

2015-06-01

Mejoramiento de la calidad de la potencia activa de un parque eólico empleando sistemas almacenadores de energía

Carlos David Zuluaga Ríos

Universidad Tecnológica de Pereira, cardazu@utp.edu.co

Andrés David Pinto Ríos

Universidad Tecnológica de Pereira, adpinto@utp.edu.co

Alejandro Garcés Ruiz

Universidad Tecnológica de Pereira, alejandro.garces@utp.edu.co

Follow this and additional works at: <https://ciencia.lasalle.edu.co/ep>

Citación recomendada

Zuluaga Ríos, Carlos David; Pinto Ríos, Andrés David; and Garcés Ruiz, Alejandro (2015) "Mejoramiento de la calidad de la potencia activa de un parque eólico empleando sistemas almacenadores de energía," *Épsilon*: Iss. 24 , Article 2.

Disponible en:

This Artículos de investigación is brought to you for free and open access by the Revistas descontinuas at Ciencia Unisalle. It has been accepted for inclusion in Épsilon by an authorized editor of Ciencia Unisalle. For more information, please contact ciencia@lasalle.edu.co.

Mejoramiento de la calidad de la potencia activa de un parque eólico empleando sistemas almacenadores de energía

CARLOS DAVID ZULUAGA RÍOS¹

ANDRÉS DAVID PINTO RÍOS²

ALEJANDRO GARCÉS RUIZ³

RESUMEN

Dentro de las energías renovables, la eólica se ha convertido en la fuente de mayor participación en el ámbito mundial. Uno de los inconvenientes que presenta esta energía limpia son las fluctuaciones en los flujos de potencia en las salidas de los centros de generación eólica, debido a la naturaleza estocástica del viento, lo cual causa impactos negativos que afectan la confiabilidad de los sistemas de potencia. Una manera de mitigar estas fluctuaciones es usar sistemas almacenadores de energía (ESS) basados en *flywheel*. Dentro de los elementos de operación de los ESS existen módulos de control que se encargan de regular la potencia activa entregada por los parques eólicos; son los estabilizadores de potencia activa. Este estudio presenta tres tipos de estabilizadores: uno basado en la potencia promedio entregada por estos centros de generación y en la energía del ESS; otro que funciona mediante una potencia de referencia y la energía del ESS; por último, un enfoque que utiliza una potencia de referencia y un controlador proporcional-integral (PI) para calcular la energía del ESS. Una vez obtenida esta energía, se procede a determinar la velocidad de giro del ESS. Para analizar el desempeño de los estabilizadores de potencia, se calculó la potencia promedio y la desviación estándar de la potencia entregada al sistema de potencia.

Palabras clave: controladores PI, estabilizadores de potencia, parque eólico, sistemas almacenadores de energía, sistemas de potencia.

¹ Estudiante de Doctorado en Ingeniería, magíster en Ingeniería Eléctrica e ingeniero electricista por la Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia. Correo electrónico: cardazu@utp.edu.co

² Candidato a magíster en Ingeniería Eléctrica e ingeniero electricista por la Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia. Correo electrónico: adpinto@utp.edu.co

³ Doctor en Ingeniería por la Universidad Noruega de Ciencia y Tecnología, Trondheim, Noruega; magíster en Ingeniería Eléctrica e ingeniero electricista por la Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia. Correo electrónico: alejandro.garcés@utp.edu.co

FECHA DE RECEPCIÓN: 29 JUNIO DEL 2014 • FECHA DE APROBACIÓN: 26 DE NOVIEMBRE DEL 2014

Cómo citar este artículo: Zuluaga Ríos, C. D., Pinto Ríos, A. D. y Garcés Ruiz, A. (2015). Mejoramiento de la calidad de la potencia activa de un parque eólico empleando sistemas almacenadores de energía. *Épsilon*, 24, 11-30.

Improving the Active Power Quality of a Wind Farm Using Energy Storage Systems

ABSTRACT

Among renewables, wind power has become the source of greater participation at global level. One of the disadvantages of this clean energy are the fluctuations in power flows at the wind generation center outputs, due to the stochastic nature of the wind, which causes negative impacts that affect the reliability of power systems. One way to mitigate these fluctuations is to use flywheel energy storage systems (ESS). In the operating elements of ESS there are control modules responsible for regulating the active power delivered by wind farms, that is, the active power stabilizers. This study presents three types of stabilizers: the first one is based on the average power delivered by these generation centers and on the ESS power; the second one works through a reference power and the ESS power, and the third one uses a reference power and a proportional-integral (PI) controller to calculate the ESS power. After this energy is obtained, the rotational speed of the ESS is determined. In order to analyze the performance of power stabilizers, the average power and the standard deviation of the power delivered to the power system is calculated.

Keywords: PI controllers, power stabilizers, wind farms, energy storage systems, power systems.

Melhoramento da qualidade da potência ativa de um parque eólico empregando sistemas armazenadores de energia

RESUMO

Dentro das energias renováveis, a energia eólica tem se tornado a fonte de maior participação no âmbito mundial. Um dos inconvenientes que esta energia limpa apresenta são as flutuações nos fluxos de potência nas saídas dos centros de geração eólica, devido à natureza estocástica do vento, o que causa impactos negativos que afetam a confiabilidade dos sistemas de potência. Uma maneira de mitigar estas flutuações é usar sistemas armazenadores de energia (ESS) baseados em *flywheel*. Dentro dos elementos de operação dos ESS existem módulos de controle que se encarregam de regular a potência ativa entregue pelos parques eólicos; são os estabilizadores de potência ativa. Este estudo apresenta três tipos de estabilizadores: um baseado na potência média entregue por estes centros de geração e na energia do ESS; outro que funciona mediante uma potência de referência e a energia do ESS, e um enfoque que utiliza uma potência de referência e um controlador proporcional-integral (PI) para calcular a energia do ESS. Depois de que se obtenha esta energia, se procede a determinar a velocidade de giro do ESS. Para analisar o desempenho dos estabilizadores de potência, se calculou a potência média e o desvio padrão da potência entregue ao sistema de potência.

Palavras chave: controladores PI, estabilizadores de potência, parque eólico, sistemas armazenadores de energia, sistemas de potência.

Introducción

La energía eléctrica es una componente clave para el desarrollo de cualquier país. Esta energía comprende muchos otros elementos importantes para transportarla desde los centros de generación hasta los de consumo. Los centros de generación existentes transforman una energía primaria en energía eléctrica. En la actualidad, en las fuentes de energía primarias convencionales hay recursos que aún dependen de combustibles fósiles, los cuales hacen mucho daño al medioambiente. Este es el caso, por ejemplo, de la energía térmica, que emite gases tóxicos que contaminan en grandes cantidades la capa de ozono. Otros tipos de fuentes de energías primarias son las energías renovables, las cuales se han incorporado a los sistemas de potencia de manera considerable.

En este contexto, una de las energías limpias con alta penetración es la eólica. La introducción de esta en los sistemas de potencia ha implicado analizar y estudiar con mayor intensidad las etapas de control y operación de estos sistemas (Georgilakis, 2008), ya que esta energía es de naturaleza estocástica, debido a la variabilidad del viento. Este comportamiento estocástico del viento hace que se presenten fluctuaciones en los flujos potencia, lo cual causa diferentes impactos que pueden afectar la operación y el análisis de los sistemas de potencia (Suvire *et al.*, 2012).

Con el fin de compensar estas fluctuaciones de potencia, una posible solución es el uso de sistemas almacenadores de energía (ESS, por sus siglas en inglés). En la actualidad existen muchos trabajos que aplican este tipo de sistemas a los sistemas de potencia. Por ejemplo, Suvire *et al.* (2012) han usado una *flywheel* como sistema de almacenamiento de energía, para mitigar los problemas introducidos por la generación eólica en las microrredes. Qu y Qiao (2011) plantean un supercondensador que ha sido usado con un generador doblemente alimentado, para suavizar las variaciones de la potencia generada a través del viento.

Por su parte, Cimuca *et al.* (2010) usan un superconductor magnético para la estabilización y el control del flujo de potencia en microrredes, en el cual se incorpora la generación eólica. Zeng *et al.* (2006) presentan el uso de baterías como ESS para mitigar el efecto de las variaciones de potencia en sistemas con generación eólica. En el mismo año, Cimuca *et al.* (2006) usaron una *flywheel* conectada a un generador eólico a través de un convertidor, con el fin de evaluar la capacidad para participar en servicios secundarios.

Todos estos trabajos muestran la importancia de los ESS para mitigar problemas introducidos por los centros de generación eólica; sin embargo, muy pocos trabajos proponen metodologías para la estabilización del flujo de potencia activa. Suvire *et al.* (2012) proponen un estabilizador basado en lógica difusa, específicamente un sistema de inferencia difusa, con el objetivo de controlar la potencia activa de la *flywheel* para seguir las fluctuaciones de la potencia entregada por los generadores eólicos. Estos sistemas difusos son una herramienta adecuada para realizar el control de sistemas, pero tal enfoque se basa en principios o reglas para realizar el control, lo que conlleva una etapa de entrenamiento que incorpora más tiempo de procesamiento a la etapa de control.

Por otro lado, Greigarn y García-Sanz (2011) proponen un sistema de control para regular la potencia de salida del parque eólico en presencia de generadores eólicos de velocidad variable. Para ello usan una *flywheel*, en tanto como estabilizador de potencia emplean un controlador proporcional-integral (PI) y un filtro de primer orden con el fin de reducir las fluctuaciones de potencia.

En este trabajo se muestra el uso de estabilizadores de potencia activa, con el fin de atenuar o mitigar las fluctuaciones debido al comportamiento de las potencias generadas en los parques o las turbinas eólicas. Así, se analizan tres enfoques de estabilizadores: el primero de ellos se basa en la potencia promedio del parque eólico y la energía del ESS; el otro usa una potencia de referencia y la energía del ESS; el último de ellos constituye un enfoque en el que se utiliza una potencia de referencia y un controlador PI para calcular la energía del ESS. Luego, con la ayuda de esta energía, se obtiene la velocidad de referencia a la cual girará el ESS. Por medio de la desviación estándar se muestra el desempeño de los enfoques propuestos.

Este artículo está organizado así: en la sección primera se exponen diferentes sistemas almacenadores de energía que existen en la literatura especializada; se habla de manera básica de los elementos que lo componen cuando se tiene una aplicación en los sistemas de potencia, e igualmente se mencionan los estabilizadores de potencia activa y el sistema de control de la velocidad de giro. Seguidamente se muestra el sistema de estudio, se mencionan las características del ESS y del parque eólico y se describen un poco los datos de la velocidad del viento que fueron utilizados. Posteriormente se muestran los resultados y se realiza una discusión de estos frente a la mitigación de las fluctuaciones de potencia activa a causa de la naturaleza estocástica del viento. Finalmente se exponen las conclusiones del estudio propuesto.

Sistema de almacenamiento de energía basado en *flywheel*

Dentro de los ESS más empleados se tienen, hasta el momento, las baterías, los supercapacitores, los superconductores, los almacenadores a base de bombas hidráulicas y las *flywheel*. Las baterías han sido la forma más reconocida y popular de almacenamiento de energía. Su uso tradicional se debe al bajo costo y su alta eficiencia relativa; sin embargo, su vida útil es baja y el rendimiento en altas temperaturas es pobre (Chen *et al.*, 2009). Otra forma de almacenar energía es por medio de los supercapacitores, que pueden ofrecer un tiempo de carga mucho menor comparados con las baterías, aunque presentan una alta eficiencia. El mayor problema de estos elementos es la corta duración y la alta energía disipada (Chen *et al.*, 2009).

Otros sistemas de almacenamiento de energía son los basados en bombas hidráulicas, las cuales son una tecnología de diseño simple, bajo costo y de operación similar a las centrales hidroeléctricas; sin embargo, estas tecnologías requieren de ubicaciones específicas para su funcionamiento (Chen *et al.*, 2009). Por último, las *flywheels* se basan en la energía cinética para almacenar energía; su objetivo es hacer girar inercias de gran tamaño a altas velocidades. En la actualidad existen mecanismos de control para obtener *flywheels* con eficiencias altas para un tiempo de almacenamiento corto, pero una de las desventajas de estas tecnologías es su alto costo inicial y las pérdidas rotacionales (Chen *et al.*, 2009).

Los anteriores ESS poseen grandes cualidades en el momento de conservar energía y no poseen una operacional ideal. Todos presentan desventajas ya sea en su diseño constructivo, en su rendimiento o inclusive en su operación. Para este trabajo se empleó como elemento almacenador de energía la *flywheel*, ya que en la actualidad su utilización se ha incrementado, puede ser más eficiente, no tiene impactos ambientales y el tiempo de carga en el almacenamiento de energía puede ser mayor en comparación con las otras tecnologías. Además, se han empleado en sistemas espaciales, medios de transporte, sistemas industriales y sistemas de potencia (Alzola *et al.*, 2011; Sebastián y Alzola, 2012).

Modelado del sistema de almacenamiento de energía

Como se mencionó, las *flywheels* se basan en el movimiento de una inercia de gran tamaño [1] y a gran velocidad, que por medio de la energía cinética almacenan energía [2]:

$$J \frac{\partial w}{\partial t} = T_E \quad [1]$$

$$E = \frac{1}{2} J w^2 \quad [2]$$

Donde es la energía cinética almacenada en la *flywheel*, J es el momento de inercia, w es la velocidad angular de la *flywheel* y T_E es el torque eléctrico de la máquina. Esta masa rotacional (J) depende de la forma y composición estructural del almacenador de energía (Boulund *et al.*, 2007; Sebastián y Alzola, 2012).

La representación de un sistema de almacenamiento de energía de este tipo puede consistir en una *flywheel*, una máquina síncrona y un convertidor que tiene como finalidad realizar el acoplamiento entre el sistema de máquinas y la red eléctrica (figura 1). Esta máquina debe trabajar como motor cuando la potencia de la *flywheel* (P_{fy}) sea menor que 0 ($P_{fy} < 0$); o como generador cuando P_{fy} sea mayor a cero ($P_{fy} > 0$) (Veszpremi y Schmidt, 2007). A partir de esto puede afirmarse que una desaceleración de la *flywheel* corresponde a tener un estado de descarga de energía; en caso contrario, a medida que la *flywheel* incrementa su velocidad, puede presentarse un estado de carga de energía (Veszpremi y Schmidt, 2007). Una de las máquinas más comunes en las aplicaciones de los ESS son las síncronas de imanes permanentes (PMSM) (Díaz -González *et al.*, 2012).

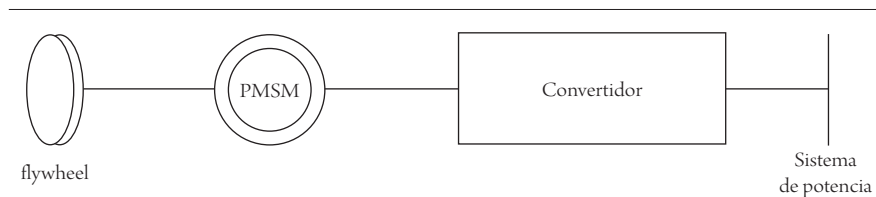


Figura 1. Sistema de funcionamiento de la *flywheel*

Nota: una PMSM es una máquina síncrona de imanes permanentes. El sistema de potencia representa un equivalente de toda la red en el punto de conexión a la *flywheel*.

Fuente: elaboración propia.

Con el fin de obtener un diseño experimental de una *flywheel*, se puede empezar asumiendo el comportamiento del ESS por un periodo, es decir, se puede suponer que una *flywheel* trabaje, como se observa en la figura 2.

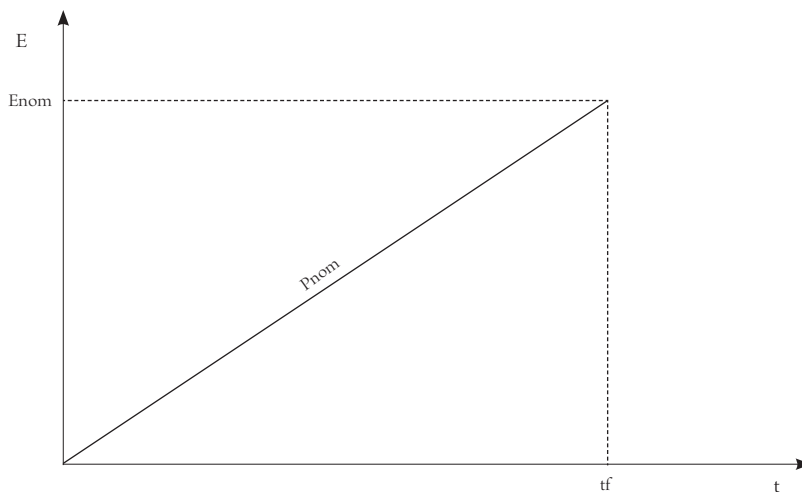


Figura 2. Comportamiento inicial de la *flywheel*

Fuente: elaboración propia.

De la figura 2 y de la ecuación [2] se puede definir [3]:

$$E_{nom} = P_{nom} t_f = \frac{1}{2} J w_{nom}^2 \quad [3]$$

Si se conoce la velocidad nominal de la *flywheel* (w_{nom}) y la potencia de esta, se puede llegar a conocer de manera experimental el momento de inercia necesario para esta operación; sin embargo, cabe resaltar que el diseño de estos almacenadores de energía contemplan muchas variables que no se pueden obviar³.

Sistemas de control de potencia activa

El ESS, como se mostró en la figura 1, debe incorporar convertidores bidireccionales para conectar el sistema de almacenamiento a la red de potencia. El esquema mostrado en esta figura de conexión debe contener tres tipos de controles: a) el control del convertidor del lado de la red o el sistema de potencia, b) el control del lado de la máquina y c) un control de nivel externo. El primer control se encarga de

3 Para tener en detalle el diseño de una *flywheel*, confróntese el trabajo de Bolund *et al.* (2007).

regular la potencia activa suministrada hacia o desde la red; por lo general se lleva a cabo utilizando controladores PI (Suvire y Mercado, 2009; Suvire *et al.*, 2012).

El segundo sistema de control tiene como finalidad regular el voltaje del voltaje DC del convertidor y gobernar la potencia reactiva inyectada hacia o desde la red (Díaz-González *et al.*, 2007; Suvire *et al.*, 2012). Finalmente se tiene un control de nivel externo, el cual contiene control de tensión, de frecuencia y un estabilizador de potencia activa (Suvire *et al.*, 2012). Este último elemento es el que se encarga de calcular la velocidad de referencia de la *flywheel*, con el fin de mejorar el perfil de potencia activa; por lo tanto, se asumirá que los otros elementos distintos al estabilizador de potencia activa trabajan de manera adecuada.

Estabilizador 1

Uno de los objetivos del estabilizador de potencia es calcular la velocidad angular de referencia (w_{ref}) a la cual girará la *flywheel*. Teniendo w_{ref} y por medio del control de nivel externo del sistema de almacenamiento, la *flywheel* girará a la velocidad de referencia (Suvire y Mercado, 2009). Una manera de calcular w_{ref} es considerando la potencia promedio de la potencia suministrada por el parque eólico (Díaz-González *et al.*, 2007). Un diagrama de bloques para determinar la velocidad de referencia es mostrada en la figura 3.

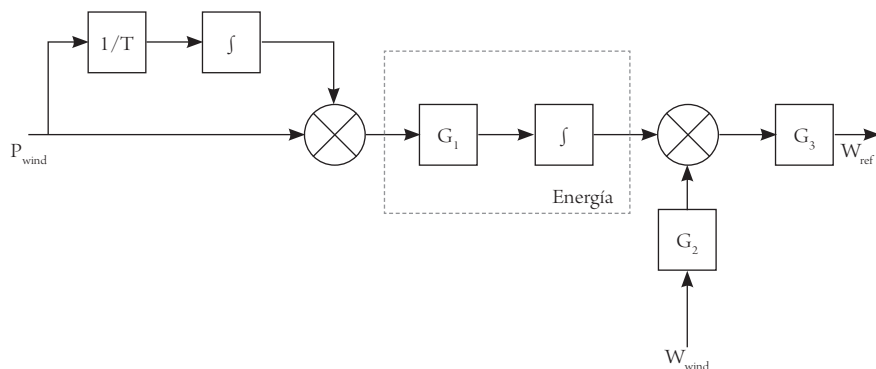


Figura 3. Diagrama de bloques para el estabilizador 1

Nota: G_1 , G_2 y G_3 son constantes de proporcionalidad, con el fin de pasar las variables de energía a velocidad.

Fuente: elaboración propia.

Estabilizador 2

Una propuesta para calcular la velocidad de giro de la *flywheel* consiste en determinar experimentalmente la diferencia de una potencia de referencia y la potencia del parque eólico; luego se obtiene la energía a partir de esta diferencia y finalmente, la velocidad de referencia, como se muestra en la figura 4.

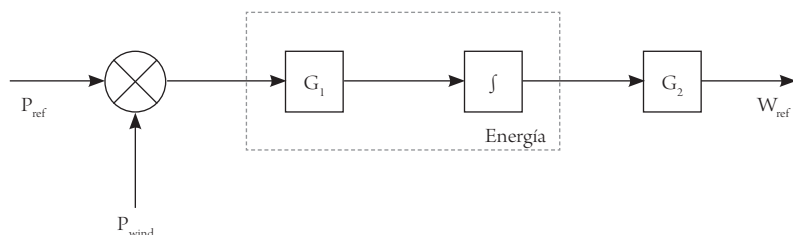


Figura 4. Diagrama de bloques para el estabilizador 2

Nota: G_1 y G_2 son constantes que ayudan a obtener la velocidad de referencia de la *flywheel*.

Fuente: elaboración propia.

Estabilizador 3

Otro método propuesto para calcular la velocidad de referencias es por medio de un controlador PI como elemento de cálculo de la energía, como se muestra en la figura 5.

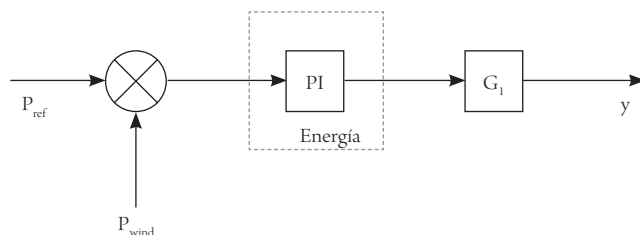


Figura 5. Diagrama de bloques para el estabilizador 3

Nota: $G1$ es una constante de proporcionalidad para calcular esta velocidad de giro. Las constantes del controlador PI fueron asumidas con valores de $k_p = 0,3$ y $k_i = 0,8$.

Fuente: elaboración propia.

Control de velocidad de giro

Luego de obtener la velocidad de referencia de giro de la *flywheel*, es necesario tener un mecanismo de control con el objetivo de que la velocidad real de rotación del elemento almacenador de energía sea similar a la velocidad de referencia. Para este caso se utilizó un controlador PI, como se muestra en la figura 6.

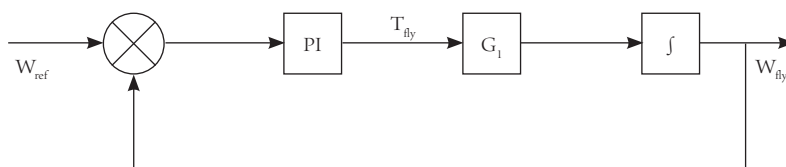


Figura 6. Diagrama de bloques del controlador para la velocidad de la *flywheel*

Nota: las constantes del controlador PI fueron $k_p = 10000$ y $k_i = 1$. T_{fly} es el torque de la *flywheel*.

Fuente: elaboración propia.

La potencia de la *flywheel* P_{fly} puede calcularse en función del torque y de la velocidad de la máquina (w_{fly}); por lo tanto, la potencia resultante de la red al considerar este dispositivo almacenador de energía se representa en la ecuación [4]:

$$P_{red} = P_{wind} + P_{fly} \quad [4]$$

Donde G_1 es una constante de proporcionalidad que ayuda a obtener la velocidad de la *flywheel*. Es posible ver esta constante y el integrador como una planta representada por la ecuación [1].

Sistema en estudio

En este estudio se analizó el perfil de potencia activa suministrada por un parque eólico de 5MW, como se muestra en la figura 7. El sistema comprende un parque eólico, representado por una turbina eólica que es conectada a través de una PM-SM, y un convertidor bidireccional que se une al sistema de potencia o red. Además, contiene una *flywheel* de 500kW conectada igualmente por una PMSM y un convertidor bidireccional a la red. La velocidad del viento fue simulada por medio de un modelo desarrollado por el Laboratorio Nacional de Energía Sostenible de la Universidad Técnica de Dinamarca (RISO-DTU) (Sørensen *et al.*, 2002). El

modelo calcula la velocidad del viento como un valor promedio ponderado de los valores de esta variable en diferentes puntos, en los alabes de varias turbinas eólicas. Este modelo tiene en cuenta la turbulencia del medio y la altura de las turbinas.

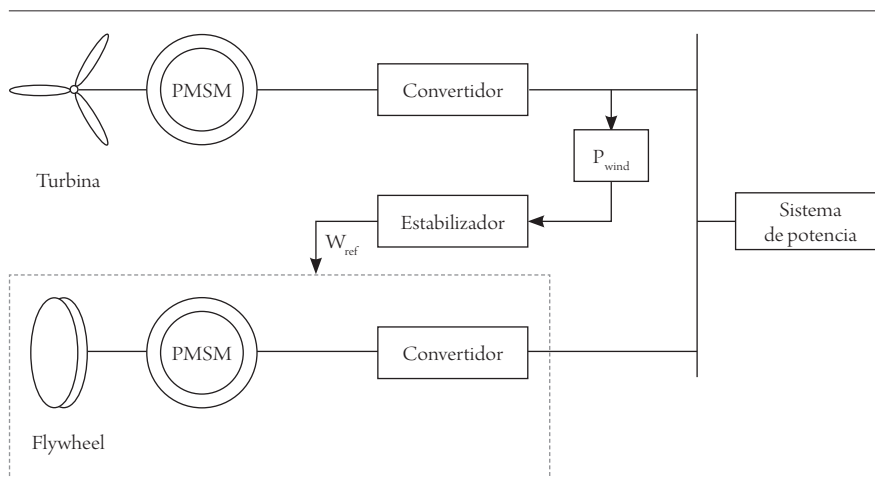


Figura 7. Sistema de prueba

Nota: PMSM es una máquina síncrona de imanes permanentes. El sistema de potencia representa un equivalente de toda la red en el punto de conexión a la *flywheel*.

Fuente: elaboración propia.

Para este estudio se simuló tener turbinas con un diámetro del rotor de 15 m, una velocidad promedio de 12 m/s, un nivel de turbulencia del 4 % y un tiempo de muestreo de 0,1 s (Sørensen *et al.*, 2002). Este modelo entrega la velocidad del viento en el parque, lo que lleva a obtener la potencia activa suministrada por el parque eólico a la red. En la figura 8 se observa que la potencia producida por el sistema eólico varía con el tiempo.

Con el fin de medir el mejoramiento de la calidad de la potencia activa entregada a la red, se calculó la desviación estándar de la potencia activa al considerar el ESS. Esta desviación proporciona una medida de cuánta variabilidad o dispersión hay en un conjunto de datos alrededor de su media. La media y la desviación estándar se pueden calcular así:

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_n \quad [5]$$

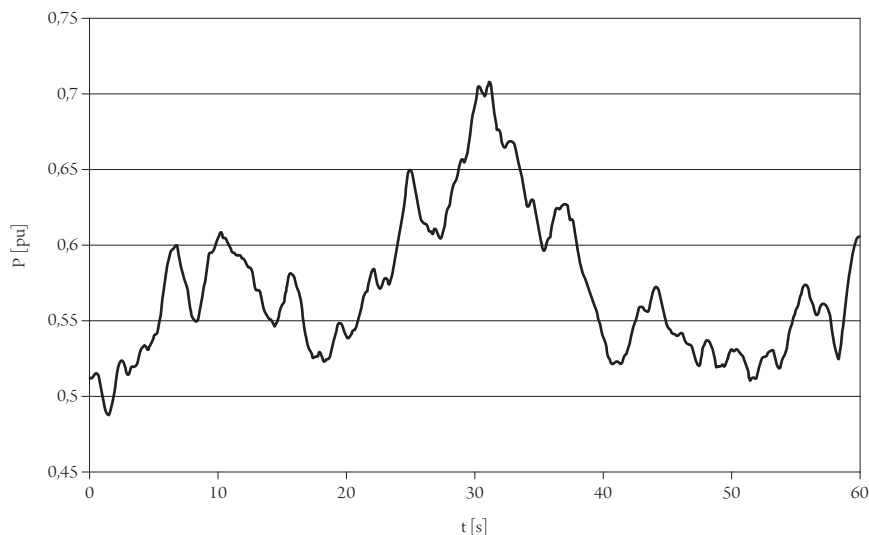


Figura 8. Potencia activa entregada por el parque eólico a la red

Nota: la potencia de referencia para los estabilizadores 2 y 3 fue establecida en 0,599 pu.

Fuente: elaboración propia.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x_n - \mu)^2} \quad [6]$$

Donde μ es la media del conjunto de datos, σ es la desviación estándar de los datos y N es el número total de datos.

Resultados y discusión

A partir de los estabilizadores mostrados en las figuras 3, 4 y 5, la idea es entregar un perfil de potencia lo más plano posible, ya que si se observa la potencia entregada por el parque eólico (figura 8), esta presenta oscilaciones. Para este estudio se consideró una *flywheel* de 500 kW que presenta un momento de inercia de valor $J = 2465 \text{ kgm}^2$. Para el mejoramiento del perfil de potencia activa solo se analizó un periodo de 60 s. En la figura 9 se muestra el perfil de potencia activa para el sistema de la figura 7, considerando el estabilizador 1. De esta figura puede observarse que existen valores de potencia entre 5 y 7 pu, son cantidades altas para tener valores en por unidad. Esto se debe a que el parque eólico tiene una potencia base

diferente al ESS; sin embargo, el fenómeno físico se puede analizar teniendo en cuenta esta diferencia.

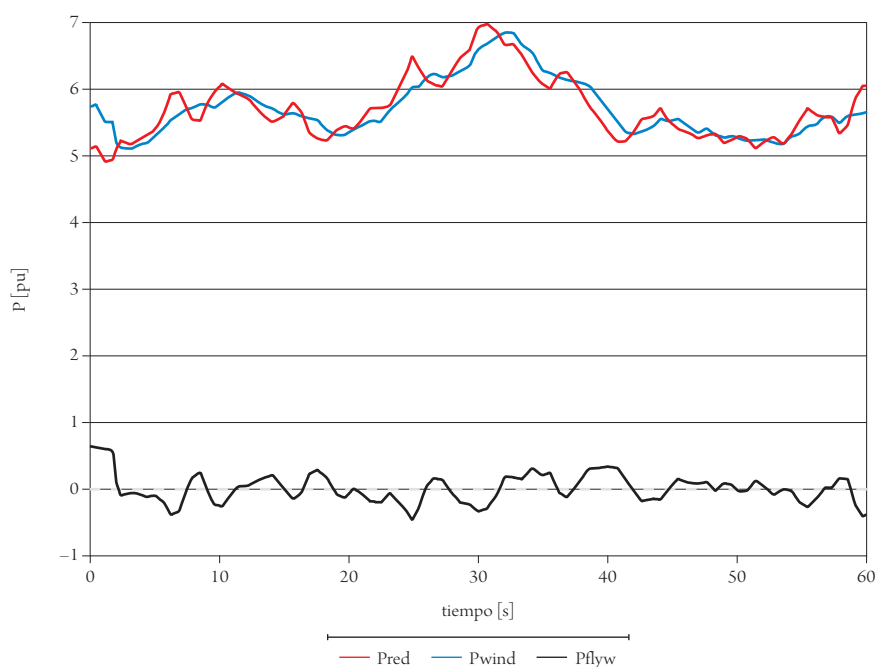


Figura 9. Perfil de potencia cuando se tiene el parque eólico, la *flywheel* y el estabilizador 1 como elemento regulador de la potencia activa

Nota: la línea roja representa la potencia entregada a la red, la línea azul es la potencia del parque eólico y la línea negra es la potencia de la *flywheel*.

Fuente: elaboración propia.

De la figura 9 se puede observar que el estabilizador basado en la potencia promedio del parque eólico hace que la potencia entregada a la red (línea roja) tenga menos oscilaciones que la suministrada por el parque sin la presencia del elemento almacenador de energía (línea azul). La línea negra expresa el comportamiento de la potencia de la *flywheel* (P_{fly}) ante las variaciones de la potencia del parque eólico. Se puede analizar de P_{fly} cuando se hace menor que 0 ($P_{fly} < 0$), que la *flywheel* se carga y actúa como motor. Ahora bien, cuando P_{fly} se hace mayor a 0 ($P_{fly} > 0$), la *flywheel* entrega la energía almacenada y se considera como un generador (Veszpremi y Schmidt, 2007). El estabilizador de la figura 3 logra obtener una potencia promedio entregada a la red de $\mu_{e1} = 5,7540 \text{ pu}$ y un valor de dispersión de $\sigma_{e1} = 0,4467 \text{ pu}$.

Por otro lado, la figura 10 muestra las potencias de la red, del parque eólico y de la *flywheel* utilizando el estabilizador 2. Esta figura también muestra un perfil de potencia entregada a la red considerando la *flywheel* (línea roja), que es más plana o más constante que la presenta en la figura 9 usando el estabilizador 1. Esto se debe a la potencia de referencia del estabilizador, que es constante y de valor adecuado, lo cual hace que la *flywheel* almacene más energía (línea negra) en comparación con el perfil de la *flywheel* al utilizar el estabilizador 1.

A partir de la figura 10 también se puede ver más claramente el comportamiento de P_{fly} ya que existen periodos más prolongados de carga y de descarga, lo cual deriva en que el perfil entregado a la red sea mucho más plano. Al utilizar el estabilizador 2, se puede obtener una potencia promedio de $\mu_{e_2} = 5,9814 pu$ y un valor de dispersión de $\sigma_{e_2} = 0,1277 pu$.

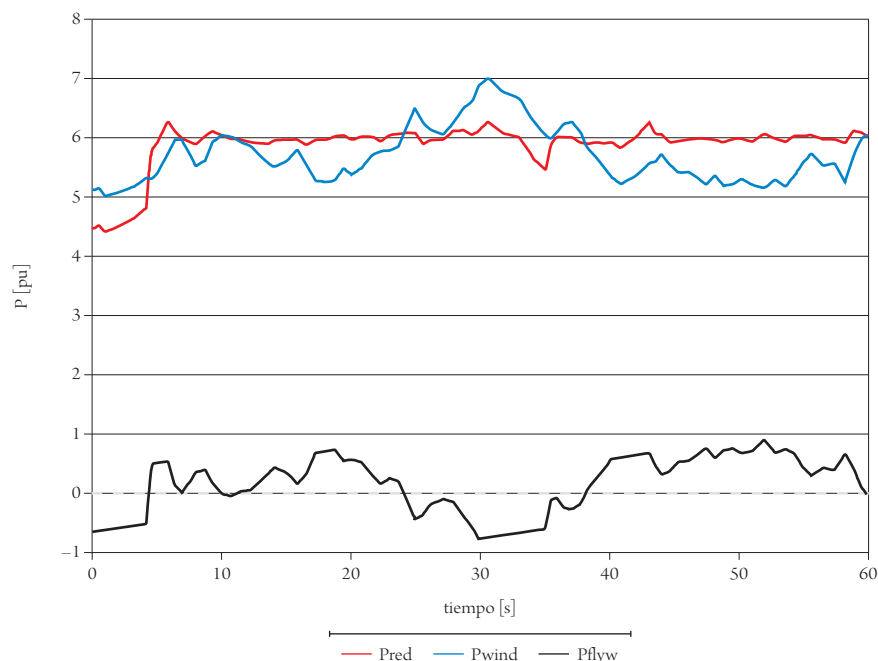


Figura 10. Perfil de potencias a partir del estabilizador de la figura 4

Nota: la línea roja ilustra el comportamiento de la potencia entregada a la red, la línea azul es la potencia del parque eólico sin considerar la *flywheel* y la línea negra es la potencia de la máquina.

Fuente: elaboración propia.

Por último, en la figura 11 se observan las potencias de la red, del parque eólico y la de la *flywheel* al utilizar el estabilizador 3 basado en un controlador PI.

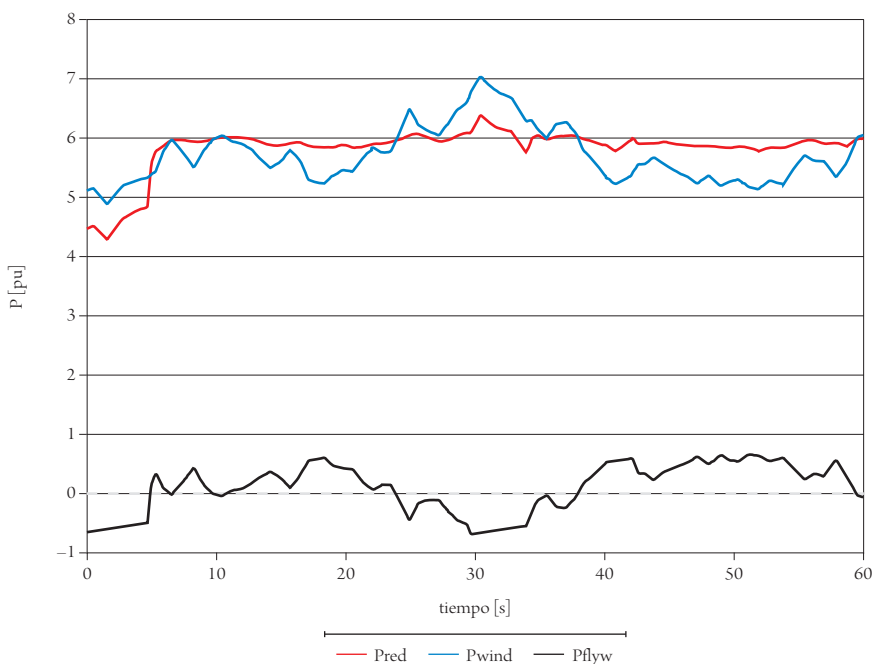


Figura 11. Potencias de la red, el parque eólico y la *flywheel* utilizando el estabilizador basado en un controlador PI.

Nota: la línea roja representa la potencia de la red, la línea azul muestra la potencia del parque eólico y la línea negra indica la potencia del estabilizador basado en un controlador PI.

Fuente: elaboración propia.

Esta red, que es muy similar a la presentada en la figura 10, usa el estabilizador 2. Sin embargo, lo que difiere entre estos dos esquemas es la utilización de un controlador PI para obtener la energía de la *flywheel*, que puede ser visto además como un filtro (Ogata, 2010). Esto ayuda a la estabilización de la señal de potencia; en cambio, el estabilizador 2 posee solo una constante y el integrador para obtener la energía. La potencia promedio y la dispersión de la potencia entregada a la red usando el estabilizador 3 es $\mu_{e3} = 5,9475 \text{ pu}$ y $\sigma_{e3} = 0,1095 \text{ pu}$. Estos valores de potencia promedio y dispersión se pueden ver, para los tres casos, en la tabla 1, donde el estabilizador 3, basado en un controlador PI, obtiene la menor variabilidad de los tres diferentes estabilizadores presentados.

Tabla 1. Potencia promedio y desviación estándar (dispersión) de la potencia entregada a la red

| MÉTODO | $\mu \pm \sigma$ [pu] |
|-----------------|-----------------------|
| Estabilizador 1 | 5,7540 \pm 0,4467 |
| Estabilizador 2 | 5,9814 \pm 0,1277 |
| Estabilizador 3 | 5,9475 \pm 0,1095 |

Nota: μ es el valor medio de la señal de potencia en pu, y σ es el valor de la dispersión alrededor de μ .

Fuente: elaboración propia.

En las figuras 12, 13 y 14 se muestra la velocidad de giro de la *flywheel* durante el proceso del mejoramiento del perfil de potencia activa, al usar los estabilizadores 1, 2 y 3, respectivamente. El control de esta velocidad se realizó por medio de un controlador PI (figura 6). Estas figuras muestran que la velocidad de giro (línea roja) sigue muy de manera muy fiel la velocidad de referencia (línea azul).

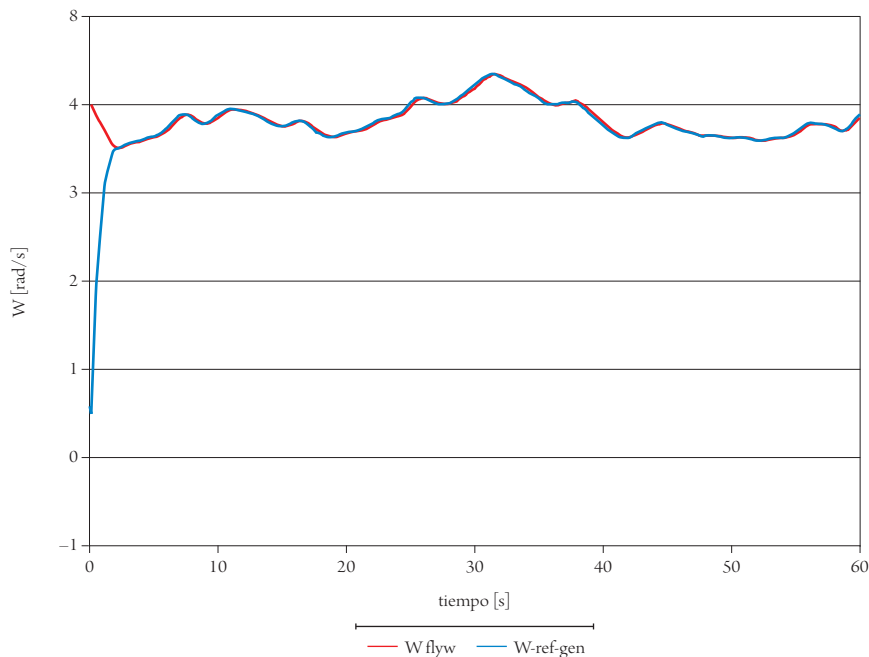


Figura 12. Velocidad de giro de la *flywheel* utilizando el estabilizador 1

Nota: la línea roja representa la velocidad a la que está girando el elemento almacenador de energía; la línea azul es la velocidad de referencia obtenida a través del estabilizador 1.

Fuente: elaboración propia.

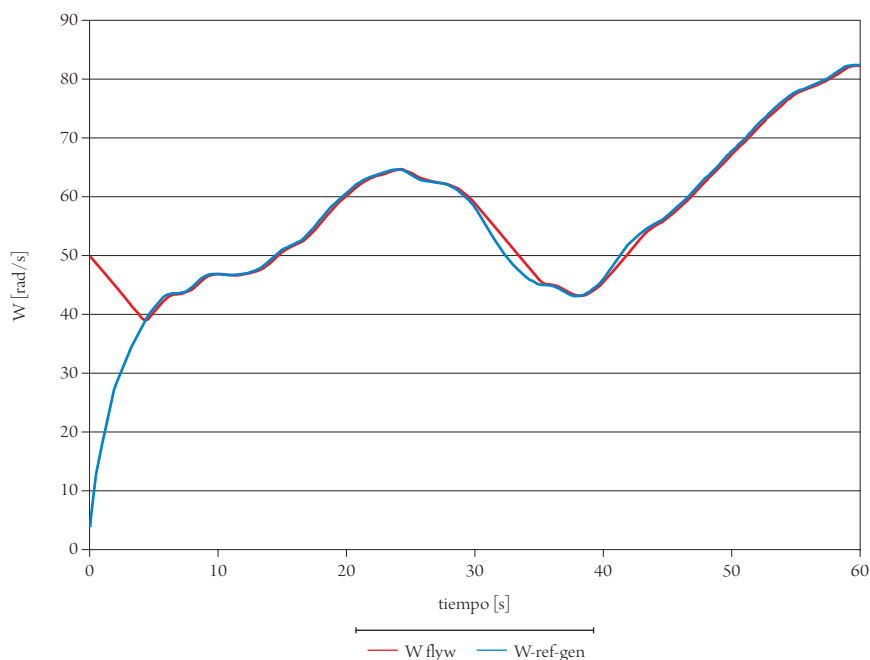


Figura 13. Velocidad de giro de la *flywheel* utilizando el estabilizador 2

Nota: la línea roja es la velocidad de giro del elemento almacenador de energía; la línea azul es la velocidad de referencia calculada por medio del estabilizador 2.

Fuente: elaboración propia.

Conclusiones

En este trabajo se presentaron varios esquemas para realizar el mejoramiento del perfil de potencia activa entregado por un parque eólico que usa sistemas almacenadores de energía, específicamente la *flywheel*. Este sistema llegó a proporcionar perfiles de potencia suaves y constantes con respecto a la potencia entregada por las turbinas eólicas. Particularmente se presentaron tres estabilizadores de potencia activa. Entre ellos, el mejor enfoque es el basado en controladores PI para obtener la energía de la *flywheel*, con lo cual se contribuye con niveles bajos de dispersión de la potencia entregada a la red.

Además se mostró la velocidad de giro controlada por medio de controladores PI, para seguir la velocidad de referencia obtenida por dichos estabilizadores. Debe resaltarse que la potencia de referencia para los estabilizadores 2 y 3 es una

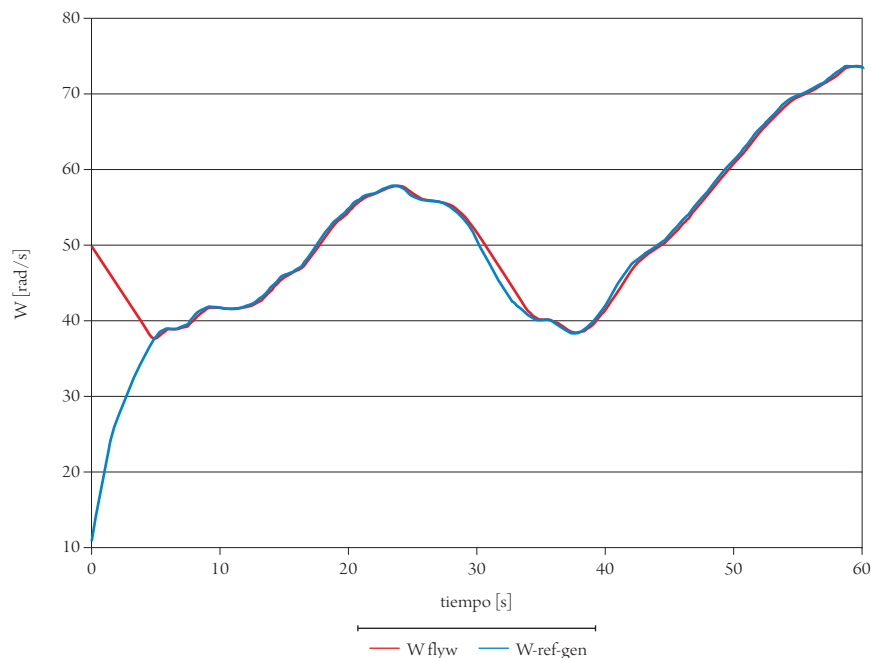


Figura 14. Velocidad de giro de la *flywheel* utilizando el estabilizador 3

Nota: la línea roja representa la velocidad de la *flywheel*; la línea azul es la velocidad de referencia hallada a través del estabilizador 3.

Fuente: elaboración propia.

componente clave para el estudio propuesto; por lo tanto, como trabajo futuro, se puede plantear un estabilizador de potencia que sea autónomo, que no requiera de sintonización experimental, en función de determinar estas constantes mediante un enfoque matemático.

Referencias

- Boulund, B., Bernhoff, H. y Leijon, M. (2007). Flywheel energy and power storage systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(2), 235-258.
- Chen, H., Cong, T. N., Yang, W., Tan, C., Li, Y. y Ding, Y. (2009). Progress in electrical energy storage system: A critical review. *Progress in Natural Science*, 19(3), 291-312.
- Cimuca, G., Saudemont, C., Robyns, B. y Radulescu, M. (2006). Control and performance evaluation of a flywheel energy-storage system associated to a variable-speed

- wind generator. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 53(4), 1074-1085. Doi: 10.1109/TIE.2006.878326.
- Cimuca, G., Breban, S., Radulescu, M., Saudemont, C. y Robyns, B. (2010). Design and control strategies of an induction-machine-based flywheel energy storage system associated to a variable-speed wind generator. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 25(2), 526-534. Doi: 10.1109/TEC.2010.2045925.
- Díaz-González, F., Sumper, A., Gomis-Bellmunt, O. y Villafáfila-Robles, R. (2012). A review of energy storage technologies for wind power applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(4), 2154-2171.
- Díaz-González, F., Sumper, A., Gomis-Bellmunt, O. y Martínez-Rojas, M. (2007). Power smoothing of DFIG wind turbines with flywheel. *Electrical Engineering*, 58(2), 79-84.
- Georgilakis, P.S. (2008). Technical challenges associated with the integration of wind power into power systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(3), 852- 863.
- Greigarn, T. y Garcia-Sanz, M. (2011). Control of flywheel energy storage systems for wind farm power fluctuation mitigation. *IEEE Energytech*, 2011, 1-6. Doi: 10.1109/EnergyTech.2011.5948509.
- Ogata, K. (2010). *Modern control engineering*. Nueva York: Prentice Hall.
- Alzola, R., Sebastián, R., Quesada, J. y Colmenar, A. (2011). Review of flywheel based energy storage systems. In: *Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG), 2011 International Conference on*, 16.
- Qu, L. y Qiao, W. (2011). Constant power control of DFIG wind turbines with supercapacitor energy storage. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 47(1), 359-367. Doi: 10.1109/TIA.2010.2090932.
- Sebastián, R. y Alzola, R. (2012). Flywheel energy storage systems: Review and simulation for an isolated wind power system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(9), 6803-6813.
- Sørensen, P., Hansen, A. y Rosas, P. (2002). Wind models for simulation of power fluctuations from wind farms. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 90(12-15), 1381-1402.
- Suvire, G. y Mercado, P. (2009). Improvement of power quality in wind energy applications using a dstatcom coupled with a flywheel energy storage system. *Power Electronics Conference, 2009*, 58-64. Doi: 10.1109/COBEP.2009.5347602.
- Suvire, G., Molina, M. y Mercado, P. (2012). Improving the integration of wind power generation into ac microgrids using flywheel energy storage. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3(4), 1945-1954. Doi: 10.1109/TSG.2012.2208769.
- Veszpremi, K. y Schmidt, I. (2007). Flywheel energy storage drive for wind turbines. *Power Electronics and Drive Systems, 2007*, 916-923. Doi: 10.1109/PEDS.2007.4487814.

Zeng, J., Zhang, B., Mao, C. y Wang, Y. (2006). Use of battery energy storage system to improve the power quality and stability of wind farms. *Power System Technology*, 2006, 1-6. Doi: 10.1109/ICPST.2006.321662.

Técnicas asistidas para estimar la maduración ósea por imágenes de mano y muñeca. Revisión de tema

ANDRÉS ROBERTO DÍAZ PASCUAS¹

DAVID LEONARDO TORRES RODRÍGUEZ²

ASTRID RUBIANO FONSECA³

RESUMEN

La estimación de edad ósea es un procedimiento usado en radiología y endocrinología para realizar diagnósticos con respecto a la malnutrición y las anomalías en el crecimiento. Su práctica efectiva requiere de experiencia y tiempo del profesional en el área; por ello es de gran utilidad el desarrollo de herramientas asistidas por ordenador que ayuden a automatizar la estimación de edad ósea. Este artículo es una revisión bibliográfica de modelos, metodologías y desarrollos que se presentan como ayudas al profesional en la estimación de la edad ósea. Está organizado de manera cronológica, hace énfasis en las innovaciones que ha hecho cada autor para hacer efectivo este proceso y presenta las técnicas que cada uno de ellos aplicó en su desarrollo.

Palabras clave: estimación edad ósea, procesamiento de imágenes, radiografías de mano y muñeca.

¹ Ingeniero en Telecomunicaciones por la Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia. Auxiliar de investigación y miembro del Grupo de Investigación en Telemedicina (TIGUM) de la Universidad Militar Nueva Granada. Correo electrónico: pascuass@gmail.com

² Ingeniero en Telecomunicaciones por la Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia. Auxiliar de investigación y miembro del Grupo de Investigación en Telemedicina (TIGUM) de la Universidad Militar Nueva Granada. Correo electrónico: andres.diaz.pascuas@gmail.com.

³ Candidata a doctora en Ciencias de la Ingeniería por la Universidad de París Quens Nanterre La Défense. Magíster en Sistemas Automáticos de Producción por la Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia. Ingeniera mecatrónica por la Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia. Miembro del Grupo de Investigación en Telemedicina (TIGUM) de la Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: astrid.rubiano@unimilitar.edu.co

FECHA DE RECEPCIÓN: 10 DE ENERO DEL 2014 • FECHA DE APROBACIÓN: 20 DE OCTUBRE DEL 2014

Cómo citar este artículo: Díaz Pascuas, A. R., Torres Rodríguez, D. L. y Rubiano Fonseca, A. (2015). Técnicas asistidas para estimar la maduración ósea por imágenes de mano y muñeca. Revisión de tema. *Épsilon*, 24, 31-48.

Assisted Techniques to Estimate Bone Maturation Through Hand and Wrist Images. Topic Review

ABSTRACT

Bone age estimation is a procedure used in radiology and endocrinology for diagnostic purposes regarding malnutrition and growth abnormalities. Its effective implementation requires professional experience and time in the field; therefore, it is very useful to develop computer-assisted tools to help automate the estimation of bone age. This paper is a literature review of models, methodologies and developments presented as aids to professionals in estimating bone age. It is organized chronologically, emphasizes the innovations made by each author to implement this process and presents the techniques that each of them applied in their development.

Keywords: bone age estimation, image processing, hand and wrist radiographs.

Técnicas assistidas para estimar a maturação óssea por imagens de mão e munheca. Revisão de tema

RESUMO

A Estimativa da idade óssea é um procedimento usado em radiologia e endocrinologia para realizar diagnósticos sobre a má nutrição e anormalidades no crescimento. A prática efetiva deste requer experiência e tempo do profissional nesta área; por isso, é de grande utilidade o desenvolvimento de ferramentas assistidas por computador que ajudem a automatizar a estimativa da idade óssea. Este artigo é uma revisão bibliográfica de modelos, metodologias e desenvolvimentos que se apresentam como ajudas ao profissional na estimativa da idade óssea. Está organizado de maneira cronológica, faz ênfase nas inovações que feitas por cada autor para realizar este processo e apresenta as técnicas que cada um deles aplicou em seu desenvolvimento.

Palavras chave: estimativa da idade óssea, processamento de imagens, radiografias de mão e munheca.

Introducción

La aplicación de las ciencias de la computación en la medicina ha sido de gran interés en las últimas décadas; en particular, las técnicas de procesamiento de imagen han contribuido significativamente a facilitar los procesos de seguimiento, diagnóstico y tratamiento de la enfermedad.

Un proceso fundamental en el área de radiología y endocrinología es la estimación de la edad ósea, que es usada como método para detectar anomalías en el crecimiento. Desde hace más de tres décadas, diferentes autores han desarrollado algoritmos orientados al diseño de herramientas computacionales completas que apoyan estos procesos, con el propósito de reducir tiempos, disminuir errores y facilitar un diagnóstico preciso y los tratamientos oportunos.

Este artículo presenta una revisión del estado del arte de las metodologías desarrolladas por diferentes autores como ayuda para la estimación de la edad ósea, mediante procesamiento de imágenes radiológicas de mano y muñeca. Se describen en específico las técnicas y los procedimientos implementados. El texto está organizado de la siguiente manera: inicialmente se presenta el estado del arte en orden cronológico, haciendo énfasis en la técnicas, las regiones de interés y los resultados; en la sección siguiente se presenta la comparación técnica del desempeño de los diferentes trabajos; luego se muestran las perspectivas; finalmente, los últimos apartados contienen las conclusiones de los autores y el soporte bibliográfico del artículo.

Estado del arte

En 1981, un equipo de trabajo del Imperial College of Science & Technology de Londres propone un algoritmo para la optimización en la extracción de características, mediante la detección de bordes en imágenes radiológicas y con experimentación en radiografías de mano y muñeca (Pal, 1981). Este algoritmo hace uso de los operadores de lógica difusa tipo s y π (Pavlidis, 1977), los cuales mejoran el contraste entre píxeles con el fin de aislar los tejidos blandos del tejido óseo.

Algunos años después, los mismos autores realizan un nuevo aporte: se enfocan específicamente en el reconocimiento sintáctico de los diferentes estados de ma-

duración ósea en radiografías de mano y muñeca (Pal y King, 1983), y hacen uso de gramática y radiografías primitivas difusas obtenidas en trabajos anteriores (Pal, King y Hashim, 1983). Para la automatización de procesos, proponen dos algoritmos que usan jerarquías sintácticas de tres estados, que a su vez utilizan seis o siete fraccionamientos para su clasificación. La estimación de la edad ósea la hacen por medio del método TW2, de Tanner *et al.* (1975).

Cabe resaltar que este trabajo requería un fuerte análisis en las etapas de procesamiento y segmentación, debido a que los equipos de rayos x y los digitalizadores no contaban con las características necesarias para entregar una imagen de buena calidad.

Por su parte, Michael y Nelson (1989) diseñaron e implementaron un modelo basado en sistemas de visión computacional, al cual nombran HANDX. Este segmenta automáticamente falanges específicas y mide cuatro parámetros: perímetro, área, longitud del eje mayor y longitud del eje menor. En la fase de preprocesamiento, para normalizar la radiografía, usan un modelo basado en histogramas. La segmentación busca y esboza líneas basadas en conocimientos previos de la mano, fase en la que los autores determinan tres clases, para cada una de las cuales determinan el valor medio y la desviación estándar, como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Clases y características de la segmentación propuesta por Michael y Nelson (1989)

| CLASE | DESCRIPCIÓN DE LOS PÍXELES | VALOR PROMEDIO | DESVIACIÓN ESTÁNDAR |
|-------|----------------------------|----------------|---------------------|
| 1 | Fondo | 20 | 10 |
| 2 | Tejido blando | 110 | 40 |
| 3 | Hueso | 210 | 35 |

Fuente: Michael y Nelson (1989).

En la fase de medición se cuantifican los parámetros obtenidos en la imagen segmentada. Estos autores no tuvieron en cuenta los huesos del carpo, que son una fuente importante de información para el cálculo de la maduración ósea entre los primeros años de edad.

Levitt *et al.* (1990) aplican una técnica conocida como *inferencia bayesiana* para extracción de bordes, vértices y otras características relevantes de la imagen. Una especie de plantilla de la mano es usada para detectar el borde transversal de esta,

así como las uniones de las falanges. Autores como Pietka *et al.* (1991) aducen que una técnica como esta no puede ser usada en radiografía pediátrica, debido a que estas imágenes resultan complejas de adaptar a las plantillas propuestas (por ejemplo, en términos del tamaño, la posición y la localización de la imagen de la mano).

Pietka *et al.* (1991) establecen una técnica que emplea un algoritmo para definir la región de interés falángica (*phalangeal region of interest* [PROI], como se conoce en inglés). El procesamiento de la imagen se realiza creando una imagen de gradientes de dos dimensiones, las cuales son tratadas con el operador Sobel (González y Wintz, 1987), a fin de separar los tejidos blandos del tejido óseo. La PROI se trata dividiendo las falanges distal, medial y proximal, y extrayendo la longitud de cada una de estas. Al obtener estos datos, se realiza una comparación con una tabla de medidas estándar (Garn *et al.*, 1972), para así arrojar un estimado de edad. Este trabajo tampoco tiene en cuenta los huesos del carpo, radio y cúbito, y aunque no es posible desarrollarlo clínicamente, es la base para futuros trabajos de los mismos autores.

En otro trabajo de este mismo año, Sharif *et al.* (1991) proponen un método que optimiza la segmentación de imágenes radiológicas de mano y muñeca, para lo cual hacen una detección de bordes con base en la intensidad de la imagen. Este método es propuesto dada la difícil segmentación en partes donde el tejido óseo se combina con tejidos blandos, especialmente en las regiones del carpo y metacarpo. La técnica presenta mejoras notorias para la segmentación de la imagen.

Pietka *et al.* (1991), como complemento al trabajo anterior, establecen un método para extracción de características de los huesos carpales (Pietka *et al.*, 1993). La detección de la región de interés carpal (*carpal region of interest* [CROI]) se hace de manera automática después de que la imagen es umbralizada. A continuación se extrae cada uno de los huesos del carpo y se evalúan de forma individual, para lo cual se amplía la extracción de características a toda la mano y se excluyen las terminaciones de radio y cúbito.

En 1994 se crea un nuevo trabajo que tiene como objetivo la segmentación de la imagen (Cootes *et al.*, 1994). En la fase de preprocesado se tienen en cuenta dos imágenes: una correspondiente a la original imagen original, pero suavizada por un filtro, y la otra correspondiente al croquis de la mano. La imagen se divide en múltiples regiones según un nivel umbral entre pixeles vecinos. El resultado de

esta división son secciones distribuidas por el tejido óseo, las cuales pasan a una siguiente fase en la que se fusionan entre sí, con el fin de establecer regiones únicas que muestren cada hueso de la mano. Allí, estos a su vez logran ser separarlos del fondo de la imagen. A continuación, todas estas regiones se etiquetan para identificar cada uno de los huesos. Este trabajo presenta una alternativa para segmentación, pero no extrae características.

En el mismo año, Sun *et al.* (1994) proponen un enfoque similar al de Michael y Nelson (1989), pero plantean una nueva metodología: el preprocesamiento emplea un proceso de ecualización de histograma. La separación entre el tejido óseo, el tejido blando y el fondo se realiza mediante un nivel umbral entre píxeles vecinos. Según la distribución de intensidad de la radiografía de mano, se produce un histograma de forma trimodal (Tsai, 1985), para determinar los valores de umbral de la imagen de entrada. Luego, los dos valores de umbralización son seleccionados de tal manera que la imagen resultante se mantenga sin cambios.

La segmentación está separada en dos fases: primero divide la imagen en tres grupos, con el propósito de elegir automáticamente la región falángica de interés mediante un proceso de codificación *run-length*; posteriormente aplica un método de detección de bordes de un pixel de ancho para extraer contornos de cada falange seleccionada. Así, finalmente se calculan los parámetros geométricos asociados con el crecimiento óseo, los cuales son convertidos en términos de edad ósea mediante la tabla de Garn *et al.* (1972).

En 1995 se plantean dos sistemas: el primero de ellos, de Dinesh (1995), realiza el procesado de la imagen y aplica algoritmos de detección de bordes haciendo uso del operador Sobel. Con este procedimiento se busca detectar y segmentar la estructura ósea de los tejidos blandos y el fondo, los cuales son despreciables. La técnica planteada varía en su aplicación, ya que puede ser usada para estimación de edad ósea haciendo uso de un atlas, o bien, puede emplearse para determinar la calidad del hueso en cuanto a su estructura de calcio.

El segundo sistema, de Rucci *et al.* (1995), aplica el método TW2 y hace uso de algoritmos genéticos para la segmentación y las medidas de cada hueso de la mano. El sistema funciona indicando una región de interés por cada hueso por tratar. Cada hueso se ubica por su centroide y se identifica a manera de coordenadas XY. Luego se usa un proceso considerado como *retina*, donde se trata una matriz de tipo M

$\times N$ para cada hueso, que almacena características en cada uno de sus espacios. Al final se hace uso de redes neuronales para tratar las características almacenadas en la matriz y realizar así la estimación de edad por medio de TW2.

Años después, Mahmoodi *et al.* (2000) proponen un método basado en TW2 en el que solo se tienen en cuenta las falanges. Para la detección y segmentación de los huesos emplean técnicas basadas en el conocimiento, como la inferencia jerárquica (Efford, 1994) y el modelo de formas activas (*active shape models* [ASM]) (Cotes *et al.*, 1995). Después de la aplicación de esta técnica, se emplean descriptores de forma, de los cuales se selecciona un vector de características obtenido de un modelo de regresión y un estimador bayesiano. Este trabajo realiza la estimación de forma automática, y los autores aducen que se constituye en una buena herramienta para los especialistas, dada su alta efectividad en los resultados arrojados.

Este mismo año se presentan el diseño y la implementación inicial de un atlas digital de mano y un sistema web de diagnóstico asistido por computador para la evaluación de la edad ósea (Cao *et al.*, 2000). El proyecto es construido sobre un sistema de archivado y transmisión de imágenes, cuya interfaz está basada en Java.

Ulteriormente, Pietka *et al.* (2001) desarrollan una herramienta que extrae características para estimación de edad ósea. En la fase de preprocesamiento de la imagen se remueve el fondo de la imagen por umbralización dinámica, y a continuación se realiza una extracción de la región de interés epifisial (*epiphysial region of interest* [EMROI]) tomando como base cada uno de los dedos. Para ello es necesario encontrar las puntas de las falanges distales e implementar una función de cuñas; después se realiza la extracción del eje vertical de las falanges, ya que es un soporte para detección de bordes, cuando se trata con un operador Sobel (González y Wintz, 1987). Las técnicas planteadas en este documento, complementadas con la aplicación de TW2, serían de gran utilidad en la estimación.

En Italia, Bocchi *et al.* (2003) desarrollan un sistema en el que implementan el método TW2 mediante una arquitectura de red neuronal similar a la de Rucci *et al.* (1995). Cada hueso complejo es localizado en la imagen y preprocesado usando una transformada de Gabor, o bien, un filtrado diferencial gaussiano de múltiple escala. La salida de la fase de preprocesamiento alimenta un conjunto de redes neuronales entrenadas para clasificar cada hueso de acuerdo con el método TW2, para luego estimar la edad ósea. Este sistema tiene en cuenta los veinte huesos que

comprenden la mano, la muñeca, el radio y el cúbito, por lo cual se constituye en un proceso bastante completo según el rango de edad.

En el mismo año, los Países Bajos desarrollaron un sistema automático para evaluar la edad ósea (Niemeijer, 2003) basado en el método de TW2. El proceso se enfoca en asignar a una región de interés la falange media del tercer dedo y clasificarla de la siguiente manera: las regiones de interés donde el radiólogo ha asignado un estado se utiliza para construir una imagen significativa de esta etapa; en una nueva región de interés de entrada son detectados los puntos de interés a través de un modelo de formas activas, los cuales son usados para alinear una imagen promedio con la imagen de entrada, y luego se calcula la correlación entre las dos imágenes. La región de interés puede ser asignada al estado con la mayor correlación, o los valores pueden ser usados como características en un clasificador.

De igual forma, en España se desarrolla un algoritmo para detección de contorno de huesos en radiografías de mano (De Luis-García, 2003) mediante modelos de contornos activos (Kass *et al.*, 1988; Cohen, 1991). El conocimiento previo es utilizado para localizar bordes de cada hueso de interés. Posteriormente se aplica un algoritmo de contornos activos (*snakes*) adaptativo, a fin de que los parámetros sean ajustados a cada hueso. Ellos introducen una técnica denominada *novel truncation* para prevenir las fuerzas externas y limitar el contorno exterior de los huesos.

En el año siguiente, en China, se desarrolló un sistema que hace uso de TW2 para la estimación de edad ósea (Lin *et al.*, 2004), mediante la aplicación de filtros para la mejora de calidad en el preprocesamiento. El sistema usa contornos activos en la segmentación y adapta el modelo de Xu y Prince (1998a, 1998b): el *gradient vector flow*. Este modelo permite la iniciación flexible de los contornos activos y ayuda en la convergencia de las concavidades límite, lo cual corrige la necesidad de un operario para seleccionar el contorno.

Ulteriormente, Zhang *et al.* (2007), basados en el conocimiento previo, desarrollaron un método para la segmentación de huesos carpales y el análisis de características morfológicas. Estos autores usan lógica difusa para calcular la edad ósea de niños con edades cercanas a los siete años.

Por su parte, Hsieh *et al.* (2007) desarrollaron un trabajo complementarios en el que tratan solo la región de interés carpal de niños con edades inferiores a ocho años.

El desarrollo implementa una detección automática de dicha región de interés, y mediante una base de datos de huesos carpales aplica una correlación para siete de los ocho huesos carpales, empezando por el mayor y finalizando en el trapecio. Con los resultados de esta correlación se genera una serie de reglas aplicadas a redes de neuronas artificiales (*artificial neuronal networks* [ANN], con el fin de establecer la estimación de edad ósea.

En el 2008, en Corea Lee *et al.* (2008) proponen un sistema basado únicamente en características. Inicialmente se hace uso de un ajuste polinomial de tercer grado para eliminar el fondo de la imagen. Se realiza también un trazado del contorno de la mano en función de ubicar cada dedo según los resultados de la cadena de fronteras (*boundary chain*). Después, mediante arreglo de curvas (*line fitting*), se ubican las EMROI.

En este mismo año, Liu *et al.* (2008) efectuaron un trabajo en el que implementaron varios algoritmos de nueva generación para optimizar el proceso de la estimación de edad ósea. Al mismo tiempo, relacionan al proceso dos bases de datos con imágenes de mano y muñeca que se retroalimentan entre sí, ya que la primera almacena imágenes con características extraídas y la segunda almacena a aquellas a las que no se les ha realizado dicho proceso. La extracción de características es basada en un método computacional conocido como PSO (*particle swarm optimización*, u optimización por enjambre de partículas) (Kennedy *et al.*, 1995; Meissner *et al.*, 2006), y después de ello son ubicados en clasificadores por ANN. De igual forma, Güld *et al.* (2008) proponen el uso de múltiples clasificadores que utilizan para identificar las características globales de las imágenes.

Un año después, Thodberg *et al.* (2009) presentan un nuevo método para la determinación automática de la edad ósea: el BoneXpert. Este reconstruye automáticamente los bordes de todos los huesos presentes en las radiografías de mano, y luego calcula de manera intrínseca la edad ósea para cada uno de los trece huesos (radio, cubito y los once huesos cortos). Este trabajo presenta un modelo generativo o de apariencia activa para la reconstrucción del hueso, predice la edad ósea a partir de puntajes de formas, intensidad y textura, unifica los métodos de Tanner-Whitehouse y Greulich-Pyle y es común tanto para hombres como para mujeres.

El BoneXpert es actualmente usado en la práctica médica y se ajusta a las directivas de la Comunidad Europea para dispositivos médicos. A su vez, ha sido validado para

cuatro etnicidades (Thodberg, 2010) y probado en poblaciones de Japón (Martin *et al.*, 2010a), Alemania (Van Rijin *et al.*, 2009) y Francia (Martin *et al.*, 2010b).

El modelo inicial de Fischer y sus colaboradores es la base para los trabajos desarrollados en el 2009 (Fischer *et al.*, 2009) y en el 2010 (Fischer *et al.*, 2010). En este último se recolectan catorce regiones de interés correspondientes a las falanges y los metacarpos, las cuales son almacenadas en una base de datos con sus respectivas etiquetas de identificación. Luego son comparadas con imágenes similares que ya tienen establecidas su edad ósea, con el fin de realizar la estimación por emparejamiento.

En Italia, Giordano *et al.* (2009), basados en investigaciones previas, proponen un sistema automático para la evaluación de la edad ósea (Giordano *et al.*, 2010). Dicho sistema implementa un método para la extracción de las regiones de interés carpales y epífisares-metáfisares, sin considerar la orientación de la mano y las características del usuario. El primer paso del método propuesto es una fase de preprocesamiento para identificar el fondo, para lo cual se usan estadísticas locales y globales de la imagen. Luego extraen el primer dedo, (meñique), el tercero (medio) y el quinto (pulgar), a partir de lo cual usan distintos algoritmos para conocer las diferencias morfológicas entre los dedos.

En cada región extraída aplican un conjunto de filtros isotrópicos basados en un algoritmo diferencial gaussiano (DoG), y según la desviación estándar definida por el usuario, para aproximar el umbral de la región. El sistema encuentra entonces las tres áreas más largas, que deben ser epífisis, diáfisis y metáfisis. Cada uno de estos contornos es rodeado por una envolvente convexa para obtener una representación geométrica de las tres regiones.

Ulteriormente, Jantan *et al.* (2010) desarrollan un trabajo en el que hacen uso de modelos difusos sustentados en características distales del radio, para estimar la edad ósea, a la vez que crean una función miembro que sirve de base para calcularla. Es importante resaltar que para reducir el ruido, usan filtrados anisotrópicos difusos (Perona y Malik, 1990), con resultados válidos para edades menores a los catorce años.

Por su parte, Somkantha *et al.* (2011) desarrollan una técnica que permite detectar los límites de los huesos carpales en imágenes de rayos x, para lo cual usan la

información de un modelo de vector de imágenes y un mapa de bordes. Luego, las características extraídas sirven como entrada para la regresión mediante vectores-soporte que calculan la edad ósea. La técnica es evaluada en 180 carpogramas de niños entre cero y seis años

En el mismo, Fischer *et al.* (2011) proponen una herramienta web basada en el diagnóstico asistido por computador (CAD) para estimar la edad ósea. En primer lugar localizan automática o manualmente el centro, y luego extraen las regiones de interés epifisares y las comparan con sus referencias en la base de datos. Aquí aplican técnicas de recuperación de imágenes basadas en contenido (CBIR), función de correlación cruzada (CCF), modelos de distorsión de imagen (Thies *et al.*, 2005; Keysers *et al.*, 2000) y características de texturas (Tamura *et al.*, 1978) para buscar la similitud entre imágenes. Así, como paso final, se estima la edad ósea.

Recientemente, Seok *et al.* (2012) propusieron un sistema automático para la detección automática de la edad ósea a partir del *Greulich and Pyle Atlas*, así como para la extracción de características y máquinas de aprendizaje inteligentes, específicamente redes neuronales artificiales. Por otra parte, Mansourvar *et al.* (2014) proponen un nuevo método automático de la identificación de la edad ósea a partir de la combinación de métodos. Aunque los autores aseguran poder lograr la estimación de la edad ósea en poco tiempo y de forma efectiva, no se reportan experimentos relacionados con el costo computacional o con la tasa de aciertos.

Comparaciones técnicas

En relación con las características técnicas de los desarrollos antes mencionados, a continuación se comparan los resultados obtenidos en términos de casos exitosos de reconocimiento con respecto a la edad deducida por el especialista (tabla 2).

Tabla 2. Comparación de los porcentajes del reconocimiento con éxitos de la edad

| AUTORES | CASOS EXITOSOS (%) |
|-------------------------------|--------------------|
| Pietka <i>et al.</i> (1991) | 94,0 |
| De Luis-García (2003) | 91,5 |
| Fischer <i>et al.</i> (2008) | 70,5 |
| Giordano <i>et al.</i> (2009) | 91,0 |

| AUTORES | CASOS EXITOSOS (%) |
|-------------------------------|--|
| Giordano <i>et al.</i> (2010) | 90,0 |
| Güld (2005) | 86,7 |
| Lee y Kim (2008) | 91,0 |
| Mahmoodi <i>et al.</i> (2000) | 84,0 (en mujeres) 82,0 (en hombres) |

Fuente: elaboración propia.

De la misma forma, es relevante comparar los resultados de los autores en términos del error absoluto promedio (tabla 3), la tasa media de error, la desviación estándar, el porcentaje promedio absoluto y el error medio cuadrático (tabla 4).

Tabla 3. Comparación del error absoluto promedio

| AUTORES | ERROR ABSOLUTO PROMEDIO (AÑOS) |
|-------------------------------|--------------------------------|
| Fischer <i>et al.</i> (2011) | 1,9 |
| Giordano <i>et al.</i> (2010) | 0,33 ± 0,6 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4. Comparación de los resultados reportados con respecto al error

| AUTORES | TASA MEDIA DE ERROR (AÑOS) | DESVIACIÓN ESTÁNDAR (STR) | PROMEDIO ABSOLUTO (AÑOS) | ERROR MEDIO CUADRÁTICO (AÑOS) |
|--------------------------------|----------------------------|---------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|
| Bocchi <i>et al.</i> (2003) | 0,05 | 0,7 | -- | - |
| Fischer (2012) | 1,9 | -- | -- | - |
| Fischer <i>et al.</i> (2011) | 0,99 | 0,76 | -- | - |
| Giordano <i>et al.</i> (2010) | 0,33 ± 0,6 | -- | -- | - |
| Keysers <i>et al.</i> (2000) | 2,2% | -- | -- | - |
| Thodberg <i>et al.</i> (2009) | 0,80 años | 0,68 | -- | - |
| Thodberg (2010) | -- | -- | -- | 0,63 |
| Somkantha <i>et al.</i> (2011) | -- | -- | 0,57 en hombres -0,51 en mujeres | - |

Fuente: elaboración propia.

Es importante mencionar que uno de los desarrollos con menor tasa de error corresponde al de Bocchi *et al.* (2003), quien hace uso del método TW2 y de una arquitectura de red neuronal. Asimismo, la utilización de etiquetados en las falan-

ges y los metacarpos (Fischer *et al.*, 2011) muestra una disminución considerada del error. Además, el uso de algoritmo diferencial gaussiano (DoG), combinado con la desviación estándar definida por el usuario para aproximar el umbral de la región (Giordano *et al.*, 2010), resulta en un buen rendimiento del sistema para la determinación de la edad ósea.

Conclusiones

Se identifica que la selección de la región de interés es un proceso que define el nivel de dificultad del procesamiento de la imagen, y ello puede afectar directamente a los resultados obtenidos, de lo cual depende el éxito de un modelo de estimación de edad ósea. Los trabajos que usaron radiografías digitales disminuyeron drásticamente la fase de preprocesamiento, en comparación con los trabajos que usaron radiografías convencionales digitalizadas. En este último caso, la calidad de la imagen aumentaba la dificultad en el proceso.

La eficiencia en la estimación de la edad ósea obtenida en cada trabajo depende de todo un proceso en el que la gran variedad de técnicas, y los resultados obtenidos con cada una de ellas no permiten concluir cuál constituye el mejor sistema. La región de interés seleccionada puede validar un trabajo en un rango de edades determinado; sin embargo, no necesariamente puede ser usada en todas las edades.

Los métodos con mayores aciertos se basan en el uso de atlas de Tanner-Whitehouse. Al tener en cuenta esta metodología, se asegura un amplio rango de determinación de la edad ósea, así como en las variaciones étnicas, las cuales afectan considerablemente. De la misma forma, el software *BoneXpert* presenta buenos resultados en cuanto a la tasa de error. En este mismo sentido, el uso de redes neuronales y de algoritmo diferencial gaussiano presentan un buen desempeño en la determinación de la edad ósea.

Perspectivas

Para la determinación de la edad ósea se hace necesario el desarrollo de una herramienta automática que se caracterice por un rápido desempeño, con un bajo costo computacional y que sea independiente de la calidad de la imagen presentada por

el usuario. En este mismo sentido, es interesante proponer un sistema que haga uso de la inteligencia artificial, es decir, que sea capaz de aprender de las respuestas entregadas por el especialista en el área. Por otra parte, conviene validar la efectividad de máquinas de soporte vectorial en la selección de las diferentes regiones, como en el tejido bando y los huesos.

Referencias

- Bocchi, B., Ferrara, F., Nicoletti, I. y Valli, G. (2003). An artificial neural network architecture for skeletal age assessment. *Image Processing*, 1, 14-17. Doi: 10.1109/ICIP.2003.1247153.
- Cao, F., Huang, H. K., Pietka, E. y Gilsanz, V. (2000). Digital hand atlas and web-based bone age assessment: system design and implementation. *The Official Journal of the Computerized Medical Imaging Society*, 24, 297-307.
- Cohen, L. (1991). On active contour models and balloons. *Computer Vision and Image Understanding*, 53, 211-218.
- Cootes, T., Hill, A., Taylor, C. y Haslam, J. (1994). Use of active shape models for locating structures in medical images. *Image and Vision Computing*, 12, 355-365.
- Cotes, T. F., Taylor, C. J., Coper, D. H. y Graham, J. (1995). Active shape models-their training and application. *Computer Vision and Image Understanding*, 61, 38-59.
- De Luis-García, R. (2003). *A fully automatic algorithm for contour detection of bones in hand radio graphs using active contours*. Valladolid: Universidad de Valladolid.
- Dinesh, M.S. (1995). Vision system for bone measurement from digital hand radiograph. *Proceedings of the First Regional Conference, IEEE Engineering in Medicine and Biology Society and 14th Conference of the Biomedical Engineering Society of India*. Doi: 10.1109/RCEMBS.1995.533064
- Efford, N. D. (1994). Knowledge-based segmentation and feature analysis of hand wrist radiographs. Recuperado de <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.16.1794>
- Fischer, B., Sauren, M., Güld, M. O. y Deserno T.M. (2008). Scene analysis with structural prototypes for content-based image retrieval in medicine". *Proceedings of SPIE*, 6914, 69141X-1/69141X-9.
- Fischer B. Brosig, A., Deserno, T., Ott, B. y Günther, R. (2009) "Structural scene analysis and content-based image retrieval applied to bone age assessment, *Proceedings of SPIE*, 7260, 726004-1/726004-11.

- Fischer, B., Brosig, A., Welter, P., Grouls, C., Günther, R. y Deserno, T. M. (2010). Content-based image retrieval applied to bone age assessment. *Methodology, Proc. of SPIE*, 7624, 762412-1/762412-10.
- Fischer, B., Welter, P., Grouls, C., Günther, R. W. y Deserno T. M. (2011). *Bone age assessment by content-based image retrieval and case-based reasoning*. Nueva York: Rochester.
- Garn, S. M., Hertzog, K. P., Poznanski, A. K. y Nagy, J. M. (1972). Metacarpophalangeal length in the evaluation of skeletal malformation. *Radiology*, 105, 375-381.
- Giordano, D., Spampinato, C. y Scarciofalo, G. (2009). Automatic skeletal bone age assessment by integrating EMROI and CROI processing. *Bone*, 141-145. Doi: 10.1109/MEMEA.2009.5167972
- Giordano, D., Spampinato, C., Scarciofalo, G. y Leonardi, R. (2010). An automatic system for skeletal bone age measurement by robust processing of carpal and epiphysial/metaphysial bones. *Instrumentation and Measurement*, 59, 2539-2553.
- González, R. C. y Wintz, P. (1987). *Digital image processing*. Massachusetts: Addison-Wesley.
- Göld, M. O., Thies, C., Fischer, B., & Lehmann, T. M. (2005). *Combining global features for content-based retrieval of medical images*. In Cross Language Evaluation Forum 2005 Workshop.
- Hsieh, C.-W., Jong, T.-L., Chou, Y.-H. y Tiu, C.-M. (2007). Computerized geometric features of carpal bone for bone age estimation. *Chinese Medical Journal*, 120, 767-770.
- Jantan, S., Hussain, A. y Mustafa, M. M. (2010). Distal radius bone age estimation based on fuzzy model. *Biomedical Engineering*, 427-432. Doi: 10.1109/IEC-BES.2010.5742275.
- Kass, M., Witkin, A. y Terzopoulos, D. (1988). Snakes: active contour models. *International Journal of Computer Vision*, 1, 321-331.
- Kennedy, J., Eberhart, R. y Wang, D. (1995). Particle swarm optimization. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 4, 1942-1948.
- Keysers, D., Dahmen, J., Theiner, T. y Ney, H. (2000). Experiments with an extended tangent distance. Recuperado de <http://www-i6.informatik.rwth-aachen.de/~keysers/ICPR2000.pdf>
- Lee, J. y Kim, W. (2008). Epiphyses extraction method using shape information for left hand radiography. *International Conference on Convergence and Hybrid Information Technology*, 319-326. Doi: 10.1109/ICHIT.2008.232
- Levitt, T. S., Hedgcock, M. W., Dye, J. W. y Johnston, S. E. (1990). Model-based analysis of computed radiographs. *Proceedings of the First Conference on Visualization in Biomedical Computing*, 144-148. Doi: 10.1109/VBC.1990.109313
- Lin, P., Zhang, F., Yang, Y. y Xun-Zheng, C. (2004). Carpal-bone feature extraction analysis in skeletal age assessment based on deformable model. *JCS&T*, 4, 3-7.

- Liu, J., Qi, J., Liu, Z., Ning, Q. y Luo, X. (2008). Automatic bone age assessment based on intelligent algorithms and comparison with TW3 method. *Computerized Medical Imaging and Graphics*, 32, 678-684.
- Mahmoodi, S., Sharif, B. S., Chester, E. G., Owen, J. P. y Lee, R. (2000). Skeletal growth estimation using radiographic image processing and analysis. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, 4, 292-297.
- Martin, D. D., Sato, K., Sato, M., Thodberg, T. y Tanaka, H. H (2010a). Validation of a new method for automated determination of bone age in Japanese children. *Hormone Research in Pediatrics*, 74, 50-55.
- Martin, D. D., Schittenhelm, J., Ranke, M. B., Binder, G. y Thodberg, H. H. (2010b). Validation of a new adult height prediction method based on automated determination of bone age in a French population. *Hormone Research in Pediatrics*, 69.
- Mansourvar, M., Abdul, S., Akmar, M. y Nasaruddin, F. (2014). Automatic method for bone age assessment based on combined method. *International Conference on Computer and Information Sciences*, 1-5. Doi: 10.1109/ICCOINS.2014.6868424
- Meissner, M., Schmuker, M. y Schneider, G. (2006). Optimized Particle Swarm Optimization (OPSO) and its application to artificial neural network training. *BMC Bioinformatics*, 7. Recuperado de <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1464136/>
- Michael, D. J. y Nelson, C. (1989). HANDX: a model-based system for automatic segmentation of bones from digital hand radiographs. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 8, 64-69.
- Niemeijer, M. (2003). Assessing the skeletal age from a hand radiograph: automating the Tanner-Whitehouse method. *Proceedings of SPIE*, 5032, 1197-1205.
- Pal, K. (1981). Application of fuzzy set theory in detecting x-ray edges. *Sciences-New York*, 6, 1125-1128.
- Pal, K. y King, R. A. (1983). On edge detection of x-ray images using fuzzy sets. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, PAMI-5, 69-77.
- Pal, K., King, R. A. y Hashim, A. A. (1983b). Image description and primitive extraction using fuzzy sets. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, SMC 1,3, 94-100.
- Pavlidis, T. (1977). Fuzzy sets and their applications to cognitive and decision processes. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 22, 999-1000.
- Perona, P. y Malik, J. (1990). Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 12, 629-639.
- Pietka, E., Gertych, A., Pospiech-Kurkowska, S., Cao F. y Huang, H. K. (2001). Computer-assisted bone age assessment: image preprocessing and epiphyseal/metaphyseal ROI extraction. *Assessment*, 20, 715-729.

- Pietka, E., Kaabi, L., Kuo, M. L. y Huang, H. K. (1993). Feature extraction in carpal-bone analysis. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 12, 44-49.
- Pietka, E., McNitt-Gray, M. F., Kuo, M. L. y Huang, H. K. (1991). Computer-assisted phalangeal analysis in skeletal age assessment. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 10, 616-620.
- Rucci, M., Coppini, G., Nicoletti, I., Cheli, D. y Valli, G. (1995). Automatic analysis of hand radiographs for the assessment of skeletal age: a subsymbolic approach, *Computers and Biomedical Research*, 28, 239-256.
- Seok, J., Hyun, B., Kasa-Vubu, J. y Girard, A., (2012). Automated classification system for Bone Age X-ray images. *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, 208-213. Doi: 10.1109/ICSMC.2012.6377701
- Sharif, B. S., Zaroug, S., Chester, E.G., Owen, J. P. y Lee, E. J. (1991). Bone edge detection in hand radiographic images. *Proceedings of 16th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 514-515. Doi: 10.1109/IEMBS.1994.411927.
- Somkantha, K., Theera-Umpon, N. y Auephanwiriyakul, S. (2011). Bone age assessment in young children using automatic carpal bone feature extraction and support vector regression. *Journal of Digital Imaging*, 24(6), 1040-1058.
- Sun, Y. N., Ko, C. C., Mao, C.W. y Lin, C. J. (1994). A computer system for skeletal growth measurement. *Computers and Biomedical Research*, 27, 2-12.
- Tamura, H., Mori, S. y Yamawaki, T. (1978). Textural features corresponding to visual perception. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 8, 460-473.
- Tanner, J. M., Whitehouse, R. H., Healy, M. J. y Goldstein, H. (1975). *Assessment of skeletal maturity and prediction of adult height (TW2 method)*. Nueva York: Academic Press.
- Thies, C., Fischer, B. y Lehmann, T. M. (2005). Content-based retrieval of medical images by combining global features. Doi: 11878773_77. Recuperado de http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F11878773_77
- Thodberg, H. H. (2010). Validation and reference values of automated bone age determination for four ethnicities. *Acad. Radiol.*, 17, 1425-1432.
- Thodberg, H. H., Kreiborg, S., Juul, A. y Pedersen, K. D. (2009). The BoneXpert method for automated determination of skeletal maturity. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 28, 52-66.
- Tsai, W. H. (1985). Moment-preserving thresholding: a new approach. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 29, 377-399.
- Van Rijn, R., Lequin, M. H. y Thodberg, H. H. (2009). Automatic Determination of Greulich and Pyle bone age in healthy Dutch children. *Pediatric Radiology*, 39, 591-597.

- Xu, C. y Prince, J. L., (1998a). Generalized gradient vector flow external forces for active contours. *Signal Processing*, 71, 131-139.
- Xu, C. y Prince, J. L. (1998b). Snakes, shapes, and gradient vector flow. *IEEE Transactions on Image Processing*, 7, 359-69.
- Zhang, A., Gertych, A. y Liu, B. J. (2007). Automatic bone age assessment for young children from newborn to 7-year-old using carpal bones. *Computerized Medical Imaging and Graphics*, 31, 299-310.

Diseño y simulación de un vehículo prototipo para la distribución automática de fertilizantes agrícolas

PEDRO FERNANDO MARTÍN GÓMEZ¹

OSCAR SAÚL HERNÁNDEZ MENDOZA²

JUAN SEBASTIÁN TOQUICA ARENAS³

RESUMEN

Durante los últimos años, la agricultura ha tenido un especial desarrollo de nuevas tecnologías dirigidas al bienestar y el sostenimiento del ser humano. A través de múltiples investigaciones se han desarrollado nuevas tecnologías en automatización agrícola, con base en la eficiencia y efectividad de las prácticas agrícolas comunes, junto con equipos y métodos modernos de producción. En esta línea, el presente artículo describe el diseño y la simulación de un vehículo autónomo para la irrigación inteligente de fertilizantes en un cultivo piloto, por lo cual se utiliza un *software* especializado. Se genera así una nueva perspectiva sobre cómo la robótica y la automatización pueden aportar una solución diferente y eficaz en la forma como se manejan cultivos por filas en Colombia, en función de que estos sean más tecnificados y acordes con nuestra topografía y características de producción. Este vehículo busca viabilizar la aplicación de tecnología moderna en la agricultura, adaptada a cultivos de pequeño y mediano tamaño, los cuales representan un alto porcentaje de la producción agrícola en el país.

Palabras clave: automatización, vehículo autónomo, producción agrícola, diseño, simulación.

¹ Doctor en Ingeniería Mecánica por la Universidad Federal de Uberlândia, Santa Mônica, Brasil. Magíster en Materiales y Procesos de Manufactura por la Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. Ingeniero mecánico por la Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. Actualmente se desempeña como docente del programa de Ingeniería en Automatización en la Universidad de La Salle, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: pmartin@unisalle.edu.co

² Doctor en Ingeniería Mecánica por la Universidad Estatal de Campinas, Campinas, Brasil. Magíster en Ingeniería Mecánica por la Universidad de Siracusa, Nueva York, Estados Unidos. Ingeniero mecánico por la Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. Actualmente se desempeña como profesor doctor emérito de posgrado en la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Federal de Uberlândia, Santa Mônica, Brasil. Correo electrónico: oscarhernandez@femec.ufu.br

³ Candidato a magíster en Sistemas Mecatrónicos por la Universidad de Brasilia, Brasil. Ingeniero de diseño y automatización electrónica por la Universidad de La Salle, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: jstoquica@gmail.com

FECHA DE RECEPCIÓN: 18 DE OCTUBRE DEL 2013 • FECHA DE APROBACIÓN: 18 OCTUBRE DEL 2015

Cómo citar este artículo: Martín Gómez, P.F., Hernández Mendoza, O. S. y Toquica Arenas, J. S. (2015). Diseño y simulación de un vehículo prototipo para la distribución automática de fertilizantes agrícolas. *Épsilon*, 24, 49-xx

Design and Simulation of a Prototype Vehicle for Automatic Distribution of Agricultural Fertilizers

ABSTRACT

For the past few years, agriculture has had a special development of new technologies for the welfare and sustenance of human beings. New technologies in agricultural automation have been developed through multiple investigations based on the efficiency and effectiveness of common agricultural practices, together with modern production equipment and methods. In this vein, this paper describes the design and simulation of an autonomous vehicle for smart irrigation of fertilizers in test planting, reason why a specialized software is used. Thus, a new perspective is generated about how robotics and automation can provide a different and effective solution to the way crops are handled as rows in Colombia, depending on whether they are more technically advanced and consistent with our topography and production characteristics. This vehicle seeks to facilitate the application of modern technology in agriculture, adapted to small and medium size crops, which represent a high percentage of agricultural production in the country.

Keywords: automation, autonomous vehicle, agricultural production, design, simulation.

Desenho e simulação de um veículo protótipo para a distribuição automática de fertilizantes agrícolas

RESUMO

Durante os últimos anos, a agricultura teve um especial desenvolvimento de novas tecnologias dirigidas ao bem-estar e o sustento do ser humano. Através de múltiplas investigações foram desenvolvidas novas tecnologias em automatização agrícola, com base na eficiência e efetividade das práticas agrícolas comuns, juntamente com equipamentos e métodos modernos de produção. Nesta linha, este artigo descreve o desenho e a simulação de um veículo autônomo para a irrigação inteligente de fertilizantes em um cultivo piloto, razão pela qual se utiliza um *software* especializado. Gera-se assim uma nova perspectiva sobre como a robótica e a automatização podem oferecer uma solução diferente e eficaz na forma como se manejam cultivos por filas na Colômbia, em função de que estes sejam mais tecnológicos e acordes com a nossa topografia e características de produção. Este veículo visa viabilizar a aplicação de tecnologia moderna na agricultura, adaptada a cultivos de pequeno e médio tamanho, os quais reapresentam uma alta porcentagem da produção agrícola no país.

Palavras chave: automatização, veículo autônomo, produção agrícola, desenho, simulação.

Introducción

En los últimos años, la agricultura ha captado la atención del mundo entero por el desarrollo de avances tecnológicos y nuevos métodos estratégicos, sin dejar de lado la experiencia humana. Un ejemplo de ello es la aplicación de campos como la robótica en la agricultura, lo que ha facilitado las producciones en gran escala. Esta especialización tecnológica de la agricultura es llamada en la actualidad *agricultura de precisión*, esto es: el manejo de la variabilidad agrícola para mejorar los beneficios económicos y reducir el impacto tecnológico en el medioambiente (Blackmore, 2007).

Dentro de las múltiples aplicaciones para este tipo de agricultura se encuentra el uso de los vehículos autónomos (*autonomous guide vehicle* [AGV]) requeridos en muchos procesos de los cultivos. El diseño de “sistemas específicos a medida” ha creado vehículos de cuatro o seis ruedas; con orugas; de dos, cuatro o seis piernas, e incluso robots aéreos especiales. Además, estos diseños están presentes en sistemas de dosificación, agitación, siembra, irrigación, cosecha y todos los procesos relacionados con la agricultura.

Para este fin, se han desarrollado vehículos onmidireccionales, como el MEGAN-1 (Diegel *et al.*, 2002), los OMNI-x (Mohd *et al.*, 2006), los tractores modificados (Gan-Mor *et al.*, 2007; Da Cunha *et al.*, 2011; Murakami *et al.*, 2008; Rosa *et al.*, 2008), el robot TA-ATMR como modificación de una Yamaha Grizzly 700 ATV (Bascetta *et al.*, 2009) y robots con piernas (Ilda *et al.*, 2008). También se han desarrollado robots con posicionamiento autónomo controlados por sistemas de posicionamiento global y navegación cinética satelital (GPS-RTK), como el Autonomous Platform and Information System (API) (Slaughter *et al.*, 2008; Åstrand y Baerveldt, 2002) y la plataforma modular INDIGO para cargas mayores de 80 kg (Sternfeld *et al.*, 2005).

Otros diseños con robots soportados por sistemas de información geográfica son los desarrollados por la Universidad de São Paulo (Tabile *et al.*, 2011) y el robot ATRV-jr, de iROBOT, para detección de obstáculos (Blackmore *et al.*, 2004). Se han creado también robots cooperativos para tareas en grupo (Paulsen *et al.*, 2005; Mondada *et al.*, 2004; Pettinaro *et al.*, 2002) y, finalmente, robots tipo Rover todo-

terreno para exploración aeroespacial, con diversas aplicaciones en los últimos años: el robot DIDAJO de la Universidad de San Buenaventura, en Bogotá, Colombia (Ardila *et al.*, 2006); los robots Mars Explorer Rover (MER) de la NASA; los robots SOLERO y CRAB del Autonomous System Laboratory en Suiza; los modelos RCL-E y RCL-C, y los tipo CRAB-S y CRAB-8 de última generación, con muchas versiones en la actualidad (Thueer *et al.*, 2006).

La mayoría de estas aplicaciones involucran visión por computador, sistema de posicionamiento global (GPS) con generación de trayectorias por computador, sistemas de información geográfica (SIG), bases de datos para almacenamiento y un sistema de comunicación inalámbrico (generalmente de tipo *wi-fi* o *zig-bee*). Todas estas aplicaciones, por su estructura compleja, son justificables en sistemas de producción en gran escala, sobre terrenos básicamente planos y con cultivos de más de 1000 ha.

Por esta razón, y dado que la producción agrícola en Colombia es desarrollada en alto porcentaje por pequeños agricultores, fue dimensionado y analizado por computador un vehículo con estructura tipo Rover de seis ruedas, con tecnología CAE (*computer-aided engineering*, o análisis de ingeniería por computador). Su función fue la dosificación automática de fertilizantes líquidos de nitrógeno, potasio y fósforo sobre cultivos pequeños y medianos, a partir de un sistema de posicionamiento basado en GPS y controlado por computador, con tecnología de menor costo. El vehículo fue dimensionado para una autonomía de 1 ha y capacidad máxima de carga de 500 kg.

Características fundamentales del tipo de cultivo

Para desarrollar el prototipo fue necesario determinar las características de un cultivo piloto, para así ajustar el vehículo a las condiciones específicas de este. El cultivo fue seleccionado según su tamaño, características, cantidad de producción, demanda y facilidad de acceso cerca de Bogotá, así como por las características orgánicas y de fertilización con nitrógeno, fósforo y potasio. Además, se tuvieron en cuenta otros factores: la cercanía del cultivo a Bogotá, los requerimientos de transporte y desplazamiento frecuente para pruebas en campo, y el tamaño pequeño de la planta, como elemento fundamental para el dimensionamiento del

vehículo. Así, fue seleccionado un cultivo de papa, que típicamente se hace con 1 m entre surcos y 40 cm entre plantas, y una altura de planta promedio de 40 cm.

Todo lo anterior se suma al interés de desarrollar un prototipo estructural base, sobre el cual puedan ser implementados después dispositivos modulares intercambiables para diferentes labores del cultivo, como siembra, irrigación, cosecha, fertilización y medición de variables de cultivo o de medioambiente. Los sistemas componentes fueron desarrollados para estas condiciones y características del cultivo. Adicionalmente, aunque el producto final comercializable en este caso es el tubérculo, puede ser aplicado a otros cultivos de características o dimensiones similares (Martín, 2013).

Requisitos de diseño derivados de la aplicación

El tamaño del vehículo debe ser acorde con las características del cultivo indicadas anteriormente; la longitud y el ancho no deben superar los 100 cm; la altura mínima depende del tamaño de las plantas de papa (aproximadamente, 40 cm), y el largo del prototipo es proporcional a las anteriores dimensiones, para facilitar el giro sobre su centro geométrico. En consecuencia, según las características del suelo, es un vehículo todoterreno, por el medio húmedo y agresivo donde se va a desempeñar; con flexibilidad de tránsito por el cultivo y sin dañar las plantas; de configuración flexible, para intercambiar diferentes módulos componentes de una variedad tareas agrícolas; y con material liviano y fácil de construir y mantener en el campo colombiano. Las principales características de diseño y construcción son estas:

- a) La estabilidad del vehículo se logra con tres ruedas mínimo, para cuando hay falta de tracción o de contacto con la superficie del cultivo.
- b) Los obstáculos de tamaño máximo sobrepasables son de aproximadamente el 20% del diámetro de las ruedas; los motores, en cooperación con el sistema de evasión, tendrán suficiente torque para la superación de los obstáculos.
- c) Las limitaciones dimensionales del vehículo, debido a las características de los cultivos por filas, dependerán del tamaño de las plantas y su distribución en el terreno.

Diseño estructural del prototipo de vehículo

Para establecer las dimensiones estructurales del vehículo fue calculada el área mínima de los soportes y las partes que componen el chasis. Para ello fue seleccionado el material de construcción, y con sus propiedades físicas y las cargas aplicadas se determinaron las respuestas de desplazamientos y los esfuerzos generados en cada uno de los componentes a partir del equilibrio estático (figura 1).

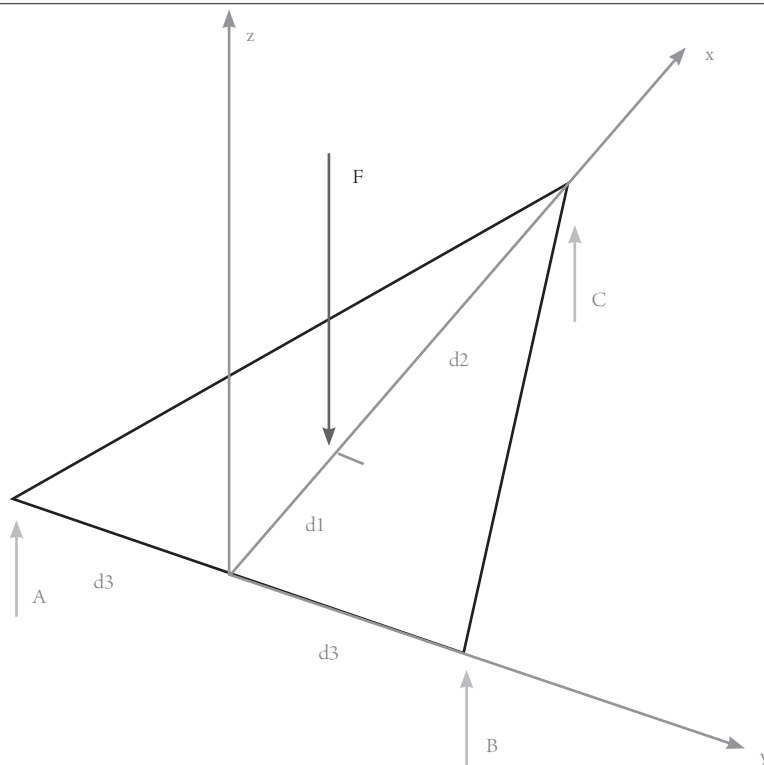


Figura 1. Diagrama de cuerpo libre del marco principal de la estructura

Fuente: elaboración propia.

En el diseño del chasis fueron determinadas las reacciones generadas por la carga máxima que soportará el vehículo, presupuestada en aproximadamente 500 kg con todo el sistema de dosificación abordo. En la figura 1 se identifican los tres apoyos —que en la práctica se denominan los pivotes *A*, *B* y *C*— sobre los cuales la carga total *F* se distribuye a través del marco y cuyo análisis fue hecho para los planos *ZX* y *ZY*, dando como resultado:

Para el plano ZX, la reacción en el punto C queda definida por la ecuación [1]:

$$R_{CZ} = F \frac{d_1}{d_1 + d_2} \quad [1]$$

Donde d_1 y d_2 son las distancias según la figura 1.

Para el plano ZY, las reacciones en los puntos A y B queda definidas según la ecuación [2]:

$$R_{AZ} = R_{BZ} \quad [2]$$

Finalmente, la reacción en el punto A se determina de acuerdo con la ecuación [3]:

$$R_{AZ} = \frac{F}{2} \left(1 - \frac{d_1}{d_1 + d_2} \right) = \frac{F}{2} \left(\frac{d_2}{d_1 + d_2} \right) \quad [3]$$

De donde fueron obtenidos los siguientes valores:

$$R_{AZ} = R_{BZ} = 1611,4\text{N}$$

$$R_{CZ} = 839,6\text{N}$$

Para determinar el área trasversal de una viga estructural bajo flexión, se debe cumplir con criterios básicos de diseño, como el momento flector máximo en la viga y el esfuerzo de diseño soportado por las dimensiones de la sección trasversal de la viga (Mott, 2009). Como resultado del diseño, se definió un perfil de aluminio 2014-T4 de 50 mm por 26 mm para el marco principal de la estructura, con barras de suspensión de 634,5 mm² de área mínima, soporte de ruedas de 453,3 mm² de área mínima y pasadores de ensamble de 11 mm de diámetro mínimo. Los diseños de las uniones de la estructura con tornillos son mostrados en la figura 2.

El análisis estático de cada una de las piezas fue desarrollado con el *software* Solidworks, mediante análisis de ingeniería por computador (CAE) para los materiales seleccionados. De acuerdo con los resultados mostrados en la figura 3, el límite elástico del material (290 MPa) no es superado, y el máximo esfuerzo generado es de aproximadamente 25,5 MPa. Esto arroja un factor de seguridad de aproxima-

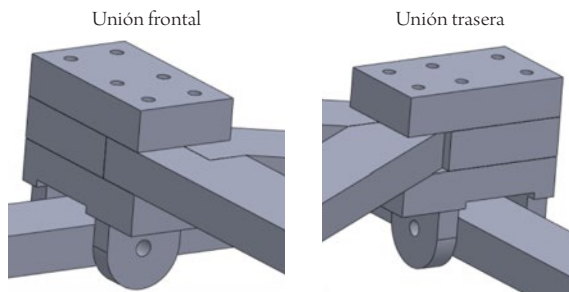


Figura 2. Diseño de las uniones de la estructura principal

Fuente: elaboración propia.

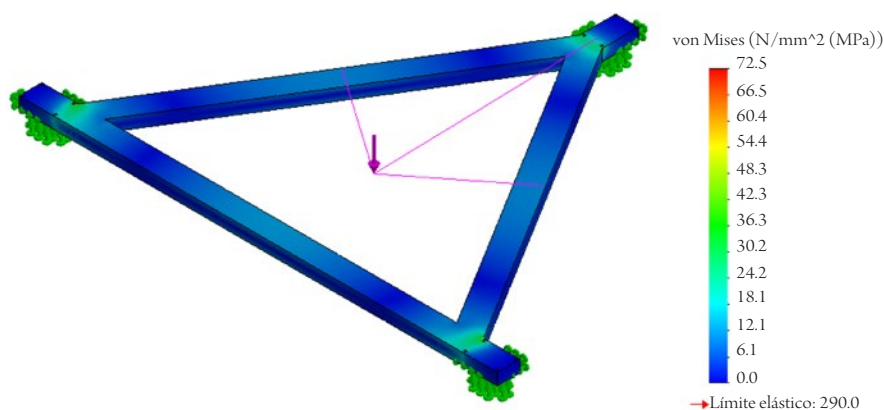


Figura 3. Análisis de esfuerzos del marco principal de la estructura

Fuente: elaboración propia.

damente 10, que puede ser favorable por el tipo de ambiente al cual está expuesto el vehículo y por la carga que soporta con las características irregulares del terreno. Además, ello favorece la portabilidad de tanques con líquidos en movimiento y la posibilidad de que otros accesorios modulares diseñados en el futuro puedan generar cargas mayores sobre la estructura. Al aplicar estos mismos criterios, y desde los recursos CAE, también fueron diseñados los demás elementos componentes de la estructura del vehículo.

Para las condiciones de carga estipuladas, y según los diseños de montaje, fueron seleccionados pernos de cabeza hexagonal tipo G8 de $5/16 \times 18$ UNC 2A, de 3,5 plg de longitud, como se puede observar en la figura 4.

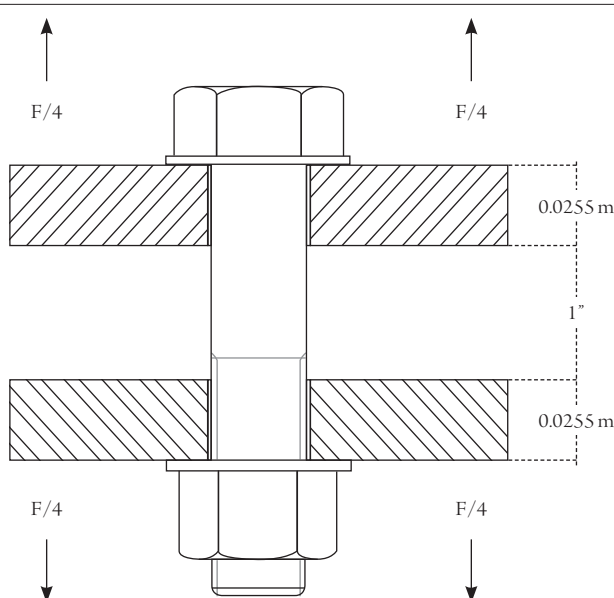


Figura 4. Diagrama de fuerzas en el perno según el diseño del ensamble

Fuente: elaboración propia.

Medidas preliminares del vehículo

La estructura tipo Rover de seis ruedas fue seleccionada a partir de un diseño de la Universidad de Michigan (Weymouth y Roth-Tabak, 1990), por su estabilidad, versatilidad y buen comportamiento en todo tipo de terrenos. Así, tendrá por lo menos cuatro ruedas en contacto permanente con el suelo en diferentes momentos, lo cual es importante por la necesidad de llevar tanques con líquidos a bordo (Thueer *et al.*, 2006). El radio de giro apropiado para el vehículo fue definido para que fuera sobre su propio centro geométrico, en función de que ocupe el menor espacio posible y optimice el espacio disponible para el cultivo. Adicionalmente, fue considerado este hecho para establecer el mismo centro geométrico como punto de referencia, a fin de asegurar el posicionamiento del vehículo con respecto a las plantas de cultivo para la dosificación; es decir, este punto es considerado como la referencia de posicionamiento dentro del cultivo sobre cada planta por dosificar.

De acuerdo con lo anterior, se tuvo en cuenta la disposición al momento de realizar el giro de la estructura, la flexibilidad y el poco espacio que requiere, para no

estropear las filas del cultivo, en comparación con otros mecanismos de giro. Ello permite una mayor precisión del sistema, al posicionarse en función del centro geométrico del vehículo. A partir de las características propias del cultivo, se dimensionaron todos los elementos, limitados por la distancia entre surcos y la altura máxima que podrían alcanzar las plantas. Esto da como resultado las medidas de 970 mm de lado en el plano horizontal, con una altura de 400 mm para la estructura como se muestra en la figura 5.

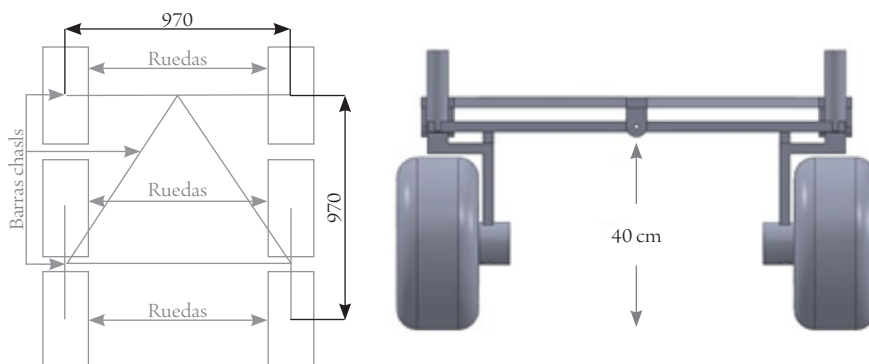


Figura 5. Dimensionamiento general del vehículo

Fuente: elaboración propia.

Sistema de dirección

Respecto al giro del vehículo sobre su propio centro geométrico, ocupando el menor espacio posible y sin estropear las plantas fue determinado un sistema mediante el cual se hace la rotación de las llantas: se producirá un giro simultáneo de dos llantas delanteras y dos traseras. También se calculó el ángulo necesario para que las líneas de eje se crucen en el centro de rotación, que para este caso coincide con el centro geométrico, como se muestra en la figura 6.

Para el sistema de giro seleccionado, se utilizan servomotores independientes en cada rueda, encargados de girar las ruedas 45° para posicionar el AGV en estado de "giro"; una vez alcanzado este estado, los seis motores que generan el avance del vehículo se energizan en sentido horario o antihorario, según el caso, para desarrollar el movimiento de giro hasta que la medición del compás electrónico valide o confirme los requerimientos de orientación especificados. Una vez orientado el

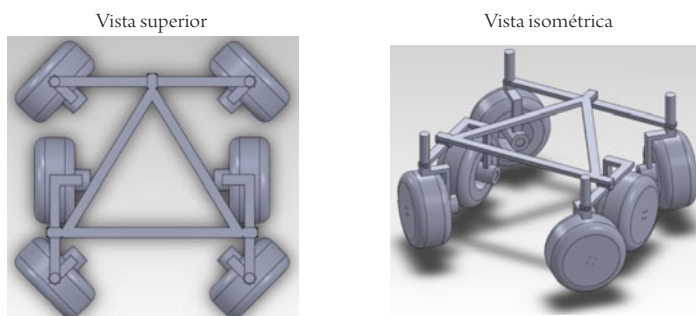


Figura 6. Especificación del sistema de rotación de las ruedas para el giro sobre el centro geométrico

Fuente: elaboración propia.

vehículo, este endereza nuevamente las ruedas, para desplazarse linealmente según los puntos de trayectoria enviados, basado en el algoritmo A* de trayectorias (Martín *et al.*, 2012).

Cálculo de motores

Los motores fueron calculados a partir de la fuerza necesaria para el movimiento del vehículo o el giro de las ruedas. Para ello se tuvo en cuenta el peso máximo que habrá de movilizar el prototipo, es decir, 500 kg distribuidos sobre las seis ruedas, de acuerdo con su geometría y dimensiones. Estos cálculos dependen fundamentalmente del peso que soporta y de la fricción con el suelo (figura 7), para el cálculo del torque necesario.

Adicionalmente, a la fuerza de fricción F_{FR} se le suma la componente horizontal del peso, derivada de la inclinación del suelo con ángulos máximos de 13° ; por tanto, la fuerza total del motor tiene en cuenta la componente de fuerza adicional por la inclinación generada. El motor reductor seleccionado es de marca Transtecno. En la tabla 1 se detallan las características.

Tabla 1. Especificaciones generales del motor reductor

| MARCA | REFERENCIA | VOLTAJE DE OPERACIÓN | RELACIÓN DE REDUCCIÓN | TORQUE DE SALIDA (N · M) | VELOCIDAD (M/S) |
|------------|-------------|----------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------|
| Transtecno | ECP350/1053 | 24 VDC | 1:168 | 186 | 0,21 |

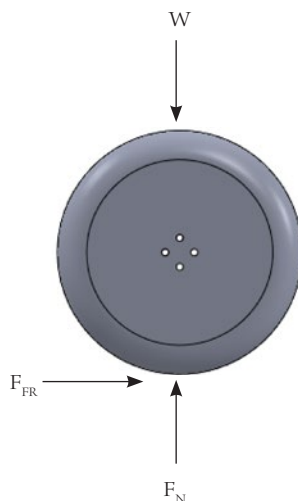


Figura 7. Diagrama de cuerpo libre de la rueda para el cálculo de los motores

Nota: W , peso total; F_{FR} , fuerza de fricción; F_N , fuerza normal.

Fuente: elaboración propia.

Sistema de suspensión

Se implementó el tipo de suspensión *rocker-bogie* (Bickler, 1988), que es utilizado especialmente en los vehículos Mars Rover de la NASA. El término *rocker* fue introducido por la función de oscilación de los eslabones entre los sistemas de suspensión del robot. Este principio ofrece mayor estabilidad debido a que cuando un *rocker* se eleva, el otro extremo desciende, lo cual genera siempre el contacto de las ruedas con el terreno. Asimismo, el término *bogie* se refiere a la unión de la rueda con la terminación en el respectivo *rocker*.

Según el tipo de suspensión seleccionado, se modificaron algunos aspectos de la configuración *rocker-bogie* básica, para implementar así un prototipo ajustado a las condiciones del terreno, con mayor flexibilidad a la articulación y que sobrepase eficientemente los obstáculos. En la figura 8 se muestra el sistema de suspensión desarrollado; se aprecian allí los *bogies* utilizados para la aplicación, en función de facilitar el movimiento de las ruedas compensado con el balanceo lateral del vehículo.

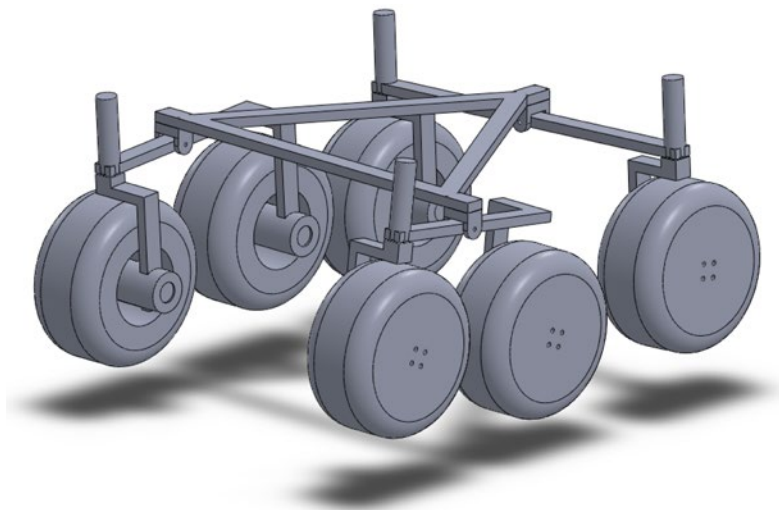


Figura 8. Accionamiento flexible del sistema de suspensión basado en los *rocker-bogies*

Fuente: elaboración propia.

Sistema de control de movimiento y navegación

Para el control de movimiento y navegación fue implementada una arquitectura DAMN (*distributed architecture for mobile navigation*), ilustrada en la figura 9. Esta arquitectura distribuida para navegación móvil está basada en un árbitro que coordina las acciones de evasión de obstáculos, búsqueda del objetivo, seguimiento de ruta y solicitud de nueva ruta según las características de desempeño; y a partir de esta arquitectura se planteó el código de control para el vehículo.

Junto a las variables de *posicionamiento* y *evasión de obstáculos*, el algoritmo de control provee las acciones por seguir según el comportamiento del vehículo sobre el terreno. Dependiendo de la trayectoria generada por el algoritmo A*, el sistema de control verifica el estado actual y orienta el vehículo (giro) en dirección a las coordenadas recibidas; posteriormente, realiza el desplazamiento necesario para proceder con la dosificación de los fertilizantes y esperar nuevamente coordenadas del próximo punto al cual deberá dirigirse. Este procedimiento se repite hasta agotar el fertilizante o terminar el proceso de dosificación (figura 9).

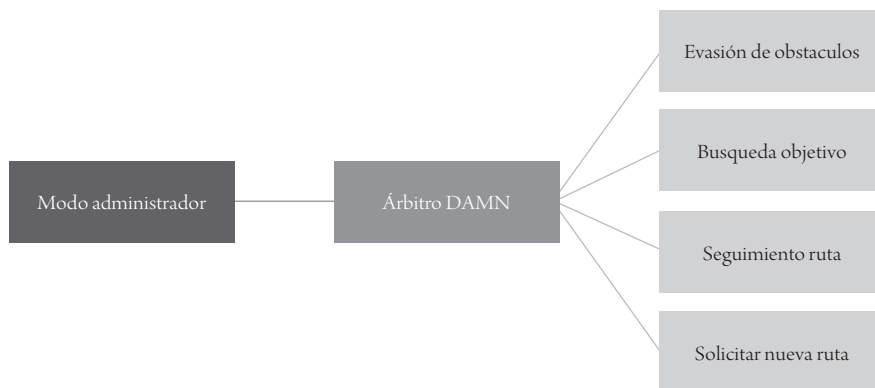


Figura 9. Configuración de arquitectura DAMN implementada

Fuente: elaboración propia.

En la figura 10 se muestra cómo fue configurado el sistema de control para el desempeño del vehículo sobre el terreno, el cual se desarrolló en Microsoft Visual Studio, versión 2008, en lenguaje C++. De acuerdo con la figura, el *software* Mari-

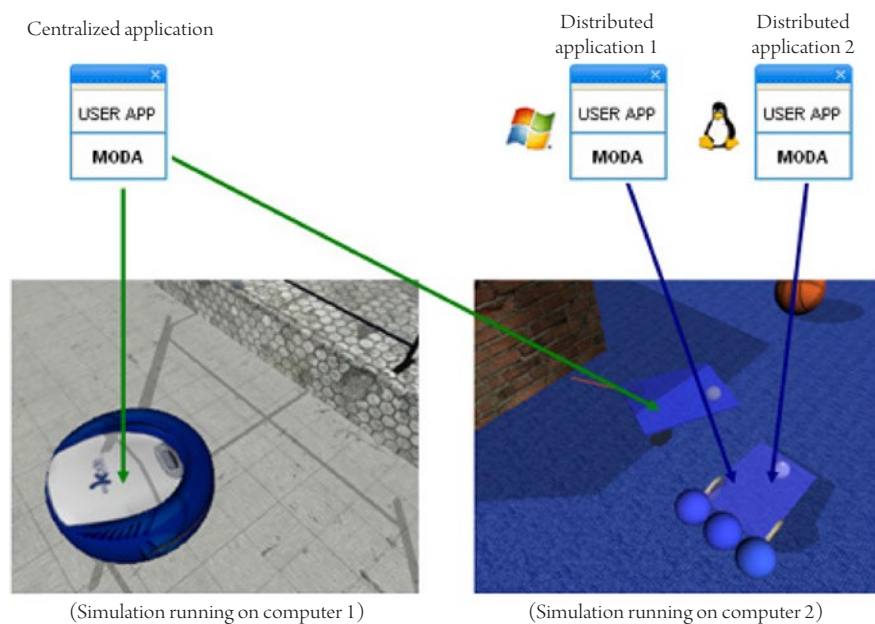


Figura 10. Configuración por bloques del servidor MODA en el *software* Marilou Robotics Studio

Fuente: AnyCode Marilou (2012).

lou Robotics Studio tiene un servidor MODA (Marilou Open Devices Access), donde reside la aplicación centralizada en el computador, la cual se comunica con la aplicación de control del vehículo, configurado para la simulación como un controlador distribuido. A través de este servidor virtual se simula la conexión entre el controlador del vehículo y el computador para la simulación dinámica del vehículo (Anycode, 2012).

El algoritmo desarrollado mediante la implementación de la metodología DAMN para el control del movimiento y posicionamiento del vehículo está conformado por selecciones prioritarias (árbitro) entre variables de entrada, como el ángulo de rotación con respecto al norte terrestre. Se tiene en cuenta acá un compás electrónico simulado con las mismas características reales, la detección de obstáculos y la distancia recorrida por el vehículo, como variables adquiridas por funciones internas del simulador. Se registra además la variación de movimiento en función de los ejes coordenados, a semejanza de dispositivos electrónicos basados en posicionamiento terrestre.

La relación de posicionamiento terrestre aplicada en el simulador está descrita por coordenadas semejantes a un plano cartesiano de dos dimensiones, y allí la distancia entre puntos es de 1 m. Para la evasión de obstáculos, el algoritmo depende fundamentalmente de los sensores ultrasónicos de distancia, los cuales realizan la lectura de posibles objetos que obstruyan el desplazamiento del vehículo. Junto a las variables de posicionamiento y evasión de obstáculos, el algoritmo de control provee al comportamiento sobre el terreno agrícola el control sobre los actuadores o motores. Dependiendo de la trayectoria generada por el algoritmo pertinente, el sistema de control verifica el estado actual y posiciona el vehículo (giro), y posteriormente se desplaza para proceder con la dosificación de los fertilizantes y esperar nuevamente las coordenadas, como se muestra en el diagrama de flujo de la figura 11.

Adicionalmente, se implementó en el sistema de control una corrección de posición para cuando el vehículo se encuentra en cercanías al punto de dosificación; así, se desplaza el vehículo específicamente hacia la coordenada correcta, lo cual garantiza la dosificación de los fertilizantes necesarios de forma eficiente. El error máximo es de 10 cm de distancia, ya que el tiempo requerido para ubicarse con precisión mayor es demasiado largo.

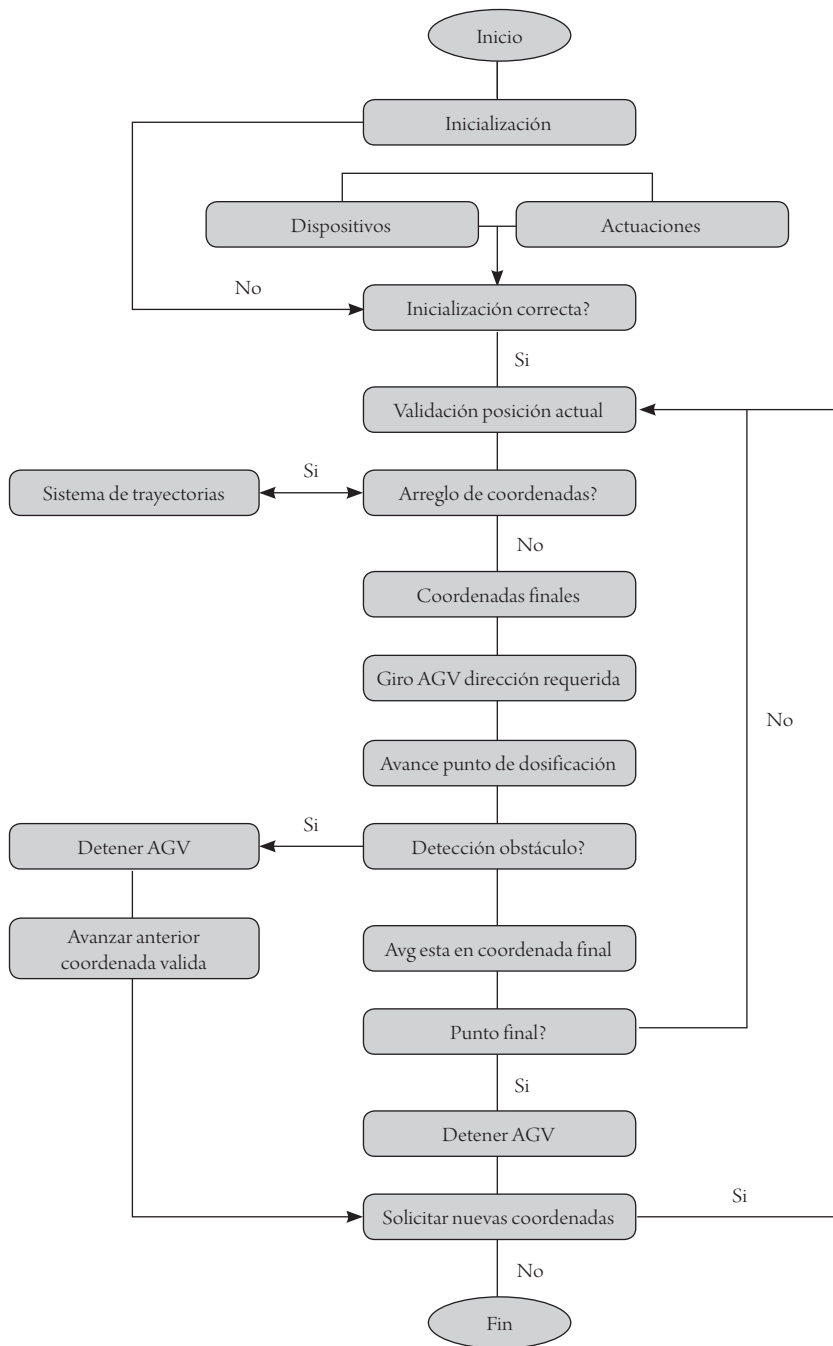


Figura 11. Diagrama de flujo de funcionamiento del vehículo

Fuente: elaboración propia.

Simulación dinámica

Para la verificación del diseño funcional fue realizada la simulación en el terreno, así como el comportamiento generado por los actuadores y sensores mediante el algoritmo de control desarrollado en lenguaje C. Se generó un modelo con las mismas características físicas del modelado en Solid Works, el cual fue puesto sobre el terreno donde se desplaza el AGV. Este modelo considera aspectos similares al campo de cultivo real, es decir, con las plantas y los puntos de las estaciones en campo. Posteriormente, se hicieron varias simulaciones con diferentes trayectorias y en distintas condiciones de movimiento. Los resultados se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Errores obtenidos en la trayectoria desplazamiento

| | SIMULACIÓN 1 (%) | | SIMULACIÓN 2 (%) | | SIMULACIÓN 3 (%) | |
|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | ERROR CON CORRECCIÓN | ERROR SIN CORRECCIÓN | ERROR CON CORRECCIÓN | ERROR SIN CORRECCIÓN | ERROR CON CORRECCIÓN | ERROR SIN CORRECCIÓN |
| Error en metros (m) | 1,33 | 0,67 | 1,43 | 1,32 | 0,63 | 0,51 |
| | 1,81 | 6,20 | 1,32 | 1,80 | 0,71 | 0,30 |
| | 0,41 | 2,31 | 1,55 | 3,74 | 2,93 | 4,10 |
| | 1,48 | 1,50 | 1,73 | 3,41 | 0,50 | 2,40 |
| | 1,50 | 4,51 | 4,68 | 4,34 | 3,28 | 3,11 |
| Promedio | 1,31 | 3,04 | 2,14 | 2,92 | 1,61 | 2,08 |

Fuente: elaboración propia.

En la tabla 2 se aprecia el comportamiento del vehículo al comparar el algoritmo sin corrección y con corrección de posicionamiento a partir de los resultados promedio. Se entiende por *corrección de posicionamiento* a aquella aplicación que hace la corrección para un error máximo de 10 cm de distancia. No hay corrección de posicionamiento cuando la aplicación no hace esta consideración adicional. Los resultados ofrecen la dosificación de los fertilizantes sobre el punto deseado con mayor precisión, con lo cual se mejora considerablemente el posicionamiento en el cultivo y se disminuye el porcentaje de error, pero aumentan los tiempos de aplicación.

El vehículo fue modelado con formas básicas de Marilou Robotics Studio (cilindros, cubos, esferas), y luego fueron configuradas las relaciones y características como material y restricciones funcionales (figura 12).

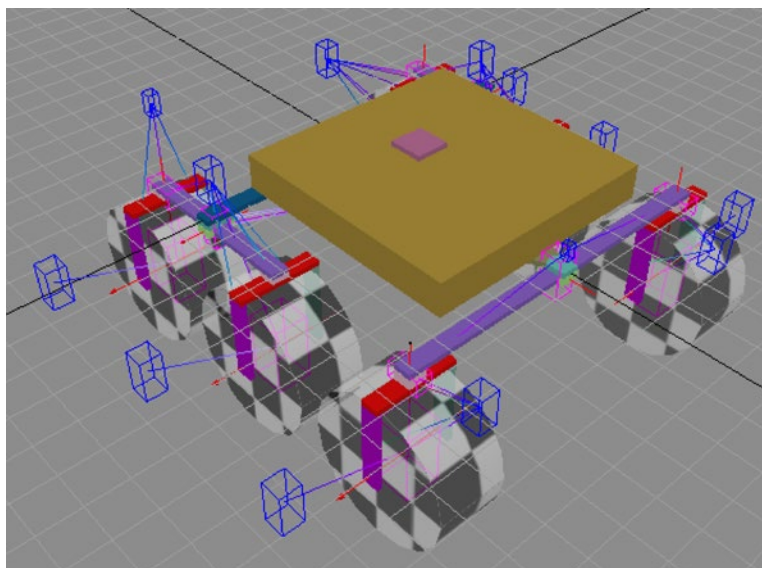


Figura 12. Modelo final del vehículo configurado en Marilou Robotics

Fuente: elaboración propia.

Tales relaciones y características fueron posteriormente importadas sobre el modelo de distribución del cultivo (mostrado en perspectiva en la figura 13). El cultivo está compuesto por 7 filas, cada una de 12 plantas (previamente modeladas en Blender), donde fue hecha la simulación del algoritmo de control para el posicionamiento, la evasión de obstáculos y la posterior dosificación.

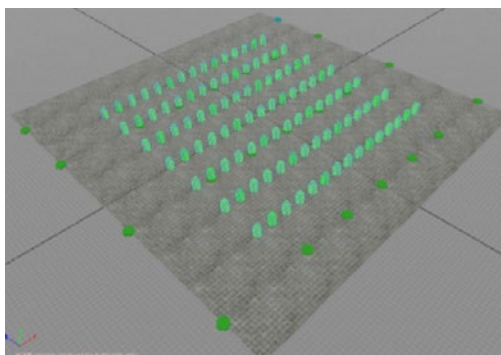


Figura 13. Modelo de terreno desarrollado en Blender con las plantas (verde claro) y las estaciones alrededor (verde oscuro)

Fuente: elaboración propia.

El sistema de control se probó mediante la simulación de trayectorias a través del terreno, con la aplicación del sistema de control con corrección y sin corrección de posicionamiento, cuyos resultados se muestran en la figura 14. Se simuló el comportamiento de posicionamiento del vehículo a partir de puntos establecidos y de los valores mostrados por el sensor de posicionamiento utilizado en la simulación. Los valores mostrados corresponden a los promedios de diez repeticiones de las mismas pruebas simuladas para tres casos diferentes.

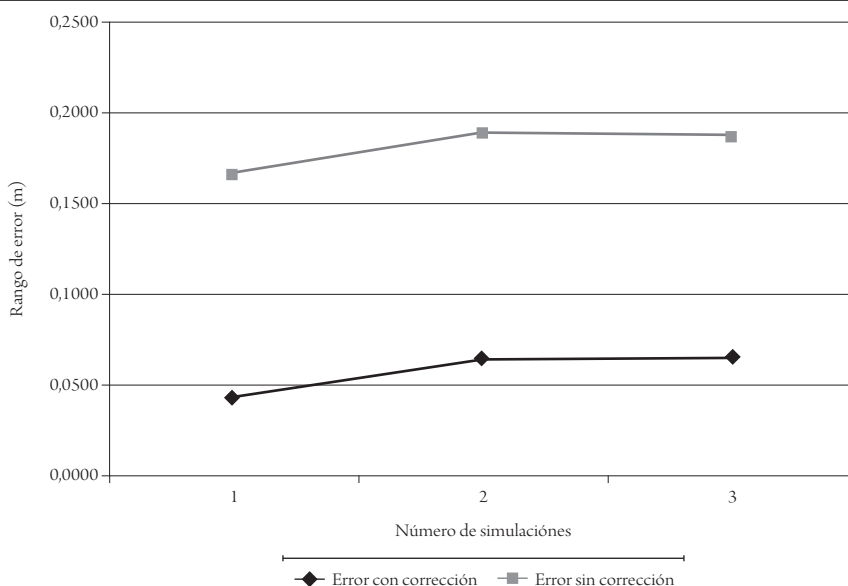


Figura 14. Comparaciones de resultados del error de posicionamiento con y sin corrección

Fuente: elaboración propia.

Conclusiones

A partir de la selección inicial del cultivo de papa para la implementación del sistema de dosificación automático, se obtuvieron factores necesarios para el desarrollo de los sistemas que forman parte del vehículo. Estos resultados permitieron el dimensionamiento de la estructura de un prototipo que cumple con los requisitos establecidos, además de constituir una configuración todoterreno ideal.

El diseño estructural del vehículo en *software* especializado, complementado con la simulación dinámica, dio resultados satisfactorios acerca del funcionamiento de la suspensión tipo *rocker-bogie*, así como en una aproximación del comportamiento del algoritmo de control sobre el cultivo modelado, el cual fue optimizado con otro algoritmo de corrección de posicionamiento para la dosificación de los fertilizantes, con un error máximo de 10 cm de distancia.

Con respecto al comportamiento del vehículo en la simulación del terreno, luego de varias simulaciones puede garantizarse la respuesta que tiene el algoritmo de posicionamiento para la dosificación de fertilizantes en los puntos requeridos. Esta precisión permite obtener un error promedio de 0,12 m sin corrección de posición, y 0,0569 m con corrección de posición, que son errores aceptables para la aplicación de fertilizantes.

A partir del dimensionamiento del vehículo se pudo validar claramente, mediante el *software* de análisis de ingeniería CAE, la utilidad de la metodología de elementos finitos, a lo que debe sumarse la seguridad de cada una de la piezas en comparación con el peso soportado por el vehículo.

El sistema de control mediante el servidor MODA del *software* para simulación dinámica es compatible con dispositivos de control como actuadores, sensores u otros sistemas complementarios, lo cuales, en la construcción final del vehículo, solo dependerán de la calibración para el enlace con el algoritmo diseñado.

El tiempo empleado para la supervisión de los diferentes puntos de dosificación es menor en comparación con el recorrido total del cultivo y sin condiciones objetivas de supervisión, por cuanto mediante la utilización del algoritmo de generación de trayectorias se logran suministrar las rutas de dosificación para que el vehículo proceda con la administración o el suministro de fertilizantes en los puntos definidos, con mayor rapidez, regularidad y precisión.

Referencias

AnyCode Marilou (2012). Marilou Open Devices Access (MODA) (*software* de modelación). Montpellier, Francia.

- Ardila, J. A., Hernández, D. M. y Luque, D. (2006). Diseño y construcción de un vehículo autónomo tipo Rover "DIDAJÓ". *Ingenium*, 7(14), 38-47.
- Åstrand, B. y Baerveldt, A. (2002). An agricultural mobile robot with vision-based perception for mechanical weed control. *Autonomous Robots*, 13, 21-35.
- Bascetta, L., Magnani, G. A., Rocco, P., Rossi, M. y Zanchettin, A. M. (2009). Teleoperated and Autonomous All Terrain Mobile Robots (TA-ATMR). *B&R First European Industrial Ethernet Award*. Salzburg, Austria. Recuperado de http://www.researchgate.net/publication/228461818_Teleoperated_and_Autonomous_All_Terrain_Mobile_Robot_%28TA-ATMR%29
- Bickler, D. (1988). *Articulated suspension system*. Estados Unidos: Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA).
- Blackmore, B. S., Fountas, S., Vougioukas, S., Tang, L., Sørensen, C. G. y Jørgensen, R. A. (2004). Method to define agricultural robot behaviours. *Mechatronics & Robotics Conference*. 1197-1200.
- Blackmore, S. (2007). Agricultura de precisión (AP). *Revista Nacional de Agricultura*, 949, 20-28.
- Da Cunha, J., Martins, D. H. y Da Cunha, W. G. (2011). Operational performance of the mechanized and semi-mechanized potato Harvest. *Engenharia Agrícola Jaboticabal*, 31(4), 826-834.
- Diegel, O., Badve, A., Bright, G., Potgieter, J. y Tlale, S. (2002). Improved mecanum wheel design for omni-directional robots. *Australasian Conference on Robotics and Automation*, 2002, 117-121.
- Gan-Mor, S., Clark, R. L. y Upchurch, B. (2007). Implement lateral position accuracy under RTK-GPS tractor guidance. *Computer Electronic Agriculture*, 59, 31-38.
- Iida, M., Kang, D., Taniwaki, M., Tanaka, M. y Umeda, M. (2008). Localization of CO₂ Source by a hexapod robot equipped with an anemoscope and a gas sensor. *Computer and Electronics in Agriculture*, 63, 73-80.
- Luttenberger, C. (2004). Introducción al concepto de redes VRS (Virtual Reference Stations). Madrid: TOPCART.
- Machado, T. M. et al. (2010). Metodologia para avaliação do desempenho de receptor de GPS de uso agrícola em condição cinemática. *Engenharia Agrícola*, 30(1), 121-129.
- Martín, P., Hernández, O., García, A., López, J., Tumialán, A. y Rangel, J. (2012). Planeamiento de trayectorias para un vehículo autónomo en agricultura de precisión. 3rd International Symposium on Innovation and Technology, 2012. Cusco, Perú: Instituto Internacional de Innovación y Tecnología.

- Martín, P. (2013). *Distribuição inteligente de adubos químicos via GPS com tecnologia para pequenos produtores* (tesis de doctorado). Uberlândia, Brasil: Universidad Federal de Uberlândia.
- Matthies, L. et al. (1998). *Robotic perception for autonomous navigation of mars rovers*. California, Estado Unido: Instituto de Tecnología de California.
- Moan, Y. (2009). *Swarm robotics: an extensive research review*. Selangor, Malasia: Universidad de Monash.
- Mohd, J. F., Rizon, M., Yaacob, S., Adm, A. H. y Mamat, M. R. (2006). Designing omnidireccional mobile robot with mecanum wheel. *American Journal of Applied Sciences*, 3(5), 1831-1835.
- Mondada, F. et al. (2004). Swarm-bot: a new distributed robotic concept. *Autonomous Robots*, 17(2-3), 193-221.
- Mott, R. L. (2009). *Resistencia de materiales* (5.ª ed.). México: Pearson.
- Murakami, N., Ito, A., Will, J. D., Steffen, M., Inowe, K., Kita, K. y Miyaura, S. (2008). Development of a teleoperation system for agricultural vehicles. *Computers and Electronics in Agriculture*, 63, 81-88.
- Paulsen, G. L., Farritor, S., Hunstberger, T. L. y Aghazarian, H. (2005). All terrain exploration with the cliff-bot system. Recuperado de <http://www.engineering.unl.edu/research/robots/publicationdocs/ICRA05-Paper.pdf>
- Pettinaro, G. C. et al. (2002). Swarm-robotics: a different approach to service robotics. *Proceedings of the 33rd International Symposium on Robotics*. Estocolomo, Suecia: Federacion Internacional de Robótica.
- Rosa, U. A., Cheetancheri, K. G., Gliever, C. J., Lee, S., Thompson, J., y Slaughter, D. C. (2008). An electro-mechanical limb shaker for fruit thinning. *Computer and Electronics in Agriculture*, 61, 213-221.
- Slaughter, D.C., Giles, D.K., Downey, D. (2008). Autonomous robotic weed control systems: a review. *Computer and Electronics in Agriculture*, 61, 63-78.
- Sternfeld, R., Hiiemaa, M., Sell, R., Leomar, P. y Tamre, M. (2005). Design of a module-architecture autonomous robot platform INDIGO. OST conference. Estocolmo, Suecia.
- Tabile, R. et al. (2011). Design and development of the architecture of an agricultural mobile robot. *Engenharia Agrícola*, 31(1), 130-142.
- Thueer, T., Krebs, A. y Siegwart, R. (2006). Comprehensive locomotion performance evaluation of all-terrain robots. *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2006, 4260-4265.
- Weymouth, T. y Roth-Tabak, Y. (1990). Using and generating environment models for indoor mobile robots. Michigan, Estados Unidos: Universidad de Michigan.

Localización de bodegas y asignación de clientes en supermercados de Barranquilla

DIEGO FERNANDO SUERO PÉREZ¹

HUGO MERCADO CERVERA²

HELMAN HERNÁNDEZ RIAÑO³

RESUMEN

Los sistemas de distribución, localización y ruteo tienen importantes impactos en la competitividad de una compañía, especialmente en lo relacionado con costos de transporte y niveles de servicio. Por ello, el diseño de estrategias para minimizar costos es una alternativa recomendada para las organizaciones. En este artículo se presenta un esquema sugerido de ruteo y ubicación de centros de distribución, para lo cual se usan algoritmos de programación lineal y la heurística de Gillet y Miller para una empresa que fabrica aceite de oliva y lo comercializa en cadenas de supermercados de Barranquilla, Colombia. Las técnicas implementadas revelan como resultado la ubicación y el dimensionamiento de un solo centro de distribución en la zona centro, y no varios, como se esperaba. También se propone un enrutamiento recomendable para cada cliente.

Palabras clave: ruteo, centros de distribución, problemas de ruteo de vehículos (VRP), problema de enrutamiento de vehículos con capacidad (CVRP), problema de distribución en planta con restricción de capacidad (CFLP).

¹ Doctorante en Ingeniería Industrial por la Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia. Magíster en Ingeniería Industrial por la Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. Ingeniero Mecánico por la Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia. Actualmente se desempeña como docente investigador en la Universidad Libre, seccional Barranquilla, Colombia. Correo electrónico: dfsuero@gmail.com

² Doctorante en Ingeniería Industrial por la Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia. Magíster en Ingeniería Industrial por la Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia. Actualmente se desempeña como docente de la Universidad de Magdalena, Santa Marta, Colombia. Correo electrónico:

³ Doctorante en Ingeniería Industrial por la Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia. Magíster en Gestión de Organizaciones por la Universidad EAN, Bogotá, Colombia. Ingeniero industrial por la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. Actualmente se desempeña como docente de la Universidad de Córdoba, Montería, Colombia. Correo electrónico: hhernandez@correo.unicordoba.edu.co

FECHA DE RECEPCIÓN: 11 DE FEBRERO DEL 2014 • FECHA DE APROBACIÓN: 3 DE NOVIEMBRE DEL 2014

Cómo citar este artículo: Suero Pérez, D. F., Mercado Cervera, H. y Hernández Riaño, H. (2015). Localización de bodegas y asignación de clientes en supermercados de Barranquilla. *Épsilon*, 24, 71-87.

Location of Warehouses and Customer Allocation in Supermarkets in Barranquilla, Colombia

ABSTRACT

Distribution, location and routing systems have significant impacts on a company's competitiveness, particularly with regard to transportation and service costs. Therefore, designing strategies to minimize costs is a recommended alternative for organizations. This paper presents a suggested routing and location scheme for distribution centers based on the use of linear programming algorithms and Gillet and Miller's heuristics for a company that produces olive oil and sells it in supermarket chains in Barranquilla, Colombia. The implemented techniques reveal, as a result, the location and dimensioning of a single distribution center in the downtown area and not several, as expected. A recommendable routing for each client is also proposed.

Keywords: routing, distribution centers, vehicle routing problems (VRP), capacitated vehicle routing problem (CVRP), Capacitated Facility Location Problem (CFLP).

Localização de armazéns e designação de clientes em supermercados de Barranquilla, Colômbia.

RESUMO

Os sistemas de distribuição, localização e roteamento têm importantes impactos na competitividade de uma companhia, especialmente no que se refere aos custos de transporte e serviço. Por isso, o desenho de estratégias para minimizar custos é uma alternativa recomendada para as organizações. No artigo se apresenta um esquema sugerido de roteamento e a localização de centros de distribuição, a partir do uso de algoritmos de programação lineal e a heurística de Gillet e Miller para uma empresa que fabrica azeite de oliva e o comercializa em cadeias de supermercados de Barranquilla, Colômbia. As técnicas implementadas revelam como resultado a localização e o dimensionamento de um só centro de distribuição na zona centro, e não vários, como se esperava. Também se propõe um roteamento recomendável para cada cliente.

Palavras chave: roteamento, centros de distribuição, problemas de roteamento de veículos (VRP), problema de roteamento de veículos com capacidade (CVRP), problema de distribuição em planta com restrição de capacidade (CFLP).

Introducción

Para configurar una red logística o cadena de suministro pueden involucrarse decisiones estratégicas que permitan determinar, por ejemplo, la cantidad de puntos de ventas y centros de distribución o de empresas, la localización o ubicación de estas, el tamaño adecuado, los modos de transporte y la asignación de vehículos. En una red logística constituida por plantas de manufactura, centros de distribución y puntos de venta, cada uno de los eslabones deberían desempeñar su rol de manera efectiva, para así garantizar la satisfacción del cliente; sin embargo, cuando un eslabón falla, toda la cadena también lo hace. Así, por ejemplo, las plantas manufactureras son responsables de producir los bienes para su distribución y venta, en tanto los centros de distribución se encargan de enviar la mercancía a puntos de venta para incrementar la disponibilidad de los productos, alcanzar economías de escala, soportar medidas de emergencia y poder consolidar productos; por su parte, los puntos de venta deberían ser el acceso primario para los consumidores finales, pero en todo el proceso es improbable que hubiesen retrasos, faltantes, sobrecostos u otra serie de inconvenientes que pongan en riesgo la operación logística. Las medidas en pro de disminuir problemas en la cadena de suministro por medio de herramientas de modelación cada día tienen mayor importancia dentro de las organizaciones, debido a sus impactos positivos en los alcances propuestos.

El problema abordado es de localización y ruteo de vehículos. Se establecerá un número determinado de centros de distribución que atiendan una demanda determinística de puntos de ventas localizados, con una flota de camiones de capacidad conocida al mínimo costo. Para la solución se usó un modelo de localización de bodegas o centros de distribución de un grupo que se encuentran disponibles para alquilar en Barranquilla, con el objetivo de minimizar los costos de transporte y de envío de un producto específico. Asimismo, se utilizará el método de ruteo de vehículos de Gillet y Miller para dar cumplimiento a la demanda diaria de cada uno de los puntos de venta al menor costo posible, desde cada centro de distribución.

El problema de localización de instalaciones con capacidad determinada

Es conocido en inglés como *capacitated facility location problem* (CFLP). Dado un conjunto de clientes y un conjunto de instalaciones potenciales, el problema con-

siste en decidir qué plantas o instalaciones se utilizan y cómo son atendidos los clientes desde esas instalaciones. El objetivo es minimizar los costos fijos derivados de la utilización de una planta y los costos operativos (típicamente costos variables de producción y costos de transporte entre las plantas abiertas y los clientes) (Ortega, 2008).

Una de las principales formas de abordar los problemas de localización de bodegas es utilizando varias aproximaciones, incluyendo ramificaciones o relaciones con la programación lineal, la búsqueda tabú, la simulación y los algoritmos genéticos (Cura, 2010). Dentro de los algoritmos se encuentran los de base dual y primal-dual; sin embargo, la experiencia que se ha tenido en la modelación de eventos reales exhibe un gran número de soluciones no óptimas, por cuanto se presenta una gran relación entre el transporte y los costos fijos, lo cual dificulta la eliminación temprana de algunas bodegas (Michael y Van Hentenryck, 2003).

Por otra parte, algunos autores consideran que los problemas de localización de bodegas están altamente influenciados por factores cuantitativos, pero también cualitativos. Se incluye criterios como tasa de incentivo, tasa estructural, habilidad de la fuerza laboral, calidad y confiabilidad de los modos de transporte, proximidad al consumidor final, entre otros (Demirel, Cetin y Kahraman, 2010). A la hora de cuantificar los valores de los criterios, priman las decisiones del mercado o la experiencia de los actores ante unas aproximaciones cercanas a la realidad.

Lo cierto es que existen muchos estudios sobre solución de problemas de localización de bodegas. Uno de estos es el desarrollo de un sistema de soporte de decisión geográfico: se selecciona el sitio de ubicación de bodegas, tras lo cual se manejan los criterios cuantitativos y cualitativos en función de visualizar la mejor ubicación (Vlachopoulou, Silleos y Manthou, 2001). Otro método redujo el problema a la escogencia de aquellos puntos, donde se minimice la suma de los costos de utilización de la bodega y los de transporte de los materiales (Sharma y Berry, 2007).

Actualmente, los avances para resolver este tipo de análisis han crecido significativamente. El *software* de sistemas de información de ubicación de bodegas se han desarrollado para que los industriales exploten la base de datos y escojan la ubicación de sus bodegas de acuerdo con sus criterios de selección (Colson y Dorigo, 2004).

De manera global, el principal objetivo en este tipo de problemas es minimizar la distancia máxima desde la instalación de los centros de distribución hasta los puntos de venta; sin embargo, la solución es de tipo *NP-hard*, lo cual implica mayor dificultad a la hora de encontrar una solución óptima. Por tal razón, se optó por elegir métodos heurísticos para plantear una solución razonable (Amiri-Arefa y Baboli, 2013). En general, las aplicaciones potenciales de este problema son para centros de servicio, centros de emergencia, policía, bomberos, centro de almacenes y, en nuestro caso, una empresa de alimentos cuyo producto principal es el aceite de oliva para uso doméstico.

El reto abordado surge de la necesidad de transportar los insumos requeridos desde las bodegas hasta cada uno de los puntos de los supermercados, dinámica en la que se genera un problema de enrutamiento de vehículos que implica asignar rutas e itinerarios a una flota de camiones. Se pueden dar dos tipos de problema de enrutamiento: en arcos y en nodos. En nuestra situación en particular, los vehículos no deben seguir un arco o cumplir con un recorrido, pero sí deben visitar cada uno de los nodos o puntos de venta, y de este modo se configura un problema de ruteo en nodos.

Existen varias técnicas de solución para problemas de enrutamiento en nodos; por ejemplo, la del árbol mínimo de envergadura máxima (AMEM), donde en una red dirigida, cada arco tiene un costo asociado y se recorren todos los nodos de la red de manera tal que se minimice la sumatoria de sus costos. El problema del agente viajero (PAV), desde el origen, consiste en que un agente vendedor debe visitar un conjunto de clientes exactamente una vez y regresar a su punto de partida. Allí, el costo mínimo constituye problemas básicos asociados usualmente al diseño de rutas de recolección (Salazar y Ruiz, 2009).

La heurística de Clarke y Wright para problemas de ruteo de vehículos (VRP) es un ejemplo de un método constructivo. Allí, inicialmente cada cliente es visitado por un vehículo; por tanto, existirán tantos vehículos como clientes. Luego, de acuerdo con la capacidad del vehículo, se determina si este puede visitar un segundo nodo cercano al primero; si esto es posible, entonces se constituye un ahorro de un viaje. Se continúa realizando el análisis hasta que la capacidad del vehículo esté copada y la totalidad de los arcos estén cubiertos.

Se han desarrollado diversas formas para abordar la solución del ruteo de vehículos con capacidad (CVRP), como son algunos algoritmos genéticos híbridos (Wang y Lu, 2009). Otra forma de abordar el problema es incluir dentro del modelo variables como el consumo de combustible (Xiao *et al.*, 2012), o algoritmos constructivos que implementan algoritmos de búsqueda aleatoria con un algoritmo de búsqueda tabú (Augerat *et al.*, 1998).

Dadas las características del problema que enfrentamos, se optó por utilizar una de las técnicas de barrido. En la heurística de barrido geográfico de Gillet y Miller, los clientes son agrupados y se resuelve un PAV (problema del agente viajero) en cada grupo. Si las distancias son razonablemente euclidianas, entonces se obtendrán resultados satisfactorios. Se ubican clientes en un mapa y se realiza un barrido geográfico con una línea recta; se estudia así la factibilidad de incluir el cliente en la ruta, dependiendo de la capacidad del camión y de la disponibilidad de tiempo. El algoritmo finaliza cuando no hay más disponibilidad de vehículos o cuando todos los clientes están cubiertos.

Sin embargo, no es suficiente implementar los métodos de ruteo según la metodología ISM. De hecho, el análisis de los factores relevantes en la eficiencia de distribución de las cadenas de supermercados son estos: las medidas de restricción del tráfico urbano, la estructura de las empresas de logística, el nivel de información y, en menor medida, la infraestructura, el medioambiente, el número de vehículos de propiedad de las empresas de logística, el número de personal que participan en la gestión logística y el tiempo de realización de pedidos de los supermercados (Xu y Qiao, 2010).

Hipótesis planteadas

- a) La modelación matemática permitirá encontrar la ubicación óptima de centros de distribución para los supermercados y las tiendas Olímpica.
- b) La modelación de la ubicación de varios centros de distribución equidistantes en la ciudad obtendrá costos razonables de operación de la distribución de aceite de oliva en los supermercados.

Metodología

El proyecto se desarrolla en cuatro fases, como se muestra a continuación.

Identificación y búsqueda de bodegas viables

Se realizó la búsqueda en el periódico local *El Herald* del 4 de abril de 2013, en los clasificados de arriendo de finca raíz, en la página web www.metrocuadrado.com y en algunas inmobiliarias. A continuación, en la tabla 1, se presentan los resultados de las 15 bodegas consultadas vía telefónica o internet, con sus respectivos datos de costo de arrendamiento, incluidos gastos de administración, dirección, capacidad³ y posibles ubicaciones para el fin solicitado.

Tabla 1. Resultado de posibles bodegas como centros de distribución

| | CALLE | CARRERA | PRECIO DIARIO | CAPACIDAD TON POR M ² |
|-----------|-------|---------|---------------|----------------------------------|
| Bodega 1 | 40 | 50B | \$ 83.333 | 43 |
| Bodega 2 | 49 | 52 | \$200.000 | 120 |
| Bodega 3 | 48 | 67 | \$300.000 | 156 |
| Bodega 4 | 30 | 40 | \$433.333 | 260 |
| Bodega 5 | 39 | 38 | \$333.333 | 260 |
| Bodega 6 | 43 | 35 | \$173.333 | 156 |
| Bodega 7 | 38 | 46 | \$200.000 | 182 |
| Bodega 8 | 30 | 10 | \$666.667 | 39 |
| Bodega 9 | 111 | 34 | \$560.000 | 364 |
| Bodega 10 | 30 | 26 | \$309.833 | 186 |
| Bodega 11 | 100 | 30 | \$192.000 | 150 |
| Bodega 12 | 1 | 10 | \$456.667 | 260 |
| Bodega 13 | 98 | 58B | \$566.667 | 386 |
| Bodega 14 | 51 | 42 | \$300.000 | 260 |
| Bodega 15 | 109 | 49D | \$433.333 | 260 |

Fuente: elaboración propia.

3 Consultar especificaciones del factor de escala en la fase 2 de la metodología.

Determinación de variables de interés y su respectiva cuantificación

Factor de capacidad en toneladas

Se seleccionó al azar un producto de una empresa real de la ciudad de Barranquilla: el aceite Girasol gourmet de 1000 cm³ (figura 1), que se empaca en cajas de 12 unidades. Cada caja pesa 11,04 kg, y hay 55 cajas por estiba; por lo tanto, se da la relación 607,2 kg/estiba. Con 8,44 m de fondo, pasillos de 3 m, cuerpos de 2 m y 6 niveles de altura, se pueden almacenar 48 estibas en un área de 13 × 8,44 m (Callejas, 2013) (figuras 2 y 3).



Figura 1. Aceite Girasol gourmet

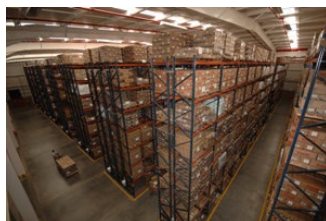


Figura 2. Bodega de almacenamiento de aceite de Girasol gourmet

Fuente: Callejas (2013).

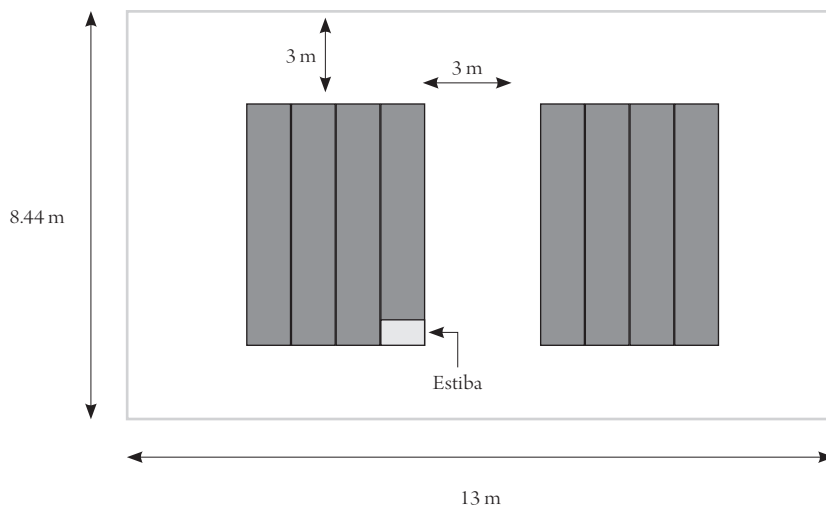


Figura 3. Vista superior de la Bodega base para cálculos con niveles de altura

Fuente: elaboración propia.

Por lo tanto, nuestra área base es de 109,72 m, y nuestro peso base es de 29145,6 kg, es decir, 29,14 Ton (48 estibas \times 55 cajas \times 11,04 kg). Para realizar la especificación de la capacidad de la bodega en toneladas, se usó el factor de escala, el cual es el cociente entre peso base y área base:

$$\text{factor de escala} = \frac{\text{Peso base}}{\text{Área base}} = \frac{29.14 \text{ Ton}}{109.72 \text{ m}^2} = 0.26 \text{ Ton/m}^2 \quad [1]$$

Supuestos y variables relevantes

- *Determinación de distancias entre bodegas y clientes:* esta se obtuvo por medio del aplicativo web Google Maps, al digitar la ubicación entre cada bodega y los clientes, además de las distancias entre los clientes.
- *Costos fijos:* el costo por kilómetro recorrido fue de \$6600 (Callejas, 2013).

Los costos de arriendo, vigilancia y administración están incluidos en el precio del canon de arrendamiento.

Formulación del modelo matemático

Para la solución del caso de estudio planteado es necesario resolver dos problemas de optimización combinatoria de manera secuencial:

- a) Problema de localización de bodegas y asignación de clientes con restricción de capacidad:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n C_{ij} X_{ij} + \sum_{i=1}^m f_i Y_i \quad [1]$$

Sujeto a:

$$\sum_{i=1}^m X_{ij} = 1 \forall j \in N \quad [2]$$

$$\sum_{j=1}^n w_j X_{ij} \leq q_i Y_i \forall i \in B \quad [3]$$

$$X_{ij}, Y_i \in \{0,1\} \forall j \in N, \forall i \in B \quad [4]$$

Donde N son los conjuntos de puntos de venta (B es el conjunto de sitios posibles para bodegas (C_{ij} es el costo de transportar w_j unidades desde la bodega i hasta el punto de venta j ; w_j es la demanda del punto de venta j ; Y_i es igual a 1 si se localiza la bodega en el sitio i , o 0 en otro caso; X_{ij} es igual 1 si el cliente j es servido por la bodega i , o 0 en otro caso; p es el número de bodegas; f_i es el costo fijo de instalar una bodega en el sitio i , y g_i es la capacidad de la bodega instalada en el sitio i).

Esta formulación describe el problema de localizar el número óptimo de bodegas considerando m posibles sitios. Además, se asignan n puntos de venta a las bodegas, con lo cual se minimizan la suma del costo total de transporte y el costo total de instalación. Puede indicarse que la ecuación [2] garantiza que cada cliente sea atendido por una sola bodega, en tanto la ecuación 3 establece que la sumatoria de la demanda de todos los clientes asignados a una bodega debe ser inferior a la capacidad de esta.

b) Ruteo de vehículos con restricción de capacidad (CVRP):

$$x_{ij}^k = \begin{cases} 1 & \text{si el camión } k \text{ sirve el arco } (i, j) \\ 0 & \text{si no} \end{cases} \quad \forall (i, j) \in A$$

$$y_{ij}^k = \begin{cases} 1 & \text{si un camión sirve el arco } (i, j) \\ 0 & \text{si no} \end{cases} \quad \forall (i, j) \in A$$

$$\text{Min} \sum_{l \leq k \leq K} \sum_{\forall (i, j) \in A} c_{ij} x_{ij}^k \quad [5]$$

Sujeto a:

$$\sum_{l \leq k \leq K} x_{ij}^k = y_{ij} \quad [6]$$

$$\sum_{l \leq j \leq n} y_{ij} = 1 \quad \forall i \in N - \{1\} \quad [7]$$

$$\sum_{l \leq i \leq n} y_{ij} = 1 \quad \forall j \in N - \{1\} \quad [8]$$

$$\sum_{l \leq j \leq n} y_{ij} = K \quad [9]$$

$$\sum_{l \leq i \leq n} y_{il} = K \quad [10]$$

$$\sum_{2 \leq i \leq n} \sum_{l \leq j \leq n} d_i x_{ij}^k \leq u \quad \forall k = 1, 2, \dots, K \quad [11]$$

$$\sum_{i \in Q} \sum_{j \in Q} y_{ij} \leq |Q| - 1 \quad \forall Q \quad \{2, 3, \dots, n\} \quad [12]$$

$$y_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall (i, j) \in A \quad [12]$$

$$x_{ij}^k \in \{0, 1\} \quad \forall (i, j) \in A, k = 1, 2, \dots, K \quad [12]$$

La anterior formulación matemática describe el problema de determinar el reparto de mínimo costo al considerar una flota de K vehículos homogéneos con capacidad finita u . Se considera un depósito común (nodo 1) y se atienden un conjunto de clientes (nodos 2, 3, ..., n) cada uno con demanda d_i .

La función objetivo plantea la minimización del costo total de transporte, obtenido a partir de las sumatorias del costo de transporte de cada cliente c_{ij} visitado en la ruta, multiplicado por la variable de decisión x_{ij}^k .

La ecuación [6] controla que cada cliente sea visitado por un solo camión. La ecuación [7] controla que a todos los clientes llegue solo un camión. La ecuación [8] refiere a que de cada cliente salga el camión que llegó. Estas últimas restricciones buscan mantener un equilibrio en el flujo. Por su parte, las ecuaciones [9] y [10] buscan garantizar que todos los camiones salgan y regresen al depósito, en tanto la ecuación [11] establece que la cantidad de producto entregado por cada camión k debe ser menor a su capacidad. Finalmente, la ecuación [12] garantiza que la solución sea un ciclo hamiltoniano (la solución no tiene subciclos), mientras que las ecuaciones [13] y [14] establecen el carácter binario de las variables de decisión.

Solución del modelo

El problema de localización de bodegas y asignación de clientes con restricción de capacidad fue modelado y solucionado mediante el *software* de optimización General Algebraic Modeling System (GAMS), que *software* permite modelar y resolver problemas de optimización lineal, no lineal y enteros mixtos.

Para la solución del problema de ruteo de vehículos con restricción de capacidad se usó la heurística de barrido (*sweep*). Se realizaron dos aplicaciones de la heurística: una iniciando el barrido a las 3:00 y otra a las 6:00; sin embargo, la de mejor resultado fue a las 3:00.

Resultados

Identificación y especificación de Bodegas candidatas

La solución óptima obtenida por la solución de este problema en el *software* GAMS es esta:

- *Bodega seleccionada*: todos los Y_i excepto Y_{14} , obtuvieron un valor de 0, lo que implica que la seleccionada es la bodega 14, ubicada en la calle 51 con carrera 52.

Tabla 2. Ruteo de Vehículos

| RUTA | | | |
|-----------------|-------------------|------------------------|--------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| Bodega | Bodega | Bodega | Bodega |
| Miramar | Buena Vista | Cordialidad | Calle 68 |
| Bodega | Bodega | Bodega | Recreo |
| Calle 93 | Alto Prado | Hipódromo | Bodega |
| Ciudadela | Bodega | Bodega | Campo Alegre |
| Bodega | Calle 84 | Las Nieves | Bodega |
| Villa Campestre | Bodega | Carrera 14 | |
| Bodega | Calle 53 | Bodega | |
| Calle 82 | Carrera 43 | Carrera 8 Las Palmas | |
| Bodega | Bodega | Ciudadela | |
| Calle 72 | Calle 30 (Centro) | Bodega | |
| Bodega | Bodega | Cordialidad (Macarena) | |
| Calle 76 | | Bodega | |
| Bodega | | Carrera 21 | |
| | | Cordialidad Bosque | |
| | | Bodega | |

Fuente: elaboración propia.

A continuación, y a manera de ejemplo, se muestra la ruta 1 graficada a través de la aplicación Google Maps.

Conclusiones

La hipótesis del estudio planteaba que se necesitarían varias bodegas, ubicadas de manera equidistante de los clientes, para obtener una solución razonable; por lo tanto, la hipótesis original no es retenida, sino la hipótesis contraria, donde solo se necesitó de una bodega. El costo total de transporte y el costo total de instalación obtenido es \$ 2.038.260 por día.

Con respecto al ruteo de vehículos, cabe resaltar que la baja capacidad del camión (4,5 Ton) y el bajo porcentaje diario de productos que deben transportarse

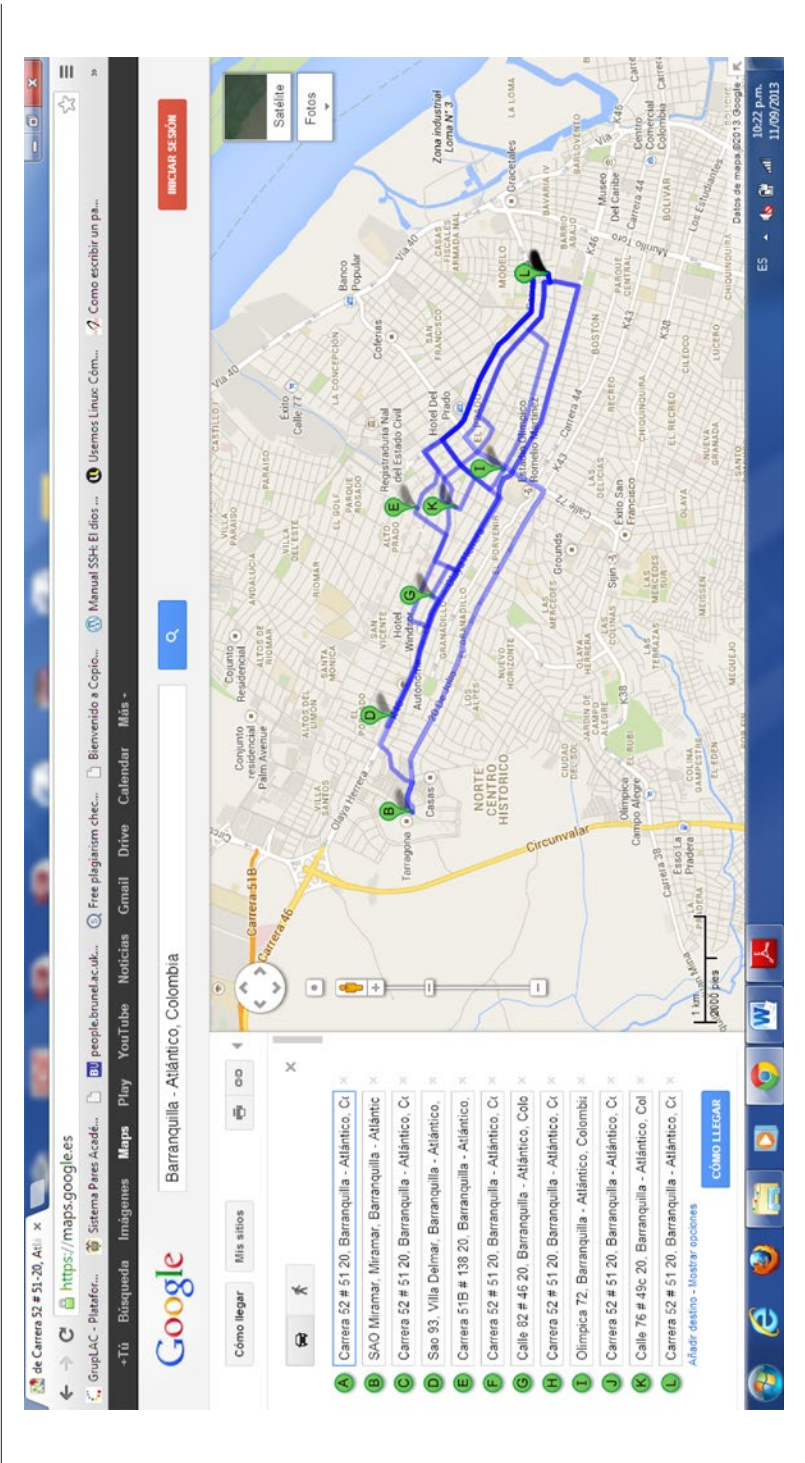


Figura 4. Ruta 1

Fuente: Google Maps.

(4 %) aumentan la distancia de las rutas, lo cual acrecenta el costo de transporte al incrementar innecesariamente el número de veces que el camión debe regresar al depósito. Según lo anterior, es recomendable estudiar el uso de camiones de mayor capacidad, con miras a lograr la disminución de los costos de transporte (sin embargo esto también depende de las restricciones legales de cada zona).

Un aspecto relevante es que el modelo planteado no penaliza los desperdicios de capacidad de bodega, por lo que, a pesar de que la demanda diaria es de solo 68,33 Ton/día, la capacidad de la bodega seleccionada es 260 Ton/diaria. Una modificación al modelo en este sentido podría mejorar la calidad de las soluciones obtenidas.

Por último, en los modelos seleccionados para la solución del caso planteado no se consideran aspectos como los impactos ambientales, sociales, uso de infraestructura, congestión, etc., lo que limita la aplicabilidad de los resultados. Por ello, es conveniente el uso de modelos de optimización multiobjetivo o multicriterio que permitan encontrar soluciones más robustas a este tipo de problemas logísticos. Esto se convierte en un importante tema de investigación que podría ser desarrollado en futuros trabajos.

Referencias

- Amiri-Arefa, M. y Baboli, A. (2013). The center location-dependent relocation problem. *Applied soft Computing*, k(7), 3380-3391.
- Augerat, P., Belenguer, J., Benavent, E., Corberin, A. y Naddef, D. (1998). Separating capacity constraints in the CVRP using tabu search. *European Journal of Operational Research*, 106, 546-557.
- Callejas, A. (2013, 1 de agosto 1). Entrevista jefe de almacen de Casa Luker.
- Colson, G. y Dorigo, F. (2004). A public warehouses selection support system. *European journal of Operational Research*, 153(2), 332-349.
- Cura, T. (2010). A parallel local search approach to solving the uncapacitated warehouse location problem. *Computers & Industrial Engineering*, 59, 1000-1009.
- Demirel, T., Cetin, N., & Kahraman, C. (2010). Multi-criteria warehouse location selection using Choquet Integral. *Expert Systems with Application*, 37(5), 3943-3952.
- Michael, L. y Van Hentenryck, P. (2003). A simple tabu search for warehouse location. *European Journal of Operational Research*, 157(3), 576-591.

- Ortega Mier, M. A. (2008). *Utilización de métodos cuantitativos para el análisis de problemas de localización en logística inversa*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Salazar, E. y Ruiz, N. (2009). ACO model applied to the waste collection by containers. *Ingeniere:Revista Chilena*, 17(2), 236-243.
- Sharma, R. y Berry, V. (2007). Developing new formulations and relaxation of single stage capacitated warehouse location problem. *European Journal of Operational Research*, 51, 24-34.
- Vlachopoulou, M., Silleos, G. y Manthou, V. (2001). Geographic information systems in warehouse site selection decisions. *International Journal of Production Economics*, 77(1-3), 205-212.
- Wang, C.-H. y Lu, J.-Z. (2009). A hybrid genetic algorithm that optimizes capacitated vehicle routing problems. *Experts Systems with Applications*, 36(2), 2921-2936.
- Xiao, Y., Yuchun, X., Qihong, Zhao, B. y IkouKaku, C. (2012). Development of a fuel consumption optimization model for the capacitated vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, 39, 1419-1431.
- Xu Feng, Z. y Qiao Yun, W. (2010). Analysis on distribution efficiency influencing factors of supermarket bases on interpretive structural model. *International Conferencia on Logistics Systems and Intelligent Management*, 3, 1476-1480. Doi: 10.1109/ICL-SIM.2010.5461213

Estudio de material reciclado para reparar fisuras y su aplicación en un pavimento en Bogotá

ANA SOFÍA FIGUEROA INFANTE¹

ELSA FONSECA SANTANILLA²

RESUMEN

Esta investigación se deriva del proyecto *Movilidad sustentable*, realizado en el Centro de Investigación de Desarrollo Sustentable y Cambio Climático (Cidescac) de la Universidad de La Salle. En la investigación se estudiaron algunos materiales no biodegradables que podrían ser reciclados y reutilizados como sellantes de fisuras en pavimentos asfálticos. Los materiales reciclados fueron caucho proveniente de las llantas usadas de los vehículos y poliestireno (icopor), para mejorar las propiedades físicas, mecánicas y químicas de la mezcla asfáltica. Los ensayos realizados incluyeron la caracterización fisicoquímica de los materiales para encontrar las proporciones óptimas de aplicación en campo. Se analizaron ensayos para encontrar la estabilidad química, la deformación plástica, la fatiga y el módulo dinámico de la mezcla diseñada. El alcance de esta fase de la investigación es la producción, la colocación y el seguimiento del nuevo material para la reparación de daños superficiales en pavimentos flexibles, para lo cual se realizó un tramo de prueba otorgado por el Instituto de Desarrollo Urbano (IDU).

Palabras clave: pavimento asfáltico reciclado (RAP), sello de fisuras, asfaltos modificados, poliestireno, caucho de llanta,

¹ Candidata a doctora en Ingeniería por la Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia. Magíster en Ingeniería por la Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. Magíster en Docencia por la Universidad de La Salle, Bogotá, Colombia. Especialista en Gerencia de Construcciones por la Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia. Especialista en Geotecnia Vial y Pavimentos por la Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia. Ingeniera civil por la Universidad Santo Tomás, Bogotá, Colombia. Actualmente es docente de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de La Salle y lidera el grupo de investigación Indetec en esta misma universidad. Correo electrónico: afigueroa@unisalle.edu.co

² Magíster en Docencia de la Química por la Universidad Pedagógica Nacional, Bogotá, Colombia. Especialista en Gestión del Medio Ambiente por la Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España. Química por la Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. Actualmente es docente de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de La Salle e investigadora del grupo Indetec en la misma universidad. Correo electrónico: elsafonseca@unisalle.edu.co

FECHA DE RECEPCIÓN: 10 DE ENERO DEL 2014 • FECHA DE APROBACIÓN: 26 DE OCTUBRE DEL 2014

Cómo citar este artículo: Figueroa Infante, A. S. y Fonseca Santanilla, E. (2015). Estudio de material reciclado para reparar fisuras y su aplicación en un pavimento en Bogotá. *Épsilon*, 24, 89-121.

Study of Recycled Material for Repairing Cracks and its Application on a Pavement in Bogota, Colombia

ABSTRACT

The article stems from the *Sustainable Mobility* project carried out at the Research Center for Sustainable Development and Climate Change (Cidescac) from La Salle University. Some nonbio-degradable materials were studied that could be recycled and reused as fissure sealants in asphalt pavements. The recycled materials were rubber from the used tires of vehicles and polystyrene (styrofoam) to improve the physical, mechanical and chemical properties of the asphalt mix. The tests performed included the physicochemical characterization of materials to find the optimum proportions of field application. Tests were analyzed in order to find chemical stability, plastic deformation, fatigue and the dynamic module of the designed mix. The scope of this phase of the research is the production, placement and follow-up of the new material to repair surface damage in flexible pavement, for which a test stretch granted by the Urban Development Institute was carried out.

Keywords: recycled asphalt pavement (RAP), fissure sealant, modified asphalts, polystyrene, rubber from tires.

Estudo de material reciclado para reparar fissuras e sua aplicação em um pavimento em Bogotá, Colômbia.

RESUMO

O artigo se deriva do projeto *Movilidad sustentable*, realizado no *Centro de Investigación de Desarrollo Sustentable e Cambio Climático* (Cidescac) - segundo suas siglas em espanhol - Pesquisa de Desenvolvimento Sustentável e Mudanças Climáticas - da Universidad de La Salle. Estudaram-se alguns materiais não biodegradáveis que poderiam reciclar-se e reutilizar-se como selantes de fissuras em pavimentos asfálticos. Os materiais reciclados foram a borracha proveniente dos pneus usados dos veículos e o poliestireno (isopor), para melhorar as propriedades físicas, mecânicas e químicas da mistura asfáltica. Os ensaios realizados incluíram a caracterização físico-química dos materiais para encontrar as proporções ótimas de aplicação em campo. Analisaram-se ensaios para encontrar a estabilidade química, a deformação plástica, a fadiga e o módulo dinâmico da mistura desenhada. O alcance desta fase da pesquisa é a produção, a colocação e o seguimento do novo material para a reparação de danos superficiais em pavimentos flexíveis, para o qual se realizou um trecho de prova outorgado pelo Instituto de Desenvolvimento Urbano.

Palavras chave: pavimento asfáltico reciclado (RAP), selo de fissuras, asfaltos modificados, poliestireno, borracha de pneu.

Introducción

Colombia en uno de los países con mayor déficit en infraestructura vial en el mundo. Los principales problemas que se presentan en los pavimentos asfálticos en servicio son la baja resistencia a la fatiga y la deformación permanente, que generalmente son consecuencia de una inadecuada dosificación ligante-agregado, sus interacciones, el método de colocación, mezclado y compactación de la mezcla asfáltica, así como del desempeño de los materiales ante cambios bruscos de temperatura. Los daños evidentes en la red vial nacional y de Bogotá se observan en las figuras y 2, respectivamente.

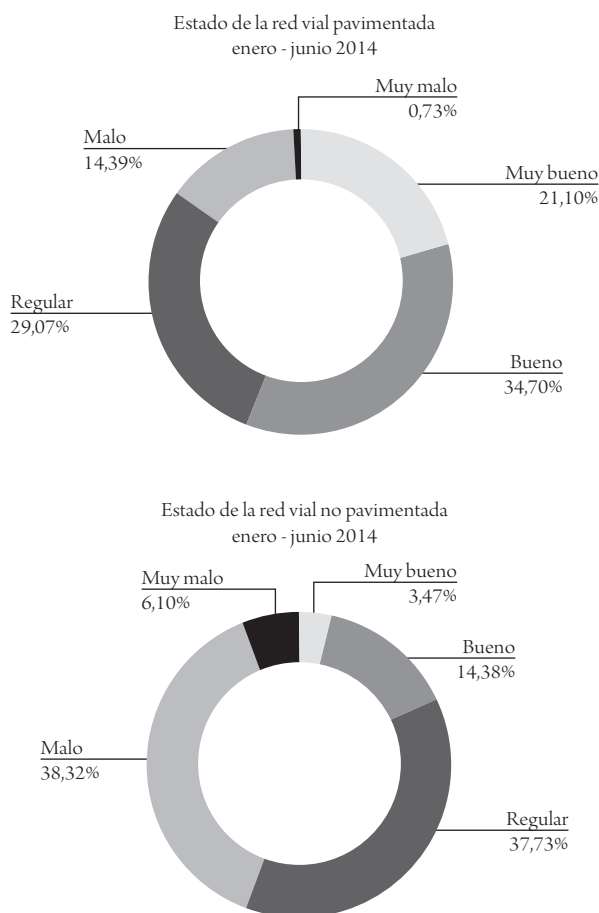


Figura 1. Estado de la red vial nacional

Fuente: Instituto Nacional de Vías (Invías, 2013).

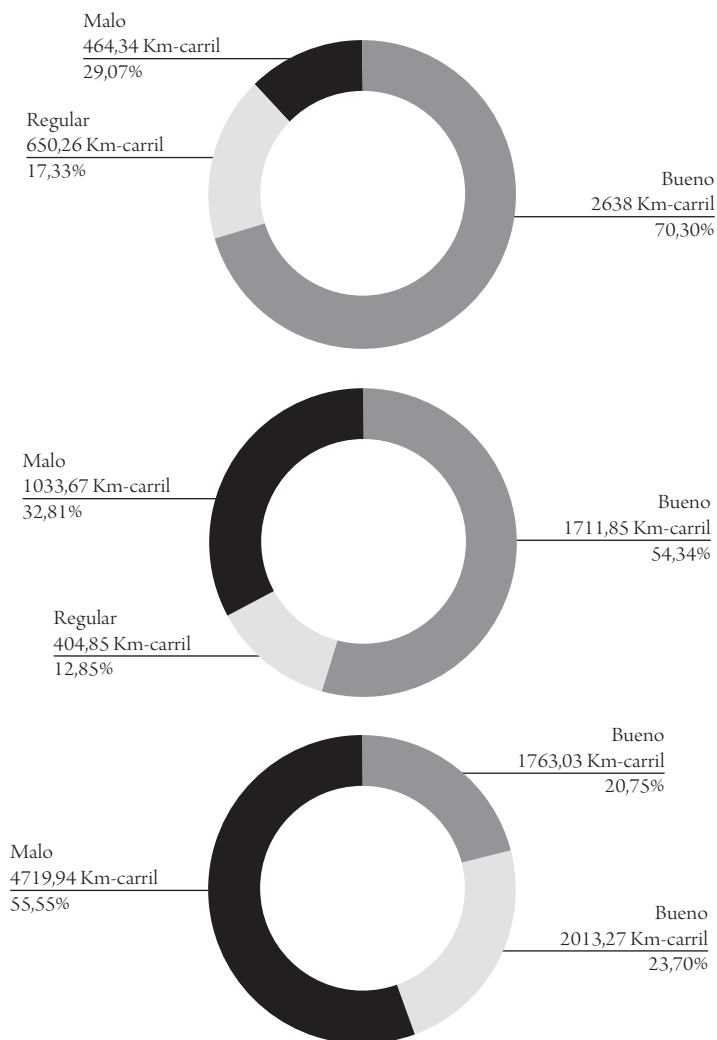


Figura 2. Estado de la malla vial en Bogotá en 2013

Nota: a) malla vial arterial; b) malla vial intermedia; c) malla vial local

Fuente: IDU (2013).

Los ligantes asfálticos modificados son productos concebidos para superar las propiedades del asfalto original, con lo cual mejoran el desempeño del pavimento a largo plazo. Si bien los modificadores pueden afectar muchas propiedades, la mayoría de ellos intentan reducir la dependencia de la temperatura, el endurecimiento por oxidación del cemento asfáltico y la susceptibilidad a la humedad de la mezcla asfáltica (Coinsky *et al.*, 1994).

Los bitúmenes modificados con polímeros (BMP) empleados en pavimentación de carreteras son materiales nuevos que en la actualidad son ampliamente empleados en pavimentación de carreteras con tráfico intenso o con temperaturas extremas. En términos generales, los asfaltos modificados con polímeros mejoran propiedades tales como menor susceptibilidad a la temperatura, mayor intervalo de plasticidad, mayor cohesión, mejor respuesta elástica y mayor resistencia al agua y al envejecimiento.

En este trabajo se investigó acerca de la factibilidad de mejorar el comportamiento mecánico de una mezcla asfáltica con asfalto proveniente del Complejo Industrial de Barrancabermeja (CIB) cuando se modifica el ligante convencional con dos residuos poliméricos: poliestireno expandido (icopor) y polvo de llantas usadas. A partir de la caracterización fisicoquímica y mecánica, se fabricó una mezcla densa en caliente para rodadura tipo MDC-2 (Norma Invías-2007), debido a su gran utilización en el país.

Marco teórico

Ligante asfáltico modificado

Los ligantes asfálticos modificados son productos concebidos para superar las propiedades del asfalto original, con lo cual mejoran el desempeño del pavimento a largo plazo. Si bien los modificadores pueden afectar muchas propiedades, la mayoría de ellos intentan reducir la dependencia de la temperatura, el endurecimiento por oxidación del cemento asfáltico y la susceptibilidad a la humedad de la mezcla asfáltica (Coinsky *et al.*, 1994).

Polvo de llanta. Mejora la flexibilidad y la resistencia a la tensión de las mezclas asfálticas, con lo cual disminuye la aparición de grietas por fatiga o por cambios de temperatura. Se utiliza en carpetas delgadas de granulometría abierta y en tratamientos superficiales. Entre los cauchos sintéticos utilizados para modificar asfaltos se encuentran los de tipo estireno butadieno, y entre estos, el SBR es el más utilizado. Después de la polimerización, este material contiene entre el 20% y el 23% de estireno. La presencia del butadieno permite el entrecruzamiento con el azufre y hace posible producir el isómero CIS³, que tiene una mayor elasticidad que la del

3 Son isómeros que difieren de la distribución de átomos en la molécula

caucho natural. El estireno permite tener un caucho más duro y más tenaz, lo que permite que no se cristalice cuando experimenta grandes esfuerzos (v. figura 12).

Poliestireno. Es un material plástico transparente y relativamente frágil, pero puede ser modificado con caucho, lo que lo hace expansible y resistente al impacto. La presencia de un anillo bencénico en cada átomo de carbono de la cadena principal produce una configuración rígida con suficiente impedimento estérico para hacer el polímero muy inflexible a temperatura ambiente. Se aplica en piezas del interior de automóviles, botones de aparatos y utensilios domésticos (Yip y Dalton, 1971).

En los ligantes modificados con polímeros, a elevadas temperaturas pueden producirse fenómenos de cremado y sedimentación. Ello enriquece el ligante en polímero en la parte superior o inferior del tanque, dependiendo de la densidad del polímero respecto al ligante. Esta desestabilización puede producirse por falta de compatibilidad entre ambos o por dispersión incorrecta del polímero, según el sistema y las condiciones de mezclado.

Uno de los trabajos más antiguos y completos sobre asfaltos modificados con polímeros es el de Collins *et al.* (1991), que demostró la efectividad de los polímeros en la mejora de propiedades del asfalto a altas y bajas temperaturas. Por su parte, Socal *et al.* (2004) estudiaron el efecto de la composición química de las mezclas asfalto-polímero modificadas sobre las propiedades viscoelásticas lineales del asfalto y correlacionaron esas propiedades con la susceptibilidad térmica.

En Colombia, el Instituto de Desarrollo Urbano (IDU, 2002) realizó una investigación para el empleo del caucho de llantas en pavimentos. En este se establece la metodología que se debe seguir para mejorar las propiedades mecánicas y de durabilidad de las mezclas asfálticas elaboradas con asfalto del CIB y de la refinería de Apiay, para lo cual utilizaron caucho molido.

Reyes y Figueroa (2008) analizaron diferentes tipos de mezclas asfálticas con diferentes gradaciones, modificadas por vía seca y vía húmeda. Tales mezclas tenían modificadores provenientes de desechos no biodegradables aplicados de manera independiente en cada una de ellas. El alcance de esta investigación fue de tipo fisicomecánico.

Finalmente, se reseña el trabajo realizado por Figueroa y Reyes 2005), en el que se elaboraron mezclas asfálticas modificadas por la vía húmeda, empleando asfalto del CIB y un porcentaje de poliestireno (icopor) triturado proveniente de vasos desechables como modificador. Los resultados indicaron que la mezcla asfáltica elaborada con asfalto CIB modificado es más resistente y rígida que la mezcla preparada con asfalto convencional.

Contribución ambiental

En Bogotá se producen cerca de 600 toneladas de basura diarias cuyo destino final son los rellenos sanitarios. En Colombia, según estudios, el 55 % de los residuos son orgánicos; 10%, plásticos; 13%, papel y cartón; 7%, vidrio; 3,5%, metales, y 12% otros (textiles, cueros y cerámica) (Segura, 2006). La mayoría de los rellenos no cuentan con un sistema de reciclaje adecuado, plantas de selección o aprovechamiento de estos residuos o selección manual para el sustento y apoyo a las comunidades que pueden vivir del reciclaje. Con esta investigación se quiere llamar la atención sobre la importancia de la organización de basuras y demostrar que es posible aprovecharlas en materiales para carreteras, como de hecho lo hacen otros países en el mundo.

Si nos remontamos a los antecedentes sobre el aprovechamiento de residuos y ahorro energético, se encuentra que el mayor interés internacional lo ha suscitado la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE)⁴.

En 1980 se presentó un proyecto para la incorporación de residuos plásticos en las mezclas bituminosas, el cual recibió recursos de la Asesoría de Investigación Científica y Técnica, en Francia. Durante el proceso surgieron dos problemas aparentemente insuperables: la forma de incorporación del plástico al asfalto y la elección de un desecho adecuado. El primer problema tenía su origen en la idea

4 Organismo internacional que tiene como principales objetivos: a) impulsar el mayor crecimiento posible de la economía y el empleo, elevar el nivel de vida en los países miembros en condiciones de estabilidad financiera y contribuir al desarrollo de la economía mundial; b) promover el desarrollo económico de los países miembros y no miembros; c) impulsar la expansión del comercio mundial sobre bases multilaterales y no discriminatorias acordes con las normas internacionales. Sus tres protocolos se firmaron en París el 14 de diciembre de 1960. En la actualidad, el Organismo se integra por 25 países que sustentan su estrategia de crecimiento en modelos de mercado, democracia y libre comercio: Alemania, Australia, Bélgica, Dinamarca, Francia, Grecia, Irlanda, Islandia, Italia, Luxemburgo, Noruega, Países Bajos, Portugal, Reino Unido, Suecia, Suiza, Turquía, Estados Unidos, Canadá, España, Japón, Finlandia, Australia, Nueva Zelanda y México.

de que el plástico solo podía actuar en la mezcla bituminosa como modificador de las propiedades reológicas del asfalto; el segundo radicaba en poder contar con un desecho cuya naturaleza fuese apta para obtener la modificación pretendida y que pudiese disponerse de él en forma y cantidades que garantizaran una mínima viabilidad técnica. Posteriormente se iniciaron diversas investigaciones en el mundo con el ánimo de perfeccionar la respuesta de los materiales con el uso de estos desechos (Reyes y Figueroa, 2008).

La presente investigación presenta una aproximación a lo que puede realizarse con este tipo de desechos no biodegradables.

Materiales y métodos

El asfalto empleado para esta investigación proviene del complejo industrial de Barrancabermeja de Ecopetrol (asfalto CIB), de penetración 80-100, mientras que los modificadores empleados fueron el poliestireno correspondiente a vasos desechables y el polvo de llantas usadas. El programa de ensayos realizado se observa en la figura 3.

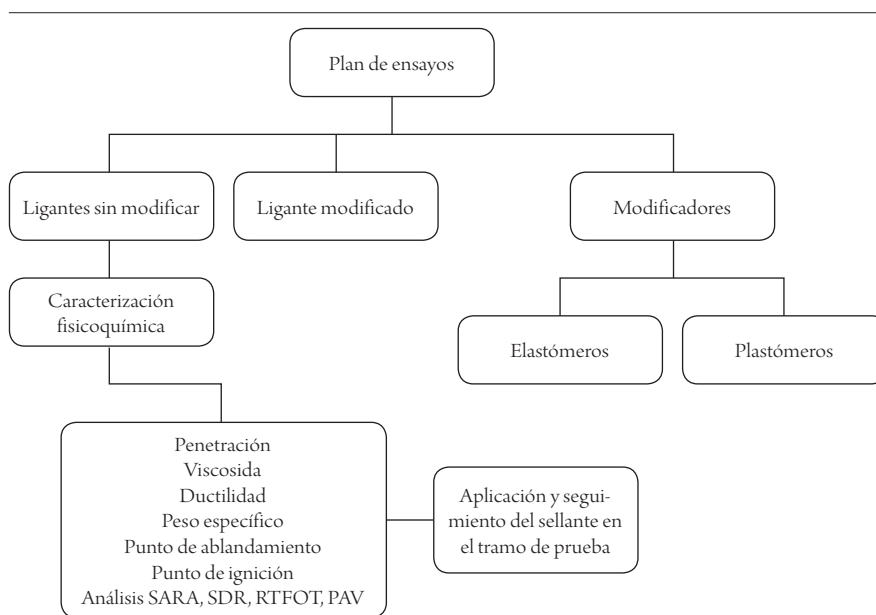


Figura 3. Programa de ensayos realizados en esta investigación

Fuente: elaboración propia.

Los polímeros fueron caracterizados de acuerdo con sus propiedades físicas y químicas en los Laboratorios de Química de la Universidad de La Salle, en tanto que su análisis morfológico por microscopía electrónica de barrido SEM se realizó en el Laboratorio de Microscopía Electrónica de Barrido del Centro Interfacultades de la Universidad Nacional de Colombia. El equipo empleado para el análisis fue el microscopio de barrido FEI QUANTA 200, a un voltaje de 30 kV, en modo de operación alto vacío (3×10^{-6} torr).

El asfalto fue modificado mecánicamente empleando el dispersor de asfaltos del Laboratorio de Pavimentos de la Universidad de La Salle. De acuerdo con las condiciones establecidas en ensayos preliminares y trabajos anteriores (Figuerola *et al.*, 2007; Ocampo *et al.*, 2002), se planteó un diseño experimental para establecer el porcentaje óptimo de polvo de llanta para las condiciones de modificación anteriormente establecidas.

Los niveles estudiados para la variable porcentaje de llanta fueron: 0%, 12%, 14%, 16%, 18% y 20%, y en vez de una sola variable respuesta, se estandarizaron las condiciones experimentales que produjeron el asfalto modificado con mejor desempeño de acuerdo con la compatibilidad y estabilidad asfalto polímero, así como según sus características fisicoquímicas y morfológicas.

Cada mezcla asfalto-polímero preparada fue sometida a la prueba de estabilidad al almacenamiento y la temperatura descrita en US Pat. 5.348.994, en un equipo construido para la investigación, el cual cumple con las especificaciones establecidas en The Shell Bitumen Handbook (2004) (figura 4).



Equipo dispersor de asfaltos Universidad de La Salle



Proceso de modificación de asfalto 80-100

Figura 4. Dispersor de asfalto, Laboratorio de Asfalto de Pavimentos de la Universidad de La Salle

Fuente: autores

Caracterización física del asfalto convencional y modificado

El asfalto CIB, de penetración 80-100 original, y las mezclas modificadas preparadas de acuerdo con el numeral anterior fueron caracterizados físicoquímica y reológicamente. El análisis físicoquímico de las muestras de asfalto convencional y modificado se realizó de acuerdo con las normas vigentes del instituto nacional de vías (Invías, 2007) e incluyó las siguientes pruebas: ductilidad, penetración, peso específico, punto de ignición y llama, viscosidad rotacional, punto de ablandamiento y pérdida de masa en película delgada.

Los ensayos que se explican de aquí en adelante solo fueron realizados en el asfalto convencional y en el asfalto modificado, que presentó los mejores resultados en los ensayos anteriores. La tabla 1 presenta los resultados físicos realizados a los asfaltos.

Tabla 1. Resultados del análisis físico del asfalto sin modificar y modificado en estado sin envejecer y envejecido

| ENSAYO | UNIDAD | NORMA | ASFALTO NORMAL | | | | ASFALTO MODIFICADO | | | |
|-------------------------------------|-------------------|-----------|----------------|------|---------------|------------|--------------------|------|---------------|------------|
| | | | Mín. | Máx. | SIN ENVEJECER | ENVEJECIDO | Mín. | Máx. | SIN ENVEJECER | ENVEJECIDO |
| Ductilidad (25 °C, 5 cm/min) | cm | INV-E-702 | 100 | -- | 140 | 140 | 15 | - | 42.9 | 35 |
| Penetración (25 °C, 100 g Ss) | 0,1 mm | INV-E-706 | 80 | 100 | 90 | 31 | 55 | 70 | 60 | 47 |
| Gravedad específica | g/cm ³ | INV-E-707 | -- | -- | 1,0083 | N. A. | - | - | 1.0262 | N. A. |
| Punto de ignición | °C | INV-E-709 | 230 | -- | 306 | N. A. | 230 | - | 299 | N. A. |
| Punto de llama | °C | INV-E-709 | -- | -- | 348 | N. A. | - | - | 349 | N. A. |
| Punto de ablandamiento | °C | INV-E-712 | -- | -- | 46 | 48,5 | 58 | - | 55 | 55 |
| Índice de penetración | -- | INV-E-724 | -1 | +1 | -0,7907 | -2,5159 | -1 | +1 | 0,4394 | -0,0648 |
| Viscosidad de Brookfield (80 °C) | cP | INV-E-717 | -- | -- | 21642 | 36902 | - | - | 147333 | 147125 |

| ENSAYO | UNIDAD | NORMA | ASFALTO NORMAL | | | | ASFALTO MODIFICADO | | | |
|---|--------|-----------|----------------|------|---------------|------------|--------------------|--------|---------------|------------|
| | | | Min. | Max. | SIN ENVEJECER | ENVEJECIDO | Min. | Max. | SIN ENVEJECER | ENVEJECIDO |
| Viscosidad de Brookfield (135 °C) | c P | INV-E-717 | -- | -- | 418,8 | 583,3 | - | - | 3106 | 2533,9 |
| Viscosidad de Brookfield (180 °C) | c P | INV-E-717 | -- | -- | 75 | 86,9 | - | - | 521 | 426,5 |
| Pérdida de masa | % | INV-E-720 | -- | 1 | 0,431 | - | 1 | -0,511 | | |
| Recuperación elástica | % | INV-E-742 | -- | -- | N. A. | N. A. | - | - | 61,17 | 59 |
| Penetración al residuo (% de la original) | % | INV-E-706 | 48 | -- | 34 | 65 | - | 78 | | |
| Incremento del punto ablandamiento al residuo | °C | INV-E-712 | -- | 5 | 2,5 | - | - | 0 | | |

Fuente: elaboración propia.

Caracterización química del ligante original y modificado

El procedimiento que describe la norma D4124-09 indica que el asfalto analizado mediante solventes se puede separar en cuatro fracciones claramente diferenciables. Una fracción en estado sólido que se identifica como asfaltenos —los cuales aportan la rigidez y dureza al ligante— es la fracción más pesada. Las siguientes tres fracciones se encuentran en estado líquido en el siguiente orden: primero se destilan los hidrocarburos saturados utilizando el heptano y el tolueno; esta solución posee un color casi translucido. Inmediatamente después se destilan los hidrocarburos aromáticos, los cuales reaccionan a la presencia de tolueno y metanol y cuyo es amarillento. Por último, se destilan las resinas en presencia de Tricloroetileno y su color es café (figura 5).



Figura 5. Separación del asfalto en sus cuatro fracciones: saturados, aromáticos, resinas, asfáltenos (SARA)

Fuente: autores.

El análisis de las cuatro fracciones o análisis SARA se realizó por duplicado en cada una de las muestras definidas en la tabla 2.

Tabla 2. Nomenclatura de las muestras durante la investigación

| MUESTRA | SÍMBOLO |
|--|------------------|
| Asfalto original sin modificar y sin envejecer | ASF 80-100 SM-SE |
| Asfalto original sin modificar y envejecido | ASF 80-100 SM-E |
| Asfalto modificado sin envejecer | ASF 80-100 M-SE |
| Asfalto modificado envejecido | ASF 80-100 M-E |

Fuente: autores.

El cálculo del índice de inestabilidad coloidal (IC) se determinó mediante la utilización de la ecuación [1], en tanto el índice de solubilidad (IS) se determinó mediante la ecuación [2]. El valor de IS indica la estructura coloidal de la siguiente manera:

- $IS < 4$ = estructura GEL
- $4 < IS < 9$ = estructura SOL-GEL
- $IS > 9$ = estructura SOL

$$IC = \frac{\text{Constituyentes floculados}}{\text{Constituyentes dispersos}} = \frac{\text{Saturados} + \text{Asfaltenos}}{\text{Aromáticos} + \text{Resinas}} \quad [1]$$

$$IS = \frac{\text{Resinas}}{\text{Asfaltenos}} + \frac{\text{Aromáticos}}{\text{Saturados}} \quad [2]$$

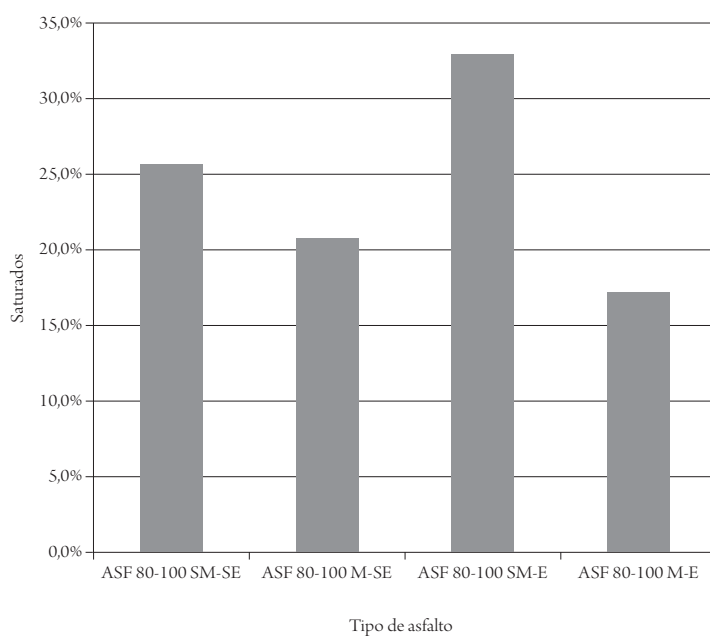
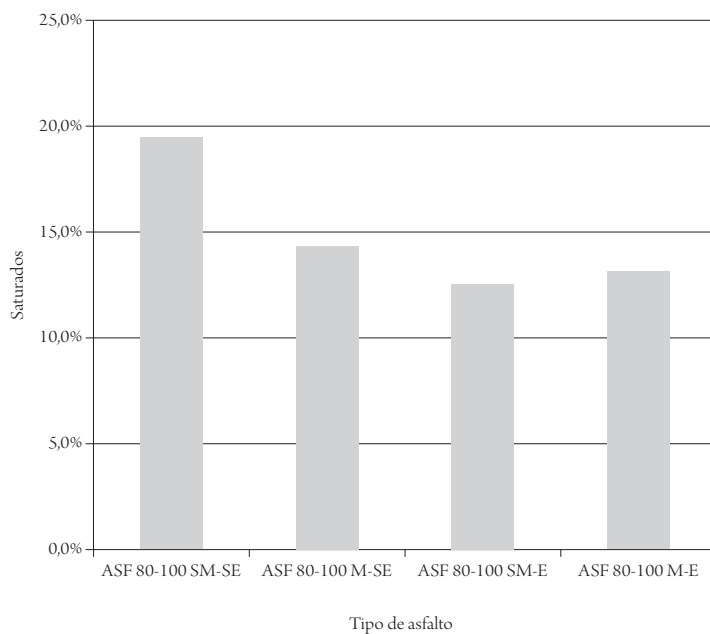
Si un asfalto es tipo GEL, posee una baja susceptibilidad térmica y un mayor intervalo de temperatura entre el cambio del estado elástico al estado viscoso. Además, se caracteriza por tener una deformación elástica retardada y por presentar bajas deformaciones permanentes debidas a la carga y la temperatura. Si el asfalto se comporta como un tipo SOL, significa que el asfalto posee una alta susceptibilidad térmica, debido al bajo porcentaje de asfaltenos (que proporcionan dureza y rigidez). Esta condición ocasiona deformaciones permanentes (ahuellamiento) en la mezcla asfáltica. Por su parte, si el asfalto es de tipo SOL-GEL, se caracteriza por su comportamiento elástico y una susceptibilidad térmica intermedia. En la tabla 3 se observan los resultados obtenidos para la separación de fracciones de cada asfalto.

En estos resultados se observa que el asfalto sin modificar tuvo una respuesta tipo SOL-GEL, en tanto que asfalto modificado sin envejecer y envejecido tuvo una respuesta tipo GEL. Adicionalmente, a partir de estos resultados se identifica que el asfalto modificado sin envejecer y envejecido presenta una mayor cantidad de porcentaje de resinas y una disminución en el porcentaje de aromáticos y saturados. Esto significa que el asfalto presenta más rigidez y soporta mayores temperaturas de mezclado y compactación, por ser los asfaltenos y las resinas los que le aportan al asfalto la estabilidad y el soporte dentro de la mezcla. En la figura 6 se observa el resultado gráfico de las fracciones de los asfaltos ensayados.

Tabla 3. Resultados del análisis SARA en asfalto sin modificar y modificado en estado sin envejecer y envejecido

| TIPO DE ASEALTO | N.º DE MUESTRA (%) | ESTADÍSTICA MALTENOS | | | | | | ESTADÍSTICA ASFALTENOS | | | | | |
|-----------------|--------------------|----------------------|------------------------|----------------|-----------------|------------------------|----------------|------------------------|------------------------|----------------|------------------------|------------------------|----------------|
| | | SATURADOS | | | AROMÁTICOS | | | RESINAS | | | ESTADÍSTICA ASFALTENOS | | |
| | | VALOR MEDIO (%) | DEVIACIÓN ESTÁNDAR (%) | COVARIANZA (%) | VALOR MEDIO (%) | DEVIACIÓN ESTÁNDAR (%) | COVARIANZA (%) | VALOR MEDIO (%) | DEVIACIÓN ESTÁNDAR (%) | COVARIANZA (%) | VALOR MEDIO (%) | DEVIACIÓN ESTÁNDAR (%) | COVARIANZA (%) |
| ASF 80-100 | 1 | | | | | | | | | | | | |
| SM-SE | | 19,43 | 0,04 | 0,18 | 25,24 | 0,05 | 0,20 | 42,34 | 0,02 | 0,05 | 13,01 | 0,06 | 0,49 |
| ASF 80-100 | 2 | | | | | | | | | | | | |
| SM-SE | | | | | | | | | | | | | |
| ASF 80-100 | 1 | | | | | | | | | | | | |
| M-SE | | 14,38 | 0,23 | 1,62 | 20,41 | 0,78 | 3,85 | 43,72 | 1,73 | 3,95 | 21,50 | 0,71 | 3,29 |
| ASF 80-100 | 2 | | | | | | | | | | | | |
| M-SE | | | | | | | | | | | | | |
| ASF 80-100 | 1 | | | | | | | | | | | | |
| SM-E | | 12,57 | 0,97 | 7,71 | 32,61 | 3,34 | 10,26 | 33,72 | 3,56 | 10,55 | 21,12 | 0,76 | 3,58 |
| ASF 80-100 | 2 | | | | | | | | | | | | |
| SM-E | | | | | | | | | | | | | |
| ASF 80-100 | 1 | | | | | | | | | | | | |
| M-E | | 13,20 | 0,90 | 6,81 | 16,99 | 1,28 | 7,54 | 46,05 | 0,54 | 1,17 | 23,77 | 0,92 | 3,87 |
| ASF 80-100 | 2 | | | | | | | | | | | | |
| M-E | | | | | | | | | | | | | |

Fuente: elaboración propia.



Continúa figura 6

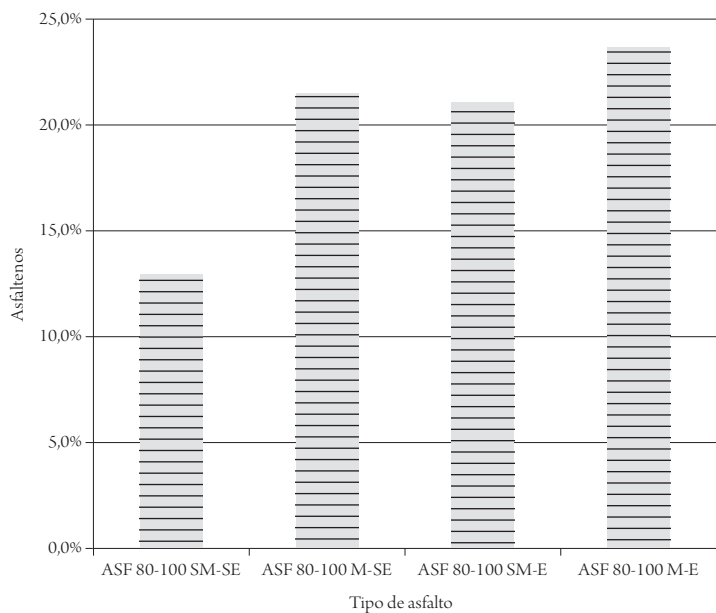
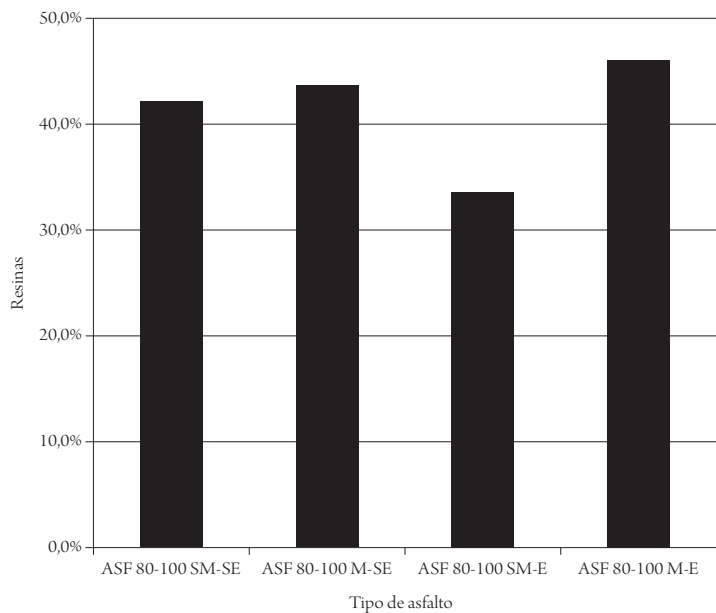


Figura 6. Resultado gráfico de las fracciones SARA para todos los tipos de asfalto ensayados

Fuente: autores.

Otro ensayo realizado al ligante modificado fue el de la *fracción de resinas*, para la cual el asfalto CIB original presentó bandas débiles en 750 cm⁻¹ (vibración de deformación fuera del plano del grupo metilo de cuatro enlaces C-H aromáticos), 1605 cm⁻¹ (bandas de estiramiento de carbonos aromáticos), 1705 cm⁻¹ (bandas de estiramiento de grupos carbonilo y/o carboxilo), 2852 cm⁻¹ y 2923 cm⁻¹ (bandas de vibración de estiramiento de enlaces C-H.) y finalmente una banda de intensidad media alrededor de 1465 cm⁻¹, correspondiente a vibraciones de deformación de grupos metilo y metileno.

El asfalto modificado presenta bandas ausentes o de mayor intensidad que la fracción correspondiente al asfalto convencional en 750 cm⁻¹, 1000 cm⁻¹ a 1200 cm⁻¹ (funciones oxigenadas), 1305 cm⁻¹ y 1605 cm⁻¹, que se explican por razones similares a las expuestas anteriormente. En la figura 7 se presentan las fotografías obtenidas para las muestras de asfalto desoleizadas por microscopía electrónica de barrido SEM de alto vacío, tanto para el asfalto CIB convencional como para el modificado.

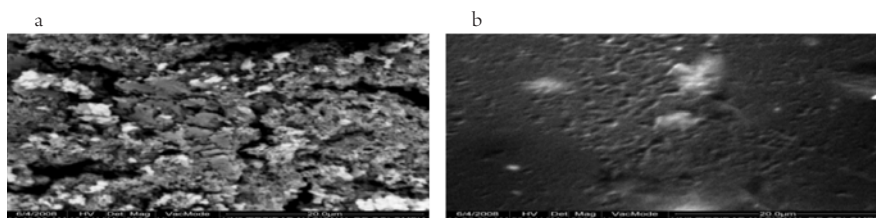


Figura 7. Análisis SEM del asfalto CIB convencional (6000X) (a) y análisis SEM de asfalto CIB modificado (6000X) (b)

Fuente: autores.

En estas fotografías se puede ver la influencia de los polímeros sobre las características morfológicas del asfalto. En la figura *a* correspondiente al asfalto CIB original se puede ver el aspecto arenoso de la muestra, mientras que en la figura *b* la homogeneidad del bitumen resultante es evidente, lo que permite suponer una buena compatibilidad entre el asfalto y el polímero y, por lo tanto, mayor estabilidad de este ligante frente al almacenamiento y a las temperaturas elevadas.

Curva de viscosidad Brookfield

Para tener un indicativo del cambio de viscosidad con la variación de la temperatura, aquella se midió a partir del ensayo en el viscosímetro Brookfield (figura 8).

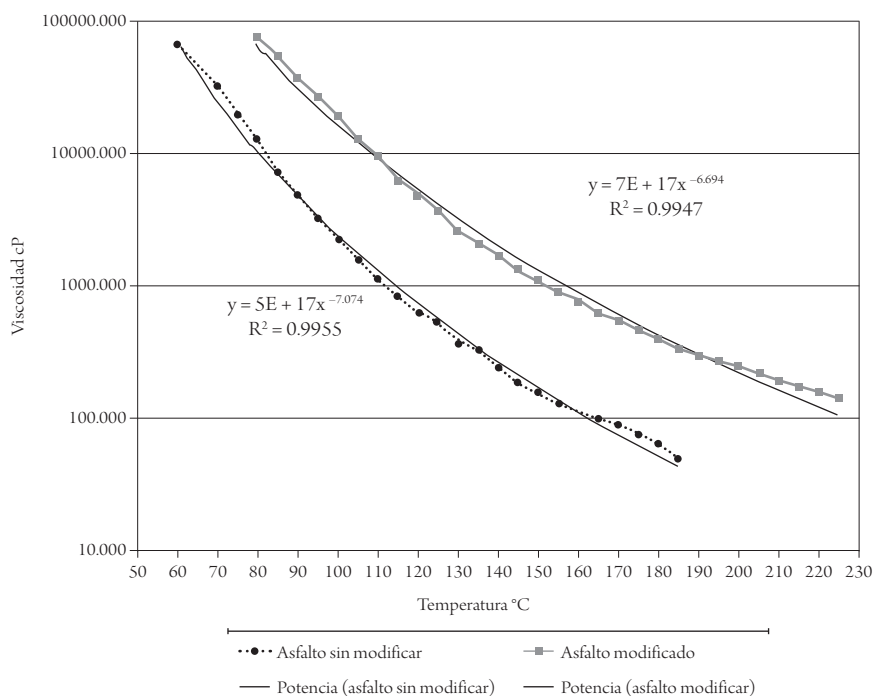


Figura 8. Comparación de curva reológica entre el asfalto sin modificar y el modificado, sin envejecer

Fuente: autores.

Proceso de envejecimiento primario en horno rotatorio de película delgada

Luego de haber realizado la caracterización física del ligante normal y modificado sin envejecer, se procedió a realizar el proceso de envejecimiento a partir horno rotatorio de película delgada (RTFO), como se muestra en la figura 9. Este método se utiliza para llevar el ligante asfáltico a una condición igual o cercana a la que tendrían al entrar en servicio (figuras 10 y 11).



Botellas girando a temperatura 163°C, durante 85 min. Asfalto Sin Modificar



Botellas después del envejecimiento, y botellas I y II para calculo de pérdida de masa. Asfalto Sin Modificar



Botellas con muestra de Asfalto Modificado, antes de la prueba. Botella I. y II. Para pérdida de masa.

Figura 9. Prueba envejecimiento primario en horno rotatorio de película delgada

Fuente: autores.

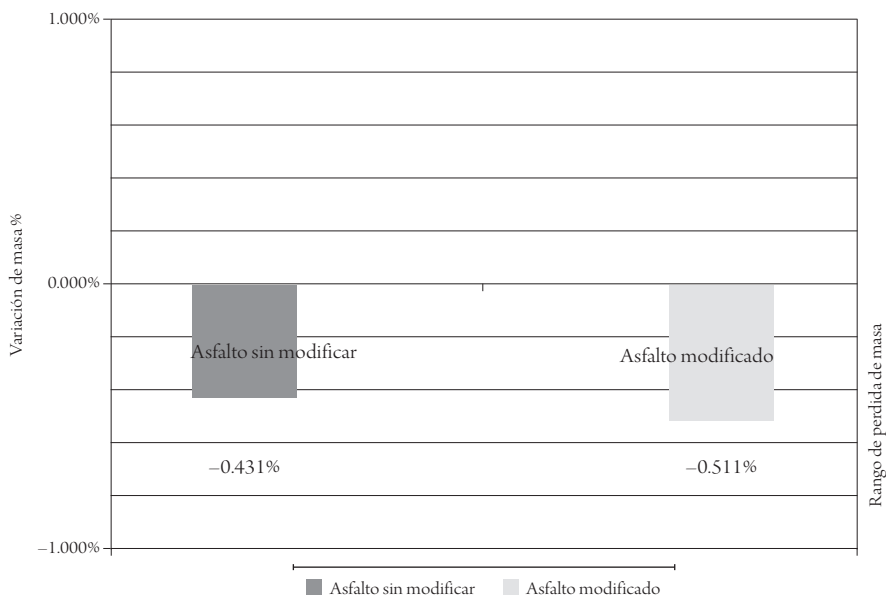


Figura 10. Variación de masa después del horno rotatorio de película delgada

Fuente: autoras.

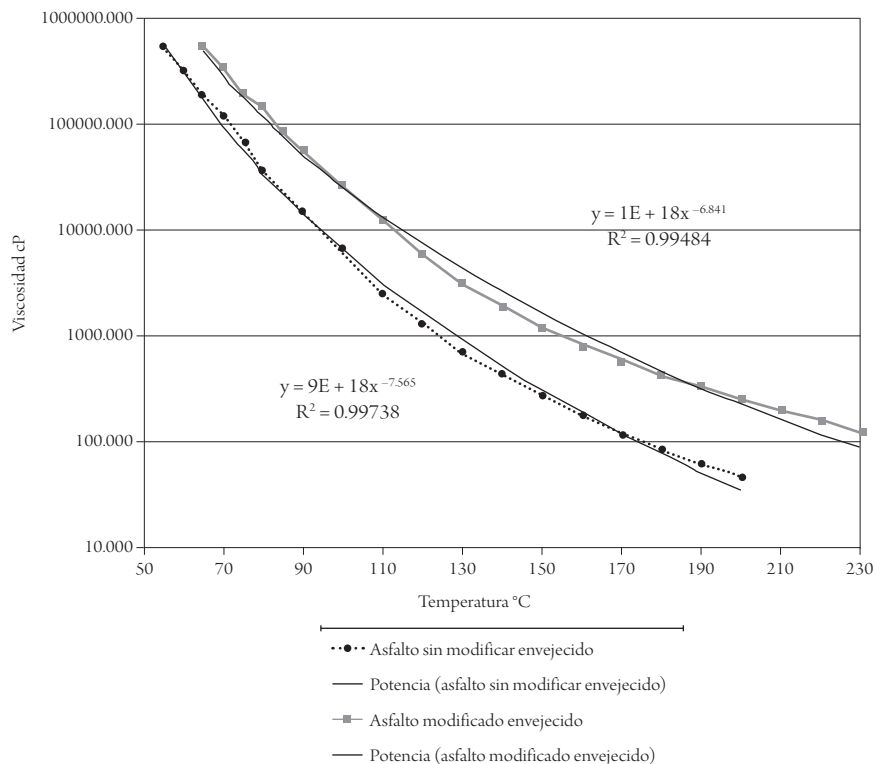


Figura 11. Comparación de curva reológica entre el asfalto sin mdificar y el modificado, envejecido

Fuente: autoras.

Reología con reómetro de corte DSR

El análisis reológico se determinó mediante la utilización del reómetro de corte dinámico (DSR) de la Pontificia Universidad Javeriana (figura 12), a partir del procedimiento descrito en la norma INVE-750-07, cuya norma homóloga AAS-HTO es la T 315-05. Su funcionamiento radica en la aplicación de un patrón sinusoidal de tensiones de corte sobre una muestra previamente definida (1 mm de espesor y 25 mm de diámetro, o 2 mm de espesor y 8 mm de diámetro). Se toman los resultados de la respuesta al aplicar el corte (deformación), la muestra se mantiene a la temperatura del ensayo mediante el calentamiento ya sea de los platos tanto inferior como superior o mediante la utilización de una cámara de ambiente protegido.

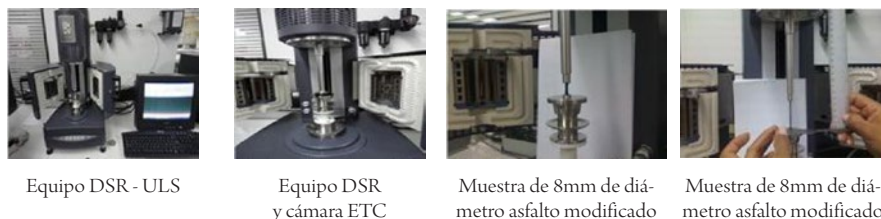


Figura 12. Reómetro de corte directo (DSR)

Fuente: autoras.

Los patrones analizados determinan dos importantes parámetros, entre muchos otros:

- *Módulo de Corte Dinámico* $[G^*]$: se considera un indicador de rigidez o resistencia del ligante asfáltico a la deformación debida al esfuerzo de corte aplicado a la muestra.
- *Ángulo de fase* δ : es el indicador de las deformaciones elásticas (recuperables) y viscosas (no recuperables) del asfalto.

Con estos dos parámetros se puede determinar la resistencia de corte de un ligante asfáltico, además de otras propiedades que están directamente relacionadas con estos parámetros (tabla 4 y figura 9).

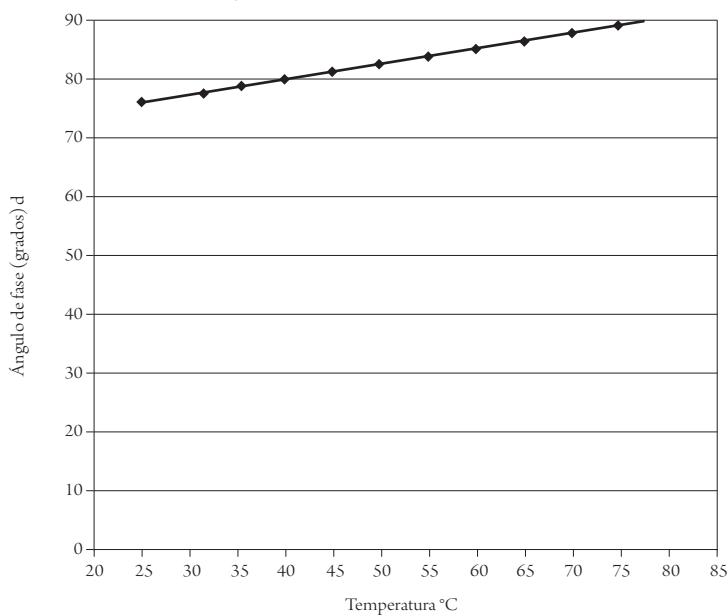
Tabla 4. Control de ahuellamiento en el DSR

| FÓRMULA | TIPO DE ASFALTO |
|--|-------------------------|
| $[G^*]/\sin(\delta) > 1 \text{ kPa}$ | Asfalto original |
| $[G^*]/\sin(\delta) > 2.2 \text{ kPa}$ | Asfalto envejecido RTFO |

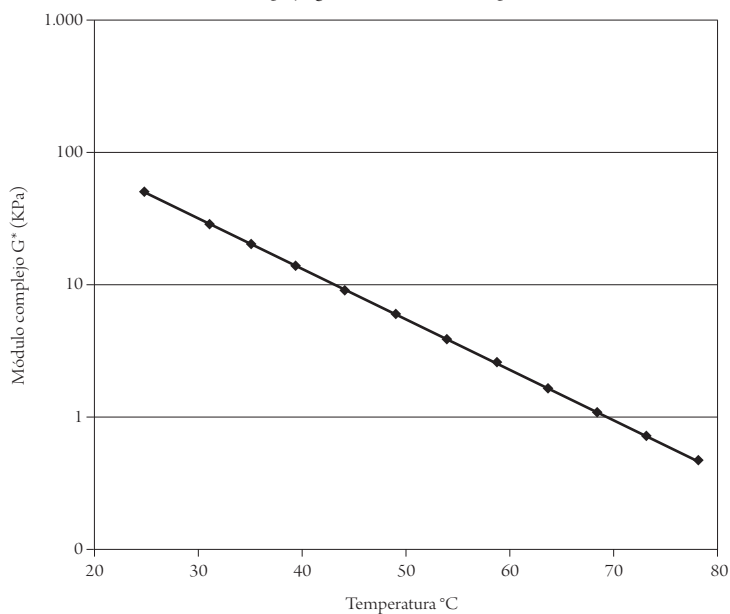
De estos resultados se observa que para el caso del asfalto modificado y sin modificar, a medida que la temperatura aumenta, el ángulo δ también lo hace; sin embargo, al comparar el asfalto modificado con el asfalto sin modificar, se tiene que para este último la susceptibilidad al ahuellamiento es mayor. Esto indica que con el asfalto modificado se podrían reducir las posibles deformaciones plásticas que se presenten en la mezcla asfáltica. El módulo complejo del asfalto modificado sin envejecer respecto al del asfalto sin modificar y sin envejecer es más alto. Este último aspecto es conveniente por cuanto al aumentar el módulo, la mezcla

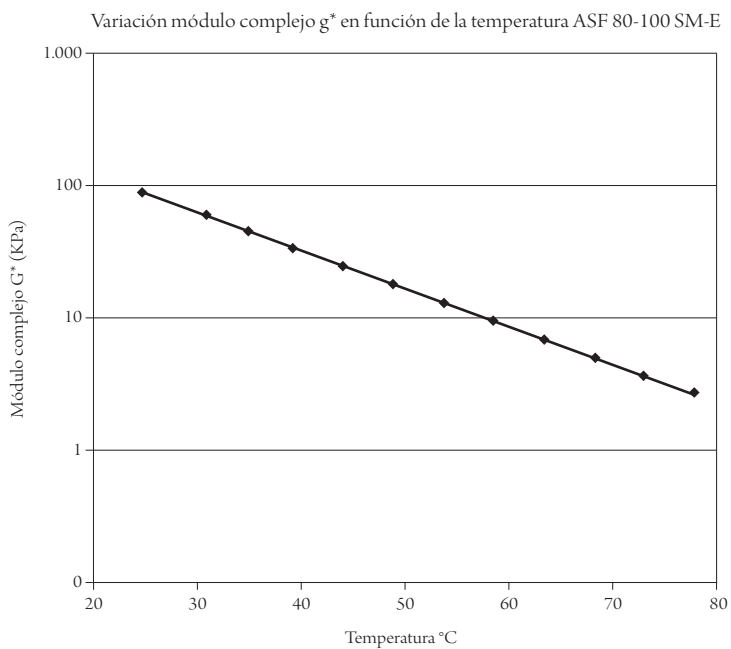
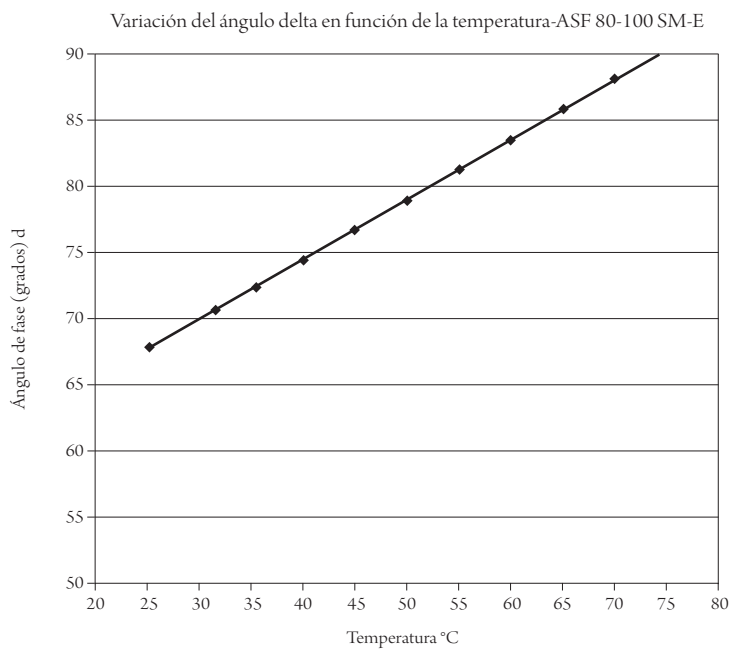
seguramente tendrá una mejor respuesta a las cargas impuestas por el tráfico con bajas deformaciones (figura 13).

Variación del ángulo delta en función de la temperatura-ASF 80-100 SM-SE



Variación módulo complejo G^* en función de la temperatura ASF 80-100 SM-SE





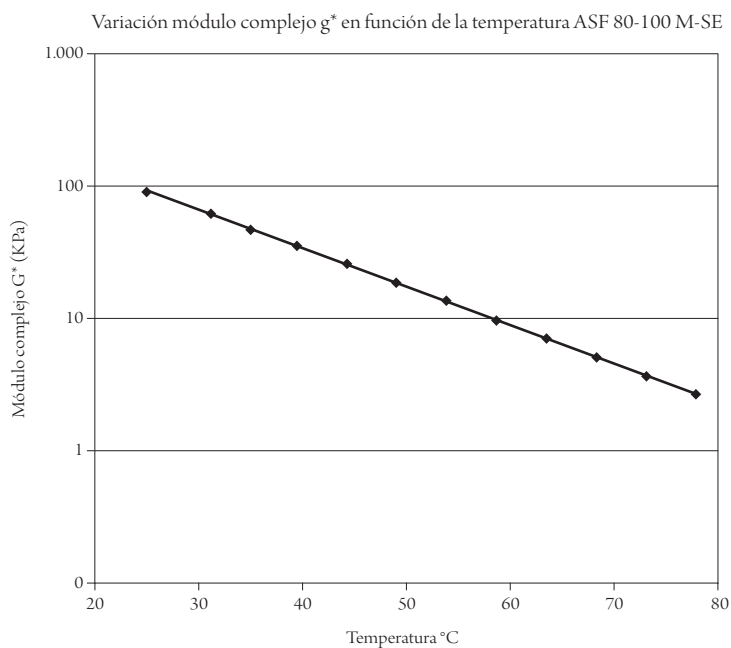
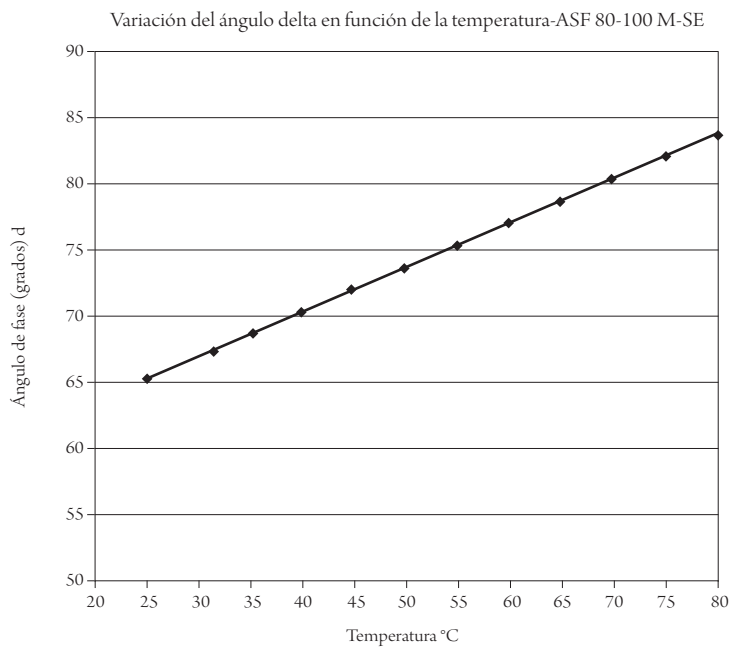


Figura 13. Variación del módulo complejo $[G^*]$ y del ángulo δ con la temperatura en el ensayo con el reómetro de corte directo

Fuente: autores.

Tramo de prueba

El tramo de prueba escogido está localizado en Bogotá, la capital de Colombia. Esta ciudad está ubicada en la meseta de la cordillera Oriental de los Andes, a 2630 msnm. Limita al occidente con el río Bogotá, al sur con las estribaciones del páramo de Sumapaz y al norte con los terrenos agrícolas de la sabana. La ciudad tiene actualmente una población de 6.840.116 habitantes, 7.945.263 en el área metropolitana, con una densidad poblacional de aproximadamente 3912 habitantes por kilómetro cuadrado. La ciudad tiene un clima de montaña debido a la altitud (principalmente afectado por la nubosidad) que oscila entre los 7 y los 18 °C, con una temperatura media anual de 14°C (similar al clima de la primavera septentrional). Las temporadas más lluviosas del año son entre abril y mayo, y entre septiembre y noviembre, cuando se alcanzan 114 mm/mes.

El tramo que estableció el IDU, después de los trámites pertinentes para la elaboración de la investigación, fue la calle 152, entre autopista norte hasta la carrera 54.

Fase I: análisis de la información existente. En esta fase se recopiló toda la información existente referente a los recuperadores de pavimentos existentes, sus alcances y limitaciones. Además, se realizaron seguimientos a proyectos que se estén llevando a cabo en la actualidad en la ciudad.

Fase II: selección del tramo de prueba. En esta fase se realizaron los trámites necesarios ante el IDU para la adjudicación del tramo, y se elaboró el plan de manejo de tráfico, el cual fue radicado ante la Secretaría de Movilidad Distrital, entidad que autorizó para iniciar labores de trabajo sobre el tramo adjudicado por el IDU.

Fase III: análisis del deterioro actual del pavimento. En esta fase se determinaron las condiciones actuales en las que se encontraba la estructura de pavimento flexible. Para esto se realizó un trabajo de campo a partir del cual se estableció el tipo de falla de la estructura, se determinó el tránsito actual al que está sometido el tramo y se establecieron las soluciones para mitigar el deterioro encontrado en la estructura del pavimento.

Fase IV: colocación del biosello SOEL. En esta fase se realizó la aplicación del sellante sobre un sector de 50 m de longitud, el cual fue escogido a partir de la evaluación de la totalidad del tramo de 280 m de longitud.

Fase V: Seguimiento del tramo a corto y mediano plazo. En esta fase se evaluó el desempeño del sellante a corto y mediano plazo después de aplicado (figura 14).

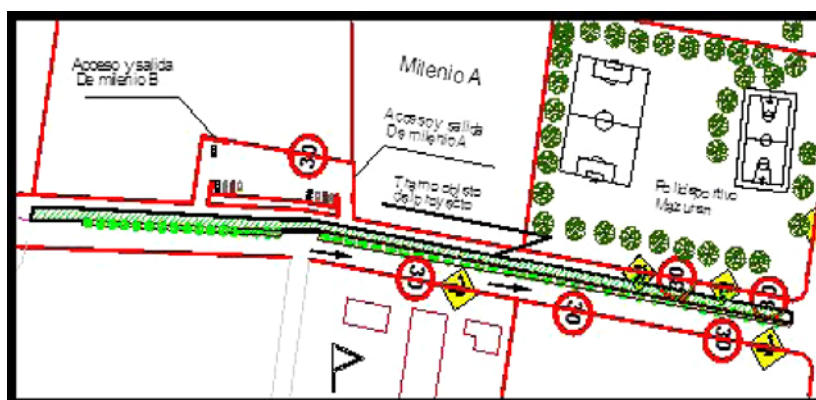


Figura 14. Localización del tramo objeto de estudio

Fuente: autoras.

La determinación de la condición superficial del pavimento se basó en la metodología Paver referenciada anteriormente. Los cálculos de las siguientes tablas se realizaron a partir de lo siguiente:

$$MDR = 100 - \sqrt{(\sum [P_{ni}]^2)}$$

Donde P_{ni}^2 es el peso de ponderación del daño según su severidad y extensión. Este número se determina a partir de curvas establecidas en el método Paver (anexo 1). A partir de esto se determina el OPI de la siguiente forma:

$$OPI = MDR * ([5e]^{((0.198 - 0.264IRI) / 5)})^{0.12}$$

Donde MDR es el índice de fallas superficiales e IRI es el índice de rugosidad internacional (m/Km) (figura 15).

Discusión y conclusiones

Se estableció que el poliestireno expandido como polímero mantiene y mejora las propiedades elásticas del ligante, mientras que la llanta mejora propiedades

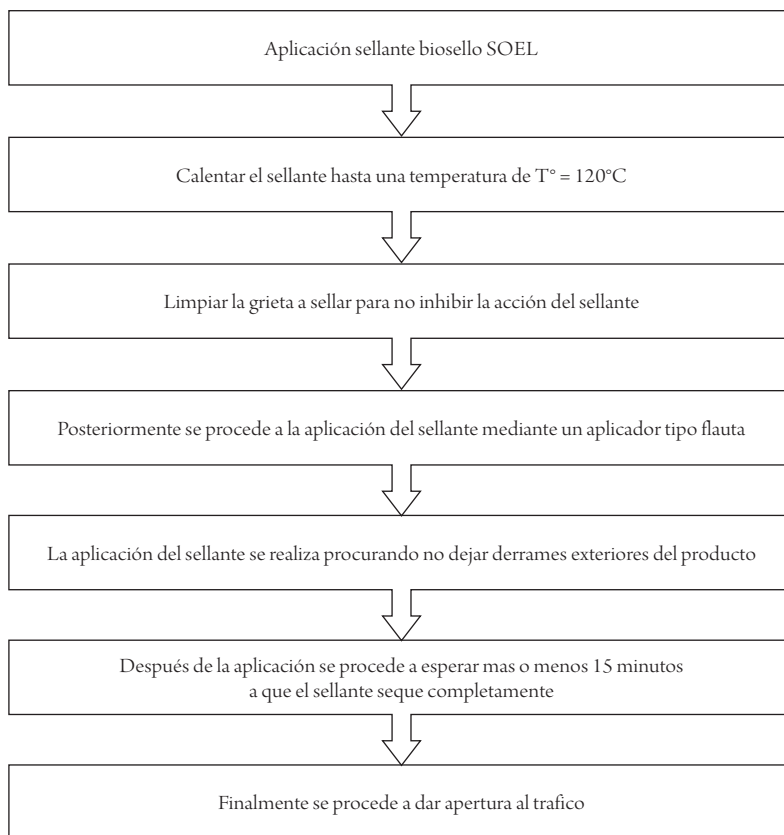


Figura 15. Diagrama sobre la aplicación del sello y seguimiento de las reparaciones con el Biosello SOEL

Fuente: autores

tales como la susceptibilidad térmica, la resistencia a la fatiga, la inflamabilidad y la resistencia a los solventes. De acuerdo con los resultados de la investigación, se encontraron los porcentajes óptimos de cada polímero para la modificación del asfalto CIB convencional, y esta dosificación generó un ligante modificado estable (respecto de las interacciones ligante-polímero) que, además de contener un porcentaje importante de llanta usada, contribuye a la solución de un grave problema ambiental.

Los resultados indicaron que no se verificó un cambio significativo en la estructura química del ligante, y allí el asfalto CIB modificado es una mezcla física de asfalto-polímero estable y homogénea. Las curvas reológicas y las energías de activación

de flujo calculadas permiten predecir una menor susceptibilidad térmica del asfalto CIB modificado respecto del asfalto CIB convencional.

Finalmente, una de las pretensiones de mayor relevancia es aportar con nuestros resultados información para que se implemente por norma en el país el uso de estos desechos no biodegradables como el polvo de llanta y otros en las mezclas asfálticas para pavimentos. El módulo complejo del ligante modificado es mayor respecto al módulo complejo del ligante sin modificar, en el rango de temperaturas estudiadas, es decir, de 25 °C a 80 °C. Se recomienda analizar puntos en intervalos de bajas temperaturas (negativas) a altas temperaturas (por encima de la de mezclado) y estudiar con mayor repetitividad los resultados obtenidos para el módulo dinámico del ligante modificado envejecido.

Sí se planea seguir trabajando sobre el tramo, es importante recordar que se debe presentar el plan de manejo de tráfico con conteos actualizados. Además, es necesario mencionar que durante los trabajos que se realizaron se instalaron tres semáforos en la zona, los cuales deben ser tenidos en cuenta al momento de la realización del PMT, ya que muy posiblemente la entidad encargada de la movilidad exija un estudio de colas en estos semáforos.

Para caracterizar un poco mejor el comportamiento del sellante, se recomienda aplicarlo en zonas de tierra caliente, por cuanto al parecer el sellante presenta debilidades con gradientes de temperatura de altos, lo que sería bueno caracterizar para un posible mejoramiento en el laboratorio del biosello SOEL.

Para establecer la vida útil del sellante, se recomienda seguir realizando visitas periódicamente; sin embargo, vale recordar que para cualquier cerramiento de la vía se debe contar con un permiso de la Secretaría de Movilidad, puesto que cualquier agente de tránsito lo puede exigir, y en caso de no tenerlo puede acarrear multas para el encargado del proyecto.

Debido al problema que presenta el sellante al no rigidizarse, se se recomienda incluir un aditivo en la preparación del sellante que lo vuelva rígido, para que no presente este tipo de desventajas frente a otros. El IRI topográfico promedio del tramo es de 0,49375 m/km, lo que, en consonancia con el IDU, refiere un nivel de servicio bueno de la vía, por tener un IRI entre 0 y 4m/km. Sin embargo, es necesario hacer mediciones con equipos especializados para tener mayor precisión sobre este valor.

Referencias

- Agnusdei, J.A. (1997). *Asfaltos modificados y sus aplicaciones*. Bogotá: Universidad de La Salle.
- Amaya, C. y Prieto, M. (2008). *Comparación de los resultados de la modificación de asfalto con poliestireno y llanta triturada, obtenidos de procesos de mezcla manual y de mezcla con el dispersor de asfaltos* (informe de trabajo de grado). Bogotá: Universidad de La Salle.
- Ander, P. y Sonnessa, Anthony. (1996). Macromoléculas. En *Principios de química. Introducción a los conceptos teóricos*. Mexico: Limusa.
- Arenas, H. (2004, 18-20 de agosto). La modificación de los asfaltos colombianos: una respuesta al deterioro prematuro de los asfaltos. *IV Jornadas Internacionales del Asfalto*. Cartagena.
- Arenas, H. (2005). *Tecnología del cemento asfáltico* (4.^a ed.). Bogotá: FAID.
- Asphalt Institute (1994). *Background of superpave asphalt binder test methods*. Lexington: Federal Highway Administration.
- Botasso, G., Gonzalez, O., Rosato, M., Rebollo, O. y Rivera, J. (2000). *Asfalto modificados fijación de residuos contaminantes*. Buenos Aires: Universidad Tecnológica Nacional.
- Coinsky, R.; Huber, G.; Anderson, M.; Kennedy, T.; Solaiman, M. (1994). The Superpave mix design manual for new construction. *Strategic Highway Research Program SHRP-A-407, 1994. chapters 1 and 2*.
- Collins, J. et al. (1991). Improved performance of paving asphalts by polymer modification. *Journal of the Association of Asphalt paving technologists (AAPT)*, 60, 43-79.
- Cuéllar, A. (2003). *Estudio comparativo de las leyes de fatiga de una mezcla cerrada 0/10, con y sin adiciones de icopor* (informe de trabajo de grado). Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.
- Cubillos Estrella. C. A. (2011). *Evaluación del asfalto 80-100 producido en Barrancabermeja modificado con elastómeros, plastómeros y polímeros no biodegradables utilizando el dispersor de asfaltos de la Universidad de La Salle* (informe de trabajo de grado). Bogotá: Universidad de La Salle.
- Estrada, J. y González, A. (2002). *Mejoramiento de las mezclas asfálticas drenantes utilizando como ligante el asfalto-caucho* (informe de trabajo de grado). Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.
- Figueroa, A., Reyes, F., Hernández, D., Jiménez, C. y Bohórquez, N. (2007). *atalia. Análisis de un asfalto modificado con icopor y su incidencia en una mezcla asfáltica densa en caliente*. *Revista Ingeniería e Investigación*, 27, 5-15.
- Figueroa, A. y Reyes, F. (2005). *Asfalto modificados con poliestireno* (informe de trabajo de grado). Bogotá: Universidad de La Salle.

- Figueroa, A., Fonseca, E. y Reyes, F. (2009). Caracterización físicoquímica y morfológica de asfaltos modificados con material reciclado. *Ingeniería y Universidad*, 13(1), 45-70.
- Figueroa, A. y Fonseca, E. (2010). *Asfalto modificado con poliestireno y polvo de llanta* (informe de trabajo de grado). Bogotá: Universidad de La Salle.
- Hernández, G. (2007). *Mejoramiento de las propiedades termo-mecánicas de asfalto modificado con copolímeros de estireno-butadieno*. México: CONINFRA.
- Heshmat, A. (1995). *Polymer modifiers for improved performance of asphalt mixture*. Texas: Texas Transportation Institute.
- Instituto Nacional de Vías (Invías) (2007). *Normas de ensayo de materiales para carreteras*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Instituto de Desarrollo Urbano (2002). *Estudio de las mejoras mecánicas de mezclas asfálticas con desechos de llantas*. Bogotá: Autor.
- Ocampo, M.; Caicedo, B. y González, D. (2002a). *Experiencia colombiana sobre el empleo de grano de caucho reciclado proveniente de llantas usadas*. Ponencia presentada en Terceras Jornadas Internacionales del Asfalto. Agosto 21-23 de 2002, Universidad del Cauca, Popayán.
- Reyes, F. y Figueroa, A. (2008). *Uso de desechos plásticos en mezclas asfálticas. Síntesis de la investigación colombiana*. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.
- Rodríguez Suparez, H. R. (2010). *Restauración y recuperación de pavimentos mediante emulsiones a base de látex* (tesis de grado). Bogotá: Universidad de La Salle.
- Sánchez, A. (2006). *Análisis comparativo de las características físicas entre el asfalto convencional y el asfalto modificado con poliestireno y llanta triturada* (tesis de grado). Bogotá: Universidad de La Salle.
- Socal, L. et al. (2004). Study of rheological properties of pure and polymer-modified brazilian asphalt binders. *Journal of Materials Science*, 39(2), 539-546.
- Segura Loaiza, L. H. (2006). *Las basuras y el reciclaje*. Bogotá: Contraloría de Cundinamarca.

Anexos: fichas de colocación y seguimiento

REGISTRO DE FISURAS A SELLAR

FECHA: 19 DE DIC-09

SITIO DE APLICACIÓN:

FICHA DE INVENTARIO #: 1

De: K0+040m

Hasta: K0+050m

1. TIPO DE DAÑO: Grieta longitudinal.
2. DESCRIPCIÓN DEL DAÑO: Fisura aproximadamente longitudinal paralela al eje de la carretera con abertura mayor a 3mm.

FOTO 1. UBICACIÓN GENERAL DE LA FALLA.



FOTO 2. DETALLE DE LA FALLA A SELLAR.



3. POSIBLES CAUSAS DEL DAÑO:

- ⊖ Ligantes asfálticos envejecidos
- ⊖ Uso de ligantes muy duros.

4. DIMENSIONES DE LA FALLA:

- ⊖ LARGO: 0.70m
- ⊖ ANCHO: 0.65m

5. NIVEL DE SEVERIDAD

Media.

6. INTERVENCIÓN RECOMENDADA

Sello de la fisura para evitar un daño más severo.

REGISTRO DE SELLO DE FISURAS**FECHA:** 19 DE DIC-09**FICHA DE INVENTARIO #:** 1**SITIO DE APLICACIÓN:****FICHA DE APLICACIÓN #:** 1**De:** K0+040m**Hasta:** K0+050m**TIPO DE SELLANTE USADO:** Biosello SOEL

FOTO 1. APLICACIÓN DEL SELLANTE.



FOTO 2. APARIENCIA FINAL DEL SELLADO.

**EQUIPO USADO:**

- ⊖ Asfalto modificado.
- ⊖ Pistola aplicadora
- ⊖ Guantes de seguridad.

DETALLES DEL SELLO:

- ⊖ **TEMPERATURA DE APLICACIÓN:** 120°C.
- ⊖ **LONGITUD DEL SELLO:** 3.5 m.
- ⊖ **TIEMPO DE SECADO:** 15 MINUTOS

OBSERVACIONES GENERÁLES:

El sello de la fisura se realizó ruteando la misma, de forma que se garantizo el
correcto sello de la misma.

REGISTRO DE SEGUIMIENTO DEL SELLO DE FISURAS DE LA CALLE 152

Fecha de seguimiento: 04 de ene-10 Ficha de aplicación referente #: 2

Sitio de seguimiento: Ficha de seguimiento #: 2

De: K0+040m Hasta: K0+050m

Tipo de sellante Usado: Biosello SOEL

Foto 1. Ubicación general de la falla sellada.



Foto 2. Falla sellada



Foto 3. Detalle 1 de la falla sellada.



Foto 4. Detalle 2 de la falla sellada.



OBSERVACIONES GENERALES:

El comportamiento del sellante 16 días después de aplicado ha sido bueno, aunque se evidencia en las fotos que el sellante comenzó a tomar la forma de la fisura.

Estudio de alternativas para el aprovechamiento y reúso del agua doméstica

DAYAN LIZETH PARRA ASTUDILLO¹

LUIS JAVIER CARRILLO PUERTO²

EDDER ALEXÁNDER VELANDIA DURÁN³

RESUMEN

A pesar de que los ciudadanos tienen garantizado el suministro de agua en Bogotá, es importante crear estrategias que propicien un uso razonable del recurso y de esta manera se prevengan futuros problemas de escasez. Este es un hecho relevante hacia el futuro, si se tienen en cuenta los cambios alarmantes reportados en las fuentes de abastecimiento de agua en la región. Con el propósito de aportar una estrategia de ahorro en el consumo de agua, este artículo propone instalar, en edificaciones nuevas de tipo residencial pertenecientes a los estratos socioeconómicos 3 y 4, un sistema para el aprovechamiento y la reutilización de las aguas grises, en función de asegurar un abastecimiento confiable en calidad fisicoquímica y biológica para los usuarios, así como una inversión en infraestructura de fácil operación y con viabilidad económica. Con esta estrategia se busca que el precio del metro cúbico de agua gris sea inferior respecto a la tarifa convencional de acueducto y paralelamente se logre reducir mensualmente la demanda de agua potable por usuario.

Palabras clave: reúso del agua gris, aprovechamiento del agua gris, reducción en tarifas de acueducto y alcantarillado

¹ Ingeniera ambiental y sanitaria por la Universidad de La Salle, Bogotá, Colombia. Estudiante de Ingeniería Civil en la Universidad de La Salle, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: dparra46@unisalle.edu.co

² Magister en Ingeniería Hidráulica por la Universidad de Cantabria, Cantabria, España. Ingeniero civil por la Universidad La Gran Colombia, Bogotá, Colombia. Profesor de cátedra del programa de Ingeniería Civil de la Universidad de La Salle, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: lcarrillo@unisalle.edu.co

³ Magister en Ingeniería Civil por la Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. Magister en Ingeniería Industrial por la Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. Ingeniero civil por la Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta, Colombia. Profesor del programa de Ingeniería Civil de la Universidad de La Salle, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: evelandiad@unisalle.edu.co

FECHA DE RECEPCIÓN: 2 DE MARZO DEL 2014 • FECHA DE APROBACIÓN: 6 DE NOVIEMBRE DEL 2014

Cómo citar este artículo: Parra Astudillo, D. L., Carrillo Puerto, L. J. y Velandia Durán, E. A. (2015). Estudio de alternativas para el aprovechamiento y reúso del agua doméstica. *Épsilon*, 24, 123-142.

Study of Alternatives for the Use and Reuse of Domestic Water

ABSTRACT

Although citizens are guaranteed water supply in Bogota, it is important to develop strategies to encourage a reasonable use of the resource and thus prevent future shortage problems. This is a significant event for the future, if the alarming changes reported in the sources of water in the region are taken into consideration. Seeking to provide a savings strategy in water consumption, this paper proposes to install, in new residential buildings belonging to socioeconomic strata 3 and 4, a system for the use and reuse of greywater, in terms of ensuring a reliable supply in physicochemical and biological quality for users, as well as an investment in infrastructure for easy operation and economic viability. The purpose with this strategy is to obtain a lower price per cubic meter of greywater compared to the conventional aqueduct rates and, at the same time, reduce the monthly demand for drinking water per user.

Keywords: reusing greywater, using greywater, reduction in water and sewer rates.

Estudo de alternativas para o aproveitamento e reutilização da água doméstica

RESUMO

Embora os cidadãos já tenham garantido o fornecimento de água em Bogotá, é importante criar estratégias que propiciem um uso razoável do recurso e desta maneira se previnam futuros problemas de escassez. Este é um fato relevante para o futuro, se são consideradas as mudanças alarmantes reportadas nas fontes de abastecimento de água na região. Com o propósito de contribuir com uma estratégia de economia no consumo de água, este artigo propõe instalar, em edificações novas de tipo residencial pertencentes aos estratos socioeconômicos 3 e 4, um sistema para o aproveitamento e a reutilização das águas residuais, em função de garantir um abastecimento confiável em qualidade físico-química e biológica para os usuários, assim como um investimento em infraestrutura de fácil operação e com viabilidade econômica. Com esta estratégia se busca que o preço do metro cúbico de água residual seja inferior com relação à tarifa convencional de empresa de águas e que, paralelamente possa-se reduzir mensalmente a demanda de água potável por usuário.

Palavras chave: reutilização da água residual, aproveitamento da água residual, redução em tarifas de empresas de água e rede de esgotos.

Introducción

Los habitantes de Bogotá, acostumbrados a recibir diariamente agua potable en sus residencias, no perciben completamente los potenciales riesgos asociados a los índices de escasez que se presentan en las fuentes de abastecimiento, como tampoco las amenazas que a mediano plazo generará el uso irracional del agua. Además, no existe una política efectiva de fomento gubernamental al reúso de aguas en zonas residenciales ni planes para la modernización de redes internas en edificaciones. En consecuencia, la población bogotana no desarrolla técnicas de aprovechamiento alternativo que brinden la posibilidad de disminuir el consumo de agua potable ni las descargas de aguas residuales al sistema de alcantarillado.

En la ciudad son casi inexistentes las edificaciones que realicen reúso de las aguas grises. Estas se definen como todas aquellas aguas que proceden del uso del agua potable para higiene corporal, utensilios domésticos y aseo general (puntos sanitarios de ducha, lavamanos, lavaderos, lavadoras). Actualmente, el conocimiento sanitario permite realizar un tratamiento químico, físico y biológico a dichas aguas, convirtiéndolas en una opción de abastecimiento complementario sin efectos en la salud humana o el medioambiente (Garavito y Miranda, 1999).

Desde la propuesta de reúso de las aguas grises en edificaciones planteada en este documento se evidencia que, según cierta estratificación económica de la edificación y del tamaño de la población residente, la inversión y puesta en marcha del esquema planteado es una opción técnica y económicamente viable para los propietarios. Al reusar agua, las demandas en la edificación son menores, y por lo tanto, también la cantidad de agua residual descargada; en consecuencia, existe una reducción de los costos por facturación de servicios públicos.

El reúso de las aguas grises en edificaciones amplía la disponibilidad del recurso agua en un sistema de abastecimiento municipal, al atender una población con menor demanda de agua y, por ende, menor infraestructura. De igual manera, al reducirse la producción de aguas residuales, se genera un menor uso de la capacidad del sistema de alcantarillado sanitario y se disminuye el impacto ocasionado por las continuas descargas de agua residual a los cuerpos de agua, especialmente cuando los municipios no cuentan con plantas de tratamiento de aguas residuales.

Planteamiento

Definición del sector de estudio y población objetivo

Según la Empresa de Acueducto, Alcantarillado y Aseo de Bogotá (EAB), existen 1.769.951 usuarios registrados hasta el 2013. El 36,5% pertenece al estrato 3 y el 14,6% corresponde al estrato 4, estratos que se caracterizan por presentar semejanza en cuanto a consumo y costumbres de uso del servicio. Por la relevancia de estos estratos en Bogotá, las edificaciones estrato 3 y 4 fueron seleccionadas como referencia para el estudio.

Para que sea viable la reutilización de aguas grises, el sistema de reúso debe implementarse en edificaciones de propiedad horizontal en altura, construcciones comunes en los estratos referidos. De acuerdo con el sondeo realizado en diferentes conjuntos residenciales de Bogotá, es particular encontrar poblaciones de 400, 800 y 1000 habitantes.

Las alternativas de reutilización se desarrollaron para un conjunto residencial tipo en Bogotá, tanto por su diseño arquitectónico como por el tamaño de la población habitante: entre 12 y 16 torres, 9 y 16 pisos por torre, 4 apartamentos por piso. Cada apartamento cuenta con una cocina con lavadero, conexión para lavadora y dos baños con ducha. Además, el conjunto tipo posee los espacios comunes como parqueaderos, zonas verdes y un área entre de 28 y 40 m² destinada para la instalación y operación del sistema de reúso.

Medida y caracterización de aguas grises

Para establecer la caracterización fisicoquímica y biológica del agua gris, se llevó a cabo el correspondiente protocolo de recolección de 40 muestras compuestas de diferentes viviendas familiares, con volúmenes provenientes de la descarga del lavamanos, ducha, lavaplatos y lavadora. Posteriormente se generó una muestra integrada de cada 10 viviendas; a cada una de las muestras se les efectuaron los ensayos de laboratorio a cargo de Antek S.A.S, Analquim y la Universidad de La Salle. Obtenidas las concentraciones de cada parámetro por muestra, se seleccionó la concentración más cercana al valor promedio ponderado, valor determinado así para el cálculo del balance de cargas del tren de tratamiento de agua gris por emplear. En la tabla 1 se muestran los resultados de calidad de agua.

Tabla 1. Análisis fisicoquímico del agua gris

| PARÁMETRO | UNIDAD | MUES- TRA 1 | MUES- TRA 2 | MUES- TRA 3 | MUES- TRA 4 | VALOR PROME- DIO | VALOR SELECCIO- NADO |
|------------------------|---------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|------------------------|----------------------------|
| pH | Unidades | 6,47 | 5,98 | 7,59 | 6,99 | 6,8 | 6,99 |
| Turbiedad | NTU | 330 | | 99,28 | 150 | 193,1 | 150 |
| Alcalinidad total | mg/L CaCO_3 | 160 | 292 | 270 | 332 | 263,5 | 270 |
| Color | UPC | 28 | 47 | 23 | 9 | 26,8 | 28 |
| Fosfatos | mg/LP- PO_4^{3-} | 2,96 | 30,3 | 31 | 35 | 24,8 | 30,3 |
| Sólidos dDisueltos | mg/L | 382 | 1120 | 548 | 890 | 735 | 890 |
| Sólidos suspendidos | mg/L | 220 | | 400 | 398 | 339,3 | 398 |
| Sólidos totales | mg/L | 614 | | 850 | 1288 | 917,3 | 850 |
| DBO5 | mg/L O_2 | 510 | | | 936 | 723 | 936 |
| DQO | mg/L O_2 | 822 | | 259 | 1853 | 978 | 822 |
| Tensoactivos | mg/L LAS | 6,68 | 17,3 | 5 | 34,6 | 15,9 | 17,3 |
| Grasas y aceites | mg/L | 190 | | 800 | 150 | 380 | 190 |

Fuente: Laboratorios Antek S.A.S, Analquim y Universidad de La Salle (s. f.).

Las mayores concentraciones están enmarcadas en los sólidos suspendidos, disueltos y totales, tensoactivos, grasas y aceites. Estos dos últimos, derivados de las actividades que implican el uso de detergentes. Como es lógico, se encontraron valores apreciables de DBO y DQO, con una estrecha relación en los contenidos de materia orgánica proveniente de jabones y residuos de alimentos. El aporte en concentración de los parámetros de agua gris es apreciablemente menor al relacionado en la carga contaminante de las aguas residuales, lo cual se constituye en una ventaja para calcular el balance de cargas, ya que desde esta condición se proponen unidades de tratamiento que se ajustan a un grado de complejidad menor para su construcción y operación, pero que igualmente son de alta eficiencia en su porcentaje de remoción.

Para identificar el volumen de agua diaria por familia, se efectuó como ejercicio práctico el muestreo de las costumbres de uso del recurso en un día cotidiano de dos familias con inco integrantes, tanto para el estrato 3 como 4. Se monitorearon durante 12 horas el volumen aproximado de agua y el tiempo utilizado por cada aparato hidrosanitario (figura 1).



Figura 1. Monitoreo de actividades domésticas

Fuente: autores.

Obtenido un valor promedio de los resultados obtenidos por familia (tabla 2), se identificaron los volúmenes de consumo y descarga de agua, de manera tal que se pudiera establecer la cantidad de agua gris con la cual puede contar cada aparato, así como la demanda requerida para la reutilización en algunos de ellos (tabla 3).

Tabla 2. Volumen de consumo y descarga convencional

| APARATO SANITARIO | CONSUMO (LITROS POR FAMILIA) | DESCARGA (LITROS POR FAMILIA) |
|----------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| Lavadero | 34 | 34 |
| Lavadora | 302 | 302 |
| Lavaplatos | 83 | 64 |
| Lavamanos | 30 | 30 |
| Ducha | 85 | 85 |
| Inodoro | 100 | 100 |
| Oficios varios | 13 | 9 |
| Total de litros familia/día | 647 | 624 |
| Total m ³ familia/mes | 19 | 19 |
| Total litros habitante/día | 129 | 125 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Volumen de consumo y descarga de agua gris en sistema hidrosanitario

| | VOLUMEN DE DESCARGA POR REUTILIZAR | VOLUMEN DE CONSUMO | VOLUMEN DE REBOSE A ALCANTARILLADO |
|----------------------------------|---------------------------------------|-----------------------|---------------------------------------|
| Total litro familia/día | 515 | 449 | 66 |
| Total m ³ familia/mes | 15 | 13 | 2 |
| Total litros habitante/día | 103 | 90 | 13 |

Fuente: elaboración propia.

Los resultados indican que por persona diariamente se obtiene un volumen adicional de agua gris de 13 litros al requerido para efectuar la reutilización en los correspondientes aparatos sanitarios, es decir, que se cumple con el volumen para suplir las necesidades básicas de reúso de 90 litros habitante/día. Asimismo, se logra disminuir en un porcentaje mensual el volumen convencional de suministro de servicio de agua potable en un 30% y el de alcantarillado en un 28%, una vez implementado el sistema de reutilización propuesto (figura 2).

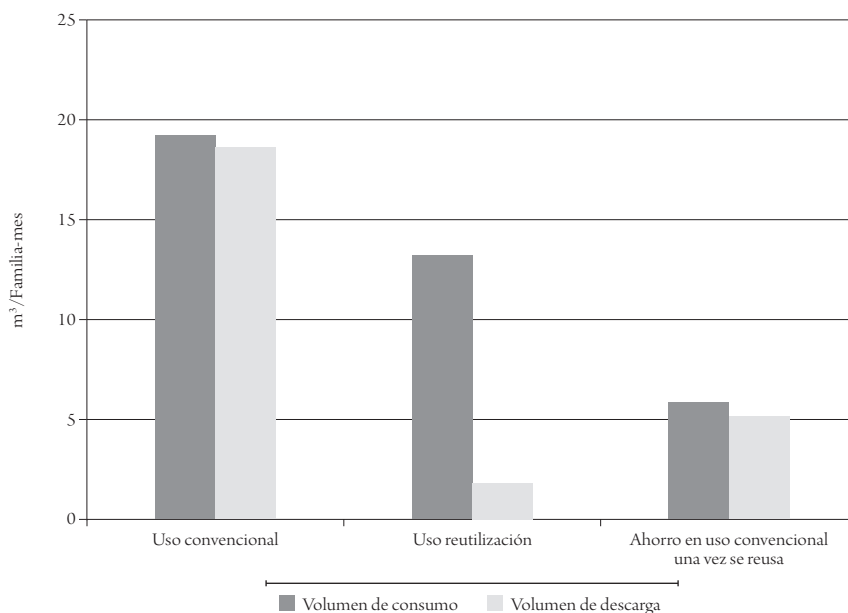


Figura 2. Comparativo de volúmenes de consumo y descarga

Fuente: elaboración propia.

Red hidrosanitaria y complementaria

Para el aprovechamiento del agua gris se contempló separar la red hidrosanitaria, una red diseñada para conducir el efluente de aquellos aparatos donde se produce agua gris y entrega al tren de tratamiento, almacenamiento y posterior distribución a los puntos en los cuales se planea suministro. La segunda red recolecta y entrega al servicio de alcantarillado público.

El diseño hidrosanitario de agua gris no contempla cálculos o procedimientos diferentes a los normalmente establecidos hidráulicamente. A partir de esta con-

sideración, se planteó el método de *Hunter modificado*. Para el caso de la red de abastecimiento del agua gris, se efectuó el cálculo de presiones, tanto la presión mínima absoluta (P_o) suficiente para vencer todas las resistencias en el circuito o ruta crítica hasta el aparato más desfavorable como la presión máxima (P_f). Con base en las presiones calculadas y los requerimientos de altura dinámica total y potencia de diseño, se propone distribuir el efluente de agua gris tratada a partir de dos tipos de sistemas: *tanque hidroneumático* o *bombeo* hacia el tanque de distribución ubicado en la cubierta de cada edificación.

El diseño hidrosanitario para cada uno de los rangos de población en estudio no solo contempló la red de aguas grises, la convencional de agua potable y residual, la del sistema de tratamiento, sino además el diseño de tres elementos para el rendimiento y funcionamiento hidráulico esperado: a) tanque de almacenamiento, b) sistema de *by-pass* que actúa como una línea de respaldo para permitir que la operación continúe mientras se realizan labores de mantenimiento o de reparación en un momento determinado y c) la red que permite descargar al alcantarillado sanitario el volumen de exceso de agua gris (figura 3).

Tratamiento de aguas grises domésticas

A partir de las características fisicoquímicas y biológicas del agua gris y el grado de depuración requerido, se definen dos opciones de tratamiento que garantizan la calidad óptima para abastecer los aparatos sanitarios mencionados y cuya operación no exigen técnicas complejas, como se muestra en la tabla 4.

Tabla 4. Opciones de tren de tratamiento

| | TRATAMIENTO PRELIMINAR | TRATAMIENTO SECUNDARIO | TRATAMIENTO TERCIARIO |
|----------|---------------------------|--|--------------------------|
| Opción 1 | Trampa de Grasas | Humedal subsuperficial de flujo horizontal | Desinfección |
| Opción 2 | Trampa de Grasas | Filtro de medio dual | Desinfección |

Fuente: elaboración propia.

Las opciones de tratamiento (figuras 4 y 5) comprenden inicialmente una unidad de trampa de grasas que permite la separación de sólidos por diferencia de densidades. De ello se obtiene como resultado que las grasas sean retenidas en la

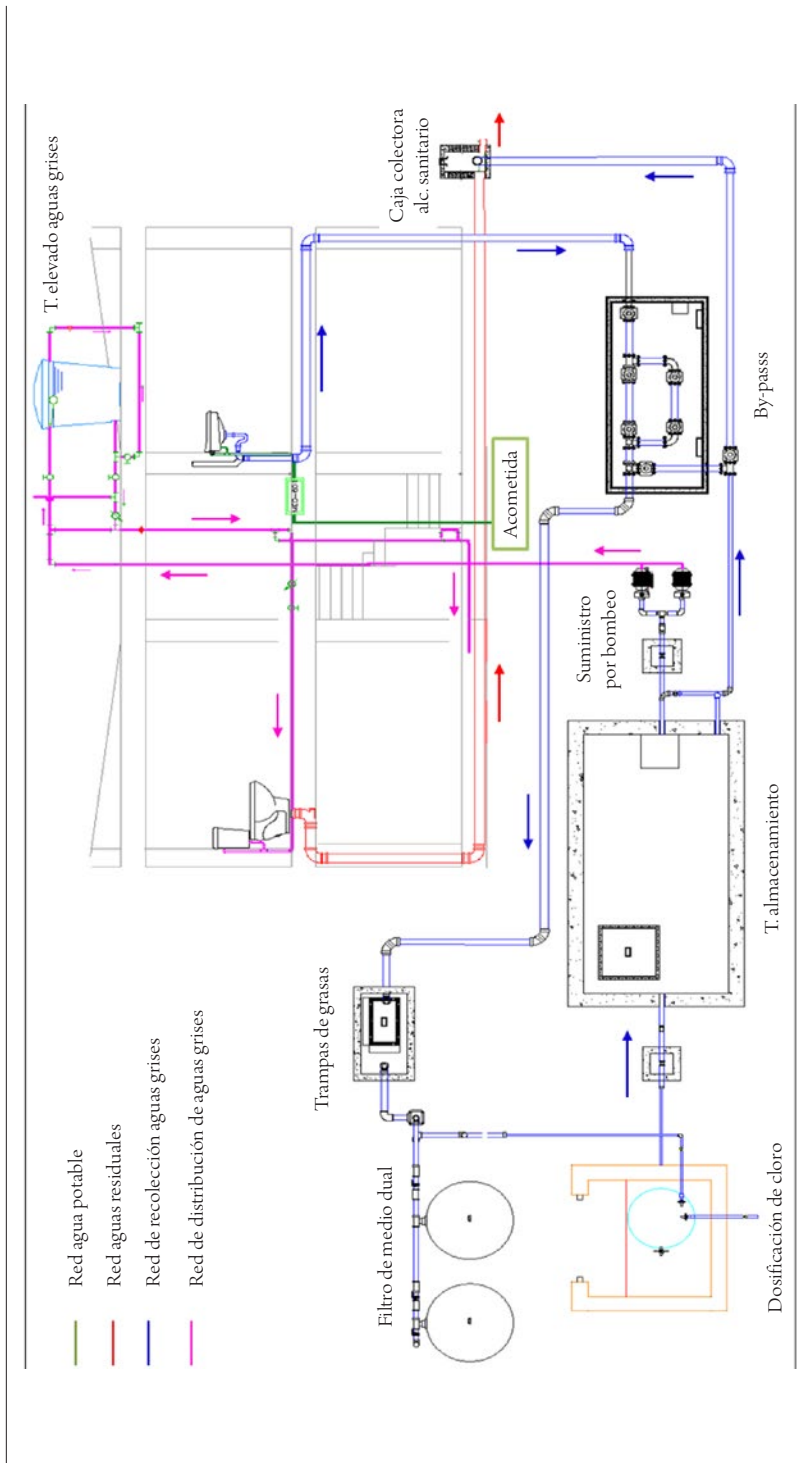


Figura 3. Diseño hidrosanitario

Fuente: elaboración propia.

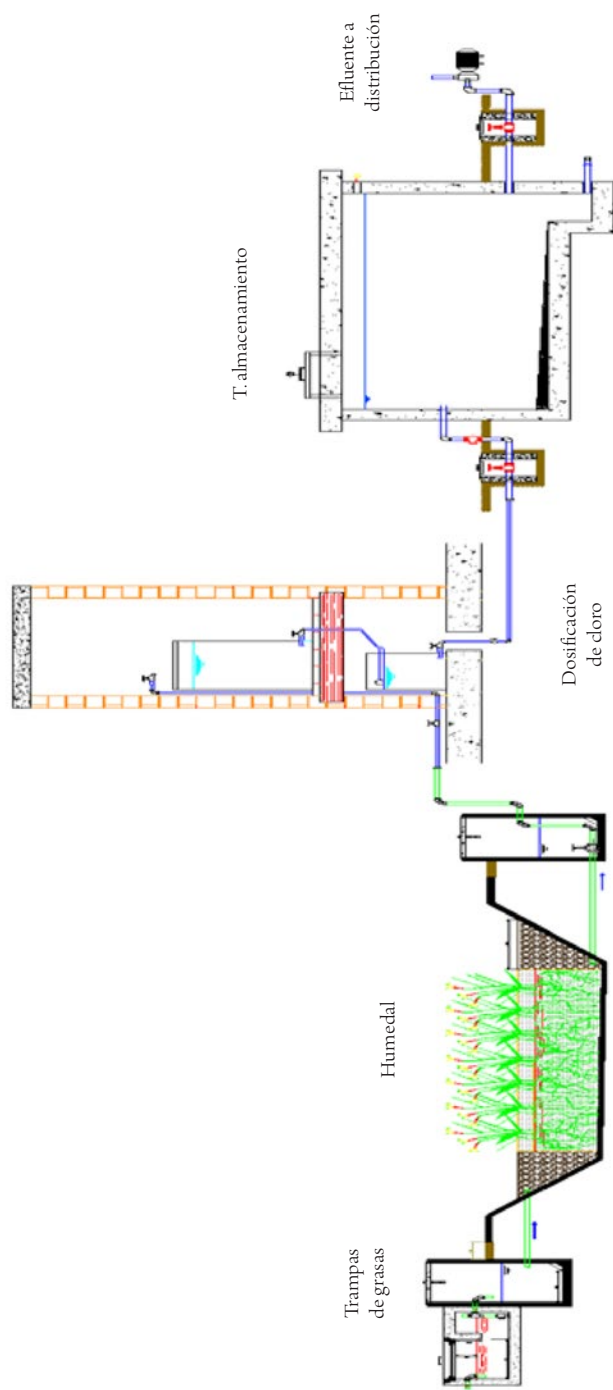


Figura 4. Opción 1 de tratamiento

Fuente: elaboración propia.

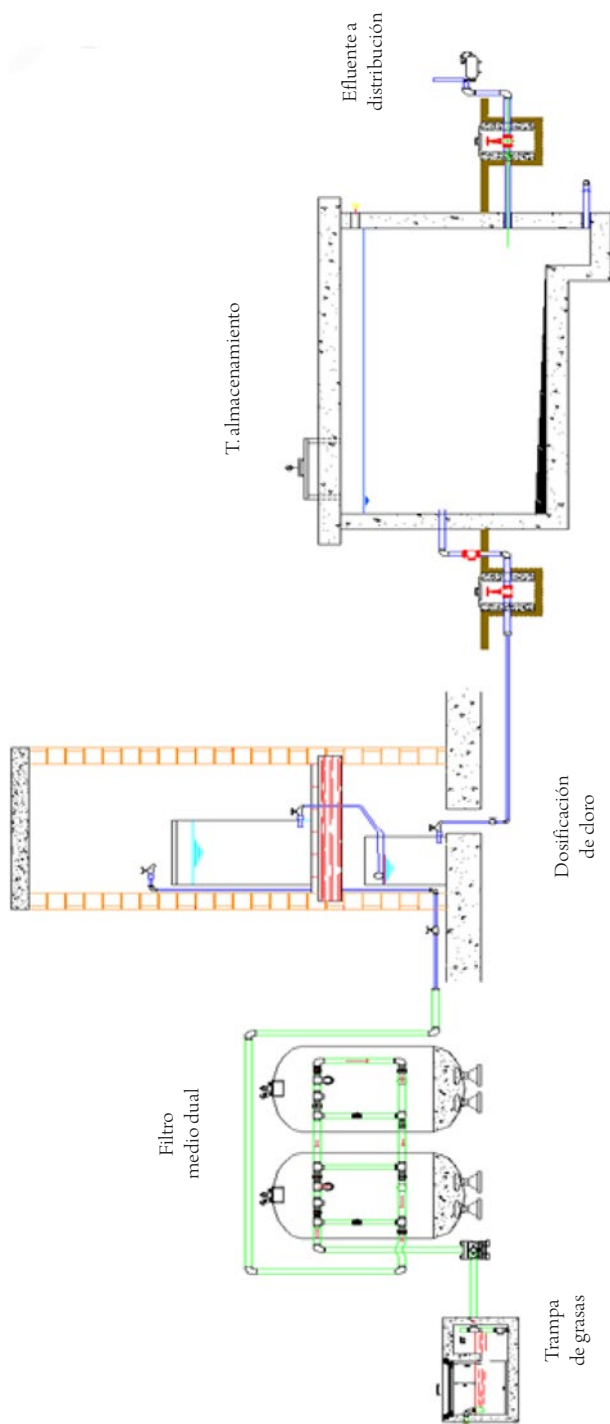


Figura 5. Opción 2 de tratamiento

Fuente: elaboración propia.

superficie libre mientras que el efluente clarificado es descargado a la unidad de tratamiento secundario. La primera opción es un humedal subsuperficial de flujo horizontal que permite la remoción de contaminantes en tiempos de retención cortos y mantiene una buena respuesta a las variaciones de caudal y carga.

En la segunda opción, el tratamiento secundario se plantea con filtro de medio dual. La eliminación de partículas suspendidas y materia orgánica se efectúa cuando el agua pasa por los intersticios de las capas filtrantes. Se garantiza la ausencia de agentes patógenos en el agua gris, una vez en el tanque de almacenamiento el agua entra en contacto con productos químicos oxidantes; por ello, este mecanismo es comúnmente utilizado para estos casos. La solución de hipoclorito de sodio tuvo una concentración calculada para los sistemas de 2 mg/L.

Cabe aclarar que para el dimensionamiento de las unidades del tratamiento por utilizar en cada población se establecieron como parámetros de diseño el tiempo de retención, la carga hidráulica, la velocidad de flujo y caudal. Este último se calculó con base en la dotación de agua gris de 90 litros habitante/día, entre otros datos característicos de cada unidad.

En el mercado colombiano también existen algunos posibles esquemas de depuración prefabricados, que pueden ser viables para obtener un efluente de agua gris óptimo. Desde esta consideración fue contemplada una alternativa en el análisis de opciones de tratamiento. Como se presenta en la figura 5, el sistema contempla unidades de clarifloculación que permiten la desestabilización y aglomeración de partículas coloidales para su posterior remoción en los filtros de arena y carbón, proceso que finaliza con la desinfección en la cámara de contacto de cloro (figura 6).

Las limitaciones en disponibilidad del recurso agua y los altos costos asociados a las tarifas de prestación del servicio han promovido la implementación de sistemas de reúso de agua gris en otros países. En California, a partir de 1970 se dio inicio a la utilización de esquemas sencillos de reúso que consistían en una manguera conectada entre la ducha y la llave del jardín. Dada la rápida adopción de estas actividades, se establecieron directrices para el reúso en el Código de Plomería de California, avance que representó la implementación de modelos automatizados y autolimpiantes para el uso de agua gris en riego (Martínez, 2010).

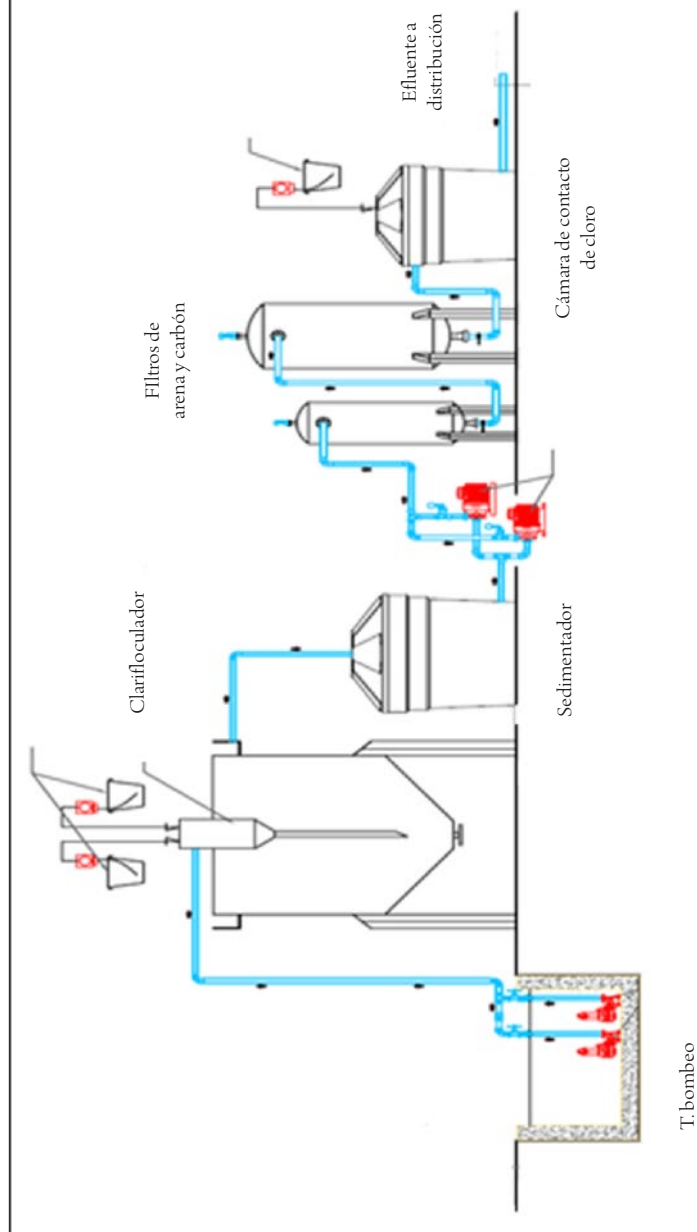


Figura 6. Esquema de alternativa de aprovechamiento comercial

Fuente: Baying SAS (s.f.).

En Montreal, Canadá, se han utilizado sistemas de reúso de agua gris para la descarga de los inodoros y para que los huertos produzcan diariamente verduras para la comida de las familias. Se producen así suficientes tomates, pimientos y albahaca para su enlatado como reservas de invierno. El agua recolectada pasa a través de un proceso simplificado de tratamiento antes de ser almacenada en un tanque subterráneo. Para simplificar el tratamiento y prevenir daños a las plantas, solo se utilizan jabones no tóxicos y biodegradables. El sistema es construido en materiales reciclados, los requerimientos energéticos son razonables, puesto que el proceso de tratamiento es alimentado por gravedad y solo se necesita de una pequeña cantidad de electricidad para bombear el agua hasta los pisos más altos de la vivienda (Finley, 2008).

En el sector comercio, empresas españolas como GreyWaterNet han desarrollado un sistema de tratamiento de aguas grises prefabricado de tipo compacto, cuyo diseño de control inteligente adapta los procesos de tratamiento al caudal de agua existente y con lo cual se optimizan los consumos de energía. Adicionalmente, cuenta con dos sistemas simultáneos de desinfección; los rayos ultra violeta y la cloración. Otras opciones presentadas en el mercado extranjero se centran en la combinación del proceso biológico aeróbico con la filtración física y desinfección, lo que es considerado como una solución más económica y factible para el reciclaje de aguas grises. En este último caso, los reactores biológico de membrana (MBR) constiuyen una solución muy atractiva en edificios residenciales urbanos (Li *et al.*, 2009).

También se demuestra la aplicación y utilidad de diseños simples de reúso de aguas grises, como es el caso de viviendas unifamiliares en Guatemala. Este tipo de esquemas tan solo consisten en un tratamiento con una unidad de trampa de grasas, para posteriormente suministrar el efluente en inodoros (Kestler, 2004).

Alternativas de aprovechamiento y reúso de agua gris

Establecidos las diferentes opciones de sistemas de tratamiento como de distribución del diseño hidrosanitario, se evaluaron económicamente las alternativas planteadas de diseño tipo de reutilización y aprovechamiento de agua gris en las edificaciones (tabla 5).

Tabla 5. Alternativas de aprovechamiento y reúso

| ALTER-NATIVA | TRATAMIENTO PRIMARIO | TRATAMIENTO SECUNDARIO | TRATAMIENTO TERCIARIO | DISTRIBUCIÓN |
|--------------|--------------------------|---------------------------|-----------------------|---------------------------|
| 1 | Trampa de grasas | Filtro de medio dual | Desinfección | Tanque hidroneumático |
| 2 | Trampa de grasas | Humeda subsuperficial | Desinfección | Tanque hidroneumático |
| 3 | Trampa de grasas | Filtro de medio dual | Desinfección | Bombeo con tanque elevado |
| 4 | Trampa de grasas | Humedal subsuperficial | Desinfección | Bombeo con tanque elevado |
| 5 | Coagulación, floculación | Sedimentación, filtración | Desinfección | Tanque hidroneumático |
| 6 | Coagulación, floculación | Sedimentación, filtración | Desinfección | Bombeo con tanque elevado |

Fuente: elaboración propia.

Costos de alternativas de aprovechamiento

Los costos de las alternativas de reúso (tabla 6) comprenden el valor del sistema de tratamiento y se complementan con las cantidades de obra y análisis de precios unitarios (APU). Estos costos tienen en cuenta la construcción e instalación del diseño de red hidrosanitaria convencional, la red hidrosanitaria de aguas grises y el tanque de almacenamiento, según el diseño de edificación tipo para cada rango de población en estudio. En la tabla 6 se indica también el respectivo valor de administración, imprevistos y utilidades (AIU).

Tabla 6. Costos de la implementación de los sistemas propuestos

| ALTERNATIVA DE TRATAMIENTO | 400 HABITANTES (COP) | 800 HABITANTES (COP) | 1000 HABITANTES (COP) |
|----------------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|
| 1 | 353.858.813 | 676.666.201 | 786.539.672 |
| 2 | 353.809.341 | 678.622.331 | 788.261.366 |
| 3 | 357.233.332 | 682.963.250 | 793.731.193 |
| 4 | 357.183.860 | 684.919.380 | 795.757.002 |
| 5 | 386.714.979 | 697.092.514 | 830.800.111 |
| 6 | 390.089.498 | 703.389.562 | 837.991.632 |

Fuente: elaboración propia.

Costos de operación y mantenimiento

Los gastos asociados al funcionamiento y mantenimiento del sistema de agua gris están constituidos por los costos de energía para el suministro en los aparatos sanitarios, así como la dosificación de 2 kg/mes de hipoclorito de sodio, los insumos requeridos y el costo de un operario capacitado en las actividades periódicas de revisión y limpieza de las unidades de tratamiento y almacenamiento. Además, se consideran los costos en mantenimiento de equipos hidráulicos, eventuales reparaciones o problemas técnicos operativos a cargo de empresas calificadas que brinden el servicio y los costos de los ensayos trimestrales de calidad de agua. De acuerdo con lo mencionado, se estiman costos anuales equivalentes a un 2,5 % de la inversión inicial.

Análisis de viabilidad de las alternativas

Para conocer la rentabilidad y factibilidad de inversión de cada una de las propuestas de alternativas de aprovechamiento que pueden implementarse en los prototipos de conjunto residencial, se realizó el respectivo análisis económico anual, a partir de la estimación del flujo de caja y de múltiples indicadores, como valor presente neto (VPN), tasa interna de retorno (TIR), relación beneficio costo (B/C), y además se identificó el periodo de recuperación de la inversión (*payback*).

El flujo de caja evaluado a valor futuro durante 25 años de vida útil del proyecto tomó como referencia los egresos definidos en la inversión inicial de construcción, los gastos de operación y mantenimiento anual y los ahorros obtenidos una vez en la factura se reduzca el costo del consumo de acueducto y alcantarillado. A partir del flujo de caja se establecen los VPN para cada alternativa (tabla 7).

Tabla 7. VPN por población de estudio

| ALTER- NATIVA | 400 HABITANTES | | 800 HABITANTES | | 1000 HABITANTES | |
|------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | ESTRATO 3 (COP) | ESTRATO 4 (COP) | ESTRATO 3 (COP) | ESTRATO 4 (COP) | ESTRATO 3 (COP) | ESTRATO 4 (COP) |
| 1 | 40.616.770 | 206.271.500 | 195.381.568 | 526.691.028 | 324.294.191 | 738.431.016 |
| 2 | 45.277.645 | 206.320.972 | 202.648.245 | 524.734.898 | 322.572.496 | 736.709.321 |
| 3 | 37.242.251 | 202.896.981 | 189.084.519 | 520.393.979 | 317.102.670 | 731.239.494 |

| ALTER- NATIVA | 400 HABITANTES | | 800 HABITANTES | | 1000 HABITANTES | |
|------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | ESTRATO 3 (COP) | ESTRATO 4 (COP) | ESTRATO 3 (COP) | ESTRATO 4 (COP) | ESTRATO 3 (COP) | ESTRATO 4 (COP) |
| 4 | 41.903.126 | 202.946.453 | 196.351.196 | 518.437.849 | 315.076.861 | 729.213.686 |
| 5 | 7.760.603 | 173.415.333 | 174.955.255 | 506.264.715 | 280.033.752 | 694.170.577 |
| 6 | 4.386.084 | 170.040.814 | 168.658.207 | 499.967.667 | 272.842.230 | 686.979.055 |

Fuente: elaboración propia.

En la tabla 8 se muestran las alternativas de aprovechamiento y reúso de agua gris de mayor utilidad y rentabilidad económica para cada una de las condiciones, conforme los resultados de los indicadores financieros.

Tabla 8. Alternativas para implementar en cada población según estrato socioeconómico

| INDICADOR | POBLACIÓN DE ESTRATO 3 (HABITANTES) | | | POBLACIÓN DE ESTRATO 4 (HABITANTES) | | |
|------------------------------|--|-------------|-------------|--|-------------|-------------|
| | 400 | 800 | 1000 | 400 | 800 | 1000 |
| Alternativa seleccionada | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 |
| Costo de imple- mentación | 353.809.341 | 678.622.331 | 786.539.672 | 353.809.341 | 676.666.201 | 786.539.672 |
| VPN (\$) | 45.277.645 | 202.648.245 | 324.294.191 | 206.320.972 | 526.691.028 | 738.431.016 |
| TIR (%) | 14 | 16 | 18 | 21 | 24 | 26 |
| B/C | 2,6 | 5,2 | 6,44 | 3,47 | 6,94 | 8,68 |
| Payback (años) | 7 | 6 | 5 | 5 | 4 | 4 |

Fuente: elaboración propia.

El análisis económico de las alternativas evidencia la viabilidad de implementación y la confiabilidad con la cual puede contar el usuario para realizar su inversión. Se consideran indicadores VPN y B/ C son mayores a 1, la TIR es obtenida presenta porcentajes positivos de rendimientos futuros esperados. Adicionalmente, el *payback* es realmente corto comparado con los ahorros estimados durante la vida útil del proyecto. Es posible diferenciar también que es en el estrato 4 donde se aprecia la mayor rentabilidad y el menor *payback* frente al estrato 3.

Una vez implementado el sistema de reúso de agua gris, se estima disminuir el volumen convencional de consumo de agua potable en un 30% y de alcantarillado

en un 28%. Esto significa para cada usuario según sea el estrato socioeconómico un ahorro mensual en el pago de su factura que oscila entre de \$72.000 y \$97.000 (tabla 9). La inversión inicial, la operación y el mantenimiento de la alternativa de reúso de agua gris le cuesta al usuario durante el *payback* un monto mensual entre \$66.000 y \$95.000. Posterior a este periodo disminuye significativamente entre \$5900 y \$14.900 (tabla 9). Este gasto se compensa con el ahorro adquirido mensualmente en el pago de la factura.

Tabla 9. Ahorro económico y gasto asociado a reúso de agua gris

| POBLACIÓN (HABITANTE) | AHORRO EN FACTURA DE LA EAB \$/ USUARIO-MES | GASTOS REÚSO AGUA GRIS \$/USUARIO-MES DURANTE EL PAYBACK | GASTOS REÚSO AGUA GRIS \$/USUARIO-MES POSTERIOR AL PAYBACK |
|--------------------------|---|--|--|
| Estrato 3 | | | |
| 400 | 72.906 | 67.609 | 14.959 |
| 800 | 72.906 | 66.387 | 7479 |
| 1000 | 72.209 | 71.528 | 5983 |
| Estrato 4 | | | |
| 400 | 97.256 | 88.669 | 14.959 |
| 800 | 97.256 | 95.587 | 7479 |
| 1000 | 97.256 | 87.914 | 5983 |

Fuente: elaboración propia.

A partir del desarrollo de la matriz de costos mensual que relaciona los gastos de operación y mantenimiento, se determina el costo del metro cúbico de agua gris, para ser comparado con el precio del metro cúbico de acueducto y alcantarillado que factura la EAAB. Sin embargo, para demostrar esta diferencia es necesario considerar que en la factura se subsidia un 15% del consumo para el estrato 3, mientras que el estrato 4 muestra un precio sin subsidios.

Según la reglamentación colombiana, el subsidio consiste básicamente en un descuento en las tarifas, de manera que el usuario paga menos de lo que cuesta realmente el servicio. Los estratos 1, 2 y 3 son los directamente beneficiados del financiamiento proveniente de los usuarios de estratos 5 y 6, quienes poseen mayores recursos económicos. El estrato 4 paga exactamente el valor que la empresa define como costo de prestación del servicio.

Tabla 10. Costo por metros cúbicos de agua gris

| ESTRATO | AGUA POTABLE ALCANTARILLADO | | AGUA GRIS | | |
|---------|--------------------------------|-------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|
| | EAB (\$/M³) | EAB (\$/M³) | 400 HABITANTES (\$/M³) | 800 HABITANTES (\$/M³) | 1000 HABITANTES (\$/M³) |
| 3 | 2.134 | 1.307 | 997 | 498 | 398 |
| 4 | 2.511 | 1.538 | | | |

Fuente: elaboración propia.

En la tabla 10 se observa que el valor del metro cúbico de agua gris frente al costo del metro cúbico e agua potable es menor en un 16% como en alcantarillado del 25%. Es evidentemente más económico para el usuario reutilizar el agua gris en actividades del hogar que pueden efectuarse sin requerir al suministro de agua potable.

Conclusiones

Los resultados del balance de agua gris indican que la oferta del agua por recircular supera el consumo demandado por las actividades de reutilización. Como resultado, se asegura que no se presentarán limitaciones para el abastecimiento continuo.

Entre más alto sea el estrato socioeconómico, mayores serán los ahorros mensuales en el pago del consumo facturado de acueducto y alcantarillado. De esta manera, proyectar la implementación de un sistema de aprovechamiento y reúso de agua gris en estratos 5 y 6 beneficiarán al usuario en un ahorro monetario superior al estimado para el estrato 4. Una vez implementadas las alternativas de reúso de agua gris, la demanda de agua potable y alcantarillado por usuario se reduce mensualmente, lo cual, además de beneficiarlo económicamente, garantiza que la EAAB optimice la oferta de sus servicios.

En términos comparativos, las propuestas de alternativa de reúso de agua gris más competitivas, y que pueden ofrecer mayor interés en el mercado, sin desconocer la viabilidad económica de las demás, es la recomendada para el estrato 4, en edificaciones con un tamaño de población de 800 y 1000 habitantes. Independientemente del monto presupuestado para la inversión inicial, esta es recuperada en un periodo mínimo de cuatro años y representan una rentabilidad superior al 24% durante la vida útil del proyecto.

Las alternativas planteadas se evaluaron en el contexto de de Bogotá como caso de ejemplo, sin descartar la factibilidad de incorporar estos esquemas de reutilización en otras ciudades del país, pues los diseños hidrosanitarios y de tratamiento pueden ajustarse fácilmente a las condiciones de cualquier proyecto nuevo de propiedad horizontal.

Referencias

- Baying S.A.S. (s. f.). *Propuesta y oferta comercial para el diseño de un sistema de tratamiento de reutilización de aguas grises*. Bogotá. Recuperado de www.bayingsas.com
- Empresa de Acueducto, Alcantarillado y Aseo de Bogotá (EAAB) (2011). Estructura tarifaria aplicable a los usuarios de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá. Resolución 1049 de 2011. Recuperado de http://www.acueducto.com.co/wpsv61/wps/html/resources/tarifas/Res1049_2011_TarBog.pdf
- Empresa de Acueducto, Alcantarillado y Aseo de Bogotá (EAB) (2014). Información para el control social 2013. Recuperado de http://www.acueducto.com.co/wpsv61/wps/html/resources/empresa/2013_CONTROL_SOCIAL_EABconAseo.pdf
- Finley, S. (2008). Reciclaje de aguas grises para la producción de alimentos en Montreal, Canadá. *Agricultura Urbana*, 20(1), 37.
- Garavito, S. P. y Miranda, L. E. (1999). *El reúso del agua en Colombia como alternativa para el control de la contaminación hídrica* (tesis de pregrado). Bogotá: Universidad De La Salle.
- Greywater.net (s. f.). El tratamiento de aguas grises. Recuperado de <http://www.greywater.net.com/tratamiento-aguas-grises.html>
- Kestler, P.J. (2004). *Uso, reúso y reciclaje del agua residual en una vivienda* (tesis de pregrado). Guatemala: Universidad Rafael Landívar.
- Li, F., Wichmann, K. y Otterpohl, R. (2009). Review of the technological approaches for grey water treatment and reuses. *Science of the Total Environment*, 407(11), 3439-3449.
- Martinez, C.J. (s. f.). Gray water reuse in Florida. Universidad de Florida. Recuperado de <http://edis.ifas.ufl.edu/pdffiles/AE/AE45300.pdf>

Sistema de información para administración de inventarios basado en técnicas de minería de datos

DIANA LANCHEROS-CUESTA¹

ANDRÉS DAVID MOJICA OSPINA²

DANIEL ALBERTO BARBOSA VARGAS³

RESUMEN

Actualmente existen diferentes sistemas de información que, a partir de grandes grupos de datos, pueden predecir comportamientos y permiten la toma de decisiones en las empresas; sin embargo, son herramientas que resultan difíciles de adquirir por su complejidad y gran robustez, debido a los costos elevados o a las restricciones legales. En las organizaciones, la administración de la información se convierte en una actividad prioritaria, por cuanto una buena gestión en la manipulación de los datos mejora los procesos. En línea con lo anterior, este artículo muestra el desarrollo de un *software* basado en técnicas de minería de datos (*datamining*) que permite la recopilación y el almacenamiento de información, con el fin de analizar patrones ocultos de comportamiento en el departamento de inventarios de una empresa.

Palabras clave: minería de datos, lógica difusa, inventario, sistema de información.

¹ Doctora en Ingeniería por la Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia. Magíster en Tecnologías de la Información por la Universidad Pedagógica Nacional, Bogotá, Colombia. Ingeniera de Diseño y Automatización Electrónica por la Universidad de La Salle, Bogotá, Colombia. Actualmente se desempeña como docentes en el programa de Ingeniería en Automatización de la Universidad de La Salle, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: dilancheros@unisalle.edu.co

² Ingeniero en Automatización por la Universidad de La Salle, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: andavidosp@gmail.com

³ Ingeniero en Automatización por la Universidad de La Salle, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: dabarva@hotmail.com

FECHA DE RECEPCIÓN: 6 DE ABRIL DEL 2014 • FECHA DE ACEPTACIÓN: 5 DE OCTUBRE DEL 2014

Cómo citar este artículo: Lancheros-Cuesta, D., Mojica Ospina, A. D. y Barbosa Vargas, D. A. (2015). Sistema de información para administración de inventarios basado en técnicas de minería de datos. *Épsilon*, 24, 143-173.

Information System for Inventory Management Based on Data Mining Techniques

ABSTRACT

There are currently different information systems that can predict behavior from large sets of data and which allow decision-making in companies; however, these tools are difficult to acquire due to their complexity and robustness, as well as high costs or legal restrictions. Information management in companies becomes a priority activity, because good management in data handling improves processes. Accordingly, this paper shows the development of a software based on data mining techniques, thus enabling the collection and storage of information in order to analyze hidden behavior patterns in a company's inventory department.

Keywords: data mining, fuzzy logic, inventory, information system.

Sistema de informação para administração de inventários baseado em técnicas de mineração de dados

RESUMO

Atualmente existem diferentes sistemas de informação que, a partir de grandes grupos de dados, podem prever comportamentos e permitem a tomada de decisões nas empresas; contudo, são ferramentas que resultam difíceis de adquirir por sua complexidade e grande robustez, devido aos custos elevados ou às restrições legais. Nas organizações, a administração da informação torna-se uma atividade prioritária, por isso, uma boa gestão na manipulação dos dados melhora os processos. Na mesma linha do anterior, este artigo mostra o desenvolvimento de um *software* baseado em técnicas de mineração de dados (*datamining*), que permite a recopilación e o armazenamento de informação, com a finalidade de analisar padrões ocultos de comportamento no departamento de inventários de uma empresa.

Palavras chave: mineração de dados, lógica difusa, inventário, sistema de informação.

Introducción

El desarrollo de un sistema de información eficiente que precise la extracción de datos de una empresa y que represente mayor economía hacia inversionistas constituye la pauta primordial para llevar a cabo la implementación de sistemas de información en la industria actual.

Actualmente, la necesidad de utilizar técnicas de minería de datos mediante un *software* determinado obliga a los ingenieros y desarrolladores a revalidar los conocimientos adquiridos y aplicados al diseño de sistemas de información. Por tanto, es necesario indicar los trabajos relacionados con este tipo de sistemas, como se reseña a continuación.

Moreno (2005) desarrolló un sistema de información modular para la compra, la venta y el inventario de una fábrica de calzado. En este trabajo se muestra la forma de implementar una terminal móvil para el control de inventarios, así como el diseño de las bases de datos, en conjunto con el sistema de información, para integrar, al final, todos los componentes del proyecto. Aquí se tienen en cuenta básicamente las necesidades transaccionales de un sistema de información.

Luna *et al.* (2009) implementaron un sistema de planificación de recursos empresariales (ERP) para optimizar sistemas de gerencia de restaurantes o bares protegidos por una llave electrónica. El desarrollo consistió en el reagrupamiento de todos los datos con el objetivo de mejorar la gestión de los datos. En primera instancia, los autores determinaron los requerimientos funcionales y los casos de uso del sistema. El trabajo evidencia la necesidad de establecer puntos de información de la base de datos, donde la información tenga nivel de seguridad gestionada por el administrador.

Por su parte, Bozo (2009) desarrolló un sistema de gestión de inventarios, ventas y facturación para una empresa automotriz, que incluía un sistema de seguridad de acceso a los datos tanto en el sistema operativo como en el programa. Esto permitió definir y asignar los diferentes accesos a los usuarios de acuerdo con su función.

Vallejos (2006) realizó un estudio con la definición, las ventajas y las desventajas de las principales técnicas de minería de datos. De igual forma, Tapia (2006) determinó una metodología para sectorizar pacientes que consumen medicamentos,

y para ello aplicó *datamart* y *datamining* en un hospital nacional. La tabla 1 muestra una descripción de otros trabajos relacionados con minería de datos, así como otras metodologías en diferentes campos de aplicación y el porcentaje de efectividad que tuvo la técnica de minería de datos aplicada.

Tabla 1. Síntesis de metodologías de trabajos de grado relacionados con minería de datos

| TÍTULO, AUTOR, AÑO | METODOLOGÍA | RESUMEN | EFFECTIVIDAD (%) |
|---|---------------------------------------|--|------------------|
| "Método general de extracción de información basado en el uso de lógica borrosa. Aplicación en portales web" (Roper, 2009) | Lógica fuzzy | En esta tesis se ha planteado un nuevo método de extracción de información basado en el uso de la lógica borrosa para un conjunto de conocimiento general. Este método se aplica, en particular, a portales web. | 90 |
| "Diseño e implementación de un sistema ERP para optimizar sistemas de gerencia de restaurantes o bares protegido por una llave electrónica" (Beltrán <i>et al.</i> , 2009). | Regresión lineal, árboles de decisión | En el sistema ERP se reagrupan todos los datos de la empresa. En el caso de la empresa seleccionada para el caso de estudio, este sistema hace que sean más dinámicas las funciones administrativas de la empresa. Con base en estas consideraciones, se establecieron los requerimientos funcionales y los casos de uso del sistema, para el manejo operativo de este cuando se elaboró la base de datos. Fue de vital importancia establecer puntos de información de la base de datos, donde esta tenga cierto nivel de seguridad por el administrador. | 90 |
| "Desarrollo metodológico y técnico de un pronóstico de ventas para un producto con patrones cíclicos" (Gracia, 2002) | Regresión lineal | En el documento se ha sugerido la posibilidad de utilizar modelos matemáticos edificados a través del comportamiento de las ventas. Estos son correlacionados con indicadores del comportamiento económico del país, y se edifica luego la ecuación de pronósticos con la ayuda de la herramienta estadística de análisis de regresión lineal. | 90 |
| "Diseño e implementación de un sistema de información modular para la compra, venta e inventario de una fábrica de calzado" (Moreno, 2005) | Modelos estadísticos | En el documento se muestra la forma de implementar al terminal móvil para el control de inventarios, así como el diseño de las bases de datos en conjunto con el sistema de información, para al final integrar todos los componentes del proyecto de forma adecuada. | 90 |

| TÍTULO, AUTOR, AÑO | METODOLOGÍA | RESUMEN | EFFECTIVIDAD (%) |
|--|---|--|---------------------|
| "Formulación de minería de datos para la Empresa Distribuidora de Productos Espinoza Aguilar S.A." (Alcántara, 2012) | Modelo predictivo | Con el apoyo de la metodología de la minería de datos, se buscan tendencias que dan una mejor rentabilidad para el negocio. Con ello se reducen los costos logísticos mediante el uso de la información que se tiene almacenada históricamente del propio entorno del negocio. | 80 |
| "Desarrollo de un <i>software</i> para el control de inventario de productos terminados para los departamentos de atención al cliente, la línea de producción 'sector beta', y despacho en una empresa alimentos" (García, 2009) | Árboles de decisión | Consiste en el desarrollo de un <i>software</i> para la automatización de las operaciones de realización, aprobación y despacho de las ordenes de carga, así como la creación y actualización del inventario en la empresa alimentos Súper S planta Barcelona C.A. Este <i>software</i> facilitará los procesos llevados a cabo los operadores de los diferentes departamentos involucrados. Este proyecto plantea optimizar y reducir los tiempos y los errores en las operaciones llevadas a cabo en los departamentos de Atención al Cliente, Cuentas por Cobrar, Despacho, Línea de Producción, Romana, para lo cual se tienen en consideración los adelantos tecnológicos en el área de <i>software</i> . | 70 |
| "Aplicación de minería de datos para la exploración y detección de patrones delictivos en Argentina" (Perversi, 2007) | Árboles de decisión; algoritmo <i>ID3 K-means; clustering</i> ; algoritmo de inducción C4.5 para identificar reglas de pertenencia a cada uno de los grupos | En este trabajo se ha demostrado no solo que es factible aplicar minería de datos a la información criminal en Argentina, sino que también evidencia su alto valor agregado para el análisis y la generación de nuevo conocimiento. | 65 (aún en estudio) |

Fuente: elaboración propia.

Como se observa en la anterior tabla, la efectividad varía según la metodología usada en cada una de las diferentes áreas. Por tal motivo, puede deducirse que la aplicación de la minería de datos en un ámbito de *software* para el apoyo en la toma de decisiones, con base en la programación lineal y la computación gráfica para la visualización de los datos, permite obtener resultados satisfactorios. A continuación se describe la metodología utilizada en el desarrollo del *software*.

Metodología

Para el desarrollo del *software* se llevaron a cabo las siguientes etapas: a) definición del problema, b) preparación los datos, c) exploración los datos, d) generación de modelos, e) exploración y validación de modelos, f) implementación y g) actualización del modelo final, como se muestra a continuación.

Definición del problema

Para el diseño y desarrollo del sistema se tuvo en cuenta la existencia de una serie de datos sobre las ventas en una empresa de servicios, los cuales están desorganizados. Adicionalmente, el sistema de información actual no permite que se modifiquen lo datos de los productos de forma rápida y sin tener conocimientos de programación, lo cual genera reportes erróneos de la empresa y no permite la toma de decisiones.

Preparación y exploración de los datos

Los datos proporcionados por la empresa están dispersos y almacenados en un mismo archivo y presentan una cantidad de variables irrelevantes para el proceso. También contienen incoherencias, como entradas que faltan o no separación visual de la información. La figura 1 muestra una fracción del archivo de información de ventas, donde se nota la dificultad para utilizar estos datos de forma tal que el sistema brinde análisis claros y concisos. Por tal razón, es necesario ordenar y preparar nuevamente.

Generación de los modelos

Para la generación del modelo computacional que soporta el sistema de información se implementaron técnicas de control de inventarios mediante la estadística y lógica *fuzzy*.

Modelo basado en la estadística y el control de inventarios

Con el objetivo de implementar un sistema que provea al usuario la capacidad de tomar decisiones con base en métodos de administración de inventarios, y que a la vez permita realizar funciones diferentes del sistema, es necesario remitirse a

| | | | | |
|--------------------------|-----------|-------|----------------------------------|--------|
| 0553 | 11-1-2013 | 4987 | SOKA MORA BOTELLA LITRO | |
| 0332 | 12-1-2013 | 4987 | SOKA MORA BOTELLA LITRO | |
| 0223 | 13-1-2013 | 4987 | SOKA MORA BOTELLA LITRO | |
| 0333 | 14-1-2013 | 4987 | SOKA MORA BOTELLA LITRO | |
| 0444 | 15-1-2013 | 4987 | SOKA MORA BOTELLA LITRO | |
| 0555 | 16-1-2013 | 4987 | SOKA MORA BOTELLA LITRO | |
| 0666 | 17-1-2013 | 4987 | SOKA MORA BOTELLA LITRO | |
| 0777 | 18-1-2013 | 4987 | SOKA MORA BOTELLA LITRO | |
| 0888 | 19-1-2013 | 4987 | SOKA MORA BOTELLA LITRO | |
| 0999 | 20-1-2013 | 4987 | SOKA MORA BOTELLA LITRO | |
| 1234 | 16-2-2013 | 1760 | NECTAR BABY MANZANA 124G | |
| 1234 | 16-2-2013 | 2400 | FRUTTO CLASICO PERA CAJA 200ML | |
| 0022 | 24-2-2013 | 1760 | NECTAR BABY MANZANA 124G | |
| 0022 | 24-2-2013 | 2351 | FRUTTO CLASICO PERA CAJA LITRO | |
| 0022 | 24-2-2013 | 2401 | FRUTTO CLASICO MANZANA CAJ 200ML | |
| 0015 | 24-2-2013 | 1760 | NECTAR BABY MANZANA 124G | |
| NECTAR BABY MANZANA 124G | 8 | 41275 | | 330200 |
| NECTAR BABY MANZANA 124G | 7 | 41276 | | 288932 |
| NECTAR BABY MANZANA 124G | 2 | 41277 | | 82554 |
| NECTAR BABY MANZANA 124G | 3 | 41278 | | 123834 |
| NECTAR BABY MANZANA 124G | 5 | 41279 | | 206395 |
| NECTAR BABY MANZANA 124G | 7 | 41280 | | 288960 |
| NECTAR BABY MANZANA 124G | 9 | 41281 | | 371529 |
| NECTAR BABY MANZANA 124G | 5 | 41282 | | 206410 |
| NECTAR BABY MANZANA 124G | 5 | 41283 | | 206415 |

Figura 1. Fracción de la base de datos parte de ventas

Fuente: base de datos de la empresa estudiada

las ecuaciones [1], [2] y [3], donde se abarca el desarrollo del punto de reorden, inventario de seguridad y cantidad económica de producto.

Cantidad económica de producto:

$$CEP = \sqrt{\frac{2DS}{H}} \quad [1]$$

Inventario de seguridad:

$$IS = z\sigma_L \quad [2]$$

Punto de reorden:

$$R = \bar{d}L + z\sigma_L \quad [3]$$

Al aplicar este análisis matemático, se observaron los siguientes resultados (figuras 2 y 3).

Figura 2. Métodos de control de inventario para el producto seleccionado

Fuente: autores.

En la figura 2 puede apreciarse que la política de inventario más adecuada de acuerdo con el *software* es ordenar al proveedor 6 unidades cada vez que el inventario llegue a 12 de estas, a fin de para garantizar el funcionamiento adecuado del modelo planteado.

En la figura 3 puede apreciarse que la política de inventario más adecuada, de acuerdo con el *software* para el producto Néctar Manzana × 237 Bot. × 6, es ordenar al proveedor 32 unidades cada vez que el inventario llegue a 12 de estas, a fin de garantizar el funcionamiento adecuado del modelo planteado.

Figura 3. Métodos de control de inventario para el producto Néctar Manzana × 237 Bot. × 6

Fuente: autores.

Modelo basado en la lógica fuzzy como técnica de minería de datos

La figura 4 muestra el diagrama general del proceso que se utilizó para aplicar la lógica *fuzzy* al problema planteado por la empresa, para la administración adecuada del inventario.

Como se muestra en la figura 4, se aplica en un primer momento el proceso de *fuzzificación*, que consiste en convertir una variable real en un grado de pertenencia que cuantifica el grado de posesión hacia su correspondiente variable lingüística. Luego se aplica una *borrosificación* o *fuzzificación* para establecer las entradas del sistema (ventas realizadas e inventario actual), con las cuales pueden establecerse reglas para la toma de decisiones. Para establecer la función de membresía, se utilizó en la etapa de *fuzzificación* el comportamiento observado con el *software* (figura 5 y 6).

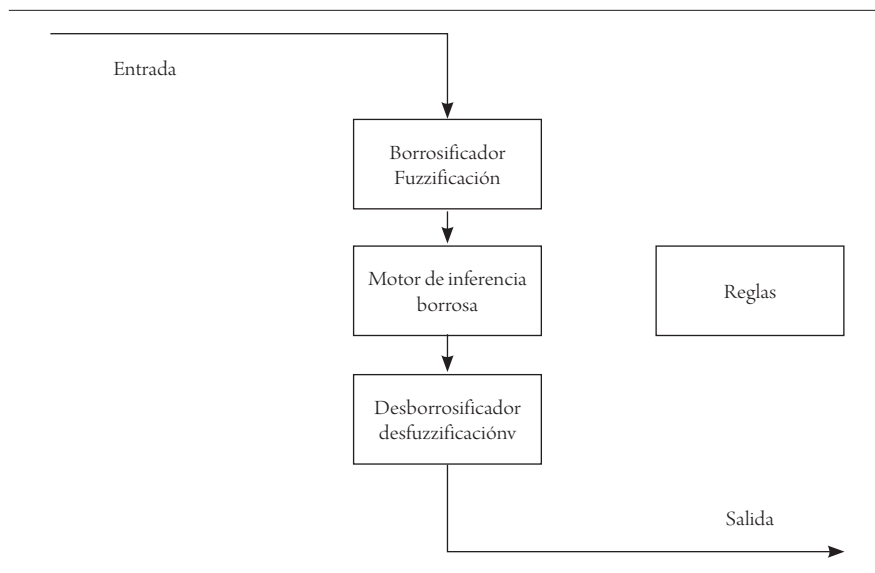
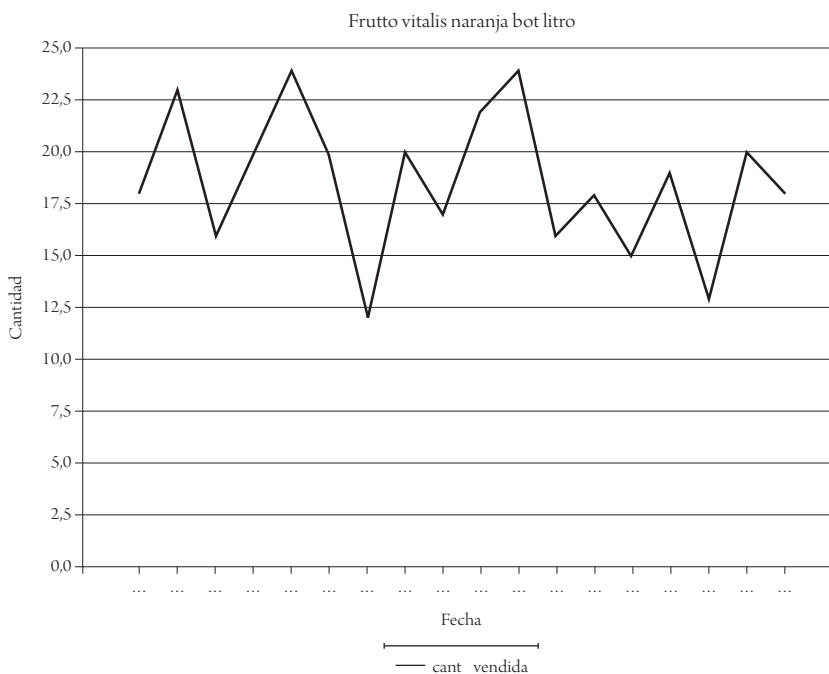


Figura 4. Diagrama de un sistema lógico borroso

Fuente: elaboración propia.



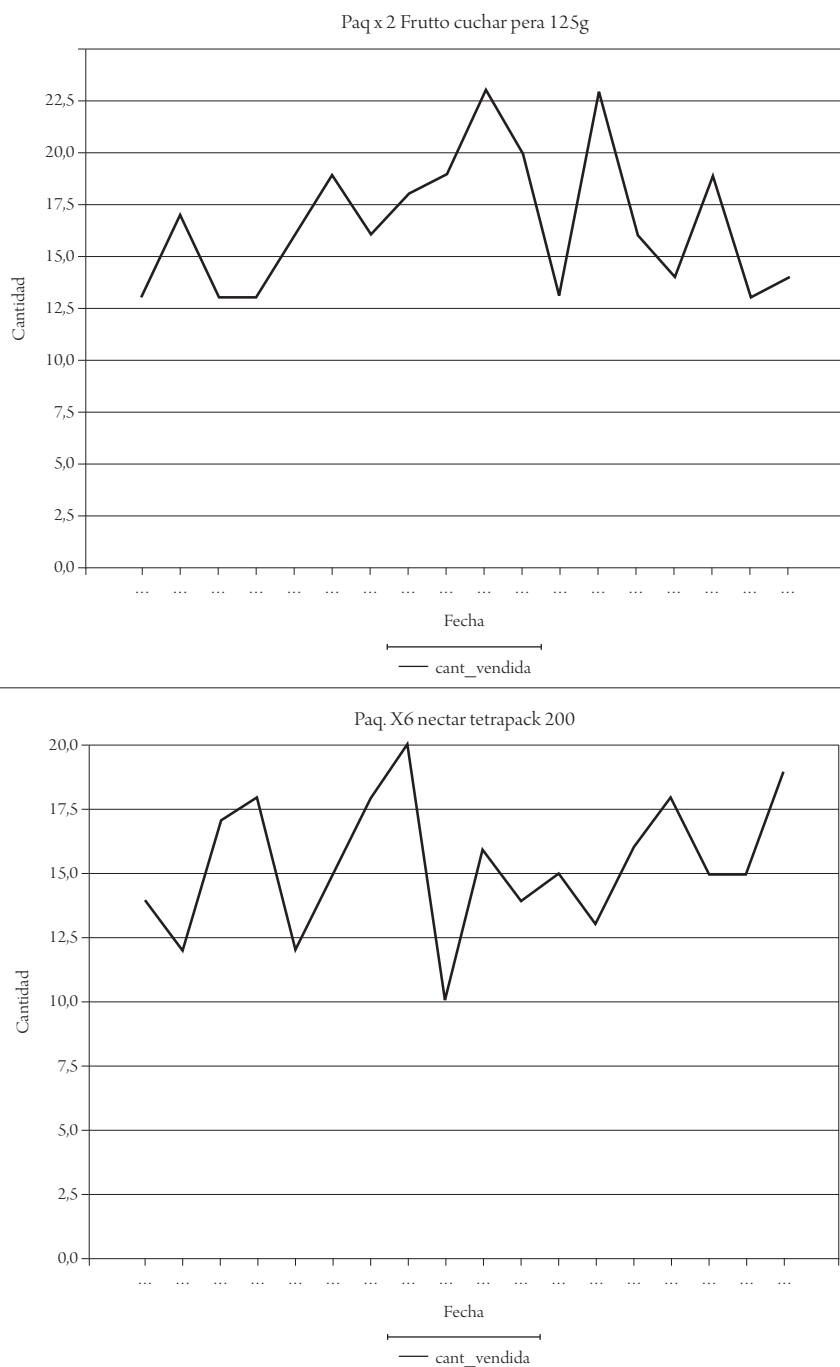


Figura 5. Comportamiento descubierto con el *software*

Fuente: autores

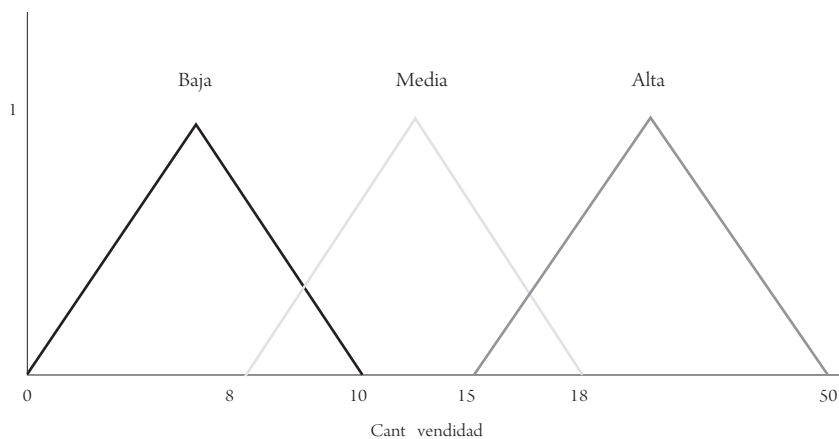


Figura 6. Función de membresía para la variable *cantidad vendida*

Fuente: autores.

Para este caso, se tuvieron en cuenta principalmente dos variables lingüísticas *cantidad vendida* y *baja, media y alta*. Cada término es caracterizado por un conjunto difuso dentro de un conjunto universo de los posibles valores. Al asumir que el conjunto universo es *cantidad_vendida* y está en el rango (0,50 unidades), entonces los términos lingüísticos son: bajo, 0-10 unidades; medio, 8-18 unidades; alto, 15-50-unidades. De igual forma se realiza con la variable *stock* (figura 7).

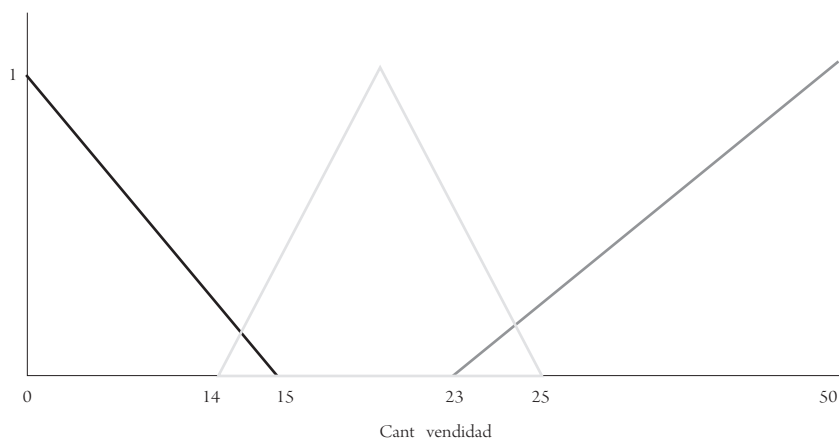


Figura 7. Función de membresía para la variable *stock*

Fuente: autores.

Una vez es establecida la función de pertenencia para cada una de las variables, como se hizo en el paso anterior, se generaron las reglas específicas (figura 8).

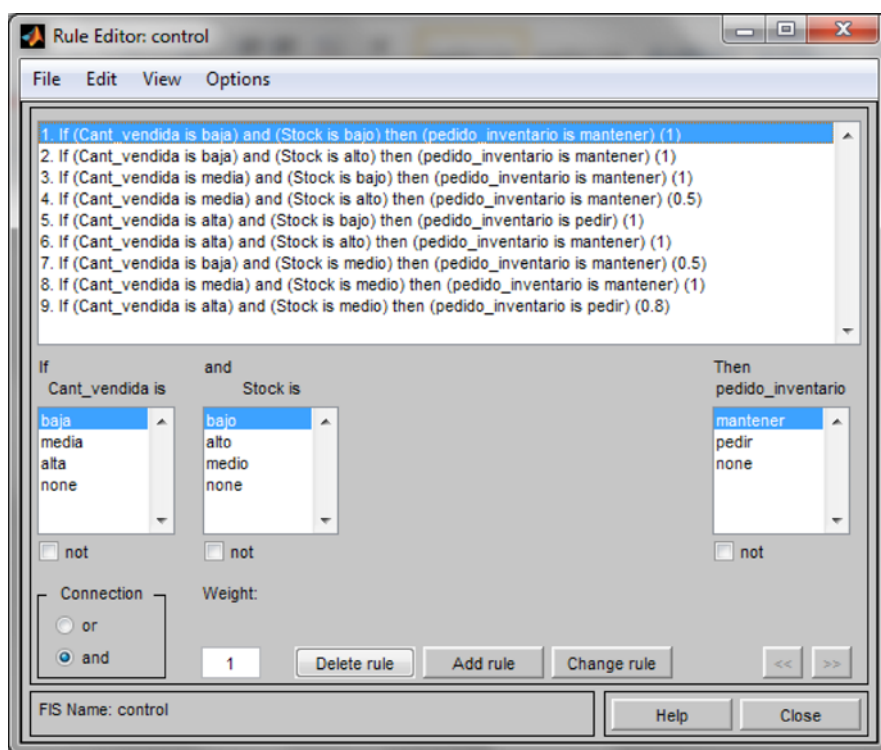


Figura 8. Motor de reglas del sistema

Fuente: autores.

Cuando se cumple la regla número 1, donde la cantidad vendida es baja y el *stock* también lo es, la respuesta de salida es mantener y no hacer pedidos, a fin de conservar el inventario (figura 9).

La figura 10 muestra la relación en 3D de las variables y la respuesta del sistema. Se pueden ver de manera integrada las reglas del motor de inferencia, donde si el stock está por debajo de 20 y la cantidad vendida está por encima de 20-23 unidades, entonces el pedido para abastecer el inventario tiene una elevación mayor, o viceversa.

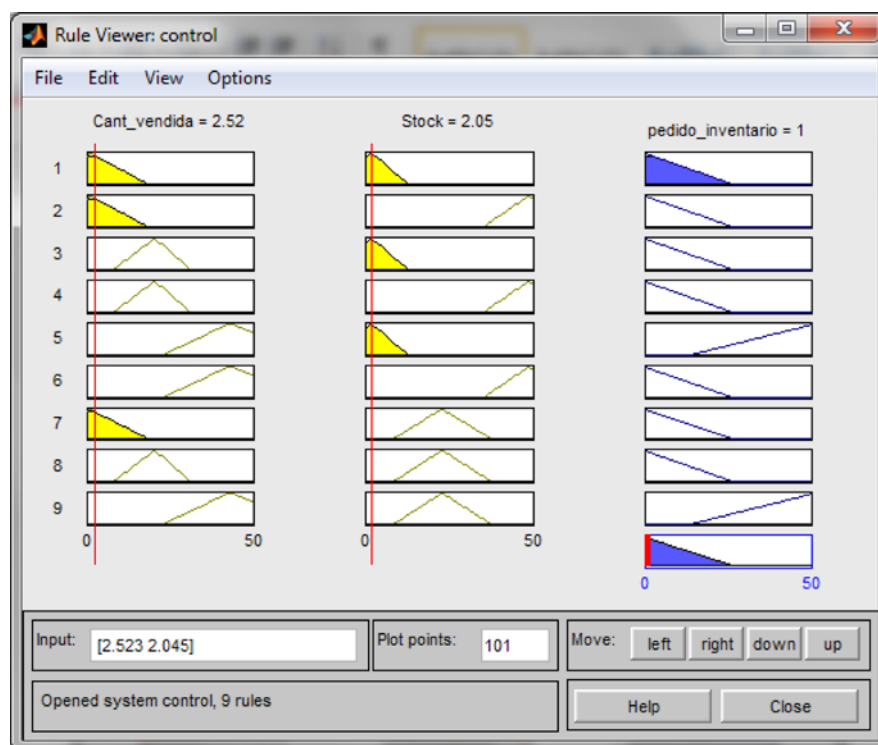


Figura 9. Regla 1: defuzzificación

Fuente: autores.

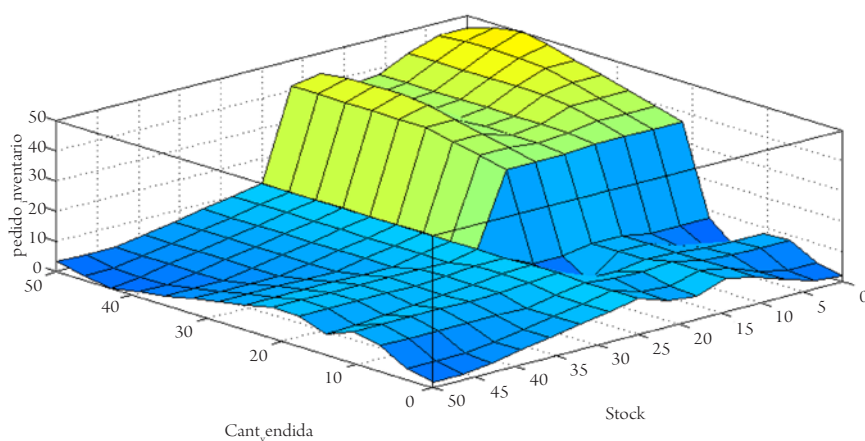


Figura 10. Representación de las reglas en 3D

Fuente: autores.

Metodología de desarrollo de software

La metodología para el desarrollo de *software*, también denominada *ciclo de vida del desarrollo de sistemas de información*, consta de los procedimientos que se observan en la figura 11.

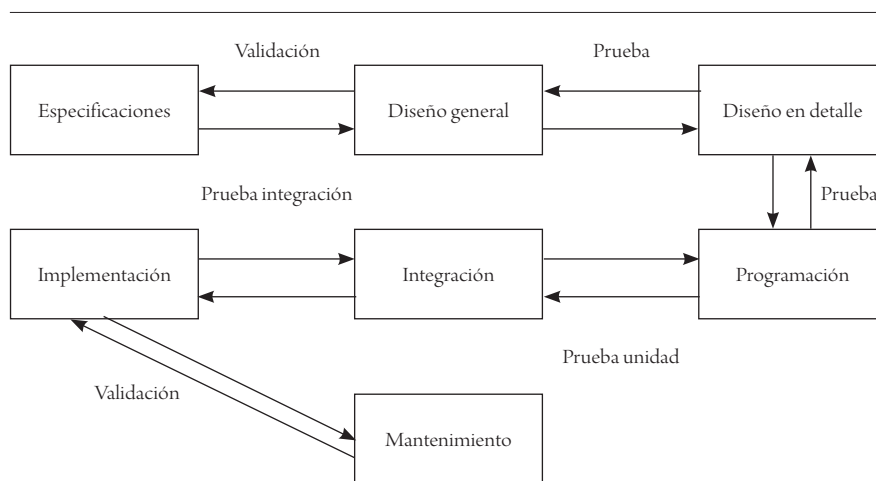


Figura 11. Etapas del ciclo de vida de *software*

Fuente: elaboración propia.

En la definición de los requerimientos de los sistemas es importante establecer los casos de uso, como se observa en las figuras 12 y 13.

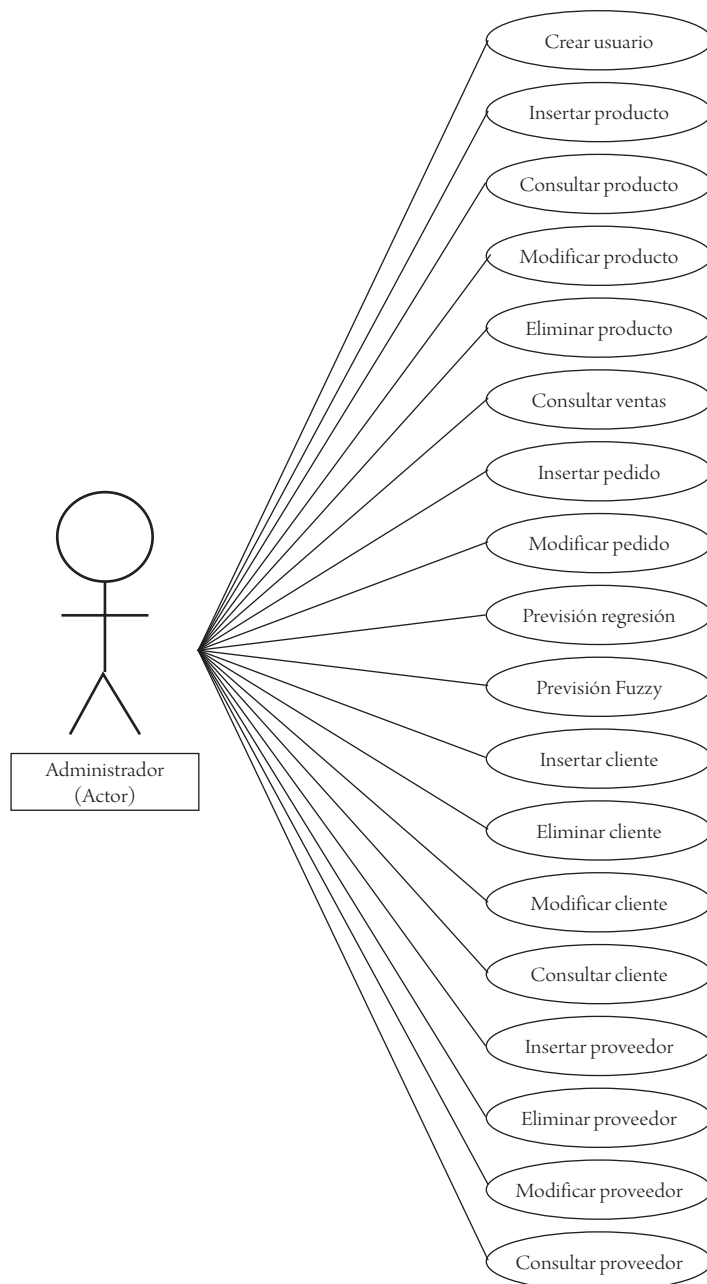


Figura 12. Casos de uso para el administrador

Fuente: elaboración propia.

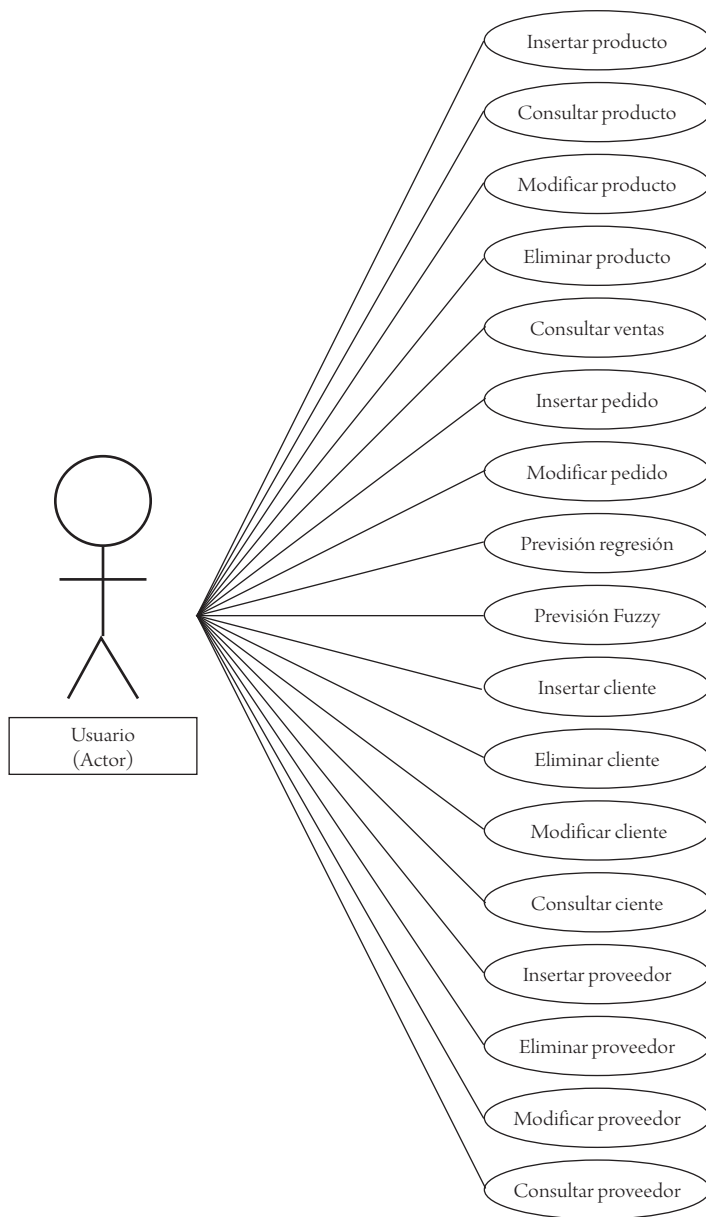


Figura 13. Casos de uso para el usuario

Fuente: elaboración propia.

Una vez definidos los requerimientos, se diseñó la interfaz gráfica, cuyos componentes se muestran en la figura 14.

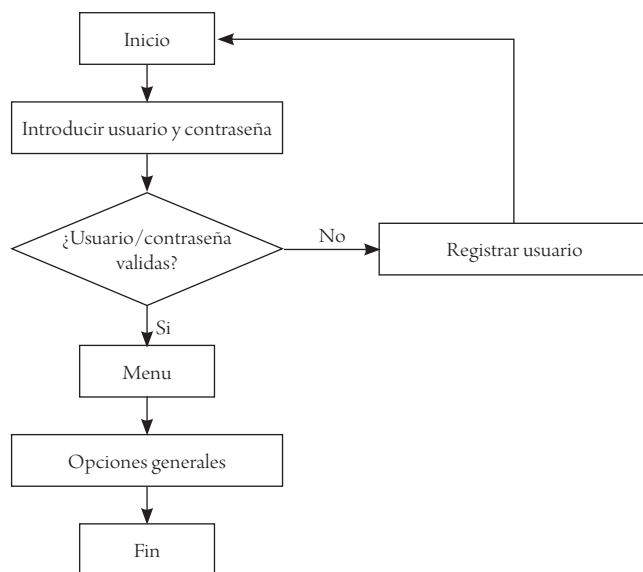


Figura 14. Diagrama de acceso al sistema

Fuente: elaboración propia.

La figura 15 corresponde al esquema general para desplazarse a través de las diferentes opciones que tiene el sistema, una vez se haya accedido a él.

Resultados

Con la librería JFreeChart y a partir de los datos del sistema pueden obtenerse diversos gráficos para el análisis de las ventas de los productos de la empresa. La figura 16 muestra las ventas totales correspondientes al periodo 1-20 de enero de 2013, donde se compara cantidad contra producto. De esta manera, se obtiene una descripción más agradable de las ventas de un producto que la simple consulta de la tabla de la base de datos.

Posteriormente, en las figuras 17 y 18 pueden apreciarse claramente las ventas de un producto determinado mediante un gráfico de dispersión. En este caso, el producto seleccionado es Nectar Baby Manzana 124G. Es importante destacar la comparación entre la cantidad vendida del producto seleccionado con el rango de fechas que se encuentran en la base de datos,. Luego se hace una comparación con Excel para determinar que el sistema sí grafica de forma correcta la información.

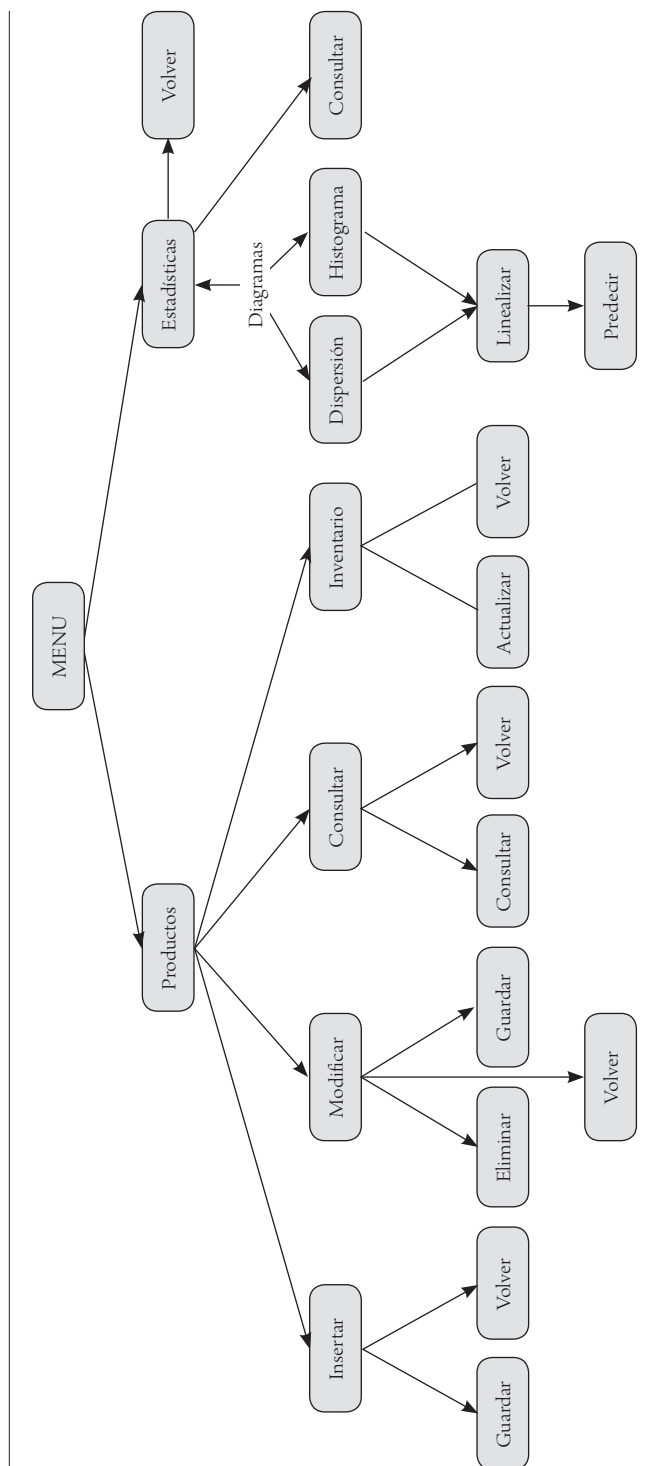


Figura 15. Mapa de navegación

Fuente: autores

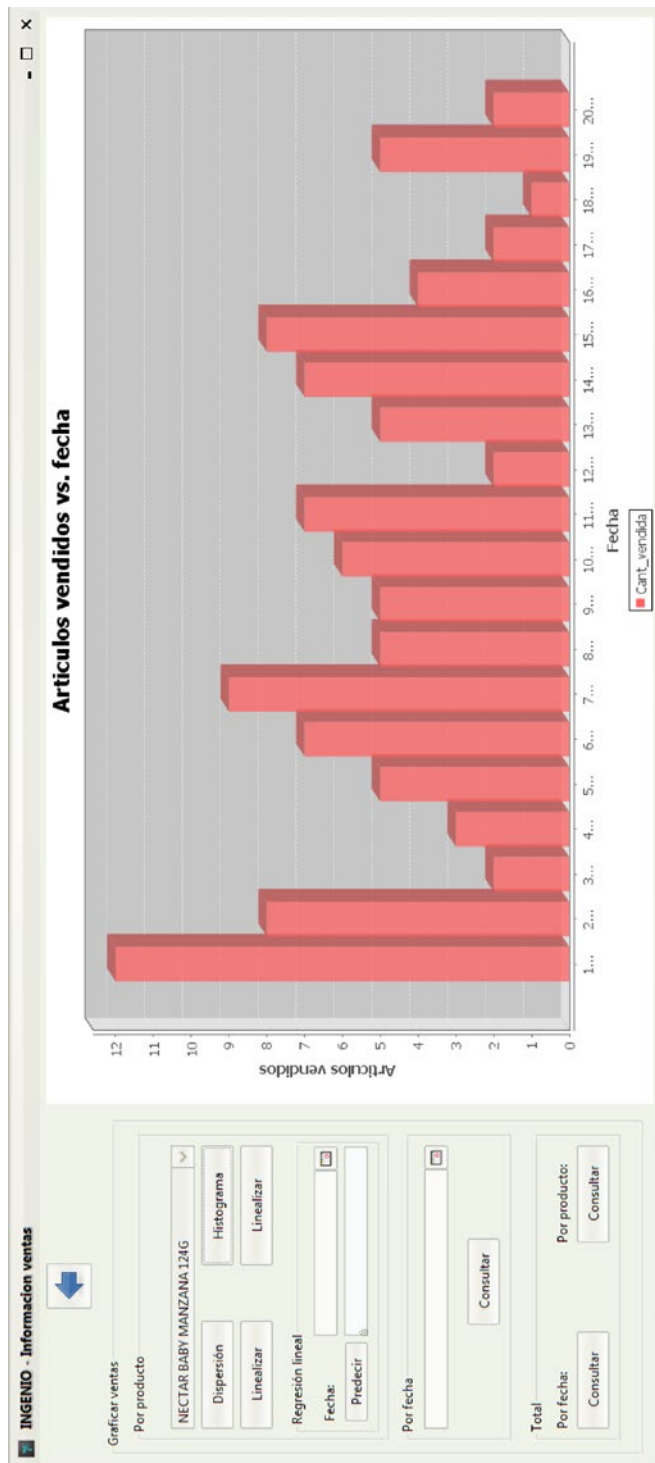


Figura 16. Gráfico de las ventas correspondientes del 1 al 20 de enero de 2013

Fuente: autores.

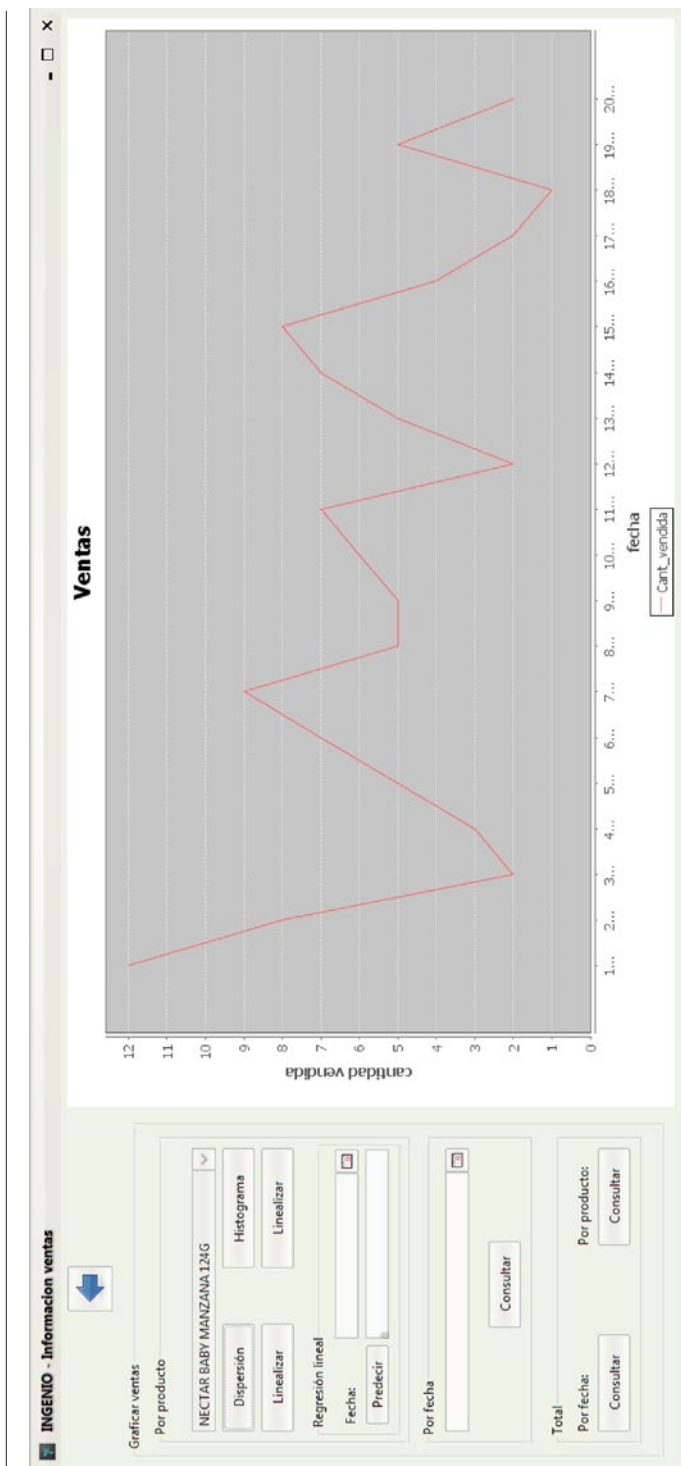


Figura 17. Gráfico de dispersión para las ventas de Néctar Baby Manzana 124G obtenido con el sistema
Fuente: autores

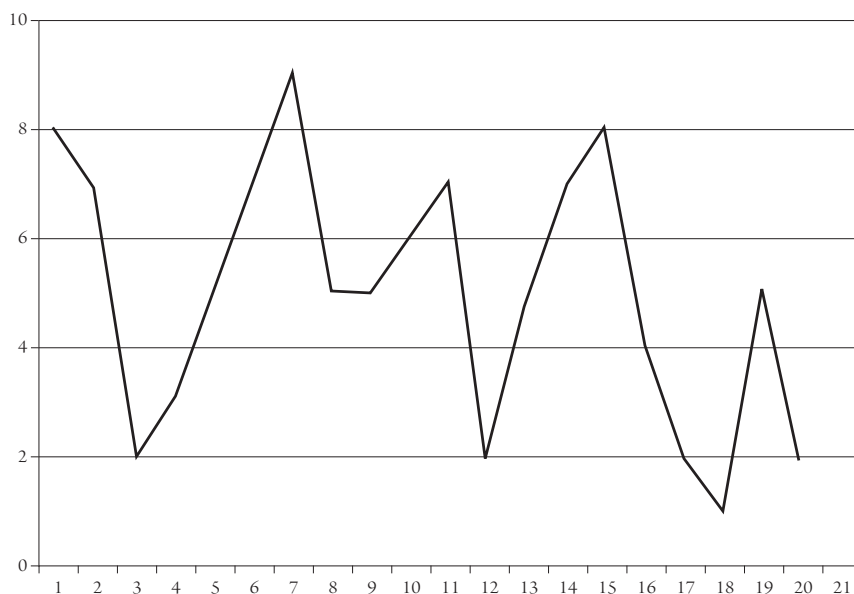


Figura 18. Gráfico de dispersión para las ventas de Néctar Baby Manzana 124G obtenido con Excel

Fuente: autores.

En las figuras 19 y 20 puede observarse de manera distinta el comportamiento mediante un gráfico de barras. En este caso también se hace la comparación entre el sistema y Excel.

Para realizar la predicción de ventas a través del método matemático de regresión lineal, es necesario implementar un algoritmo que le permita al usuario interactuar de manera adecuada y sencilla entre la predicción deseada y la aplicación. En primer lugar, se realizan todas las operaciones de prueba en Excel, de donde se parte para la obtención del modelo. Para obtener los valores que forman parte de la ecuación general de la recta es necesario determinar los coeficientes b y C que se muestran a continuación.

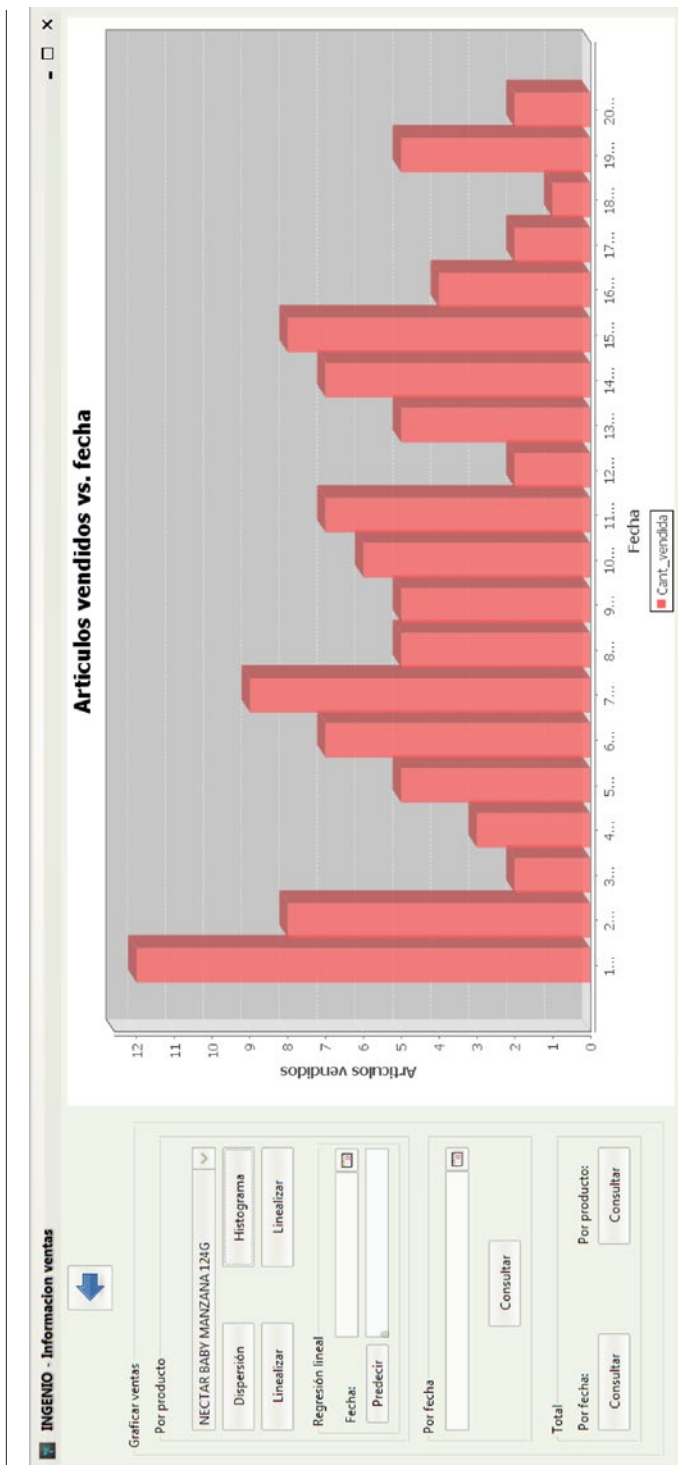


Figura 19. Gráfico de barras para las ventas de Nectar Baby Manzana 124G en el sistema
Fuente: autores

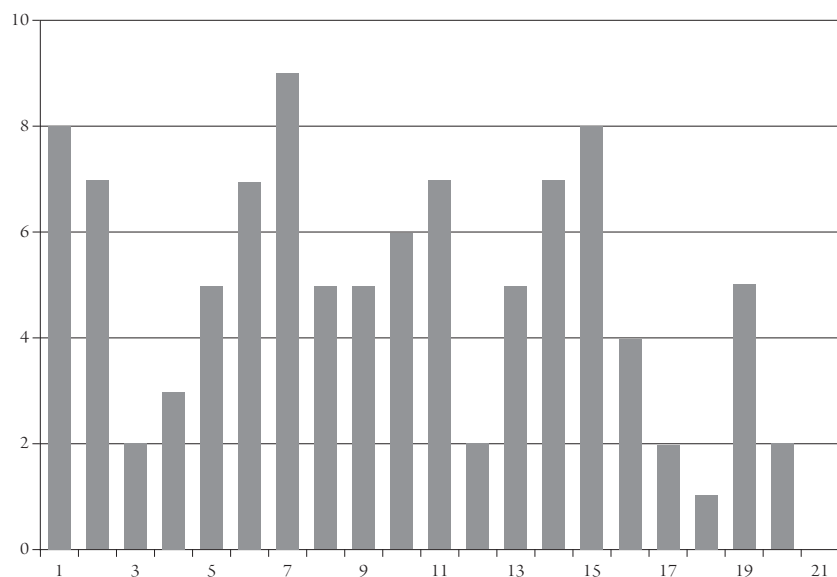


Figura 20. Gráfico de barras para las ventas de Néctar Baby Manzana 124G en Excel

Fuente: autores.

Ecuación general de la recta:

$$\hat{Y} = bX + C$$

Ecuación de coeficiente b :

$$b = \frac{\sum XY - n\bar{X}\bar{Y}}{\sum X^2 - n\bar{X}^2}$$

Ecuación de coeficiente C :

$$C = \bar{Y} - b\bar{X}$$

En las ecuaciones anteriores se denotan claramente las diversas variables, donde X es la variable independiente (para este caso, la fecha de venta del producto); Y es la variable dependiente (la cantidad de productos vendidos en el día); \bar{X} la media

aritmética de la variable independiente, y \bar{Y} es la media aritmética de la variable dependiente.

Para la implementación del modelo de regresión lineal, en primer lugar fue necesario convertir la fecha de venta del producto en un número, para lo cual se tomó el algoritmo utilizado por Microsoft Excel, que establece que el día 0 es el 1 de enero de 1900. Esto permite definir y manejar el algoritmo de manera más sencilla y veloz. Igualmente fue necesario almacenar los datos de los coeficientes b y C en la base de datos, a fin de favorecer la implementación del algoritmo y guardar los puntos de cada dato en la tabla *am_sales_lineal* para el posterior análisis del usuario. Ello puede realizarse fácilmente accediendo al panel de regresión lineal de la ventana de ventas.

Para la validación de los datos obtenidos a través de la implementación del algoritmo expuesto anteriormente fue necesario realizar la validación de los datos en Excel, donde se implementó el algoritmo, como se observa en las siguientes tablas para las ventas del producto Frutto Clasico Pera (caja litro), entre el 1 y el 20 de enero de 2013. Como ya existe una serie de datos históricos en el sistema de información, se decidió hacer algunas pruebas con diferentes fechas hacia futuro, cuyos resultados se muestran en las tablas 1, 2 y 3.

Tabla 1. Declaración de variables y factorización de los elementos de la ecuación para obtener los coeficientes b y C de la ecuación de la recta

| X | Y | | |
|-----------|----------|--------|------------|
| FECHA | PRODUCTO | X*Y | X^2 |
| 41275,000 | 5 | 206375 | 1703625625 |
| 41276,00 | 2 | 82552 | 1703708176 |
| 41277,00 | 6 | 247662 | 1703790729 |
| 41278,00 | 3 | 123834 | 1703873284 |
| 41279,00 | 5 | 206395 | 1703955841 |
| 41280,00 | 2 | 82560 | 1704038400 |
| 41281,00 | 3 | 123843 | 1704120961 |
| 41282,00 | 5 | 206410 | 1704203524 |
| 41283,00 | 7 | 288981 | 1704286089 |
| 41284,00 | 9 | 371556 | 1704368656 |

| X | Y | | |
|----------|----------|--------|------------|
| FECHA | PRODUCTO | X*Y | X^2 |
| 41285,00 | 11 | 454135 | 1704451225 |
| 41286,00 | 10 | 412860 | 1704533796 |
| 41287,00 | 7 | 289009 | 1704616369 |
| 41288,00 | 9 | 371592 | 1704698944 |
| 41289,00 | 5 | 206445 | 1704781521 |
| 41290,00 | 3 | 123870 | 1704864100 |
| 41291,00 | 8 | 330328 | 1704946681 |
| 41292,00 | 7 | 289044 | 1705029264 |
| 41293,00 | 7 | 289051 | 1705111849 |
| 41294,00 | 6 | 247764 | 1705194436 |

Fuente: autores

Tabla 2. Coeficientes *b* y *c* obtenidos a través de Excel

| X | Y | SUM (X * Y) – N * X * Y | SUM (X ^ 2) – N(X ^ 2) | B | C |
|---------|---|---------------------------|--------------------------|-------------|-------------|
| 41284,5 | 6 | 4458852 | 30679379590 | 0,000145337 | –0,00016943 |

Fuente: autores

Tabla 3. Valores obtenidos para la linealización del producto escogido

| LINEALIZACIÓN |
|---------------|
| 5,9986193 |
| 5,99876463 |
| 5,99890997 |
| 5,99905531 |
| 5,99920065 |
| 5,99934598 |
| 5,99949132 |
| 5,99963666 |
| 5,99978199 |
| 5,99992733 |
| 6,00007267 |
| 6,00021801 |

| LINEALIZACIÓN |
|---------------|
| 6,00036334 |
| 6,00050868 |
| 6,00065402 |
| 6,00079935 |
| 6,00094469 |
| 6,00109003 |
| 6,00123537 |
| 6,0013807 |

Fuente: autores.

Los valores anteriores coinciden adecuadamente con los obtenidos en la base de datos, como se puede corroborar con la tabla 4.

Tabla 4. Tabla *am_sales_lineal* con los coeficientes *b* y *C* para el producto Frutto Clásico Pera (caja litro)

| X_FECHA | X_FECHA_NUMERO | Y_LINEAL | B | C |
|-----------|----------------|------------------|----------------------|-----------------------|
| 1-1-2013 | 41275 | 5.99861929756837 | 0.000145337098065896 | -0.000169425101470111 |
| 2-1-2013 | 41276 | 5.99876463466644 | 0.000145337098065896 | -0.000169425101470111 |
| 3-1-2013 | 41277 | 5.99890997176451 | 0.000145337098065896 | -0.000169425101470111 |
| 4-1-2013 | 41278 | 5.99905530886257 | 0.000145337098065896 | -0.000169425101470111 |
| 5-1-2013 | 41279 | 5.99920064596064 | 0.000145337098065896 | -0.000169425101470111 |
| 6-1-2013 | 41280 | 5.9993459830587 | 0.000145337098065896 | -0.000169425101470111 |
| 7-1-2013 | 41281 | 5.99949132015677 | 0.000145337098065896 | -0.000169425101470111 |
| 8-1-2013 | 41282 | 5.99963665725484 | 0.000145337098065896 | -0.000169425101470111 |
| 9-1-2013 | 41283 | 5.9997819943529 | 0.000145337098065896 | -0.000169425101470111 |
| 10-1-2013 | 41284 | 5.99992733145097 | 0.000145337098065896 | -0.000169425101470111 |
| 11-1-2013 | 41285 | 6.00007266854903 | 0.000145337098065896 | -0.000169425101470111 |
| 12-1-2013 | 41286 | 6.0002180056471 | 0.000145337098065896 | -0.000169425101470111 |
| 13-1-2013 | 41287 | 6.00036334274516 | 0.000145337098065896 | -0.000169425101470111 |
| 14-1-2013 | 41288 | 6.00050867984323 | 0.000145337098065896 | -0.000169425101470111 |
| 15-1-2013 | 41289 | 6.0006540169413 | 0.000145337098065896 | -0.000169425101470111 |
| 16-1-2013 | 41290 | 6.99979935403936 | 0.000145337098065896 | -0.000169425101470111 |

| X_FECHA | X_FECHA_NUMERO | Y_LINEAL | B | C |
|-----------|----------------|------------------|----------------------|-----------------------|
| 17-1-2013 | 41291 | 6.00094469113743 | 0.000145337098065896 | -0.000169425101470111 |
| 18-1-2013 | 41292 | 6.00109002823549 | 0.000145339098065896 | -0.000169425101470111 |
| 19-1-2013 | 41293 | 6.00123536533356 | 0.000145337098065896 | -0.000169425101470111 |
| 20-1-2013 | 41294 | 6.00138070243163 | 0.000145337098065896 | -0.000169425101470111 |

Fuente: autores.

Para realizar la validación de pruebas, en este caso se eligió como ejemplo el día 29 de marzo de 2013, el cual obtuvo un valor predictivo de 6.01126 mediante la implementación del algoritmo en Excel. Este dato coincide correctamente con el valor que muestra el *software* (figura 21).

Conclusiones

La aplicabilidad de la minería de datos en sistemas de gestión depende en gran medida de la herramienta y del tratamiento de los datos que se requieran analizar. Para este caso, es necesario aclarar que los valores obtenidos no brindan una descripción adecuada de los datos proporcionados por el cliente; sin embargo, la minería de datos puede contribuir significativamente en las aplicaciones de administración empresarial basada en la relación con el cliente. Debe tenerse en cuenta en este sentido que a pesar de que la herramienta elegida en esta ocasión no brindó los resultados esperados, sí ayudó a confirmar que la dispersión de los datos puede llevar a utilizar métodos más comunes, como la linealización de las gráficas de las ventas obtenidas.

Los requerimientos del sistema de información se evidencian claramente en cada uno de los formularios desarrollados, en los que se tienen en cuenta las necesidades principales del cliente, como la consulta de la base de datos de los productos, la modificación de los mismos, el manejo robusto del inventario de la compañía y el análisis descriptivo a través de diferentes gráficas de las ventas de los productos utilizando diferentes parámetros (por ejemplo, un producto determinado o un rango de fechas escogido por el usuario del sistema). De igual manera, existen dentro del mismo sistema requerimientos básicos de un sistema de información de transacciones como el registro de usuarios y el ingreso de estos utilizando un nombre de usuario y una contraseña.

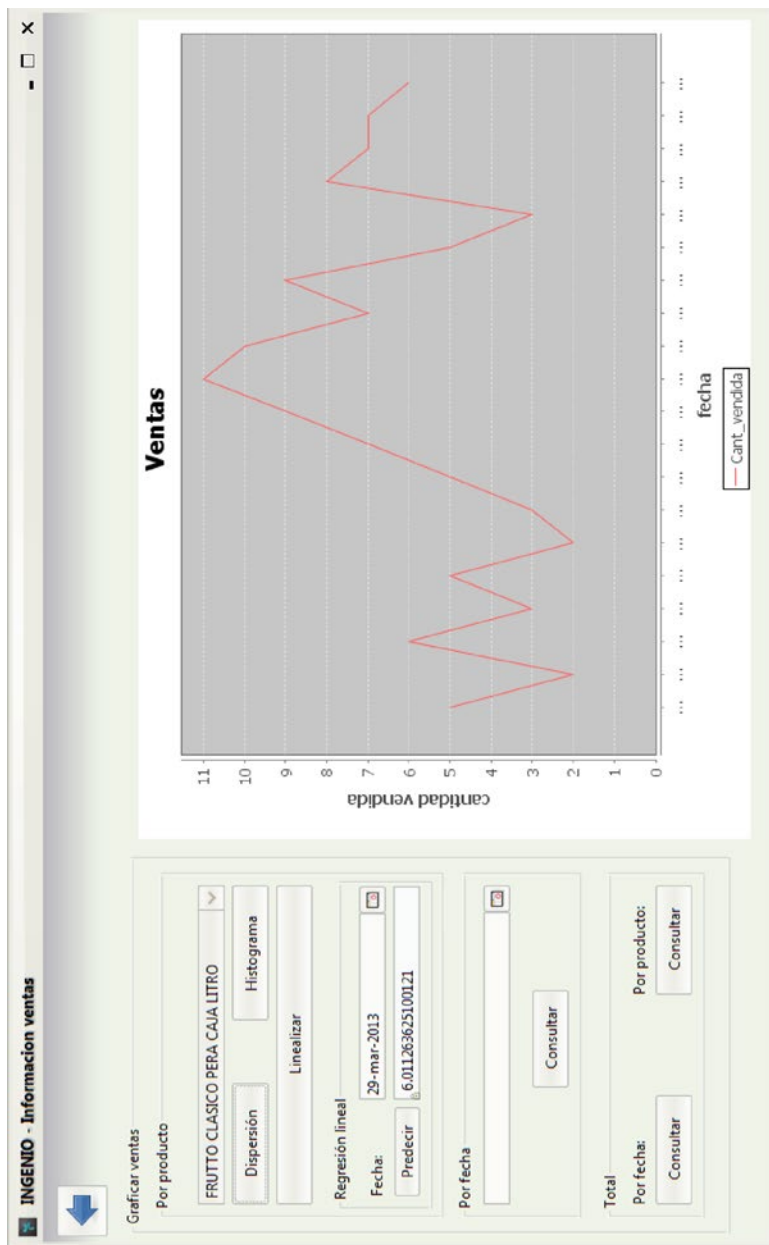


Figura 21. Predicción de ventas para una fecha determinada y el artículo seleccionado

Fuente: autores

El desarrollo del diseño del sistema de información no solo implicó un análisis profundo de los requerimientos del sistema, sino que además incluyó el estudio de una metodología de minería de datos en conjunto con herramientas adicionales para la administración de la base de datos, así como el desarrollo y la descripción gráfica de la información contenida dentro de las bases de datos de la empresa.

Finalmente, a través de la lógica *fuzzy* se observó que las entradas y salidas pueden relacionarse sin necesidad de entender todas las variables involucradas en el proceso. Ello permite que el sistema pueda ser más confiable y estable que uno con un sistema de control convencional. Es posible obtener prototipos rápidamente, ya que no requiere conocer todas las variables acerca del sistema antes de empezar a trabajar, por cuanto su desarrollo es más económico que el de sistemas convencionales, porque son más fáciles de designar.

Referencias

- Moreno Malaver, L. A. (2005). *Diseño e implementación de un sistema de información modular para la compra venta e inventario de una fábrica de calzado* (tesis de grado). Bogotá: Universidad de La Salle.
- Luna Beltrán, G. A. y Quiroz Morales, D. F. (2009). *Diseño e implementación de un sistema ERP para optimizar sistemas de gerencia de restaurantes o bares protegido por una llave electrónica* (tesis de grado). Bogotá: Universidad de La Salle.
- Fortuño, F. J. (2009). *Desarrollo y evolución de un sistema de gestión de inventarios, ventas y facturación para una empresa automotriz* (tesis de grado). Santiago de Chile: Universidad de Chile.
- Vallejos, Sofia J. (2006). *Minería de datos* (tesis de grado). Corrientes, Argentina: Universidad Nacional del Nordeste.
- Ropero Rodríguez, J. (2009). *Método general de extracción de información basado en el uso de lógica borrosa. Aplicación en portales web* (tesis de grado). Sevilla: Universidad de Sevilla.
- Elizondo Gracia, I. (2002). *Desarrollo metodológico y técnico de un pronóstico de ventas para un producto con patrones cíclicos* (tesis de grado). México: Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Alcántara Mori, Á. A. (2012). *Formulación de minería de datos para la empresa distribuidora de productos Espinoza Aguilar S.A.* (tesis de grado). Lima: Universidad Tecnológica del Perú.

- García Pérez, R. D. (2009). *Desarrollo de un software para el control de inventario de productos terminados para los departamentos de atención al cliente, la línea de producción "sector beta" y despacho en una empresa alimentos* (tesis de grado). Cumaná, Venezuela: Universidad de Oriente.
- Perversi, I. (2007). 'Aplicación de minería de datos para la exploración y detección de patrones delictivos en 2007 en Argentina. Recuperado de <http://iidia.com.ar/rgm/tesistas/PERVERSI-tesisdegradoeningenieria.pdf>

Sistema de producción Toyota usando cibernética de tercer orden

WILSON ALEXÁNDER PINZÓN RUEDA¹

CARLOS ANDRÉS ARANGO LONDOÑO²

RESUMEN

El Sistema de Gestión Industrial Toyota (TPS) ha sido ampliamente difundido por su relativo éxito en algunos contextos. Empresas de un amplio rango, como de alimentos, metalmecánicas e industriales, han intentando implementar el TPS; sin embargo, en la revisión literaria no se identifican las condiciones requeridas para obtener un resultado sostenido o consistente en su uso. Este artículo intenta presentar la relación de diferentes elementos, como el *poka yoke* y el *justo a tiempo*, con el TPS, y para ello se parte del supuesto del mercado perfecto como una condición necesaria de dicho modelo. Para este análisis se utiliza la cibernética de tercer orden.

Palabras clave: Sistema de Gestión Industrial Toyota, cibernética, administración de operaciones.

¹ Magíster en Ingeniería Industrial por la Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. Ingeniero industrial por la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. Actualmente se desempeña como docente en el proyecto curricular de Ingeniería de Producción de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: wapinzon@udistrital.edu.co

² Magíster en Ingeniería Industrial por la Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. Ingeniero mecánico por la Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia. Actualmente se desempeña como docente en el Departamento de Ingeniería Industrial de la Universidad de La Salle, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: cararango@unisalle.edu.co

FECHA DE RECEPCIÓN: 1 DE MARZO DEL 2014 • FECHA DE APROBACIÓN: 9 DE OCTUBRE DEL 2014

Cómo citar este artículo: Pinzón Rueda, W. A. y Arango Londoño, C. A. (2015). Sistema de producción Toyota usando cibernética de tercer orden. *Épsilon*, 24, 175-195.

Toyota Production System Using Third-Order Cybernetics

ABSTRACT

The Toyota Production System (TPS) has been widely spread, due to its relative success in some contexts. Companies from a wide range, such as food, metalworking and industrial companies, have tried to implement the TPS; however, in reviewing the literature on the subject, the conditions for a sustained and consistent result during use are not identified. This article aims to present the relationship of different elements, such as *poka yoke* and *justo a tiempo*, with the TPS, and for that purpose we start from the idea of the perfect market as a necessary condition of the model. For this analysis, third order cybernetics are used.

Keywords: Toyota Production System, cybernetics, operations management.

Sistema de produção Toyota usando cibernética de terceira ordem

RESUMO

O Sistema de Gestão Industrial Toyota (TPS) tem se difundido amplamente, por seu relativo sucesso em alguns contextos. Empresas de um amplo rango, como de alimentos, metalmecânicas e industriais, têm tentado implementar o TPS; no entanto, na revisão da literatura sobre o tema não se identificam as condições requeridas para obter um resultado sustentado ou consistente em seu uso. Este artigo tenta apresentar a relação de diferentes elementos, como o *poka yoke* e o *justo a tempo*, com o TPS, e para isso se parte da suposição do mercado perfeito como uma condição necessária deste modelo. Para esta análise se utiliza a cibernética de terceira ordem.

Palavras chave: Sistema de Gestão Industrial Toyota, cibernética, administração de operações.

Introducción

El Sistema de Gestión Industrial Toyota (TPS, por sus siglas en inglés) propuso unas prácticas específicas de operación en respuesta a las circunstancias que rodeaban a la empresa en su origen. Este modelo ha llevado a Toyota a tener un alto desempeño como productor. Las prácticas diferenciadas del sistema (tarjetas *kanban*, círculos de calidad, sistemas *poka yoke*, etc.) han sido introducidas por muchas empresas; sin embargo, aun con el uso de estas técnicas, son pocas las empresas que han sido capaces de sostener un alto desempeño industrial como el conseguido por Toyota. Ello quizás se deba a que es común confundir estas prácticas con el TPS mismo.

Este artículo es una propuesta para la identificación y articulación de los diferentes elementos del TPS y de su contexto; para ello se usa la cibernética de tercer orden, derivada de la cibernética del primer y segundo orden. La propuesta radica en la articulación de los diversos elementos a partir de los supuestos de TPS; es decir, a diferencia de metodologías centradas en aspectos meramente técnicos de las propiedades de flujo de materiales a través del sistema, la cibernética de tercer orden usa las propiedades de la ciencia de la comunicación, la información y el control. En este caso, se aborda el supuesto de la competencia perfecta, el cual modifica los elementos y su articulación con el TPS.

Para ello, primero se abordan las bases del TPS y de la cibernética; luego se presenta un marco de referencia que vincula los elementos de la cibernética de primer y segundo orden por la descripción de los componentes de los ciclos de realimentación de primer y segundo orden; después se identifica el concepto de cibernética de tercer orden con los de orden primero y segundo; finalmente se identifican los elementos del TPS usando circuitos de cibernética de tercer orden.

Marco de referencia

Los modelos de cibernética de tercer orden se usan para describir el TPS, que es uno de los sistemas de gestión industrial posibles de usarse. Los modelos de tercer orden son propuestos a partir de la descripción hecha por Ashby (1957) y Beer (1964) y son usados en la administración de organizaciones industriales. También

se emplea la descripción de los elementos constitutivos de un modelo de cibernética de tercer orden propuestos en diversos estudios de integración de sistemas, como el de Nova (2011).

Sistema de Gestión Industrial Toyota (TPS)

Toyota ha diseñado y fabricado carros desde 1937 (Ohno, 1988). Después de la Segunda Guerra Mundial, los niveles de productividad en Japón eran muy bajos (Jorgenson, 1987), y por ello Toyota cambió allí radicalmente su gestión industrial para disminuir los costos de producción. Esta respuesta se conoce como Sistema Producción Toyota (Lander, 2007), denominado aquí Sistema de Gestión Industrial Toyota (TPS).

Se identifican múltiples puntos de vista en la descripción del TPS, ya que al hablar del mismo objeto pareciesen sinónimos; sin embargo, la hipótesis de ser objetos separados del mismo sistema es la que se presume aquí. En otras palabras, puede abordarse el enfoque de Ohno (1988), centrado en el sistema de control económico contable de la empresa: “Taiichi Ohno helped establish the Toyota Production System, and built the foundation for the Toyota spirit of ‘making things’ by, for example, creating the basic framework for the Just-in-Time method” (Toyota, s. f.). Asimismo titula su libro: *El Sistema de Producción Toyota, más allá del punto de vista de la ingeniería* (Ohno, 1988).

Por su parte, Monden (2012) articula el TPS como un sistema de producción, sin prestar igual énfasis al aspecto contable. Y otra perspectiva es la que asume Shingo (1986): contradice abierta y directamente los principios de la gestión total de la calidad y su control estadístico, y se ocupa de los aspectos más operativos de el TPS. Con lo anterior queda claro que el grueso de los lectores no disponen de un marco o método fácil para comprender las diferentes técnicas asociadas el TPS, aun cuando los textos referidos sean de autoría de los directos involucrados en la gestión del TPS.

La propuesta inicia aquí: se presume que el TPS busca la reducción de costo, y lo hace a través de la eliminación de los desperdicios (Womack, 1996). Desde la economía se ha postulado que una empresa en mercado perfecto solo puede incrementar sus utilidades por la disminución sistemática de sus costos. Ello es así

puesto que una empresa, dentro del entorno de mercado perfecto, no puede definir el precio en el cual vende su producto, por cuanto el precio y la cantidad de los productos vendidos están determinados por la dinámica del mercado; por lo tanto, la reducción de costos es la única fuente para mejorar los ingresos de empresas en entornos de mercado perfecto (Shy, 1996).

Este escrito concibe que el mercado perfecto es el supuesto en el que se desenvuelven el origen y la evolución del TPS, ya que el precio del producto es tomado, es decir, no está definido por el productor. En este sentido, Shy (2001) indica las diferentes situaciones de mercado basado en la desviación de los supuestos asociados al mercado perfecto.

Por ello, en el TPS, el transporte innecesario, por ejemplo, no solamente aumenta los costos por las demoras de los inventarios para salir del sistema, sino que también causa la necesidad de bodegas y de espacios de almacenamiento temporal, así como de elementos especiales para transportar y manejar los materiales. El exceso de transporte esconde por lo general un problema de organización de la coordinación de flujos en la planta o en el sistema, y oculta también la verdadera localización de los cuellos de botella.

Dos técnicas populares del TPS se usan para disminuir los desperdicios. La primera es el *justo a tiempo* (JIT, por sus siglas en inglés), que consiste en producir solo lo que se necesita, analizar realmente cuánto se necesita y solo hacerlo cuándo es requerido. Cualquier desviación del proceso de transformación se considera un desperdicio (McLachlin, 1997). La segunda técnica es la conocida como *Jidoka* (construir con calidad), en la que de forma evidente se identifican las diferencias entre lo programado y lo ejecutado de la producción. De hecho, la producción se detiene en el momento en que se identifican los fallos. En un sistema de producción que utiliza la técnica en mención, se presume como desperdicio cualquier desviación del proceso (Morgan y Liker, 2006).

El TPS trabaja sobre dos supuestos tomados como comunes en ambientes productivos: a) las necesidades efectivas se van a desviar de una proyección o plan de producción de forma no predecible, sin importar qué tan meticulosa haya sido la realización de este plan (Kubiak, 1993); b) las diferencias surgirán constantemente en una fábrica, lo que hará que las desviaciones de los planes de producción sean

inevitables. TPS se enfoca en procesos de mejora continua y enfatiza en alertar a las personas, cuando se desvían, de cómo debería realizarse el proceso productivo (Zangwill, 1998).

Para implementar los principios de TPS, se usan varios componentes y criterios, entre los que encontramos el *takt time*, el flujo de producción, los sistemas *pull*, el *kanban* y la nivelación (*heijunka*) (Monden, 2012). Muchas de estas reglas se usan para mantener el flujo de información tan cerca como sea posible del flujo de materiales dentro la planta. Las piezas son inducidas a fluir dentro de la planta, a partir de la información que se tiene del uso actual, en vez de ser presionadas a fluir a través de eslla con base en un programa. Este tipo de flujo requiere que las estaciones finales del proceso tengan la capacidad de mover material con un tiempo mínimo de alistamiento; de ahí que crear flujo en un proceso productivo sea una actividad de planeación en un TPS.

Otro de los componentes del TPS es el recurso humano: las personas fijan y mantienen la operación, resuelven los problemas diarios de la operación, participan en la mejora continua de las empresas y en la organización de los equipos de trabajo de forma eficiente. Para lograr la participación de los diferentes miembros, el TPS se enfoca en el aumento de las competencias de cada uno de los colaboradores, resultado del aprendizaje y uso de las diversas técnicas del modelo en mención (Spear, 1999).

El propósito TPS es la eliminación de cualquier tipo de desperdicio, y ello abarca a todos los elementos en el área de producción, desde el departamento de compras de materias primas, hasta el servicio al cliente, pasando por recursos humanos, finanzas, etc. En esta línea, el JIT se usa para alcanzar reducciones de costos y cumplir con las necesidades de los clientes a los costos más bajos posibles (Sipper, 1998); por ejemplo, con el SMED (*single minute exchange of die*, o cambio de matriz en pocos minutos) se puede hacer el alistamiento de moldes de 20 horas en 10 minutos.

Cibernética

La cibernética es el estudio de los sistemas de regulación. Está vinculada estrechamente a la teoría de control, las comunicaciones y la información. La cibernética

estudia modos de comportamiento humano, animal y de máquinas no vivas, para lo cual se basa en los ciclos de control donde es central la variación en el comportamiento (Ashby, 1957). Para identificar los elementos de control cibernético, se hace una analogía respecto al diagrama de bloques para los sistemas de control trabajados (Beer, 1964), como se muestra en figura 1.

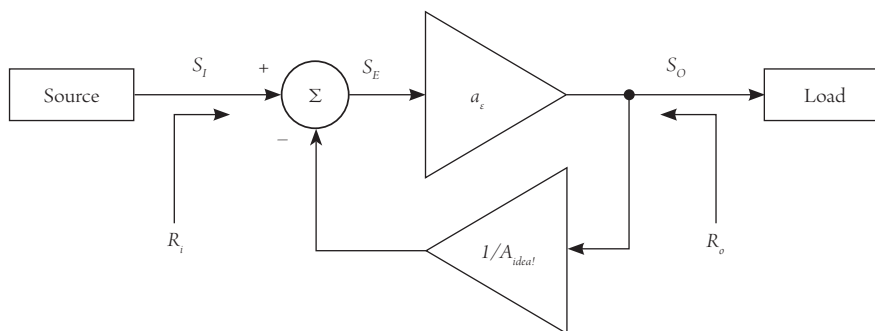


Figura 1. Diagramas de bloques con realimentación

Fuente: <http://www.mathworks.com/company/newsletters/articles/undergraduate-engineers-develop-hydraulic-servo-control-systems-using-model-based-design-with-simulink.html>

En estos bloques se indican los puntos de transformación de información, el aparato transformador (las cajas) y el flujo de materiales o de información (los arcos). Esta notación es ampliamente usada en la teoría del control industrial, como ámbito de uso de los principios de la cibernética (Beer, 1964)

La cibernética de tercer orden consiste en usar los fundamentos de la teoría de control de máquinas y proponer principios basados en el funcionamiento del sistema aplicados a sistemas sociales y biológicos. Lo novedoso de ello es la inclusión del efecto del observador y la coordinación del observador con sus actos y creencias. Adicionalmente, es posible encontrar usos de la cibernética en entornos administrativos (Vidgen, 1998; Skyttner, 2001; Robb, 1984), donde se muestra cómo los principios de ella son lo suficientemente amplios para cubrir diferentes tipos de situaciones propios de este ámbito.

En la cibernética podemos encontrar ciclos de primer, segundo (Heylighen, 2001) y tercer nivel (Nova, 2011). Los primeros hacen referencia al flujo de información y materiales; los segundos, al efecto del observador, lo cual corresponde a los pro-

pósitos, las metas, los criterios y los planes de la organización (Maruyama, 1963), y los de tercer nivel, a los supuestos que rigen el comportamiento de la organización y al efecto de estas creencias y supuestos en la acción.

La cibernética de primer orden se enfoca en los sucesos que, se presume, “suceden” fuera del observador, en lo que este puede denominar como un *sistema* (Wiener, 1961; Ashby, 1957). La innovación consistió en usar la teoría clásica de control y extrapolar sus principios al funcionamiento de, por ejemplo, los sistemas sociales y biológicos.

En la cibernética de segundo orden se identifica el efecto del observador sobre el sistema observado (Pakman, 1996; Yolles, 2006). Se identifica entonces cómo la cibernética se centra en la transmisión del mensaje, en la expectativa del observador, y no en el mensaje. Por su parte, en la cibernética de tercer orden se usan todas las propiedades de la comunicación; la transmisión de mensajes no se considera una cuestión meramente técnica, sino que va orientada por los supuestos de la organización (Nova, 2011).

Descripción de los elementos del circuito de realimentación

En el circuito de realimentación mostrado en la figura 2, un arco dirigido o una flecha representan algún tipo de flujo correspondiente a uno de los factores productivos. Así, una flecha genérica puede apuntar a uno o más de estos tipos de flujo. La línea continua identifica cualquiera de los varios tipos de flujo. La línea punteada se utiliza solo para el flujo de información. Un círculo o una elipse representan un dispositivo de monitoreo o punto para mirar los flujos, proveen información y son comparadores. Tales comparadores pueden contener un amplio número de funciones que permitan describir las relaciones entre flujos.

Además, un recuadro cerrado y en línea continua representa una transformación o el cambio de las entradas en salidas. Entre los cambios o las transformaciones más comunes en sistemas de producción se encuentran el ensamble, la asociación, la agregación, la personalización, etc. (Torres, 1994).

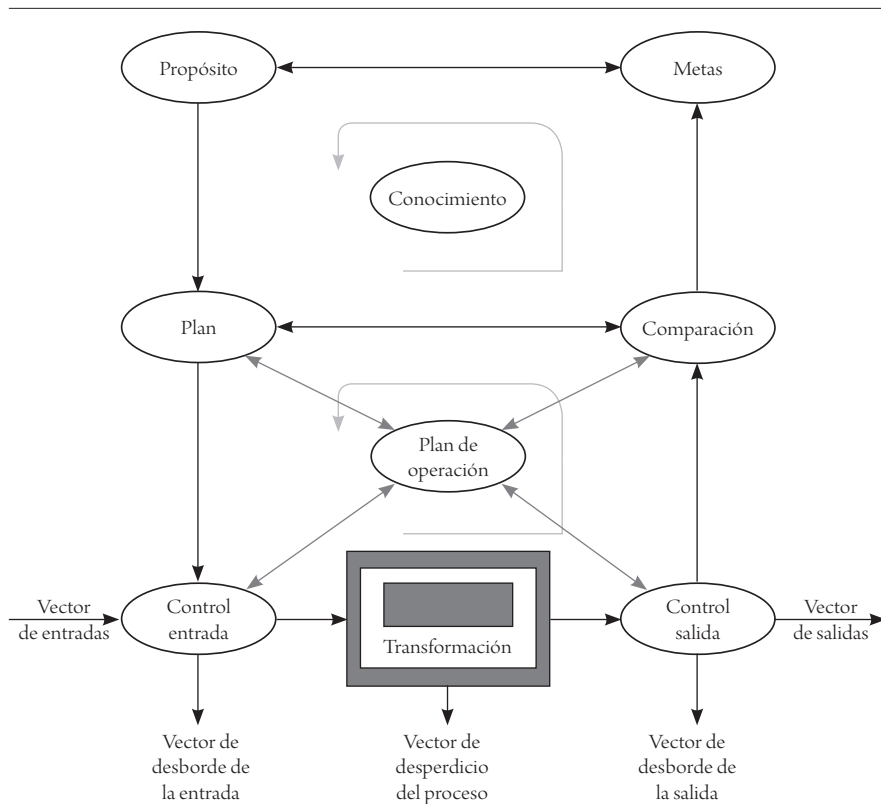


Figura 2. Circuito de realimentación de primer orden

Fuente: Nova (2011).

Elementos del circuito de primer orden

Componentes del modelo de cibernética de primer orden en el primer nivel

Los elementos o las partes de un modelo de cibernética de primer orden en el primer nivel se presentan y se describen en la figura 3.

- *Vector de insumos o entradas:* flecha continua que representa los insumos para la operación del sistema.
- *Nodo o control de entrada:* se elige sobre la capacidad y posibilidad de entrada de los recursos, en función de la información disponible.

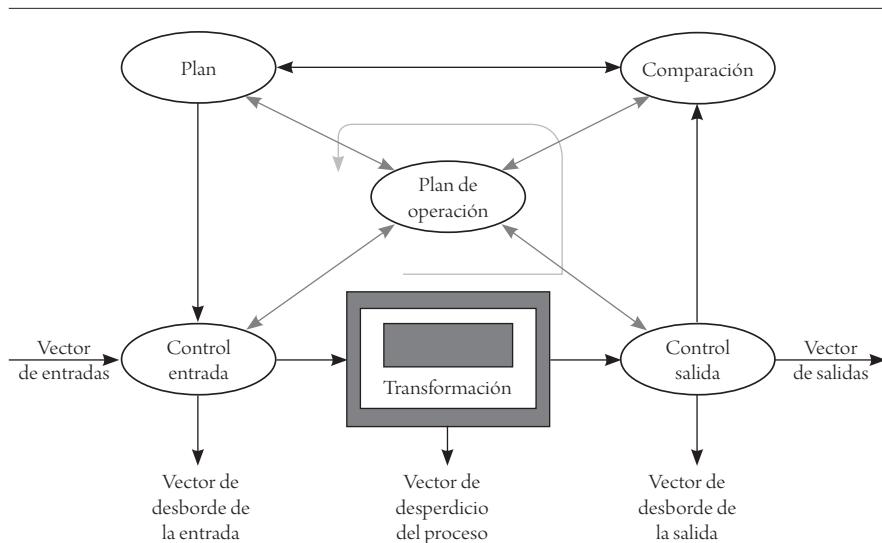


Figura 3. Circuito de realimentación de primer orden en el primer nivel

Fuente: Nova (2011).

- *Vector de paso de entrada*: identifica los recursos que efectivamente ingresan al sistema.
- *Vector de desborde de la entrada*: identifica los recursos que efectivamente no entran al sistema.
- *Función de operación o transformación*: caja gris enfocada en los elementos y procesos que se transforman, se almacenan y permanecen dentro el sistema.
- *Vector de desperdicio del proceso*: identifica todos los tipos de recursos que se pierden en la ejecución del proceso.
- *Nodo de control de salida*: es el decisor que permite la salida al entorno de los factores productivos ya transformados o de los productos finales deseados, así como de los desechos y de la información asociada a estos flujos.
- *Vector de paso de salida*: hace referencia a los productos deseados del proceso.
- *Vector de desborde de la salida*: hace referencia a todos los elementos que se pierden en función del controlador de salida.

- *Vector de salida*: corresponde al flujo de los elementos deseados y entregados de forma efectiva al entorno.
- *Vector de monitoreo*: vector que principalmente lleva información asociada al vector de salida.
- *Nodo de comparación*: nodo que compara la información disponible de la salida con la información disponible del plan de acción.
- *Vector de planeación y comparación*: canal de información, típicamente de doble vía, que transmite hacia el nodo de comparación la información disponible en el nodo de planeación.
- *Nodo del plan*: describe la asociación de recursos requeridos para la operación, compara la información asignada al plan diario de operación y la información obtenida del nodo de control de entrada.
- *Vector de planeación y entrada*: vínculo del nodo del plan con el control de entradas.
- *Nodo del plan de operación*: nodo que dispone de la información necesaria y útil para indicar cómo hacer las transformaciones.

Componentes del modelo de cibernética de primer orden en el segundo nivel

Los elementos o partes constitutivas de un modelo de cibernética de primer orden en el segundo nivel se presentan y se describen en la figura 4.

- *Nodo de metas*: nodo que desagrega la información asociada al propósito del sistema.
- *Nodo de propósito*: contiene el propósito operante del sistema y se conecta directamente al nodo de metas, al nodo de planeación y al nodo de conocimiento principalmente.

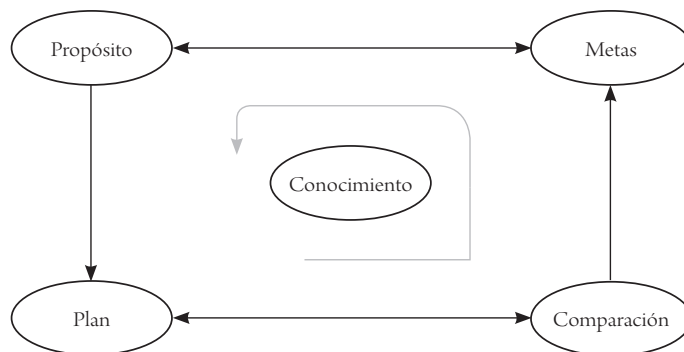


Figura 4. Circuito de realimentación de primer orden en el segundo nivel

Fuente: Nova (2011).

- *Nodo de conocimiento*: describe de forma genérica la información y capacidad actual con el que cuenta el sistema. Se entiende por *capacidad* la habilidad para coordinar las acciones y que los sucesos tengan relación causal con el conocimiento.
- *Arcos conectores*: múltiples arcos se usan para describir el ciclo o los ciclos de realimentación existentes; sin embargo, un arco muy útil y especial es que se da entre el nodo de comparación y el nodo del plan.

Elementos del circuito de realimentación de segundo orden

El ciclo de segundo orden es el control del control. Vincula el ciclo del conocimiento al ciclo de la operación, con lo cual se forma un nuevo circuito. Este ciclo de segundo orden se compone de los siguientes elementos:

- *Ciclo de realimentación de primer orden en el primer nivel*: incluye todos los elementos del piso 1 y 2. Con este se cumple el principio básico de la cibernética: las entradas están afectadas por la salida.
- *Ciclo de realimentación de primer orden en el segundo nivel o realimentación de la gestión*: este ciclo se comporta como cualquier otro ciclo de realimentación de primer orden; cualquier nodo que se tome como la entrada es afectado por el respectivo nodo considerado como la salida. Los nodos componentes son los propósitos, la meta, el plan y los criterios.

- *Ciclo de realimentación de segundo orden:* corresponde a la cibernética de segundo orden. La cibernética de primer orden identifica el efecto de las salidas en las entradas, en tanto la cibernética de segundo orden identifica el efecto del observador. En esta situación, el observador se define en función de los propósitos, las metas, los planes y el conocimiento que este tiene para ejecutar la labor, así como de los criterios de comparación. Por lo tanto, el circuito de segundo orden incluye parte del circuito de primer orden primer nivel y parte del circuito de primer orden de segundo nivel. La secuencia es esta: nodo de control de entrada, operaciones, transformación, salida; nodo de comparación, de plan, de propósitos, de metas y de plan, y por último se llega al inicio, que es el nodo de control de entradas.

Elementos del circuito de realimentación de tercer orden

La cibernética de tercer orden incluye un nodo: el de los supuestos o las sentencias axiológicas que se presuponen funcionales para la operación del sistema. Este nodo se puede separar en dos componentes: los supuestos declarados y los supuestos usados. Los supuestos declarados indican las señales emitidas al exterior por el sistema; los supuestos usados indican el fundamento de la fijación de características del sistema. De acuerdo con lo anterior, el circuito de primer orden que se incluye es supuestos, propósito, metas y supuestos.

Operación del circuito de primer orden en el TPS

A continuación se hace una descripción de los componentes del modelo de cibernética de primer orden para el TPS. Este modelo usa el supuesto de la existencia de competencia perfecta, y allí el mercado es el intercambio de objetos por créditos monetarios. El mercado perfecto asume cuatro premisas en este intercambio: a) el bien está totalmente definido, es uniforme y no distinguible, b) ningún proveedor solo afecta el precio, c) ningún cliente solo afecta el precio y d) todos disponen de la información de disponibilidad y precio del bien definido.

Según lo anterior, el propósito del TPS sería la minimización de los costos de producción. En términos de los programas lineales de optimización usados en economía y administración industrial, la maximización de la función industrial de la utilidad económica se reduce a obtener la función de mínimo costo. Esto es

así ya que si se cumple el supuesto del mercado perfecto, el productor no define ni la cantidad que habrá de venderse ni el precio específico. Este dato es tan solo tomado por el productor como fruto de los supuestos del mercado.

En el nodo de metas se asume la búsqueda del sistema en función de disminuir cualquier tipo de costos en gastos, máquinas, materiales, infraestructura, mano de obra, métodos, etc. Lo anterior conlleva como consecuencia que se busca la variación en cada uno de los ítems iguales a cero, esto es, el TPS busca no tener variaciones que no puedan acoplarse en el sistema. En el caso de que ocurra alguna diferencia entre el valor esperado y el valor observado, se recurre al plan. En el nodo del plan se tienen cuatro elementos: *poka yoke*, justo a tiempo, despliegue de la función de calidad (QFD) y mantenimiento preventivo. Estos elementos tienen como objetivo corregir cualquier tipo de variación en el sistema, de forma que estas sean igual a cero. Debido a lo anterior, habría *poka yoke* para cada uno de los factores productivos que se tienen en cuenta en la organización.

Los supuestos del TPS hacen que el sistema sea diseñado para no permitir ningún tipo de desperdicio, y si este existe, para contar con la flexibilidad necesaria que permita corregir esta situación. Por esto, encontramos en el vector de entrada SMED la polivalencia y la estandarización. En el TPS se cuenta con procesos a la vez altamente estandarizados y muy flexibles.

Kanban, diseñado como un sistema de gestión de las existencias, se utiliza para marcar los ritmos en el sistema productivo e identificar las especificaciones, sus tolerancias y la clasificación de los diversos elementos que entran al sistema. El TPS utiliza el análisis de valor y la función de pérdida de Taguchi. Finalmente, en el vector de salida se encuentran los productos resultantes del sistema, realizados en las cantidades correctas, de la mejor calidad posible y al menor costo.

Estos resultados son verificados en el nodo de criterios por medio de una contabilidad ABC y un análisis de desperdicios. De encontrarse diferencias entre los resultados del proceso y las metas de cero desperdicios, el sistema realiza los ajustes necesarios por medio del nodo de planeación. Además, se analiza por separado cada uno de los circuitos de realimentación de primer orden en sus respectivos niveles³ (figura 5).

3 Para una descripción mas detallada de los diversos componentes, se recomiendan los trabajos de Ohno (1988), Monden (2012) y Shingo (1990).

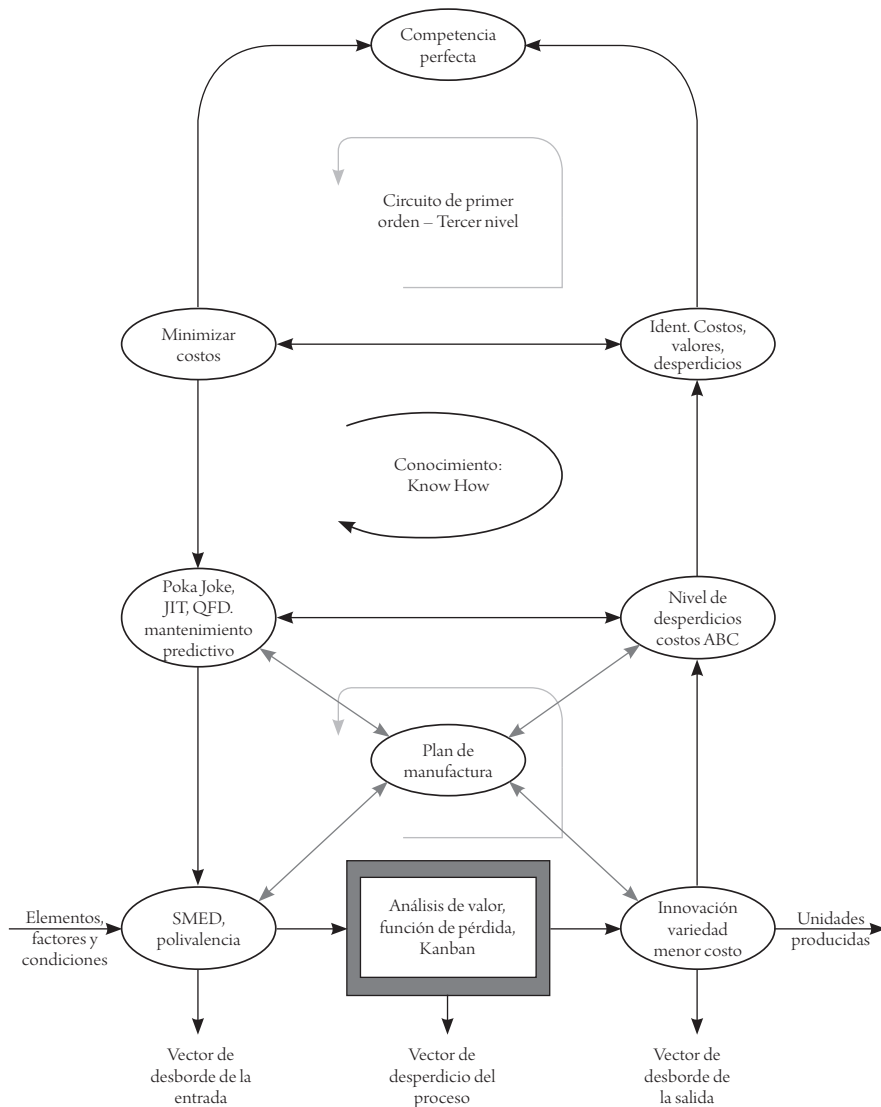


Figura 5. Circuito de realimentación de segundo orden para el TPS

Fuente: elaboración propia.

Componentes del modelo de cibernética de primer orden en el primer nivel

- *Vector de insumos o entradas:* representa los elementos necesarios para que exista un proceso de flujo continuo y sin desperdicios.

- *Nodo o control de entrada*: hace referencia al conjunto de elementos utilizados por los ingenieros para la gestión de la producción, como *poka yoke*, SMED, polivalencia.
- *Vector de paso de entrada*: corresponde a los elementos, los factores y las condiciones seleccionadas para ser usadas en el proceso de control a través del TPS.
- *Vector de desborde de la entrada*: representa el conjunto de elementos, factores y condiciones no deseables o poco eficientes y eficaces; por tanto, son descartadas en el TPS
- *Función de operación o transformación*: está representada por el proceso de transformación que se realiza en el sistema, mediante el cual los empleados realizan sus actividades productivas, pero a la vez generan, almacenan y retienen el conocimiento, con lo cual adquieren mayores capacidades y conocimiento. En este elemento se utilizan herramientas tales como análisis de valor, QFD, función de pérdida, *kanban*.
- *Vector de desperdicio del proceso*: corresponde a las prácticas no incorporadas en el TPS, por no agregar valor al producto.
- *Vector de paso de salida*: corresponde a los elementos del proceso productivo, los cuales serán evaluados por los miembros del equipo para tener en cuenta en su actividad.
- *Nodo de control de salida*: corresponde a los resultados esperados al utilizar el sistema de producción: innovación, variedad, menor costo, mercado global.
- *Vector de desborde de la salida*: corresponde a las partes del proceso que no adquirieron los conocimientos necesarios y requeridos para lograr los objetivos del TPS.
- *Vector de salida*: corresponde a las unidades producidas que finalizaron el proceso con un resultado satisfactorio.
- *Vector de monitoreo*: el vector de monitoreo lleva información del resultado de la actividad productiva en el proceso hacia el nodo de evaluación. Por lo general,

esta información se actualiza de forma constante, dado que es un monitor que aporta información del impacto del sistema en los productos generados.

- *Nodo de comparación:* corresponde a las evaluaciones realizadas para identificar el nivel de cumplimiento del sistema, los cuales reciben la información de los resultados esperados del uso del TPS y la comparan con las metas definidas por el sistema. Los criterios de comparación son el nivel de desperdicios y los costos ABC.
- *Vector de planeación y comparación:* corresponde a una autopista de información entre las estrategias por utilizar y los criterios de evaluación.
- *Nodo del plan:* el nodo corresponde a las estrategias por utilizar; al definir el uso del TPS, se decide utilizar JIT y mantenimiento predictivo para la planeación de la operación.
- *Vector de planeación y entrada:* permite la transmisión de información bidireccional entre el plan de producción y las entradas del sistema.
- *Nodo del plan de operación:* este nodo es administrado por cada uno de los miembros del equipo que se encuentran en el proceso productivo; es utilizado para obtener los mejores resultados del proceso y asegurar el menor nivel de desperdicio posible. Para ello utiliza información de las entradas del proceso, productos obtenidos, cumplimiento de los criterios y sistema de planeación utilizado.

Componentes del modelo de cibernética de primer orden en el segundo nivel

Los elementos o las partes constitutivas de un modelo de cibernética de primer orden en el segundo nivel se presentan y se describen en la figura 6.

- *Propósito:* el TPS busca la reducción de los costos del proceso productivo; para ello, se enfoca en la eliminación de cualquier tipo de desperdicio del sistema. Se entiende por *eliminación del desperdicio* la supresión de todos los factores que no agregan valor al producto o servicio, ya sea en las partes, la mano de obra o el proceso de producción.

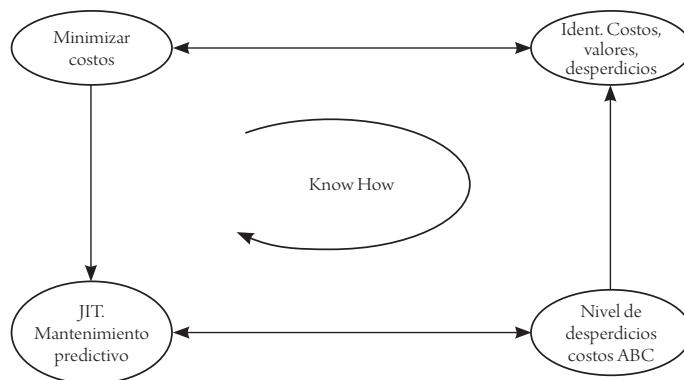


Figura 6. Circuito de cibernética de Primer orden en el segundo nivel para el TPS

Fuente: elaboración propia.

- *Meta:* para lograr la eliminación de los desperdicios, el sistema TPS se apoya en la mejora de la calidad, la productividad, la seguridad y la moral de los empleados. Para ello, analiza los objetivos del proceso productivo junto con sus resultados, a fin de identificar los costos, valores y desperdicios del proceso productivo.
- *Ciclo de conocimiento:* describe la capacidad que tienen las personas que diseñaron el sistema productivo para coordinar acciones que les permitan mantener e incrementar el nivel de compromiso hacia el sistema productivo, con lo cual se genera una minimización de los costos en forma continua.
- *Arcos conectores:* los sistemas productivos pueden involucran más arcos conectores entre los diferentes modos y el propósito y el nodo de planeación de operaciones y conocimiento. Ello depende de los diferentes elementos y estrategias de comunicación empleadas para realizar el proceso productivo.

Conclusiones

La ausencia de un sistema que permita la comprensión y relación entre los diferentes elementos del TPS hace que la aplicación de estos sea limitada, por lo cual se logran solo ciertas condiciones en el proceso. La interrelación a través de la utilización circuitos de cibernética permite comprender cómo el TPS logra realizar,

comunicar y encontrar la forma de llevar disciplinadamente un proceso productivo, con creatividad y flexibilidad. El uso efectivo de las distintas herramientas redundará no solo en una búsqueda de los desperdicios puntuales de una organización, sino también en una minimización de los costos globales y, por ende, una mayor competitividad de la compañía.

El uso de la cibernética de segundo orden para el análisis de sistemas productivo utiliza procedimientos y técnicas científicas para el estudio y la operación de organizaciones. El uso de la cibernética, entonces, facilita el proceso de diseño, ya que a partir de la definición del propósito del sistema productivo: *minimizar los costos*, se definen las metas, su proceso de evaluación y los diferentes indicadores, a la vez que se identifica el sesgo asociado al observador.

El modelo propuesto para el análisis del TPS presenta tres ciclos de realimentación de primer orden en tres niveles, lo que proporciona un sistema de control en el cual se evalúa el conocimiento desde perspectivas axiológicas, epistemológicas y ontológicas.

Finalmente, la identificación de las distintas herramientas, elementos y métodos utilizados en el TPS, así como su interrelación, brinda la oportunidad para que los ingenieros detecten las falencias, dificultades y posibilidades existentes en función de mejorar los sistemas productivo. De esta forma, puede lograr una reducción de los costos y favorecer flujo de información entre los diferentes niveles del sistema.

Referencias

- Ashby, R. (1957). *An introduction to cybernetics*. Londres: William Clowes And Sons.
- Beer, S. (1964). *Cybernetics and management*. Chichester, Reino Unido: John Wiley & Sons.
- Forrester, J. (1981). *Dinámica de sistemas*. Buenos Aires: Ateneo.
- Francis Heylighen, C. J. (2001). Cybernetics and second-order cybernetics. En *Encyclopedia of physical science & technology*. Nueva York: Academic Press.
- Golhar D., S. C. (1991). The just in time philosophy: a literature review. *International journal of Production Research*, 2(1), 657-696.
- Jorgenson, K. M. (1987). Japan-U.S. industry-level productivity comparisons, 1960-1979. *Journal of the Japanese and International Economies*, 1(1), 1-30.

- Kubiak, W. (1993). Minimizing variation of production rates in just-in-time systems: A survey. *European Journal of Operational Research*, 66(3), 259-271.
- Lander, J. L. (2007). The Toyota production system and art: making highly customized and creative products the Toyota way. Recuperado de <http://wenku.baidu.com/view/75366423af45b307e8719765>
- Maruyama, M. (1963). The second cybernetics: deviation-amplifying mutual causal processes. *American Scientist*, 57(2), 164-179.
- McLachlin, R. (1997). Management initiatives and just-in-time manufacturing. *Journal of Operations Management*, 15, 271-292.
- Monden, Y. (2012). *Toyota Production System. An integrated approach to Just In Time*. Boca Raton, Estados Unidos: CRC Press.
- Morgan, J. y Liker, J. (2006). *The Toyota product development system*. Nueva York: Productivity Press.
- Nova, P. W. (1965). *Cybernetics or control and communication in the animal and the machine*. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press.
- Nova, P. W. (2011). *Cibernética de tercer orden y su aplicación a la telefonía móvil*. Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Ohno, T. (1988). *Toyota Production System: Beyond large scale production*. Nueva York: Productivity Press.
- Pakman, M. (1996). *Las semillas de la cibernética*. Barcelona: Gedisa.
- Robb, F. (1984). Cybernetics in management thinking. *Systems Research*, 1(1), 5-23.
- Shingo, S. (1986). *Zero quality control: source inspection and the Poka-Yoke System*. Nueva York: Productivity Press.
- Shingo, S. (1990). *The Shingo production management system. Improving process functions*. Tokio: Productivity Press.
- Shy, O. (1996). *Industrial organization: theory and applications*. Boston: The MIT Press.
- Shy, O. (2001). *Industrial Organization: Theory and Applications*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Skyttner, L. (2001). *General systems theory*. Gavle, Sweden: World Scientific.
- Spear, K. B. (1999). Decoding the DNA of the Toyota Production System. *Harvar Business Review*, 77(5), 96-106.
- Torres, J. (1994). *Elementos de producción, planeación, programación y control*. Bogotá: Universidad Católica de Colombia.
- Toyota (s. f.). The origin of the Toyota Production System. Recuperado de www.toyota-global.com/company/vision_philosophy/toyota_production_system/origin_of_the_toyota_production_system.html

- Vidgen, R. (1998). Cybernetics and business processes: using the viable system model to develop an enterprise process architecture. *Knowledge and Process Management*, 5(2), 118-131.
- Wiener, N. (1961). *Cybernetics or control and communication in the animal and the machine*. Massachusets: The MIT Press.
- Womack, D. J. (1996). Beyond Toyota: How to root out waste and pursue perfection. Recuperado de <https://hbr.org/1996/09/how-to-root-out-waste-and-pursue-perfection>
- Yolles, M. (2006). *Organization as complex system an introduction to knowledge cybernetics*. Nueva York: Information Age Publishing.
- Zangwill, K. P. (1998). Toward a theory of continuous improvement and the learning curve. *Managemet Science*, 44(7), 910-920.

La ventaja de la motocicleta en su velocidad media de recorrido

CARLOS FELIPE URAZÁN BONELLS¹

EDDER ALEXÁNDER VELANDIA DURÁN²

GERMÁN ALFONSO PRIETO RODRÍGUEZ³

RESUMEN

Los crecientes tiempos de viaje en Bogotá, producto de un incremento poblacional significativo y mayores facilidades financieras en la adquisición de automóviles y motocicletas, han complicado paulatinamente los niveles de servicio de tránsito en la ciudad. Este hecho invita a la población a considerar, en cada caso particular, el modo de transporte urbano que represente la mejor velocidad de recorrido, de acuerdo con el día, la hora, la zona urbana de origen y destino, la longitud del trayecto, el requerimiento de velocidad por exigencia laboral y la disponibilidad del medio de transporte. En función de lo anterior, la motocicleta resulta el modo con mayor velocidad, seguido por el automóvil y la bicicleta. En otro grupo con velocidades promedio de recorrido menores a 15 km/h están el transporte público colectivo (TPC), el sistema de transporte urbano (BRT) y el modo a pie. A medida que aumenta la distancia de recorrido, la motocicleta y el automóvil mejoran el tiempo de desplazamiento, gracias a mayores velocidades de marcha. La velocidad de recorrido de la motocicleta alcanza valores de 43 km/h en hora valle para recorridos entre 5 y 10 km de longitud, y los valores globales indican que su velocidad es 1,3 veces la del automóvil.

Palabras clave: modos de transporte, motocicleta, velocidad de recorrido, movilidad en Bogotá.

¹ Doctor en Infraestructura del Transporte y del Territorio por la Universidad Politécnica de Cataluña, Cataluña, España. Especialista en Administración de Obras de Construcción e ingeniero civil por la Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta, Colombia. Actualmente se desempeña como docente de la Universidad de La Salle, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: caurazan@unisalle.edu.co

² Magíster en Ingeniería Industrial por la Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. Ingeniero civil por la Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta, Colombia. Actualmente se desempeña como docente de la Universidad de La Salle, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: evelandiad@unisalle.edu.co

³ Magíster en Ingeniería Civil por la Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. Especialista en Finanzas por la Universidad del Rosario, Bogotá, Colombia. Ingeniero civil por la Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. Actualmente se desempeña como docente de la Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Colombia. Correo electrónico: german.prieto@utadeo.edu.co

FECHA DE RECEPCIÓN: 18 DE MARZO DEL 2014 • FECHA DE APROBACIÓN: 4 DE OCTUBRE DEL 2014

Cómo citar este artículo: Urazán Bonells, C. F., Velandia Durán, E. A. y Prieto Rodríguez, G. A. (2015). La ventaja de la motocicleta en su velocidad media de recorrido. *Épsilon*, 24, 197-214.

The Advantage of the Motorcycle in its Average Travel Speed

ABSTRACT

The increasing travel times in Bogotá, resulting from a significant population increase and greater financial facilities for the acquisition of cars and motorcycles, has gradually complicated traffic in the city. This fact encourages the public to consider, in each particular case, the mode of urban transport that represents the best travel speed, based on the day, time, the urban area of origin and destination, the path length, the speed requirement due to work demand and the availability of means of transport. Depending on the above, the motorcycle is the fastest method, followed by the car and bicycle. In another group with average travel speeds under 15 km/h, we find collective public transport (CPT), the bus rapid transit (BRT) system and on foot. As travel distance increases, the motorcycle and car improve travel time, due to a higher driving speed. The motorcycle's travel speed reaches 43 km/h during off-peak hours for travels between 5 and 10 km in length and global values indicate that its speed is 1.3 times that of the car.

Keywords: transport modes, motorcycle, travel speed, mobility in Bogotá.

A vantagem da motocicleta em sua velocidade média de percurso

RESUMO

Os crescentes tempos de viagem em Bogotá, produto de um aumento significativo da população, e as maiores facilidades financeiras na aquisição de automóveis e motocicletas, têm complicado paulatinamente o trânsito na cidade. Este fato convida a população a considerar, em cada caso particular, o modo de transporte urbano que represente a melhor velocidade de percurso, de acordo com o dia, a hora, a zona urbana de origem e destino, a longitude do trajeto, o requerimento de velocidade por exigência no trabalho e a disponibilidade do meio de transporte. Em função do anteriormente dito, a motocicleta resulta o modo com maior velocidade, seguido pelo automóvel e a bicicleta. Em outro grupo com velocidades médias de percursos inferiores a 15 km/h estão o transporte público coletivo (TPC), o sistema de transporte urbano (BRT) e a modalidade a pé. Na medida em que aumenta a distância de percurso, a motocicleta e o automóvel melhoram o tempo de deslocamento, devido às maiores velocidades de marcha. A velocidade de percurso da motocicleta atinge valores de 43 km/h em horário pico para percursos entre 5 e 10 km de longitude, e os valores globais indicam que sua velocidade é 1,3 vezes a do automóvel.

Palavras chave: modos de transporte, motocicleta, velocidade de percurso, mobilidade em Bogotá.

La motocicleta como modo de transporte en Bogotá

Bogotá es la ciudad más grande de Colombia y es el epicentro político, administrativo, jurídico y económico del país. Se localiza hacia el interior del territorio colombiano, en la cordillera Oriental de los Andes, a una altitud de 2600 metros sobre el nivel del mar. En términos geográficos, la mayor parte del área urbana posee una topografía plana, aun cuando existen algunas zonas, principalmente al oriente y el sur, con variaciones topográficas importantes propias del relieve andino.

En su área urbana se estima que reside el 18% de la población del país (cerca de 8 millones de habitantes). Los censos señalaron que el crecimiento demográfico ha sido continuo durante las últimas tres décadas, con una tasa del 2,7% promedio ponderado anual. Esto cifra representa un crecimiento demográfico superior a la tasa de crecimiento nacional y similar al registrado en algunos de los municipios vecinos. La distribución demográfica por edades de Bogotá señaló que su población menor a 14 años representa el 25,2%; entre 15 y 64 años, el 68,7%, y mayor a 65 años, el 6,1% (Departamento Administrativo Nacional de Estadística [DANE], 2007).

Una consecuencia del crecimiento poblacional ha sido la expansión urbana. Entre 1973 y 2010, la ciudad creció casi tres veces; hoy la ciudad posee un área urbana estimada en 385 km² (Secretaría Distrital de Planeación [SDP], 2011). Esa expansión de la mancha urbana ha aumentado los tiempos de viaje. Según el Observatorio de Movilidad de la Cámara de Comercio de Bogotá (CCB, 2014), entre 2009 y 2013 el tiempo medio de viaje en sistema masivo de transporte (BRT, por sus siglas en inglés) —que para la ciudad es Transmilenio— ha aumentado de 27 a 37 minutos en servicio alimentador, ha descendido levemente de 53 a 51 minutos en servicio troncal y ha aumentado de 57 a 64 minutos en servicio de transporte público colectivo (TPC).

En el caso del automóvil o vehículo particular, el mismo Observatorio relaciona un aumento en tiempo de viaje: pasa de 34 a 39 minutos entre 2009 y 2013 (incluyendo un pico de 44 minutos en 2011). Para el modo de transporte que más nos atañe en el presente escrito, la motocicleta, en el mismo periodo se registra un aumento de 26 a 34 minutos como tiempo medio de viaje en Bogotá.

En el 2012, la Secretaría Distrital de Movilidad (SDM) presentó los resultados de la encuesta de movilidad 2011. A diferencia de la encuesta realizada en el 2005, que solo consideró viajes a pie cuando el tiempo de desplazamiento superaba 15

minutos, la nueva encuesta incluyó los viajes a pie mayores a 3 minutos y la articulación con los municipios vecinos. A partir de esta consideración se determinó que en un día hábil se desarrollan 17,6 millones de viajes en Bogotá.

En cuanto a la participación modal, la caminata fue la opción más representativa, con el 46% de los viajes; el transporte público participó con el 30% (20% el transporte colectivo, 9% Transmilenio y 1% el transporte intermunicipal); el automóvil privado representó el 10% de los viajes; la bicicleta, el 3%; la motocicleta, el 2%, y el taxi, el 4%. Para los sábados se estimó que el número de viajes fue de 14 millones. En la figura 1 se muestra la participación modal para un día laboral identificada en Bogotá, incluyendo los viajes regionales (SDM, 2011).

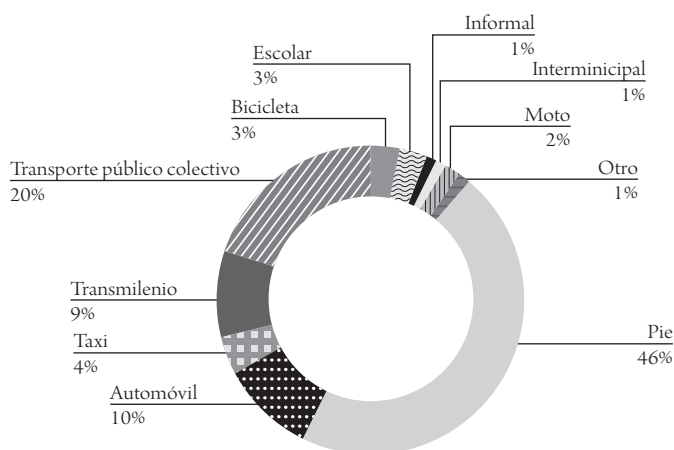


Figura 1. Distribución modal de los viajes en Bogotá/región para el 2011

Fuente: SDM (2011).

Como se muestra, el transporte colectivo y masivo son las opciones de transporte motorizado más empleados por la población. Aun cuando este hecho es positivo en términos generales, debe señalarse que los usuarios del transporte colectivo y masivo son los principales interesados en migrar a otras opciones de transporte, como el automóvil y, especialmente, la motocicleta.

Contrario a lo esperado, la oferta de transporte masivo y la política local de movilidad no han arrojado resultados eficaces para desestimular el uso del automóvil. En la ciudad, el parque vehicular se incrementó 1,53 veces durante el periodo 2007-2012 (figura 2); para el 2012, cerca de 1,3 millones de vehículos conforma-

ban la flota vehicular urbana (Observatorio Ambiental de Bogotá, 2013). Desde este escenario, el nivel de motorización de Bogotá se aproxima a 163 automóviles por cada 1000 habitantes, cifra baja respecto a las tasas registradas en ciudades norteamericanas, pero que ha derivado en saturación vial, aumento de la demanda de energía, deterioro de la infraestructura vial e incremento de las emisiones contaminantes y la accidentalidad.

El incremento del ingreso per cápita entre la población bogotana, la proximidad del producto a más hogares en términos de financiamiento y oferta de vehículos de bajo costo, las deficiencias en la prestación del transporte colectivo y masivo, el posicionamiento mediático del vehículo en el contexto distrital, las percepciones de bienestar de la población e incluso las medidas de restricción a la circulación (como el “pico y placa”) son algunas situaciones que contribuyeron al aumento de la flota de vehículos privados en Bogotá.

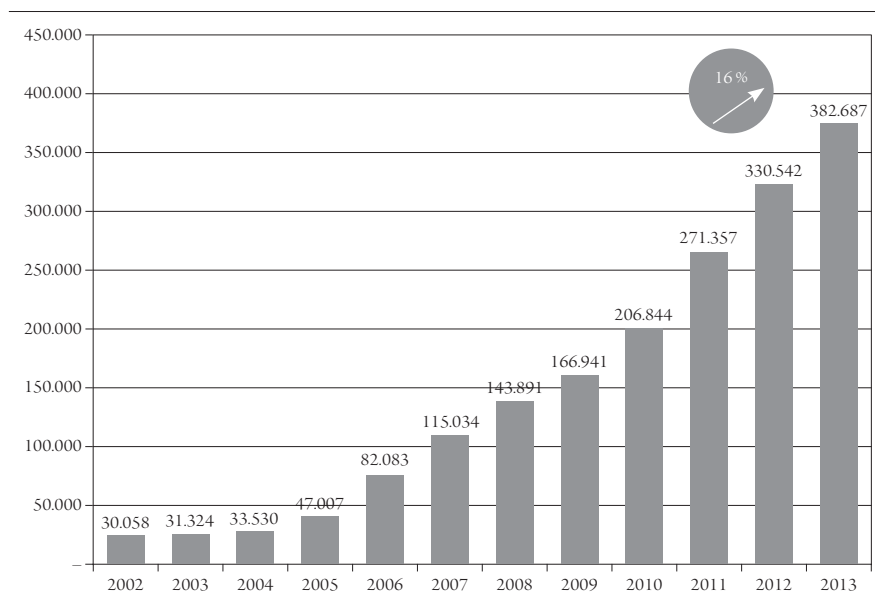


Figura 2. Número de motocicletas en Bogotá

Fuente: CCB (2014).

En ese crecimiento del parque vehicular, la motocicleta es la opción que mayor crecimiento de la flota ha registrado en lo corrido de la presente década: tuvo una tasa de crecimiento promedio anual de 22 %, frente a un 8 % para el automóvil (figura 2). Este modo de transporte aumentó en más de 10 veces entre el 2002 y el

2013: pasó de 30.058 a 382.687 unidades. Para el 2012, el parque de motocicletas matriculadas en la ciudad fue de 328.078 unidades (CCB, 2014).

Algunas causas del crecimiento de la participación de la motocicleta fueron la entrada de nuevas marcas de motos nacionales e importadas que incentivar una reducción de precios, el aumento de las facilidades de adquisición para un mayor grupo de ciudadanos, el desarrollo de una percepción de bienestar y rapidez a un bajo costo, el crecimiento de trabajos formales e informales que requieren la moto como medio de trabajo, el aumento de los precios de los pasajes, las limitaciones de calidad del servicio en el transporte público y el imaginario colectivo de que la motocicleta es un mejor modo de transporte que la bicicleta en términos de velocidad y estatus.

Con relación a la distribución de la propiedad de los vehículos, se encontró que la población propietaria de las motocicletas se concentró en los estratos 1, 2 y 3 (SDM, 2011). La figura 3 muestra la participación porcentual de propiedad de los vehículos según el estrato.

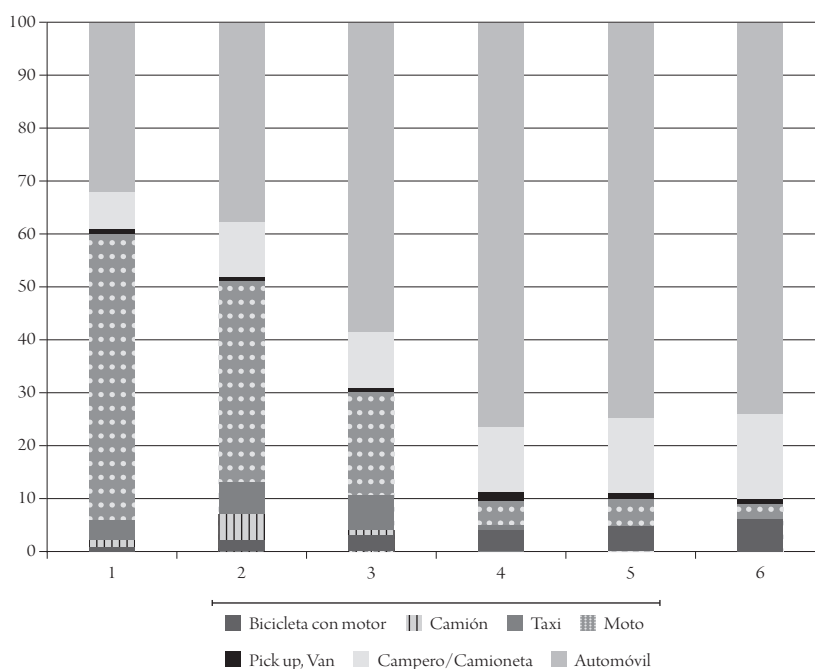


Figura 3. Distribución porcentual del tipo de vehículo por estrato socioeconómico

Fuente: SDM (2011).

En Colombia, la industria de la motocicleta y los negocios afines representan un sector en crecimiento. La industria nacional se destaca en Latinoamérica y ocupa el segundo puesto en producción de motocicletas después de Brasil. En el 2007, esta industria reportó cerca de 3800 plazas en este sector productivo. Estudios realizados por el DANE señalaron que los motociclistas en Colombia son en su mayoría hombres casados y con estudios secundarios. Por su parte, uno de cada cinco compradores es mujer. El nivel de escolaridad predominante en los propietarios de las motocicletas es secundaria (44%), seguido de estudios profesionales (23%).

Para el 2012 se estimó un índice de 38 motos por cada 1000 habitantes. Esta cifra permite establecer que el número de motocicletas en Bogotá no es significativo; incluso otras ciudades colombianas como Medellín y Sincelejo tienen un mayor número de motos por cada 1000 habitantes. De igual manera, el indicador es inferior a los registrados en algunas ciudades asiáticas, región que en el mundo se destaca por la producción y venta de motocicletas. No obstante, como lo señalan Acevedo *et al.* (2009), en el largo plazo el número de motocicletas en el país será superior al número de automóviles, y Bogotá será una ciudad que aportará en este crecimiento (tabla 1).

Tabla 1. Proyección de parque automotor en Colombia, 2010- 2040*

| AÑO | 2015 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 |
|--------------------|------|------|------|------|------|------|
| Población del país | 48,2 | 50,9 | 59,6 | 56,3 | 59,0 | 61,7 |
| Número de carros | 3,7 | 4,6 | 5,9 | 7,3 | 8,8 | 10,4 |
| Número de motos | 4,0 | 5,9 | 7,8 | 9,4 | 11,3 | 12,9 |

*Cifras en millones.

Fuente: Acevedo *et al.* (2009)

En términos económicos, la moto es viable para un usuario que realice más de tres viajes diarios en transporte masivo. Esta situación es muy usual en familias bogotanas o entre los ciudadanos jóvenes, si se tiene en cuenta que este último es un segmento de la población que realiza varios viajes al día (estudio, trabajo, ocio). Por su bajo costo y versatilidad, la motocicleta es ideal para algunas actividades laborales como la mensajería, los servicios a domicilio y la atención comercial a clientes. A estos beneficios se adiciona el hecho de que los usuarios se vuelvan propietarios del vehículo luego de dos o tres años de uso.

Un estudio realizado por Velandia, Urazán y Prieto (2010), en una muestra de 247 motociclistas bogotanos, encontró que cerca de la mitad de los motociclistas poseen hasta estudios de secundaria, los usuarios son especialmente hombres entre 26 y 40 años, el 77% de ellos provienen del transporte público, el 54% aprendió a conducirla antes de los 20 años y el 51% no conoce el Código Nacional de Tránsito.

Entre las personas encuestadas se encontró que el 53% de los usuarios viven en sectores de estrato 3, y un 33%, en el estrato 2. Se encontró además que el 84% de las motocicletas son propias, y el 24% de ellas pertenecen a la empresa. El 22% de los motociclistas señaló que posee un automóvil y que utiliza la moto como una opción durante los días de restricción (“pico y placa”).

Entre los encuestados se encontró que antes de utilizar la motocicleta, un 50% se movilizaba en bus, un 27% utilizada Transmilenio, un 18% lo hacía en vehículo particular y solo un 4% utilizaba la bicicleta. Por último, se encontró que el 41% emplea la motocicleta como medio de trabajo, y un 29% lo hace para desplazarse hogar-trabajo-hogar.

Antecedentes de estudios comparativos de velocidad de recorrido en modos de transporte

Diversos estudios han comparado la velocidad de recorrido en diferentes modos de transporte. Entre ellos, un estudio realizado por Martín (2007) en la ciudad de Barcelona, España, no incluye a la motocicleta en el análisis y estima que la velocidad media de la bicicleta en día laboral es de 11,4 km/h, igual a la del metro (considerando las caminatas a las estaciones y esperas asociadas), mientras que el modo a pie tiene velocidad de 4,5 km/h. Finalmente, el estudio sugiere que para recorridos que no superen los 450 m o 6 min de caminata, lo ideal es el modo a pie. Si el recorrido tarda entre 6 y 45 min, se recomienda la bicicleta en días laborales, y en días festivos admite para este modo hasta 55 minutos. Cuando se superan los tiempos mencionados, se recomienda hacer uso del transporte público.

Por otro lado, y recurriendo al caso Bogotá, en el 2011 la Universidad de los Andes realizó una carrera de modos con mediciones comparativas de velocidad. De ello resultó que la bicicleta logró mejor velocidad respecto al automóvil, el BRT y el TPC, cuyas velocidades fueron de 21,43 km/h, 15,57 km/h, 15,31 km/h y 13,37

km/h, respectivamente. En otro estudio, la revista *Semana* (2009) registró los resultados de una comparación de velocidad de recorrido entre modos. La conclusión es que la bicicleta tuvo 19 km/h; el BRT, 12 km/h, y el automóvil, 14 km/h.

Respecto al modo BRT, en el 2012 Transmilenio registra la velocidad promedio de la flota en 27 km/h. Otros informes, como el documento *Movilidad en bicicleta en Bogotá* (CCB, 2009), no reportan velocidad alguna para esa opción de transporte urbano.

En todos los estudios mencionados, referentes a la velocidad de recorrido comparada, la motocicleta no forma parte de los reportes. Ello permite interpretar claramente su papel relevante en la movilidad urbana como un modo que no se asemeja a otros como el automóvil, el TPC, el BRT o el modo a pie.

Otros artículos científicos respecto a la motocicleta hacen referencia principalmente a temas de seguridad vial, características de resistencia de cascos e impactos ambientales por emisiones de partículas contaminantes. Yung-Chen *et al.* (2009) exponen una velocidad promedio de 19 km/h para recorridos menores a 4 km y de 50 km/h para recorridos que superan los 10 km de longitud, aunque era un estudio para medición de mediciones, y no comparativo entre modos (Chang-Chuan *et al.*, 1995; Dang *et al.*, 2008; Albalade y Fernández, 2010; Costanzo *et al.*, 2002; Pai *et al.*, 2014).

Análisis comparado de velocidad de recorrido en distintos modos de transporte

En el 2014 culminó un estudio comparativo de velocidades de recorridos, realizado por Urazán, Medina y Linares (2014), para los siguientes modos de transporte: automóvil, motocicleta, bicicleta, TPC, BRT y modo a pie. El estudio se desarrolló por el método de vehículo flotante, apoyado en registro *track* por sistema de posicionamiento global (GPS) y discriminando los recorridos por longitud en rutas cortas (< 5km) (tabla 2) y rutas medias (entre 5 y 10 km) (tabla 3).

La Secretaría de Movilidad de Bogotá establece las horas de restricción pico y placa en la mañana de 6:00 a. m. a 8:30 a. m. y en la tarde de 3:00 p. m. a 7:30 p. m. Para el estudio solo se tendrá en cuenta la velocidad de recorrido tomada en días hábiles

Tabla 2. Recorridos por longitud en rutas cortas*

| RECORRIDO | LONGITUD (KM) | FRANJA HORARIA Y SENTIDO |
|---|---------------|--|
| Desde carrera 10 con calle 134 hasta Autopista Norte, estación Alcalá de Transmilenio Alcalá | 2,19 | Mañana: occidente a oriente Tarde: oriente a occidente Hora valle: oriente a occidente |
| Desde carrera 7 con calle 140 hasta carrera 7 con calle 116 | 2,66 | Mañana: norte a sur Tarde: sur a norte Hora valle: norte a sur |
| Desde carrera 7 con calle 94 hasta carrera 7 con calle 72 | 2,65 | Mañana: norte a sur Tarde: sur a norte Hora valle: norte a sur. |
| Dese carrera 7 con calle 140 hasta carrera 19 con calle 140 | 2,1 | Mañana: occidente a oriente Tarde: oriente a occidente Hora valle: oriente a occidente |
| Desde avenida Suba con calle 116 hasta avenida Suba con avenida Boyacá. | 2,56 | Mañana: norte a sur Tarde: sur a norte Hora valle: sur a norte |
| Desde avenida Las Américas con avenida 68 hasta avenida Las Américas, estación Banderas de Transmilenio | 2,89 | Mañana: occidente a oriente Tarde: oriente a occidente Hora valle: oriente a occidente |

*Las rutas fueron seleccionadas aleatoriamente.

Fuente: Urazán, Medina y Linares (2014).

Tabla 3. Recorrido por longitud en rutas medias*

| RECORRIDO | LONGITUD (KM) | FRANJA HORARIA Y SENTIDO |
|--|---------------|--|
| Desde calle 161 con carrera 19 hasta calle 100 con carrera 19 | 6,46 | Mañana: norte a sur Tarde: sur a norte Hora valle: sur a norte |
| Desde calle 26 con carrera 30 hasta Aeropuerto Internacional El Dorado | 10,6 | Mañana: occidente a oriente Tarde: oriente a occidente Hora valle: oriente a occidente |
| Desde Portal Norte de TransMilenio hasta calle 116 con Autopista Norte | 6,25 | Mañana: norte a sur Tarde: sur a norte Hora valle: norte a sur |
| Desde la calle 127 con avenida Boyacá hasta la calle 26 con avenida Boyacá | 6,27 | Mañana: norte a sur Tarde: sur a norte Hora valle: sur a norte |
| Desde carrera 30 con Estación La Castellana hasta carrera 30 con calle 26 | 6,22 | Mañana: norte a sur Tarde: sur a norte Hora valle: norte a sur |
| Desde calle 24 con carrera 68 hasta calle 100 con Avenida Suba | 7,4 | Mañana: norte a sur Tarde: sur a norte Hora valle: sur a norte |

*Las rutas fueron seleccionadas aleatoriamente.

Fuente: Urazán, Medina y Linares (2014).

y en las horas de pico entre 6:30 a. m. y 8:00 a. m. y entre 5:00 p. m. y 7:00 p.m., y en la hora valle de 11:00 a. m. a 2:00 p. m.. Estas horas son tomadas con base en los indicadores de la encuesta de movilidad de la SDM (2011).

Cabe resaltar que el estudio en mención consideró el tiempo total de viaje en transporte público, incluyendo los desplazamientos entre los puntos de origen-destino y la(s) respectiva(s) estación(es) o paradero(s) y esperas del servicio. Ese mayor tiempo forma parte del cálculo de la velocidad de recorrido, con lo cual se disminuye la cifra de velocidad respecto a otros estudios que ilustran, por ejemplo, al servicio de BRT con mayor velocidad. Los resultados obtenidos del estudio se exponen en los siguientes apartados.

Rutas cortas (< 5 km)

Como resultado de los valores promedio, la motocicleta registró la mayor velocidad de recorrido, comparada con los otros modos: 23 km/h en la hora punta mañana, 35 km/h en la hora valle y 28 km/h en la hora punta tarde (figura 4).

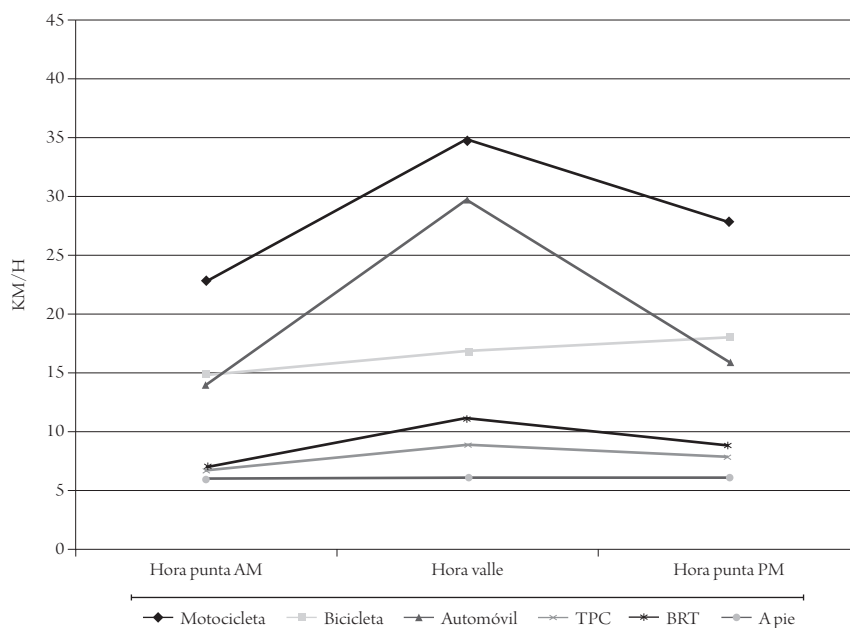


Figura 4. Velocidad media de recorrido en rutas cortas

Fuente: Urazán, Medina y Linares (2014).

Por su parte, la bicicleta presentó 15 km/h en la hora punta mañana, 17 km/h en la franja valle y 18 km/h en la hora punta tarde; es, por tanto, el segundo modo más efectivo en cuanto a velocidad se refiere. Sigue en magnitud de velocidad el automóvil, con 14 km/h en la hora punta mañana, 30 km/h en hora valle y 16 km/h en la hora punta tarde. Resulta así una diferencia poco significativa con la bicicleta, excepto en la hora valle para algunas zonas de la ciudad que llegaron a registrar casi 40 km/h.

El TPC presenta, por su parte, las siguientes velocidades de recorrido: 7 km/h en hora punta mañana, 9 km/h en hora valle y 8 km/h en hora punta tarde. Esta menor velocidad comparada se debe a las continuas detenciones por paradas para ascenso y descenso de pasajeros, hecho que afecta notoriamente su velocidad de recorrido.

En el caso del BRT Transmilenio, este presentó una velocidad de recorrido de 7 km/h en hora punta mañana, 11 km/h en hora valle y 9 km/h en hora punta tarde. Finalmente, el modo a pie presenta una velocidad de recorrido de 6 km/h, constante en todos los periodos, y por ello compite en efectividad con el TPC. La velocidad media resultante se asemeja a la encontrada por Urazán *et al.* (2015) y se aproxima a los 1,5 m/s (5,4 km/h) registrados en el Instituto de Desarrollo Urbano (IDU, 2005) para caminata en andenes a flujo libre.

Rutas medias (< 10 km)

En el caso de rutas de mayor longitud que las del apartado anterior (< 5 km), la motocicleta se muestra nuevamente como el modo con las velocidades de recorridos más favorables (figura 5). En la hora punta mañana, la velocidad de recorrido para la motocicleta fue de 30 km/h, en tanto en la hora valle fue de 43 km/h y en hora punta tarde, de 37 km/h.

El vehículo particular registró la siguiente información: 20 km/h en hora punta mañana, 35 km/h en hora valle y 33 km/h en hora punta tarde. En el caso de la bicicleta, la velocidad media de recorrido fue de 16 km/h en hora punta mañana, 17 km/h en hora valle y 17 km/h en hora punta tarde. Respecto del TPC, la velocidad en hora punta mañana fue de 10 km/h, en hora valle fue de 11 km/h y en hora punta tarde, nuevamente 11 km/h.

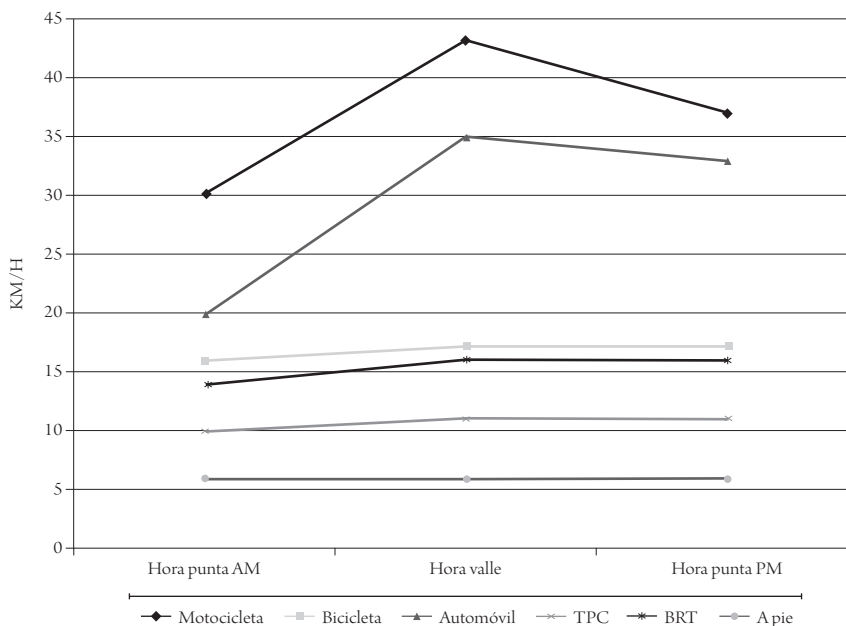


Figura 5. Velocidad media de recorrido en rutas medias

Fuente: Urazán, Medina y Linares (2014).

Los viajes en BRT Transmilenio presentaron velocidad media de recorrido de 14 km/h en hora punta mañana, 16 km/h en hora valle y nuevamente 16 km/h en hora punta tarde. Finalmente, el modo peatonal mantiene una velocidad promedio de 6 km/h en todas las franjas horarias. La velocidad media resultante se asemeja a la encontrada por Urazán, Bernal y Quijano (2015) y se aproxima a los 1,5 m/s (5,4 km/h) registrados en el IDU (2005) para caminata en andenes a flujo libre.

Lo anterior permite establecer dos grandes grupos en lo que respecto a la velocidad media de recorrido: 1) motocicleta, automóvil y bicicleta y 2) BRT, TPC y a pie (figura 6).

Conclusiones

Como era de esperarse, se corrobora que hay un aumento en la velocidad en hora valle respecto a las horas punta; no obstante, hay modos como el a pie, la bicicleta y el TPC que presentan tendencia a velocidad constante en los tres periodos

Grupo de modos con velocidad media de recorrido superior a 15 km/h



a. Motocicleta



b. Automóvil



c. Bicicleta

Grupo de modos con velocidad media de recorrido inferior a 15 km/h



d. BRT



e. TPC



f. A pie

Figura 6. Clasificación de modos de transporte, según velocidad de recorrido

Fuente: elaboración propia.

horarios. En orden, los modos de mayor a menor velocidad media de recorrido son: motocicleta, automóvil, bicicleta, BRT, TPC y a pie. Este orden se mantiene tanto para las rutas cortas como para las medias.

La motocicleta alcanzó 43 km/h como velocidad máxima de recorrido, mientras que la máxima en automóvil fue de 35 km/h, seguida por la de la bicicleta, con 18 km/h. Por su parte, en el comportamiento de velocidades más bajas están el BRT, el TPC y el modo a pie. En este grupo, la velocidad media de recorrido más alta corresponde al BRT, con 16 km/h, seguida por 11 km/h en el TPC y una velocidad constante de 6 km/h para el modo peatonal.

Dos razones que sustentan las menores velocidades de este grupo son la baja velocidad de marcha peatonal y las continuas detenciones de los vehículos de transporte público, debido a detenciones en zonas de ascenso y descenso de pasajeros que aumentan los tiempos de viaje y, por tanto, disminuyen la velocidad de recorrido.

Ahora bien, al analizar el comportamiento de las velocidades en función de la longitud media de recorrido, se ha determinado que la motocicleta presenta mejor

velocidad en rutas medias que en cortas: es en promedio 1,28 veces superior en las últimas, con lo cual se pierde efectividad en recorridos menores a 5 km, pese a ser el modo más rápido en todos los medios de transporte analizados.

Para rutas cortas, en los distintos periodos horarios la velocidad media de la motocicleta es aproximadamente 1,5 veces superior a la del automóvil, 1,7 veces superior a la de la bicicleta, 3,2 veces superior a la del BRT, 3,5 veces superior a la del TPC y 4,8 veces superior a la del recorrido a pie.

Por otro lado, en las rutas medias la motocicleta sigue siendo el modo más eficaz, pero reduce la brecha de velocidad de recorrido respecto al automóvil (la velocidad pasa de ser 1,5 a 1,3 veces superior) y al BRT (la velocidad pasa de ser 3,2 a 2,4 veces superior). En comparación con el TPC, la relación prácticamente se mantiene: pasa de 3,5 a 3,4 veces superior. Sin embargo, mejora la relación de velocidades respecto a la bicicleta (la velocidad de la motocicleta pasa de 1,7 a 2,2 veces superior) y al modo a pie (la velocidad de la motocicleta pasa de 4,8 a 6,1 veces superior).

De lo planteado previamente resultan recomendaciones para la selección del modo de desplazamiento en la ciudad de Bogotá, en función de la velocidad media de recorrido, dependiendo de la franja horaria y la distancia de viaje.

Si la distancia del viaje que debe realizarse es menor a 5 km, la diferencia radica en si el recorrido se realiza en hora punta o no. Si es en hora punta (sea mañana o tarde), el orden de velocidades de recorrido, de mayor a menor, es la motocicleta, la bicicleta, el automóvil, el BRT, el TPC y a pie. Si, por el contrario, el viaje se realiza en hora valle, el automóvil resulta la segunda mejor opción, y la bicicleta pasa a tercer lugar.

Este cambio en el comportamiento se sustenta en que en hora valle el automóvil mejora la velocidad (cambia de 16 km/h a 30 km/h), debido a un cambio significativo en el nivel de servicio del tránsito; mientras que la velocidad en bicicleta es prácticamente constante (entre 15 y 18 km/h). Por su parte, la motocicleta, al igual que el automóvil, tiene un aumento significativo en la velocidad promedio al cambiar su tránsito de hora punta a hora valle (pasa de 26 km/h a 35 km/h).

En la circunstancia de que el viaje tenga una distancia de recorrido entre 5 y 10 km, no se diferencian situaciones por periodos horarios en el comportamiento

comparado de las velocidades. El orden por modos, de mayor a menor velocidad, es este: la motocicleta, el automóvil, la bicicleta, el BRT, el TPC y el modo a pie. En este caso, las mayores distancias de recorrido permiten a los modos de motocicleta y automóvil mejorar el tiempo de desplazamiento, gracias a mayores velocidades de marcha.

Esa mayor velocidad de la motocicleta es resultado de la maniobrabilidad que tiene en la corriente de tránsito. Su menor tamaño de ocupación le permite (en algunos casos infringiendo el Código Nacional de Tránsito Terrestre) el denominado *zigzagueo* entre vehículos, el sobrepaso por el costado izquierdo y el derecho en las corrientes vehiculares, la detención y el giro para acomodarse sobre las cebras peatonales sin realizar la debida oreja en la manzana para girar a izquierda en intersecciones, entre otros casos.

El factor laboral que exige al trabajador recorridos en corto tiempo, como es el caso de las entregas a domicilio, motiva también la elección de la motocicleta. Adicionalmente, la relación peso-potencia de esta le permite una aceleración de salida incluso mayor a la del automóvil, factor que también aumenta su velocidad de marcha y, por tanto, la de recorrido.

No obstante lo anterior, que manifiesta que la motocicleta brinda una mejor condición de movilidad por su mayor velocidad de recorrido, los autores dejamos en firme que no consideramos que la motocicleta sea la opción para un trasvase modal de los usuarios del vehículo particular ni para los usuarios del transporte público colectivo o masivo. Velandia, Urazán y Prieto (2014) exponen como ventajas en el uso de la motocicleta que esta permite el acceso a un modo de transporte privado para la población que no logra acceder financieramente al automóvil, y que por su bajo costo y versatilidad, la motocicleta es ideal para algunas actividades laborales como la mensajería, los servicios a domicilio y la atención comercial a clientes.

Respecto a la velocidad de recorrido (tema central de este escrito), la flexibilidad de la motocicleta supera la de otros modos, por lo cual es altamente competitiva en este sentido. No obstante, son otros los criterios en los que la motocicleta pierde como opción frente al transporte público: la estadística en seguridad vial, la contribución a la emisión de partículas contaminantes y el requerimiento de espacio público tanto en vía como en estacionamiento público por cada usuario que opta por viajar en moto y no en bus.

Referencias

- Acevedo, J., Echeverry, J., Bocarejo, J., Lleras, G., Ospina, G. y Rodríguez A. (2009). *El transporte como soporte al desarrollo del país. Una visión al 2040*. Bogotá: Universidad de los Andes.
- Albalade, D. y Fernández-Villadangos, L. (2010). Motorcycle injury severity in Barcelona: The role of vehicle type and congestion. *Traffic Injury Prevention*, 11(6), 623-631.
- Cámara de Comercio de Bogotá (CCB) (2009). Movilidad en bicicleta en Bogotá. Recuperado de <http://www.ccb.org.co/content/download/3830/44021/file/Informe%20movilidad%20en%20bicicleta%20en%20Bogotá.pdf>
- Cámara de Comercio de Bogotá (CCB) (2014). Observatorio de Movilidad. Reporte anual 2013. Recuperado de <http://www.ccb.org.co/content/download/4646/57496/file/Observatorio%20202013.pdf>
- Chang-Chuan, C., Chiu-Kuei, N., Cheng-Yuan, T. Y GuoryRong, H. (1995). Comparison of tail-pipe emissions from motorcycles and passenger cars. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 45(2), 116-124.
- Costanzo, A., Messina, J., Taggi, F., Pitidis, A., Natalini, E., Stagnitti, F., Calderale, S. y Ribaldi S. (2002). Epidemiology and severity of injuries caused by road traffic accidents in the metropolitan area of Rome. *Traffic Injury Prevention*, 3(4), 311-315.
- Dang Viet, H., Mark, S. e Ivers, R. (2008). Motorcycle helmets in Vietnam: ownership, quality, purchase price, and affordability. *Traffic Injury Prevention*, 9(2), 135-143.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) (2007). *Cifras de crecimiento poblacional en ciudades colombianas*. Bogotá: Colombia.
- Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) (2005). *Guía práctica de la movilidad peatonal urbana, Bogotá D.C.* Bogotá: Autor.
- Martín Bermejo, D. (2007). *Comparación de tiempos de trayectos metro-a pie-bici en la zona urbana de Barcelona* (tesis de grado). Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Pai, M., Gadgil, G., Mahendra, A., Vernekar, S., Heywood, R. y Chanchani, R. (2014). *Motorized two-wheelers in Indian cities: a case study of the city of Pune, India*. Mumbai, India: World Resources Institute.
- Secretaría Distrital de Movilidad (SDM) (2012). Encuesta de Movilidad Distrital. Bogotá: Autor.
- Secretaría Distrital de Planeación (SDP) (2011). Densidades habitantes por hectárea en Bogotá. Bogotá: Autor.
- Observatorio Ambiental de Bogotá (2013). Indicadores Ambientales y movilidad en Bogotá. Bogotá: Autor.

- Semana* (2009, 14 de noviembre). La bicileta, más rápida que Transmilenio y el carro particular. Recuperado de <http://www.semana.com/nacion/articulo/la-bicicleta-mas-rapida-transmilenio-carro-particular/109838-3>
- Urazán, C. F., Medina, C. y Linares, R. (2014). Comparación de velocidad media de recorrido para varios modos en la ciudad de Bogotá (artículo inédito).
- Urazán, C. F., Torres, A. C., Bernal S. y Quijano, A. (2015). Análisis de la condición de velocidades peatonales en puentes y túneles. Caso Bogotá D.C. (artículo inédito).
- Velandia, E. A., Urazán, C. F. y Prieto, G. A. (2014, 20-24 de octubre). La motocicleta, competencia para el transporte masivo en Bogotá D.C. XVIII Congreso Latinoamericano de Transporte Público y Urbano (CLATPU). Rosario, Argentina.
- Velandia, E. A., Caicedo, H. y Pérez, D. (2010). *La motocicleta como modo de transporte en Bogotá*. Bogotá: Universidad de La Salle.
- Yung-Chen, Y., Jiun-Horng, T., Hui-Fen, Y. y Hung-Lung, C. (2009). Comparison of exhaust emissions resulting from cold- and hot-start motorcycle driving modes. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 59(11), 1339-1346.
- Zhong-Ren, P., Yi, Z. y Shunfeng, S. (2008). Mobility of the Chinese urban poor: a case study of Hefei city. Recuperado de <http://www.unr.edu/Documents/business/economics/papers/2006/unrecon-wp06004.pdf>