado, no efectúan comparaciones entre las mismas, lo que podría indicar una articulación pobre con el registro verbal.

Pregunta 2. *Conociendo el volumen de agua que ha salido, ¿cómo podría determinar el tiempo que hace falta para que el tanque se desocupe completamente?*

Las respuestas a esta pregunta revelan una falta de interpretación global de la situación, que impide expresar de manera general (para las dos razones de desocupado) el tiempo que falta para desocupar el tanque en términos del volumen de agua que ha salido. Las aproximaciones a la solución se clasificaron en las siguientes categorías:

Categorías de respuesta asociadas a las transformaciones que realizan los estudiantes para expresar el tiempo en términos del volumen de agua	Porcentaje de estudiantes
R ₈ : Realizan conversiones y tratamientos adecuados para expresar diferentes relaciones con el tiempo que no logran integrar en una relación general.	33,3
R ₉ : Hacen conversiones que permiten encontrar solo una relación con el tiempo	58,3
R ₁₀ : Hacen conversiones que no corresponden a la relación entre el tiempo y el volumen de agua que ha salido.	8,3

Un ejemplo de la categoría R_8 es el siguiente:

$$\begin{aligned}
 &90480 \rightarrow \text{Cantidad total de } H_2O \\
 &x \rightarrow \text{Tiempo total (horas)} \\
 &27840 \rightarrow \text{Cantidad de } H_2O \text{ que salió en } (2) \text{ horas} \\
 &\frac{90480}{x} = \frac{27840}{2x} = 5 \\
 &x = 6.5 \text{ h tiempo total} \\
 &6.5 \text{ h} - 3 \text{ h} = 3.5 \text{ h} - 2 \text{ h} = (1.5 \text{ h}) \rightarrow \text{tiempo restante en que se desocupa el tanque.}
 \end{aligned}$$

Se aprecia que el 91,7% de los estudiantes relaciona de manera parcial el tiempo y el volumen de agua que ha salido, lo cual podría explicarse por una parte en términos de la no congruencia entre registros y por otra en relación con la estrategia de solución usada, que en la mayor parte de los casos corresponde a regla de tres, lo que incide en la dificultad para plantear relaciones generales.

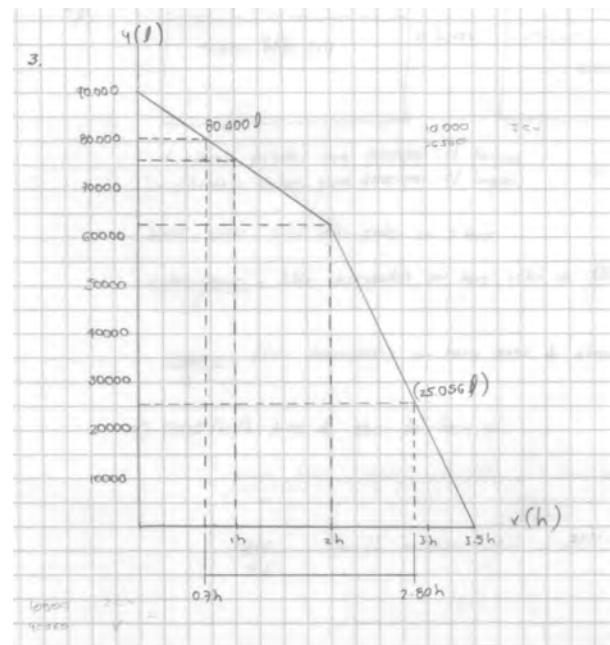
Pregunta 3. *¿En qué intervalo de tiempo la cantidad de agua que queda en el tanque cambia de 80.400 a 25.056 litros?*

Al analizar los resultados, se encontró que el 25% de los estudiantes hace una interpretación diferente de la pregunta; así, sus respuestas se dirigen a determinar en cuánto tiempo la cantidad de agua que queda en el tanque cambia de 80.400 a 25.056 litros; adicionalmente, se advierte que no se identifican con claridad los dos tramos que conforman la función a trozos, por lo que utilizan únicamente una de las razones de desocupado.

Con el fin de caracterizar las transformaciones efectuadas para determinar intervalos de covariación, se clasificaron las respuestas del 75% de estudiantes restante en la siguiente forma:

Categorías de respuesta asociadas a los tratamientos realizados para encontrar intervalos de covariación	Porcentaje del total
R_{11} : Realizan tratamientos en el registro gráfico para establecer el intervalo de covariación.	8,3
R_{12} : Realizan tratamientos en el registro aritmético para establecer el intervalo de covariación.	25,0
R_{13} : Realizan tratamientos en el registro algebraico funcional para establecer el intervalo de covariación.	25,0
R_{14} : No responden.	16,6

Un ejemplo de la categoría R_{11} es el que se muestra a continuación:



Se observa una gran diversidad de tratamientos para determinar intervalos de covariación, que comprenden lectura de gráficas por la vía del punteo, utilización de regla de tres, aplicación del modelo funcional en el registro algebraico. Los resultados indican que el 58,3% hace transformaciones para determinar intervalos de covariación entre las dos magnitudes involucradas.

Pregunta 4. *Si a las dos horas de haber empezado a desocupar el tanque, el administrador debe tomar una decisión para que el tiempo total de desocupado sea exactamente de ocho horas, ¿qué debe hacer?*

Las categorías de análisis se construyeron teniendo en cuenta las transformaciones involucradas para determinar la razón de desocupado del tanque:

Categorías de respuesta asociadas a las transformaciones realizadas para determinar la covariación entre dos magnitudes	Porcentaje de estudiantes
R_{15} : Realizan conversión y tratamientos correctos en el registro aritmético para determinar la razón de desocupado.	25,0
R_{16} : Realizan conversión y tratamientos correctos en el registro algebraico funcional para determinar la razón de desocupado.	8,3
R_{17} : Realizan conversión inadecuada en el registro aritmético y a partir de ésta determinan la razón de desocupado.	58,3
R_{18} : Dan respuesta sin explicitar tratamientos.	8,3

Un ejemplo de la categoría R_{16} es el siguiente:

DESPUÉS DE 2h QUEDAN 62640 l

$$\Rightarrow t(6) = 0$$

$$\Rightarrow 0 = -m \cdot 6 + 62640$$

$$m = \frac{62640}{6} \Rightarrow m = 10440$$

$f(x) = -10440x + 62640$ → NUEVA FUNCIÓN

$$f(1) = 62640 - 10440$$

$$f(1) = 52200 \Rightarrow 62640 - 52200 = 10440$$

$R \rightarrow$ CERRAR UN POCO LA LLAVE PARA QUE SALGAN 10440 l POR HORA.

Un aspecto que llama la atención es que el 100% de los estudiantes intenta hallar la razón de desocupado, aunque no todos la encuentran de manera correcta. Adicionalmente, el 58,3% de los estudiantes halla esta razón sin considerar que ya han transcurrido dos horas, lo que lleva a pensar que no hay un reconocimiento del punto de anclaje y de las unidades significantes involucradas.

Pregunta 5. Si el volumen del tanque fuera el doble y el administrador empieza a desocuparlo a razón constante, de tal forma que al cabo de dos horas quedan los mismos 62.640 litros de agua, ¿qué debe hacer para que el tanque se desocupe exactamente en el mismo tiempo descrito en la situación inicial?

Las respuestas se clasificaron en la siguiente forma:

Categorías de respuesta al indagar por el reconocimiento de la invarianza de la situación cuando se involucra un punto de anclaje	Porcentaje de estudiantes
R_{19} : Reconocen la invarianza de la situación y no realizan transformaciones sobre la misma.	25,0
R_{20} : No reconocen la invarianza de la situación pero realizan transformaciones adecuadas.	41,6
R_{21} : No reconocen la invarianza de la situación y realizan transformaciones inadecuadas.	33,3

Éste es un ejemplo de la categoría R_{19} :

5) la cantidad de agua es la misma por lo tanto se demora lo mismo.

Se observó que sólo el 25% reconoce la invarianza de la situación y lo explicita, de ahí que sus respuestas no evidencien transformaciones en otros registros. El 41,6% de los estudiantes parece no reconocer la invarianza, por lo que realizan transformaciones para hallar la razón de desocupado; esto nos lleva a pensar que podría no haber una interpretación global de la situación o que es posible que algunos de ellos necesiten ejecutar y exhibir procedimientos para dar validez a sus respuestas.

Entre los estudiantes que no reconocen la invarianza de la situación y realizan transformaciones inadecuadas, algunos hacen transformaciones parciales que contemplan la determinación de la razón de desocupado del primer tramo, mientras que otros efectúan una interpretación inadecuada del tiempo al que hace referencia la pregunta, lo que los lleva a determinar la razón de desocupado del segundo tramo de manera incorrecta.

CONCLUSIONES GENERALES

Aunque en este artículo se exponen solamente el diseño y el análisis de una de las situaciones propuestas a los estudiantes, se presentan a continuación las conclusiones generales a las que se llegó con la investigación.

El análisis de las respuestas de los estudiantes a las tres situaciones revela que la escogencia del registro de representación y las transformaciones que realizan están mediadas por el contexto de la situación de variación, de tal modo que cuando se reconocen en la situación elementos de proporcionalidad el registro privilegiado es el aritmético; en el caso de que la situación se relacione con un contexto de posición, el registro seleccionado por la mayoría es el gráfico de segmentos horizontales, así como las fórmulas físicas asociadas a modelos estáticos que ocultan la variación; por último, en los contextos de temperatura el registro predilecto es el gráfico cartesiano.

Por otra parte, el registro seleccionado al hacer la primera conversión determina la utilización de uno o

varios registros de representación a lo largo del desarrollo de la situación. Cuando el registro escogido es el aritmético se efectúan tratamientos en éste, mientras que una primera conversión en un registro diferente del aritmético va seguida en su mayoría de otros registros.

Queda en evidencia que cuando las preguntas involucran fenómenos de congruencia, el porcentaje de éxito de las respuestas se ve fuertemente disminuido; para algunas de las preguntas la dificultad se centra en la conversión y no en los cálculos.

En general, los estudiantes muestran una baja utilización del registro verbal en tareas asociadas con descripción o comparación de razones o magnitudes, así como en sus procedimientos. Esto confirma los resultados obtenidos por Guzmán (1998), en los que encuentra un uso restringido de este registro posiblemente por falta de relevancia en el aula. *La traducción de un lenguaje a otro, la coordinación de registros no es un objetivo de enseñanza que se tome en cuenta explícitamente, y esto sin duda no favorece ni ayuda a los estudiantes a formular sus explicaciones* (p. 18).

Se observa que casi la totalidad de los estudiantes hace conversiones a otros registros solamente para ampliar la información del cuestionamiento planteado, pero no se aprecia un interés por articular con otros registros de representación, bien sea para corroborar o verificar sus resultados.

Cabe anotar que un porcentaje significativo de estudiantes realiza transformaciones para hallar intervalos de covariación, en los que se aprecian diversidad de tratamientos para determinarlos, que abarcan de mayor a menor utilización regla de tres, lectura de gráficas por la vía del punteo y aplicación del modelo funcional en el registro algebraico. En algunos casos, los estudiantes determinan de manera aproximada los intervalos en el registro gráfico, lo que deja al descubierto una falta de articulación con otros registros para precisar sus respuestas.

Se aprecian dificultades para expresar de manera general, a través de un modelo, relaciones directas o

inversas entre magnitudes, y su aproximación más cercana es la utilización de casos particulares.

Los resultados anteriores revelan la complejidad del concepto de función afín desde un enfoque variacional, incluso en los primeros semestres de enseñanza universitaria; de ahí la necesidad de reflexionar sobre las situaciones didácticas, los contextos, los registros de representación que se deben proponer a nuestros estudiantes de manera que se contribuya a una *comprensión integrativa* en términos de Duval (1999), es decir, una comprensión cimentada en la coordinación de los registros de representación, con lo que se podría movilizar la transferencia. Las situaciones propuestas en esta investigación probablemente se podrían utilizar para diseñar tareas encauzadas a este fin, teniendo en cuenta que la teoría de registros de representación es relativamente joven y las situaciones que la ejemplifican no están ligadas a la variación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Duval, R. (1992). Gráficas y ecuaciones. La articulación de dos registros. *Antología en Educación Matemática*. México: Cinvestav. IPN.
- Duval, R. (1999). *Semiosis y pensamiento humano. Registros semióticos y aprendizajes intelectuales*. Cali: Universidad del Valle, Instituto de Educación y Pedagogía.
- Duval, R. (2004). *Los problemas fundamentales en el aprendizaje de las matemáticas*. Cali: Universidad del Valle, Instituto de Educación y Pedagogía.
- Font, V. (2001). Expresiones simbólicas a partir de gráficas. El caso de la parábola. *Revista EMA*, 6(2), 180-200.
- Font, V. (2005). *Funciones y derivadas*, tomo II. Memorias XXI Coloquio Distrital de Matemáticas y Estadística. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Gutiérrez, S. & Parada, D. (2007). *Caracterización de tratamientos y conversiones: el caso de la función afín en el marco de las aplicaciones*. Tesis de maestría. Bogotá: Universidad Pedagógica Nacional.
- Guzmán, I. (1998). Registros de representación, el aprendizaje de nociones relativas a funciones: voces de estudiantes. *Relime*, 1(1), 5-21.
- Hiebert & Carpenter (1992). *Aprendizaje y enseñanza con comprensión*. H. Alfonso y P. Perry (trads.).
- Ruiz, L. (1993). *Concepciones de los alumnos de secundaria sobre la noción de función: análisis epistemológico y didáctico*. Tesis doctoral. Granada: Universidad de Granada.

EDUCACIÓN

Las redes organizacionales en la nueva forma de producción del conocimiento

MARÍA ANDREA TRUJILLO DÁVILA

Ingeniera sanitaria. Magíster en administración. Profesora e investigadora de la Facultad de Administración de la Universidad del Rosario. Estudiante del Doctorado en Administración de la Universidad de los Andes. maria.trujilloda@urosario.edu.co

ALEXANDER GUZMÁN VÁSQUEZ

Administrador de empresas. Magíster en administración. Estudiante del Doctorado en Administración de la Universidad de los Andes. ale-guzm@uniandes.edu.co

GISELE EUGENIA BECERRA PLAZA

Administradora de empresas. Magíster en administración. Decana de la Decanatura de Administración de la Escuela Colombiana de Ingeniería. gbecerra@escuelaing.edu.co

Artículo recibido: 11/05/2007
Evaluación par externo: 12/10/2007
Aprobado: 04/12/2007

Resumen

Bajo la nueva dinámica de la ciencia, ha surgido una nueva forma de producción del conocimiento. Reconociendo lo anterior, con este artículo se pretende dar respuesta al siguiente interrogante: ¿por qué ha cobrado importancia la conformación de redes organizacionales en la nueva forma de producción del conocimiento? Darle respuesta al interrogante permite evidenciar algunas razones para la conformación de redes organizacionales, como característica central del sistema de producción de conocimiento actual, escenario en el cual la creación de valor para el conjunto de empresas de la red, derivada de los procesos de innovación y desarrollo científico y tecnológico, constituye un factor clave para la competitividad de las organizaciones.

Palabras claves: producción del conocimiento, redes organizacionales, estructura social.

Abstract

Under the new dynamic of science, a new form to knowledge's production has arisen. Recognizing the previous statement, this article tries to give answer to the following question: Why has received importance the conformation of the organizational networks in the new form of knowledge's production? Giving answer to this question, allows demonstrating some reasons for the conformation of organizational networks as central characteristic of the present knowledge's production, scene in which, the creation of value for the set of companies within network, derived from innovations process, scientific and technological development, constitutes an important key for the competitiveness of the organizations.

Keywords: Knowledge's production, organizational networks, social structure.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo científico y tecnológico, como motor del crecimiento económico de un país, constituye uno de los principales aspectos que sustentan la dinámica de la ciencia y la investigación a escala mundial. Los propósitos que han emergido y que forman parte de las agendas actuales de los países que comparten esta visión, son fomentar el desarrollo científico y tecnológico, emprender proyectos de innovación y generar competitividad con base en el conocimiento científico, donde diversos actores, como gobierno, academia y sector empresarial, conjugan esfuerzos y definen compromisos para alcanzar estos propósitos. Bajo la nueva dinámica de la ciencia, ha surgido una forma de producción del conocimiento que ha complementado a la tradicional forma de hacerlo. En la forma tradicional, el conocimiento se concibe como un saber ordenado de manera lógica, con una estructura homogénea enmarcada dentro de un contexto disciplinar específico. Esta concepción del conocimiento ha cambiado en el sentido de que han emergido variedad de contextos transdisciplinarios, que han llevado a caracterizar nuevamente el tipo de conocimiento que se produce, la manera como se produce, el contexto en el que se produce, la forma en que está organizado, los incentivos utilizados y los mecanismos para realizar el control de calidad de dicha producción.

Bajo esta nueva forma de producir conocimiento, la relación entre las organizaciones tanto de carácter público como privado, de los sectores productivo, académico y gubernamental, ha cobrado vital importancia. Las redes organizacionales se convierten en escenarios para las empresas que buscan incorporar, dentro de sus procesos productivos y en el desarrollo de las ventajas competitivas, conocimiento de última generación. Lo anterior lleva a plantear el siguiente interrogante: ¿por qué ha cobrado importancia la conformación de redes organizacionales en la nueva forma de producción del conocimiento?

Darle respuesta al interrogante permite evidenciar algunas razones para la conformación de redes organizacionales como característica central del sistema de producción de conocimiento actual, escenario en el cual la creación de valor para el conjunto de empresas de la red, derivada de los procesos de innovación y desarrollo científico y tecnológico, constituye un factor clave para la competitividad de las organizaciones.

Este artículo se estructura haciendo, en primer lugar, una descripción de lo que se ha denominado la nueva forma de producción del conocimiento para contextualizar al lector acerca de la misma. En segundo lugar, se abordará el establecimiento de redes organizacionales como medio en la generación y distribución del conocimiento. En un tercer aparte, se describirá la nueva forma de comercializar el conocimiento, derivada de la manera como se produce el mismo. Posteriormente, se analizará el papel de la universidad en la nueva forma de producción y comercialización del conocimiento, y finalmente se concluirá respondiendo al interrogante central, articulando los planteamientos derivados del enfoque de redes en la producción del conocimiento y su relación con la ciencia, la tecnología y la sociedad.

NUEVO ESCENARIO EN LA PRODUCCIÓN DEL CONOCIMIENTO

Enmarcados dentro del fenómeno de la globalización, la importancia creciente del conocimiento como motor de desarrollo, el cambio tecnológico drástico y la revolución de la información y la comunicación, son los factores preponderantes en la determinación del grado de competitividad de un país en la economía mundial.

El objetivo de este aparte es presentar los principales aspectos expuestos en *La nueva producción del conocimiento. La dinámica de la ciencia y la investigación en las sociedades contemporáneas*, de Michael Gibbons *et al.* (1997). El documento referenciado representa el informe de un estudio realizado para el Banco Mundial, que se propuso mostrar el surgimiento de una nueva forma de producción del conocimiento. La revisión a estos planteamientos permitirá identificar las características con las cuales se desarrolla en la actualidad la producción de conocimiento.

Así, entonces, ante un entorno dinámico y competitivo, surge, como lo mencionan Gibbons *et al.* (1997), una nueva manera de producción del conocimiento, que en lugar de desplazar, ha complementado al tradicional modo de hacerlo. Se genera en esta forma una discusión reflexiva sobre el modo tradicional en la producción del conocimiento y las nuevas formas de producción del mismo. Con la primera denominación, la manera como se genera conocimiento se enmarca dentro de un contexto disciplinar fundamentalmente cognitivo, “un

complejo de ideas, métodos, valores y normas que ha crecido hasta controlar la difusión del modelo newtoniano a más ámbitos de investigación para asegurar su conformidad con lo que se considera una práctica sana” (Gibbons, 1997, p. 216). De un modo más explícito, esta categorización plantea problemas y soluciones en un contexto liderado por los intereses de quienes conforman la comunidad científica. Al mismo tiempo, el modo tradicional plantea una distinción entre lo que es fundamental y lo que es aplicado; ello implica, a su vez, una distinción operativa entre un núcleo teórico y otros ámbitos de conocimiento en los que las comprensiones teóricas se traducen en aplicaciones. En contraste con ello, la nueva forma de producción del conocimiento se encuentra en flujo permanente: entre lo fundamental y lo aplicado, entre lo teórico y lo práctico. Típicamente, el conocimiento se produce en contextos en los que se desarrolla para ser utilizado, mientras que los resultados (caracterizados tradicionalmente como aplicados) alimentan nuevos progresos teóricos.

Esta nueva manera de producir conocimiento ha abierto un amplio campo de interconexiones, gracias al número de lugares situados al margen de las estructuras disciplinares y de las instituciones en los que tiene lugar una investigación competente. La ciencia se configura en la sociedad y para la sociedad, en un proceso complejo y dinámico. El conjunto de problemas que la ciencia puede abordar es extenso y, por tanto, la agenda de la investigación no se puede comprender en términos meramente intelectuales. Los problemas intelectualmente desafiantes han propiciado un escenario en el cual los investigadores tienen que desarrollar habilidades en la consecución de recursos para la financiación de las investigaciones, hecho que se convierte en un indicador de éxito. Este nuevo enfoque le adiciona al investigador un camino estratégico para el ejercicio de sus labores. Muchos científicos se han convertido en empresarios que flexibilizan sus afiliaciones disciplinares y desarrollan creatividad para traducir sus propios intereses intelectuales en el lenguaje apropiado de otras agendas.

Con todo, no puede dejarse de lado que este cambio en la producción de conocimiento también es observable en el desarrollo tecnológico. La idea de que la tecnología es además una forma de conocimiento se ha visto oscurecida por la tangibilidad de sus artefactos. El conocimiento tecnológico, tanto tácito como codifica-

do, es el resultado de las decisiones y acciones tomadas por las comunidades de practicantes. Al igual que sucede en la ciencia, estas comunidades identifican problemas significativos, desarrollan métodos para abordarlos y aportan soluciones para gestionar la dinámica diaria de los procedimientos paradigmáticos.

Con el propósito de comprender mejor la importancia que ha tenido el cambio hacia una nueva forma de producir conocimiento, es apropiado presentar los principales atributos que caracterizan la nueva manera de producir conocimiento.

Contexto de aplicación

Gibbons (1997) destaca el funcionamiento de la nueva forma de producción del conocimiento dentro de un *contexto de aplicación*, en el cual el surgimiento de nuevos mercados conlleva situaciones sociales y problemáticas novedosas, que se deben enfrentar con medios cognoscitivos que trasciendan el modo tradicional. En este sentido, la ciencia ha ido un paso más allá del mercado y la producción del conocimiento, y se está difundiendo a través de la sociedad. Por ello se habla de un conocimiento socialmente distribuido. El contexto de aplicación en la nueva forma de producción del conocimiento lo constituye un mercado en el que la oferta es cada vez más diversa y las demandas de formas diferenciadas y especializadas de conocimiento son el común denominador. La compleja realidad del rápido desarrollo de las disciplinas, en la cual el conocimiento es sofisticado y ampliamente distribuido, trasciende el cálculo simple de una decisión de producir o comprar. Los adelantos en investigación demandan un rango de intelectualidad y habilidades científicas que exceden las capacidades de una empresa singular, como se puede apreciar en las investigaciones empíricas en empresas del sector biotecnológico (Powell, 1996, p. 117).

Transdisciplinariedad

La segunda característica de este nuevo modo es la *transdisciplinariedad*, en el sentido de que los problemas no se hallan encuadrados dentro de una estructura disciplinar y permiten ir más allá de las estructuras disciplinares que construyen la agenda intelectual, más allá de la manera en que se despliegan los recursos y de las formas en que

se organiza la investigación, se comunican y se evalúan los resultados. “(...) la transdisciplinariedad consiste en una vinculación y revinculación continua de agrupamientos y configuraciones específicas de conocimiento que se conjuntan (sic) temporalmente en contextos de aplicación específicos” (Gibbons, 1997, p. 45).

Heterogeneidad

Otro de los rasgos característicos que describen el nuevo escenario en la producción del conocimiento es la *heterogeneidad o diversidad organizativa*. La difusión del conocimiento a escala global ha convocado la participación de diversos actores y ha producido sentido de responsabilidad social, situación que establece diferencia respecto a la forma tradicional de generar conocimiento, en donde la responsabilidad de la producción, difusión y aplicación, en principio, reposa en los expertos reconocidos por la comunidad científica. Esta característica permite que el equipo dedicado a solucionar un problema cambie con el tiempo y las exigencias evolucionen; la no existencia de un cuerpo central que coordine brinda flexibilidad al grado de institucionalización para la generación del conocimiento, y permite así una mayor adaptación a los requerimientos del problema y del campo de aplicación. Respecto a la heterogeneidad de las formas organizativas, se resalta que la producción no está limitada a la producción efectuada por las universidades y facultades. Los institutos universitarios, centros de investigación, instituciones gubernamentales, laboratorios empresariales, equipos de reflexión y asesorías, multinacionales, así como su propia interacción a través del establecimiento de redes, son actores de esta nueva forma de producción del conocimiento.

Control de calidad

El control de calidad en la nueva forma de producir conocimiento ha suscitado cambios que amplían los criterios para considerar el valor y la pertinencia de lo que se produce. En este sentido, la calidad esté determinada por criterios más amplios, que reflejan la composición social del sistema de revisión. En la forma tradicional de producción del conocimiento, el control de calidad lo ejercen diferentes tipos de instituciones productoras de conocimiento, cada una de las cuales

posee sus propios límites, estructuras de aprendizaje y reglas de comportamiento (universidades, academias nacionales y sociedades profesionales). En la nueva forma de producción del conocimiento la figura de pares académicos se complementa con criterios más amplios de otros actores que reflejan la composición social del sistema de revisión. La ampliación de los criterios respecto a “producción de calidad” incluye aspectos como éstos: si se encuentra la solución, ¿será competitiva en el mercado? ¿Cuál es la relación costo-beneficio? ¿Será socialmente aceptable?

La revisión realizada en los párrafos anteriores a los planteamientos de Gibbons (1997) permite identificar cambios drásticos que se han presentado en la dinámica relacionada con la generación del conocimiento. Es evidente que diferentes actores deben intervenir para producir conocimiento aplicable, relacionado con la generación de riqueza, evaluado por su utilidad para la sociedad; para ello, el establecimiento de relaciones entre organizaciones se ha convertido, más que en una ventaja, en una necesidad. Mientras más competitivo resulta el sector al que pertenece la organización, más necesaria es la alianza con otras organizaciones para responder a las demandas del entorno. A continuación se abordarán planteamientos teóricos, los cuales justifican la conformación de redes organizacionales para la generación de conocimiento y aprendizaje empresarial.

REDES ORGANIZACIONALES EN LA PRODUCCIÓN DEL CONOCIMIENTO

La globalización y el desarrollo tecnológico han llevado a las organizaciones hacia la configuración de nuevas formas de cooperación, tales como las *redes organizacionales*. “Una red es un constructo relacional, en el cual las descripciones se basan en los conceptos de vínculos que unen actores que pueden ser personas, grupos, organizaciones o clústers de vínculos —así como de personas— en un sistema social” (Sanz, 2003, p. 25). Las empresas han desarrollado estas formas de organización, que les permiten responder a las exigencias del entorno y configurar formas más eficientes de interacción.

En esta sección se analizarán enfoques teóricos que abordan las redes desde la estructura social que representan y las ventajas derivadas de las mismas; enfoques

que conciben las redes como escenarios de aprendizaje y generación de conocimiento; y finalmente, se destacarán paradojas planteadas respecto a la conformación de las mismas.

Redes organizacionales como estructuras sociales

El factor fundamental que ha llevado a cambios en la forma de producción del conocimiento ha sido la vinculación de este último a la generación de riqueza. La aplicación del conocimiento es un factor que influye en el desempeño económico de las organizaciones hoy en día. La constitución de redes representa una acción que busca mejorar el desempeño económico, y generar escenarios de aprendizaje y crecimiento organizacional. En todo caso, los beneficios económicos y el aprendizaje alcanzado en estos escenarios los determina la dinámica social subyacente. Investigaciones realizadas desde la sociología económica han resaltado la trascendencia de la estructura social en el desempeño económico de las organizaciones. En la conformación de redes organizacionales, autores como Granovetter (1985) y Uzzi (1997) han destacado la importancia de considerar el enfoque social dentro de la perspectiva económica, comprendiendo que la acción económica no la realizan individuos dotados de una racionalidad que se superpone a cualquier otro tipo de racionalidad, sino actores inmersos en un denso tejido de relaciones sociales que orientan su comportamiento económico. Desde este enfoque, en el análisis de redes se describen y estudian las estructuras relacionales que surgen cuando diferentes organizaciones o individuos interactúan, se comunican, coinciden y colaboran a través de diversos procesos o acuerdos, que pueden ser bilaterales o multilaterales. De este modo, la estructura que emerge de la interrelación se traduce en la existencia de una *red social*.

Granovetter (1985), en su artículo "Economic Action and Social Structure: The Problem of Embeddedness", parte de la idea de que la principal debilidad del análisis económico es que omite la noción de la estructura social, al reducir a la sociedad a una mera suma de individuos. Este autor plantea que la acción económica está imbricada –*embedded*– en la estructura de las relaciones sociales en la sociedad industrial. El autor toma el concepto de imbricamiento de la escuela sustantivista en la antropología, identificada con Karl

Polani (1957). Este planteamiento teórico ha establecido un puente entre los acercamientos sociológicos y económicos a la teoría organizacional. Granovetter enfatiza la importancia de la confianza y su resultado, la cooperación, como característica de las relaciones interpersonales realizadas en el contexto de redes organizacionales. Por tanto, las redes, más que representar un conjunto de organizaciones que establecen relaciones buscando un beneficio económico, representan relaciones sociales, relaciones entre individuos que conllevan un conjunto de beneficios que no se pueden reducir simplemente a una dimensión económica. Estos beneficios se acentúan en la medida en que el imbricamiento de la red aumenta, es decir, en la medida en que la confianza y los lazos personales determinan las relaciones, y llevan a que las expectativas sean más predecibles y se reduzcan los costos de supervisión y monitoreo del entorno.

De acuerdo con Gibbons (1997), en la nueva forma de producción del conocimiento el conjunto de actores representa estructuras sociales en contextos de aplicación que permiten interacciones donde prevalece el interés de colaborar. La comunicación científica que vincula los lugares de producción del conocimiento se lleva a cabo a través de los flujos de científicos y de ideas científicas que se transmiten entre ellos. La densidad de comunicación entre los científicos se halla imbricada en la organización social de su trabajo (Gibbons, 1997, p. 56).

Brian Uzzi (1997) presenta los beneficios derivados del imbricamiento, los cuales fueron fruto de la investigación empírica realizada a través de un análisis de campo y etnográfico a 23 empresas del sector de confecciones de alta costura para mujeres, en la ciudad de Nueva York. Uzzi señala que en este escenario –caracterizado por un mercado competitivo ejemplar con intensa competencia internacional, miles de tiendas locales, bajas barreras de entrada y costos de investigación–, según la teoría económica, los nodos sociales deben cumplir un papel mínimo en la actuación económica (Uzzi, 1997, p. 38). Sin embargo, por medio de su estudio evidencia cómo la dinámica, desarrollada a través de la conformación de redes organizacionales para estas empresas, representó beneficios importantes en diferentes ámbitos.

De acuerdo con Uzzi, el *embeddedness* o imbricamiento de la red de organizaciones representa mejoras

trascendentales para las organizaciones en cuatro aspectos. En primer lugar, facilita la economía de tiempo y eficacia en la asignación de recursos. Gracias a la información más detallada de las relaciones imbricadas, en la medida en que la red establece este tipo de relaciones, logra economías de tiempo, cambio oportuno frente a demandas del entorno y eficiencia en la asignación de recursos. “El *embeddedness* ayuda a resolver problemas de asignación, permitiendo a las empresas emparejar el diseño de producto y los niveles de producción más estrechamente a las preferencias del consumidor que lo que es posible en un mercado atomizado, gobernado por el sistema del precio. Cuando el sistema del precio opera, hay un retraso entre la respuesta del mercado y los ajustes de productores” (Uzzi, 1997, p. 49). De esta manera, la participación en una red permite a la organización responder ante las exigencias de su entorno, por lo que la voluntad para colaborar surge de una necesidad de compartir conocimientos. Según Gibbons, “la intensificación de la competencia todavía supone la generación de nuevo conocimiento. Para satisfacer sus exigencias, las empresas necesitan participar en el proceso y están entrando en nuevas disposiciones de colaboración que tienen muchas de las características de la nueva forma de producir conocimiento” (Gibbons, 1997, p. 73).

En segundo lugar, el imbricamiento de las redes organizacionales ayuda a establecer acuerdos integradores. Debido a la limitación de socios de intercambio en el interior de la red, las relaciones imbricadas permiten limitar la búsqueda de oportunidades en el mercado y profundizar en la búsqueda de soluciones mutuas para los socios imbricados, facilitando el establecimiento de acuerdos integradores en lugar de acuerdos distributivos (suma cero). En tercer lugar, el imbricamiento permite mayor inversión y exposición mesurada al riesgo. El conocer los socios comerciales disminuye la incertidumbre de las inversiones y, por ende, la exposición al riesgo. Adicionalmente, menos recursos estarán comprometidos en las operaciones entre firmas. Y por último, el imbricamiento mejora la adaptación compleja y reduce la brecha existente entre los beneficios económicos percibidos por las organizaciones que integran la red. Las relaciones imbricadas a través de las redes aumentan la coordinación y facilitan la identificación de soluciones óptimas que mejoran la posición de ciertos actores, sin desmejorar la de otros.

Como se puede advertir en las líneas anteriores, las redes organizacionales representan escenarios en los cuales la confianza desarrollada y la calidad de los lazos personales generan beneficios para las organizaciones, traducidos en la respuesta oportuna ante exigencias del entorno, mejora en los acuerdos, disminución de la incertidumbre de la inversión y un beneficio mayor desde el punto de vista adaptativo y financiero. Sin embargo, un beneficio trascendental para el objeto de este artículo, no evidenciado explícitamente en la investigación de Uzzi, es la producción del conocimiento a través de estas redes. Según Gibbons, “La generación de investigación y desarrollo y de tecnología constituyen, especialmente, los principales temas de alianzas (entre organizaciones). Ello se explica por varias razones: el aumento de los costos en investigación y desarrollo, la búsqueda de interfecundación entre ámbitos de investigación y la necesidad de establecer estándares técnicos” (Gibbons, 1997, p. 157). Por consiguiente, a continuación se abordará el enfoque que considera la red como un escenario de aprendizaje y generación de conocimiento.

Redes organizacionales como escenarios de aprendizaje y generación de conocimiento

En el establecimiento de redes de organizaciones, se combinan habilidades individuales y colectivas de manera tal que la capacidad del grupo para innovar es más que la suma de sus partes. En el tiempo, a medida que los actores que conforman la red trabajan juntos en varios problemas dentro de contextos de aplicación específicos, aprenden sobre las habilidades de los demás. “Aprenden cómo pueden ayudarse los unos a los otros a rendir mejor, quién puede contribuir a qué en la resolución de un proyecto concreto, cuál es la mejor forma de ganar experiencia juntos” (Gibbons, 1997, p. 164). Cada participante dentro de la red se dedica a la búsqueda de ideas que impulsen el desarrollo del grupo de organizaciones, y cada punto de la red empresarial representa una combinación de habilidades, en donde el principal artículo que se intercambiará, y con el que se comerciará, será el conocimiento.

Este enfoque, desde el que se concibe la red como un escenario de aprendizaje colectivo y de generación de conocimiento, lo abordaron Koput, Powell y Smith-Doerr en su artículo “Interorganizational

Collaboration and the Locus of Innovation: Networks of Learning in Biotechnology”, publicado en 1996. Los hallazgos presentados en este artículo se derivan del estudio empírico realizado con 225 empresas biotecnológicas dedicadas al diagnóstico y terapia en humanos, cuyo propósito central era analizar las formas de colaboración interorganizacional que estructuran el aprendizaje.

Koput sostiene que cuando el conocimiento es ampliamente distribuido y brinda una ventaja competitiva, el *locus* de innovación está soportado en una red de relaciones interorganizacionales, más que en las firmas individuales. “Una red sirve como un *locus* de innovación porque ésta provee acceso en el tiempo al conocimiento y a recursos que están de cierta manera no disponibles, mientras que pone a prueba la experiencia interna y las capacidades de aprendizaje de las firmas” (Koput, 1996, p. 119). De lo anterior se entiende que en el proceso de conformación de redes, las relaciones externas que establece la organización no son un mecanismo temporal para compensar las capacidades que la empresa aún no domina, sino que ésta usa colaboraciones para extender todas sus competencias y busca desarrollar habilidades que le permitan aprender y ganar experiencia relacional con otros actores dentro de la red.

De igual manera, Koput señala que en la conformación de redes de aprendizaje y conocimiento, la confianza es un factor determinante en la dinámica de la misma. En el aprendizaje, como proceso de construcción social, “la creación del conocimiento ocurre en el contexto de una comunidad fluida, más que una comunidad con fronteras fuertes o estáticas. La forma de organización canónica, con rigidez burocrática, es un vehículo pobre para el aprendizaje. Las fuentes de innovación no residen exclusivamente en el interior de las firmas; no obstante, están soportadas comúnmente en las intersecciones entre firmas, universidades, laboratorios de investigación, proveedores y clientes” (Powell, 1990, citado por Koput, 1996, p. 118). Esta consideración se encuentra inmersa dentro de los determinantes de la nueva forma de producción del conocimiento que plantea Gibbons (1997), en la que la comercialización del conocimiento requiere frecuentemente el establecimiento de relaciones a largo plazo, donde el intercambio ocurre dentro de estas relaciones, como un aprendizaje común y un código compartido.

La participación en redes genera beneficios para las empresas al poner a disposición el conocimiento de las organizaciones como un bien colectivo. *El conocimiento facilita el uso de conocimiento*. El intercambio tecnológico efectivo necesita que la organización industrial tenga sus propios resultados básicos de investigación, para utilizarlo como un bien susceptible de intercambio. “La colaboración en investigación y desarrollo propicia la admisión a la red de información y se constituye en un medio para la comunicación rápida de noticias, oportunidades y obstáculos entre la red de organizaciones” (Koput, 1996, p. 120).

Según lo revisado hasta el momento, la conformación de redes ha facilitado los canales de comunicación para la divulgación científica y la existencia de distintas formas de movilidad ha posibilitado el intercambio de conocimiento. Aparentemente, los beneficios de participar en redes son de diferentes tipos, entre los cuales están mejores resultados financieros, capacidad de adaptación a las exigencias del entorno, reducción de los niveles de exposición al riesgo, mejores acuerdos, y la generación y apropiación del conocimiento en escenarios de aprendizaje colectivo. Sin embargo las redes, de manera paradójica, pueden traer desventajas para las organizaciones, lo que se abordará a continuación.

Paradojas de la conformación de redes organizacionales

Uzzi (1997) cuestiona si una empresa que está demasiado imbricada puede ver disminuida su capacidad de adaptación en la medida en que las relaciones comerciales están atadas a socios específicos. Además, se pregunta si la red perjudica la diversidad, en la medida en que las organizaciones integrantes adoptan prácticas similares, y el nivel concentrado de intercambio con sólo unos compañeros de la red reduce la información relevante y el acceso a nuevas oportunidades. Estos cuestionamientos conducen al planteamiento de proposiciones teóricas, bajo las cuales el autor sustenta posibles desventajas de la participación en redes organizacionales.

La participación en redes altamente imbricadas se convierte en una desventaja para las organizaciones en tres circunstancias. En primer lugar, la pérdida del *core* de una organización en una red tendrá un gran efecto negativo en la viabilidad de la red en conjunto. A manera

de ilustración, supóngase que se establece una red de investigación con diferentes grupos dedicados a un tema específico; si uno de estos grupos modifica su razón de ser cambiando su objeto de estudio, puede originar desventajas para los demás grupos integrantes de la red. Por otra parte, en la medida en que la pérdida del *core* se presente en una organización con alto nivel de conectividad y poder dentro de la red, es posible que la supervivencia de las organizaciones asociadas se ponga en riesgo. De acuerdo con Uzzi, “la intensidad de los efectos de la pérdida del *core* de una organización se incrementa con su tamaño y el nivel de imbricamiento en la red tal que, en el límite, un ‘efecto de extinción’ ocurrirá” (Uzzi, 1997, p. 58).

En segundo término, cambios institucionales pueden racionalizar el mercado, afectando los lazos imbricados establecidos y generando problemas para las empresas que basaron sus ventajas competitivas en esos lazos. Por ejemplo, la existencia de fuertes acuerdos entre productores agrícolas y un distribuidor mayorista garantiza al productor la venta de su cosecha, pero un cambio de propietario del mayorista puede modificar las relaciones o acuerdos previos, y llevar a la pérdida del acuerdo estratégico para el productor. Un agravante de esta situación lo puede constituir un nivel de inversión elevado en activos para satisfacer los requerimientos de la red.

En tercer lugar, cuando una red está sobreimbricada disminuye su potencial de actuación debido a la falta de ideas innovadoras proveniente de actores externos. Esta situación “(...) puede reducir el flujo de nueva información en la red porque los lazos redundantes a los mismos compañeros de la red significan que hay alguno o no hay ningún eslabón a miembros externos que pueden contribuir a las ideas innovadoras potencialmente (Burt, 1992, citado por Uzzi, 1997, p. 58). En una red demasiado imbricada, las ideas innovadoras para mejorar los resultados de investigaciones que buscan la generación de un conocimiento aplicable en las organizaciones pueden estar limitadas por la visión de los integrantes de la red y conducir a soluciones no óptimas.

Los planteamientos teóricos presentados hasta el momento esbozan cómo se configura el escenario en la nueva forma de producción del conocimiento, así como los rasgos característicos que le imprimen una nueva dinámica a la ciencia en términos de investigación y desarrollo. Al mismo tiempo se ha resaltado el

proceso de conformación de redes de organizaciones en la nueva forma de producción del conocimiento como mecanismo relacional y escenario para el aprendizaje, que advierte ventajas y desventajas en la búsqueda de propósitos colectivos. Así mismo se ha enfatizado en cómo la producción del conocimiento, bajo la nueva forma de producción del mismo, está directamente relacionada con la generación de riqueza. Esta característica fundamental de la nueva forma de producción del conocimiento ha implicado una nueva dinámica de comercialización. En el siguiente aparte se realizará una revisión al proceso de comercialización que ha tenido esta nueva forma, según los planteamientos de Michael Gibbons (1997).

COMERCIALIZACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DEL CONOCIMIENTO

A causa de los vínculos específicos entre la investigación y la creación de riqueza en la nueva forma de producción del conocimiento, la competencia desempeña un papel clave en el mercado del mismo e implica un balance entre las actividades de rivalidad y cooperación que se presentan entre las empresas, y la selección de estrategias de especialización y diferenciación que permitan alcanzar una alta rentabilidad empresarial, basada en la generación de conocimiento. Para entender la nueva dinámica de comercialización del conocimiento, es necesario trabajar los siguientes temas: la distribución de los resultados de la investigación, la competencia y el cambio de economías de escala a economías de alcance en la producción del conocimiento.

En primer lugar, se abordará la *distribución de los resultados de la investigación*. A pesar de las grandes inversiones requeridas por los laboratorios universitarios y gubernamentales, hasta el momento —y con contadas excepciones— se han realizado pocos esfuerzos en la distribución del conocimiento por parte de estas entidades. Tradicionalmente, las universidades e instituciones de gobiernos dedicadas a la producción del conocimiento permanecieron apartadas del mercado y no existían motivaciones suficientes para buscar la difusión del conocimiento desarrollado. Sólo los cambios en las configuraciones del mercado del conocimiento han llevado a estas instituciones a preocuparse por identificar clientes potenciales para vender el conocimiento generado y obtener fuentes adicionales de dinero.

En los programas de investigación y desarrollo de Estados Unidos y la Unión Europea se ha buscado vincular el sector académico y el productivo. Las iniciativas al respecto provienen mayoritariamente del sector privado, a través del establecimiento de relaciones bilaterales, buscando afrontar los altos costos relacionados con los procesos de desarrollo de conocimiento. Este incremento paulatino en los costos de investigación ha ocasionado la necesidad de vincular la generación del conocimiento con la creación de riqueza.

La intensa competencia internacional está obligando a las naciones a reconsiderar la función de sus inversiones en ciencia y tecnología y busca generar impactos económicos, y a las empresas a ser participantes más activos en la producción del conocimiento. Además, pretende mejorar los procesos productivos, la capacidad de innovación y la capacidad de respuesta, ante las diferentes configuraciones del entorno.

En segundo lugar, al analizar la *competencia en la producción del conocimiento*, se observa cómo las organizaciones se esfuerzan por ser diferentes; para sobrevivir, las empresas se tienen que diferenciar y se deben especializar. La especialización determina la base de conocimientos que debe desarrollar una empresa, de tal modo que soporte la creatividad para asegurar la supervivencia y el crecimiento. El campo de especialización escogido por una compañía se refleja en lo que produce. Por tanto, la especialización determina los núcleos alrededor de los cuales se organiza la competencia. Al tratar de establecer su campo de especialización, las empresas adoptan un comportamiento de rivalidad. Si logran determinar una especialización y producción de bienes y servicios que se acoplen de manera más acertada con el mercado que sus competidores, su rendimiento se mantiene por un amplio período de tiempo.

A medida que los mercados se segmentan y demandan soluciones técnicamente sofisticadas, las empresas tienen que participar más directamente en la producción del conocimiento, lo que supone participación en un esfuerzo de colaboración más amplio, debido a los altos costos asociados a la investigación y la capacidad limitada de la empresa en la generación de conocimiento. La competencia dinámica, y específicamente el cambio tecnológico acelerado, ha llevado a que el comportamiento de los competidores se modifique de manera constante y dependa cada vez más de los lazos de colaboración.

La investigación dentro de la propia compañía ya no es suficiente para hacerla prosperar, por lo que el conocimiento especializado se debe obtener a partir de una gama de fuentes más amplia. Este esfuerzo de colaboración socava los esfuerzos por apoderarse de segmentos de mercado. Así pues, mantener un equilibrio entre colaboración y rivalidad se ha convertido en un desafío fundamental.

Funcionar en el nuevo ambiente competitivo significa trabajar con regímenes de producción de conocimiento basados tanto en la competencia como en la colaboración, y en la incesante reconfiguración de recursos, conocimientos y habilidades. En último término, el éxito de la empresa dependerá de su creatividad y de la infraestructura de la que se haya dotado en respuesta a la demanda del mercado (Gibbons, 1997, p. 68). Esta adaptación ante las nuevas configuraciones del entorno empresarial ha implicado cambios en la estrategia de las compañías, complementando las economías de escala con economías de alcance.

Finalmente, se abordará este cambio de *economías de escala a economías de alcance en la producción del conocimiento*. La organización de la actividad empresarial alrededor de tecnologías capaces de ofrecer aumentos de productividad ha estado guiada por la búsqueda continua de economías de escala, y el enfrentamiento repetido con la imitación. Cuando la imitación representa una amenaza, la innovación se presenta como una estrategia para expandir el potencial de la especialización escogida por la empresa. La búsqueda de innovaciones no imitables, dependientes del conocimiento, está ocurriendo hoy en día en el ámbito empresarial. Los negocios, basados en el conocimiento, son altamente rentables gracias a su capacidad para configurar el conocimiento y la voluntad de sus clientes para pagar más por aquellos servicios que satisfagan sus necesidades. “De un modo creciente, cada vez se obtienen menos beneficios de las fuentes tradicionales: la tierra, el capital y el trabajo. Los principales productores de riqueza son la información y el conocimiento” (Drucker, 1993, citado por Gibbons, 1997, p. 80).

Por consiguiente, se ha producido un desplazamiento desde la búsqueda de economías de escala hacia la búsqueda de economías de alcance. Estas economías se derivan de la habilidad de las empresas para configurar sus recursos humanos y, particularmente, el conocimiento, de modo novedoso para ajustarse a

demandas específicas del mercado. Las economías de alcance están relacionadas con la producción específica de conocimiento para satisfacer necesidades específicas de nichos de mercado, garantizando así la rentabilidad de la empresa.

De acuerdo con lo planteado anteriormente, puede decirse que el mercado para el conocimiento es ahora mucho más amplio y diferenciado de lo que había sido históricamente. Ello se debe, en parte, a las dinámicas competitivas en el ámbito empresarial y al crecimiento del número de personas que se han calificado en alguna disciplina científica o técnica, y que han recibido formación en los métodos de investigación empírica. En términos generales, tales individuos tratan de resolver problemas utilizando las estructuras y los métodos que se les han enseñado, así como las fuentes de información con las que ya se han familiarizado. La creciente comercialización de la ciencia se debe al hecho de que quienes poseen habilidades específicas están dispuestos a reunirse, incluso en equipos multidisciplinarios temporales, para trabajar en la solución de problemas difíciles y desafiantes (Gibbons, 1997, p. 69).

Las firmas constituyen alianzas a través de la conformación de redes de organizaciones con universidades, instituciones gubernamentales y otras empresas para la generación de conocimiento. La vida de las instituciones universitarias ha cambiado en la medida en que la producción y la comercialización del conocimiento han adquirido nuevas dinámicas. A continuación, se plantean algunas precisiones en relación con esto.

LA UNIVERSIDAD Y LA NUEVA FORMA DE PRODUCCIÓN DEL CONOCIMIENTO

Según Michael Gibbons, en la década de la posguerra el incremento explosivo en la inversión dedicada a actividades de investigación y desarrollo se convirtió en un inductor de cambio institucional para las universidades. El carácter monopolístico que caracterizaba a las universidades en la producción de conocimiento les proporcionaba cierta resistencia ante el cambio. Sin embargo, la participación de nuevos actores en la nueva forma de producción del conocimiento ha propiciado una redistribución del poder en la generación del mismo, donde las universidades dejan de ser monopolio debido a la entrada de otros actores provenientes del sector productivo, laboratorios, instituciones gubernamentales, entre otros.

Cambios en el entorno para las universidades en términos de masificación de la educación superior, acceso a recursos de financiación, incremento en los costos en investigación y desarrollo, se asumieron acertadamente con el aumento de la oferta de servicios por parte de las universidades. Las condiciones han cambiado en tal grado, que el incremento en el número de programas ofrecidos o estudiantes matriculados no satisface adecuadamente las demandas de presiones cada vez más intensas. Las instituciones universitarias, reconocidas por su carácter tradicionalista, afrontan un desafío representado en la capacidad de conservar su identidad y a la vez responder ante la nueva configuración de las condiciones del entorno. “¿Pueden adaptarse las viejas y las nuevas universidades a las nuevas demandas y condiciones? ¿Y qué aspecto tendría una adaptación llevada a cabo con éxito” (Gibbons, 1997, p. 196). Estos cuestionamientos representan la preocupación central de las universidades ante las exigencias impuestas por la nueva forma de producción del conocimiento. En palabras de Gibbons, las universidades sí pueden adaptarse a las nuevas demandas “a través de más cambio y diversificación tanto de la forma como de la función, y del abandono de su posición de monopolio en el mundo de la producción del conocimiento” (Gibbons, 1997, p. 197). La universidad representa un actor en relación con otros actores, en lo que se convierte cada vez más en un sistema distribuido de conocimiento.

La universidad ha comprendido la necesidad de vincularse al sector empresarial, debido a la nueva dinámica de comercialización del conocimiento. La generación de conocimiento aplicado se convierte en un factor determinante para la consecución de recursos y la financiación de los programas de investigación universitarios. “La vinculación entre academia y empresa puede considerarse una línea o eje de acción a través del cual las instituciones involucradas tienden a transformarse y adecuarse a las nuevas condiciones imperantes bajo la economía globalizada. (Puede entenderse) la vinculación como un eje de transformación fundamental en las instituciones académicas para su adecuación a las actuales condiciones de desarrollo que establece la economía globalizada. La vinculación se convierte en un medio para que el conocimiento adquiera su valor comercial, para que sea recuperado como recurso fundamental del desarrollo económico” (Gutiérrez, 2004,

p. 80). Aunque algunas instituciones universitarias continúan aferradas a la tradición y el modo clásico de producción del conocimiento, otras han buscado que sus miembros y unidades académicas participen en redes mundiales, propias de la nueva forma de producción del conocimiento.

La preocupación por la capacidad de adaptación de las universidades ante las nuevas exigencias del entorno puede explicarse retomando brevemente planteamientos expuestos bajo la ecología poblacional de las organizaciones. La mayor parte de los análisis realizados sobre las relaciones de las organizaciones con sus entornos toman como unidad de análisis una sola organización afrontando un entorno. La propuesta que presentan Hannan y Freeman (1997), desde ecología poblacional de las organizaciones, es considerar como foco de análisis las relaciones existentes entre poblaciones de organizaciones con diferentes entornos. El término población de organizaciones se utiliza para referirse a agregados de organizaciones antes que de miembros, que se encuentran dentro de una frontera particular y tienen un modo común, entendido como la forma organizacional. El concepto de población se toma desde la ecología (Hannan y Freeman, 1997, p. 934).

Hannan y Freeman (1997) mencionan que la teoría organizacional ha basado sus estudios en un enfoque adaptativo, lo cual, sin ser impreciso, resulta limitado al momento de analizar las relaciones de poblaciones organizacionales y el entorno. La perspectiva adaptativa hace referencia a que las unidades de una organización exploran el entorno relevante por oportunidades y amenazas, formulando respuestas estratégicas y ajustando su estructura organizacional. Sin embargo, existen limitaciones en la habilidad de adaptación de las organizaciones debido a la existencia de procesos que generan *inercia estructural*¹. Las presiones inerciales emergen de los acuerdos estructurales internos y las restricciones medioambientales. Es decir, en el interior y en el exterior de la organización se presentan ciertas restricciones que limitan la capacidad de adaptación de la misma. Una de las principales restricciones en el proceso de adaptación está relacionada con las características *core*, las cuales son difíciles y costosas de modificar

ante variaciones del entorno (Carroll y Hannan, 1995, p. 27). Por lo anterior, la perspectiva adaptativa se debe complementar por una orientación hacia el *proceso de selección realizado por el entorno*. Los procesos de selección son importantes cuando las presiones inerciales son tan fuertes que impiden que la empresa cambie de forma organizacional. El concepto clásico de selección natural afirma que las condiciones de un medio ambiente favorecen o dificultan (seleccionan) la supervivencia o reproducción de los organismos vivos, de acuerdo con sus peculiaridades.

Según lo anterior, las universidades están llamadas a evaluar el papel que ejercen en la sociedad, trabajando en contra de la inercia estructural propia de su tradición, adaptándose ante las exigencias del entorno para salvaguardar su existencia. En busca de ello, la participación en redes colaborativas, la generación de conocimiento vinculado a la generación de riqueza, la capacidad para buscar respuestas ante problemas del sector productivo, entre otras, son acciones que deben desarrollar las instituciones de educación superior. Entender que el monopolio en la generación del conocimiento se ha perdido, reconocer los nuevos actores y establecer relaciones colaborativas con ellos, permitirá que la universidad mantenga el estatus que la sociedad le ha conferido.

CONCLUSIONES

La transdisciplinariedad, heterogeneidad, crecimiento y control de calidad, como características esenciales de la nueva forma de producción del conocimiento, han impactado las concepciones tradicionales acerca de producir conocimiento.

El aumento en masa de la educación superior, llevada a cabo después de la segunda guerra mundial, condujo a que las universidades apropiaran las funciones de investigación, formando profesionales especialistas en disciplinas particulares. Sin embargo, los cambios en la configuración del entorno han llevado a que la producción del conocimiento ya no sólo se genere en las universidades. Los laboratorios de empresas, industria, y gobierno han apropiado funciones con carácter científico y de investigación para producir conocimiento.

La necesidad de adaptación institucional a los contextos en los cuales se produce conocimiento ha

1. La posibilidad de que la estructura organizacional contenga un gran componente inercial la sugirieron Burns y Stalker (1961) y Stinchcombe (1965).

llamado la atención de los gobiernos en la definición y adecuación de políticas. Las nuevas políticas gubernamentales buscan dirigir el cambio que permita a las naciones actuar de manera competitiva, produciendo integración entre la educación, la ciencia, la tecnología, y la generación de riqueza, para constituir una política de innovación global que sea sensible al hecho de que la producción del conocimiento esté socialmente distribuida.

Considerando los atributos propios de la nueva forma de producción del conocimiento, éste puede caracterizarse como un proceso dinámico que responde a los requerimientos del entorno. Esta producción ha tenido un crecimiento acelerado, apalancado en los sistemas de información y comunicación que el desarrollo tecnológico ha propulsado. Esta comunicación es demandada tanto por la comunidad de expertos científicos y técnicos, como por el público atento, y entre los mismos practicantes científicos. Lo valioso de estas interconexiones y redes de difusión es que se ha establecido un diálogo positivo entre la academia y el sector empresarial, en la medida en que las viejas líneas de demarcación se hacen cada vez más permeables, permitiendo la difusión de las nuevas formas de producir conocimiento.

Las redes cumplen un papel central en este escenario. Investigaciones realizadas tanto desde un enfoque sociológico como organizacional han demostrado que la organización en red permite a sus participantes aprender nuevas habilidades o adquirir *conocimiento*, gracias a la rápida transferencia de información entre las organizaciones participantes, y la producción de información novedosa y distinta de la existente en cada una de las organizaciones de manera aislada. En segundo término, la participación en redes permite a las organizaciones ganar *legitimidad*, en la medida en que la afiliación permite el incremento del valor de la firma en el mercado, merced a la percepción positiva de los inversionistas sobre el actuar de la organización. En tercer lugar, las organizaciones alcanzan *beneficios económicos* gracias a la disminución de los costos relacionados con las labores de investigación, la capacidad de respuesta oportuna ante las exigencias de los clientes y la reducción del

riesgo en las inversiones realizadas para el desarrollo del objeto social. Finalmente, la participación en red permite a las organizaciones administrar la *dependencia de recursos*, estableciendo acuerdos con organizaciones que están en capacidad de facilitar el acceso a determinados recursos de trascendencia para la organización participante (Podolny, 1998, p. 62).

Las razones anteriormente mencionadas permiten evidenciar razones por las cuales ha cobrado importancia la conformación de redes organizacionales en la nueva forma de producción del conocimiento. En la dinámica de conformación de redes, los procesos de innovación y aprendizaje son factores claves para garantizar la capacidad de adaptación de las organizaciones a las exigencias del entorno. Sin embargo, y para terminar, es esencial recordar que la conformación de redes puede generar, paradójicamente, desventajas para las organizaciones, que se deben valorar y administrar evitando efectos negativos en las alianzas interinstitucionales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Carroll, G.; Hannan, M.T. (eds.). (1995). *Organizations and Industry: Strategy, Structure and Selection*. Oxford: Oxford University Press.
- Gibbons, Michael et al. (1997). *La nueva producción del conocimiento. La dinámica de la ciencia y la investigación en las sociedades contemporáneas*. José M. Pomares (trad.). Barcelona: Ediciones Pomares Corredor, 235 pp.
- Granovetter, M. (1985). Economic Action and Social Structure: The Problem of Embeddedness, en *The American Journal of Sociology*, vol. 91, N° 3, November.
- Gutiérrez, N. (2004). La vinculación en el ámbito científico tecnológico de México, en *Revista Latinoamericana de Estudios Educativos*, vol. XXXIV, N° 2. México: Distrito Federal, pp. 47-94.
- Hannan, M.T. & Freeman, J. (1977). The population ecology of organizations, en *American Journal of Sociology*, 82, pp. 929-964.
- Uzzi, B. (1997). Social Structure and Competition in Interfirm Networks: The Paradox of Embeddedness, en *Administrative Science Quarterly*, vol. 42, N° 1. March.
- Koput, K.; Powell, W. & Smith-Doerr, L. (1996). Interorganizational Collaboration and the Locus of Innovation: Networks of Learning in Biotechnology, en *Administrative Science Quarterly*, vol. 41, N° 1. March.
- Podolny, J. et al. (1998). *Network forms of Organization Annual Review Sociological*. Graduate School of Business. California: Stanford University, vol. 24, pp. 57-76.
- Sanz, Luis M. (2003). Análisis de redes sociales: o cómo representar las estructuras sociales subyacentes, en *Apuntes de Ciencia y Tecnología*, N° 7. Madrid: Unidad de Políticas Comparadas, Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

AUTORES EN ESTE NÚMERO

DANIEL RUIZ VALENCIA

Ingeniero civil y M.Sc. en Estructuras y Sísmica. Jefe del Laboratorio de Pruebas y Ensayos. Profesor asistente e investigador del grupo Estructuras del Departamento de Ingeniería Civil de la Pontificia Universidad Javeriana. daniel.ruiz@javeriana.edu.co.

HERMES VACCA GÁMEZ

Ingeniero civil y especialista en Geotecnia Vial y Pavimentos. Ingeniero del Laboratorio de Pruebas y Ensayos. Profesor instructor e investigador de los grupos Estructuras y Cecata del Departamento de Ingeniería Civil de la Pontificia Universidad Javeriana. vacca@javeriana.edu.co.

MARÍA LEÓN NEIRA

Ingeniera civil y M.Sc. en Infraestructura Vial y Pavimentos. Ingeniera de calidad del Laboratorio de Pruebas y Ensayos. Profesora instructora e investigadora de los grupos Estructuras y Cecata del Departamento de Ingeniería Civil de la Pontificia Universidad Javeriana. mpleon@javeriana.edu.co.

GIOVANNI GARCÍA LEÓN

Ingeniero civil, estudiante de la Especialización en Estructuras de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

JUAN ALBORNOZ

Ingeniero de sistemas de la Universidad de los Andes. Profesor de la Escuela Colombiana de Ingeniería. jalborno@escuelaing.edu.co.

RAÚL CHAPARRO

Licenciado en Matemáticas de la Universidad Pedagógica Nacional y Magíster en Matemáticas y en Ingeniería de Sistemas de la Universidad Nacional. Profesor de la Escuela Colombiana de Ingeniería. rchaparr@escuelaing.edu.co.

CÉSAR A. CASTELLANOS G.

Ingeniero electrónico de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas y físico de la Universidad Nacional. Profesor de la Decanatura de Ingeniería Electrónica y de la Dirección de Ciencias Básicas de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. ccastell@escuelaing.edu.co.

SANTIAGO AGUIRRE MAYORGA

Ingeniero industrial de la Pontificia Universidad Javeriana. Magíster en Ingeniería Industrial de la Universidad de los Andes. Profesor asistente del Departamento de Procesos Productivos de la Pontificia Universidad Javeriana. saguirre@javeriana.edu.co.

CARLOS EDUARDO FÚQUENE RETAMOSO

Ingeniero industrial de la Pontificia Universidad Javeriana. Máster en Gestión Ambiental de Portland State University. Profesor asistente del Departamento de Procesos Productivos de la Pontificia Universidad Javeriana. cfuquene@javeriana.edu.co.

LUZ ANGÉLICA RODRÍGUEZ BELLO

Ingeniera industrial, M.Sc. en Gestión y Políticas Ambientales del IIIIEE de la Universidad de Lund (Suecia). Especialista en Informática Industrial y en Aseguramiento de la Calidad. Docente en pregrado y posgrado y directora del Centro de Estudios en Sistemas de Gestión de la Escuela Colombiana de Ingeniería. Experiencia en la implementación de sistemas de gestión de calidad y gestión ambiental, con énfasis en desarrollo sostenible. larodrig@escuelaing.edu.co.

SANDRA ISABEL GUTIÉRREZ OTÁLORA

Licenciada en matemáticas de la Universidad Pedagógica Nacional. Ingeniera civil y profesora asistente de la Escuela Colombiana de Ingeniería. Magíster en docencia de las matemáticas de la Universidad Pedagógica Nacional. sgutierr@escuelaing.edu.co.

MARÍA ANDREA TRUJILLO DÁVILA

Ingeniera sanitaria. Magíster en administración. Profesora e investigadora de la Facultad de Administración de la Universidad del Rosario. Estudiante del Doctorado en Administración de la Universidad de los Andes. maria.trujilloda@urosario.edu.co.

ALEXANDER GUZMÁN VÁSQUEZ

Administrador de empresas. Magíster en administración. Estudiante del Doctorado en Administración de la Universidad de los Andes. ale-guzm@uniandes.edu.co.

GISELE EUGENIA BECERRA PLAZA

Administradora de empresas. Magíster en administración. Decana de la Decanatura de Administración de la Escuela Colombiana de Ingeniería. gbecerra@escuelaing.edu.co.

EVALUADORES PARA ESTE NÚMERO

CARLOS ALBERTO RODRÍGUEZ FLÓREZ

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

PEDRO THERÁN CABELLO

Ingeniero civil. Especialista en estructuras y diseño de estructuras de hormigón. Profesor de tiempo completo del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad del Norte.

ÓSCAR MIGUEL ALONSO MORENO

Ingeniero de sistemas, candidato a máster. Docente auxiliar de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia.

ÁNGEL LEÓN GONZÁLEZ ARIZA

Ingeniero industrial, magíster en administración de empresas y doctor en ingeniería industrial. Profesor de tiempo completo del Departamento de Ingeniería Industrial de la Universidad del Norte.

CARLOS ANDRÉS OSORIO TORO

Ingeniero industrial y magíster en ingeniería industrial. Profesor de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia.

CARLOS MARIO JARAMILLO LÓPEZ

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