

Botero Botero, Luis Fernando; Acevedo Agudelo, Harlem

Simulación digital en un proyecto de construcción en Colombia  
Revista Universidad EAFIT, vol. 45, núm. 155, julio-septiembre, 2009, pp. 45-59  
Universidad EAFIT  
Medellín, Colombia

Disponible en: <http://www.redalyc.org/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=21518651004>



*Revista Universidad EAFIT*

ISSN (Versión impresa): 0120-341X

[revista@eafit.edu.co](mailto:revista@eafit.edu.co)

Universidad EAFIT

Colombia

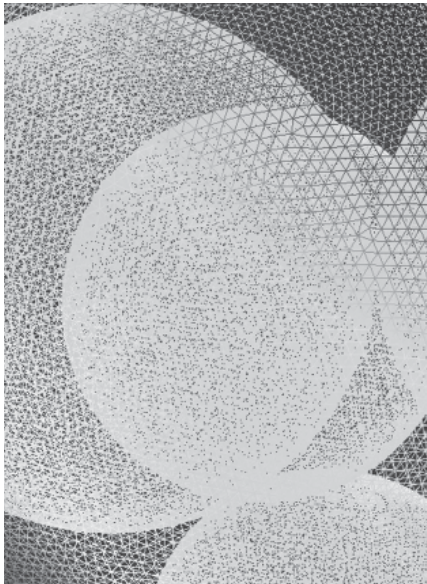
[¿Cómo citar?](#)

[Número completo](#)

[Más información del artículo](#)

[Página de la revista](#)

# Simulación digital en un proyecto de construcción en Colombia



## **Luis Fernando Botero Botero, M.Sc.**

Candidato a Máster en Ciencias de la Administración,  
Universidad EAFIT.

Docente del Departamento de Ingeniería Civil,  
Universidad EAFIT, Medellín, Colombia. Coordinador del grupo  
de investigación Gestión de la Construcción.

lfbotero@eafit.edu.co

## **Harlem Acevedo Agudelo, MBA**

Magíster en Administración, Universidad EAFIT.

Miembro del grupo de investigación Gestión de la Construcción.

hacevedo@eafit.edu.co

Recepción: 16 de marzo de 2009 | Aceptación: 01 de junio de 2009

## **Resumen**

Las operaciones relacionadas con la actividad de la construcción están condicionadas por múltiples variables que intervienen en ella, así como por la dinámica del recurso aprovechable. Algunos de esos factores son la falta de estandarización de las actividades, disponibilidad del recurso, capacitación de los trabajadores, utilización de un determinado equipo y circunstancias climáticas. Su combinación genera gran variabilidad e incrementa considerablemente la incertidumbre en la planeación de los proyectos. Esta situación plantea la necesidad de estudiar nuevos escenarios y herramientas que mejoren los distintos procesos involucrados. El artículo presenta

la simulación digital aplicada a la preparación de mezclas, transporte y disposición de concreto en un proyecto de vivienda en altura. A partir del modelo que representa el sistema real, se establecieron diferentes escenarios (reducción de personal en zona de preparación de concreto, diferentes sistemas de transporte vertical y cambio en el método de trabajo para la dosificación de concreto), con el propósito de establecer cuál de ellos es el más eficiente en términos de disminución de plazos y de costos.

## Digital simulation in a construction project in Colombia

### Abstract

Construction operations are conditioned by a numerous of variables involved in the process as well as by the dynamics of the usable resources. Some of those variables include the lack of standardization of activities, the resource availability, the workers training, the use of a given machine or tool and the weather circumstances. Combined, they generate a great variability substantially increasing the uncertainty in the project planning. This situation creates the need of studying new scenes and tools to improve the different processes there involved. This article presents a digital simulation applied to the preparation of mixtures, transport and final concrete placement in a building project. From the model representing the actual system, different scenes were established (personnel reduction in the concrete preparation area, different systems of vertical transport and a change in the method for concrete dosage) in order to determine the most efficient one in terms of time and cost reduction.

### Palabras clave

Simulación  
Variabilidad  
Escenario de mejoramiento  
Productividad

### Key words

Simulation  
Variability  
Improvement  
Productivity

### Introducción

**E**l Método de la Trayectoria Crítica (*Critical Path Method —CPM—*) se utiliza con mucha frecuencia para la programación de actividades y recursos en los proyectos de construcción. Esta técnica permite conocer la duración total del proyecto, distinguir las actividades críticas del mismo, hacer una interpretación cronológica de los diferentes pasos y adoptar las decisiones correspondientes. Pero generalmente se aplica de forma estática y determinística, pues se supone que las operaciones del proyecto serán llevadas a cabo sin ningún inconveniente. Esta visión no genera una

representación real del proyecto, el cual podría modelarse mediante un sistema dinámico y estocástico.

Si bien la experiencia es indispensable para que la planeación sea más precisa, la realidad indica que no es suficiente para lograr el mejor tratamiento de las variables que intervienen en la construcción, dado que su interacción hace difícil el manejo de la variabilidad conjunta y, por ende, de su pronóstico (Páez, 2007).

En tal sentido, la simulación digital se ofrece como una herramienta versátil para modelar sistemas con alta dinámica y variabilidad en sus parámetros,

los cuales presentan alta congestión o cuellos de botella en operaciones y procesos.

El artículo presenta la simulación digital como una herramienta útil y aplicable en las operaciones de los proyectos de construcción.

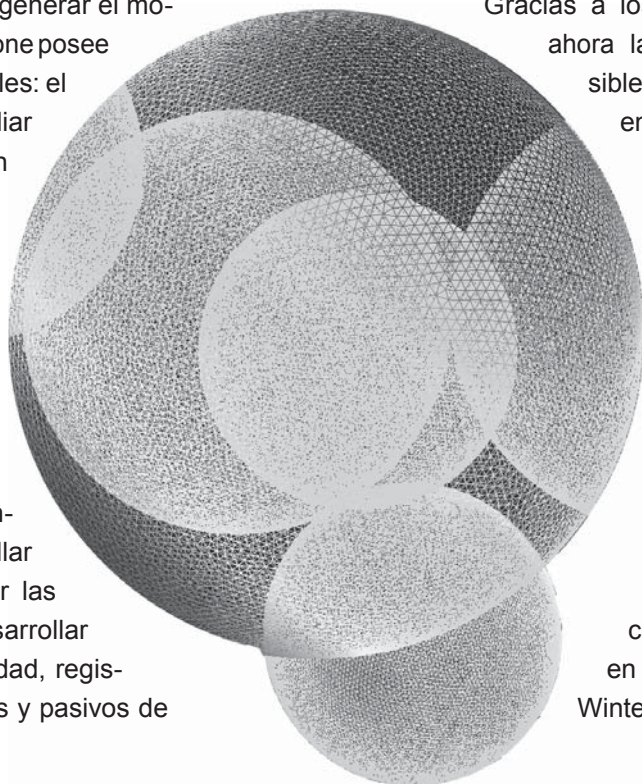
## 1. Revisión del estado del arte

A mediados de la década de los setenta, Daniel W. Halpin implementó la simulación de operaciones con el desarrollo del programa CYCLONE (*CYCLic Operations NEtwork*). Esta herramienta fue construida con el fin de modelar las operaciones de la construcción y mejorar su rendimiento. El programa consta de una red ensamblada por medio de nodos que describen las operaciones de construcción y aquellos elementos necesarios para el correcto flujo de las entidades: las actividades, los contadores de los ciclos finalizados en la operación, las colas que indican el estado pasivo o tiempo ocioso de los recursos, los conectores (flechas) que indican la dirección del flujo de los recursos entre los estados activos y pasivos de la red (Halpin & Riggs, 1992).

El procedimiento para generar el modelo por medio de Cyclone posee tres pasos fundamentales: el primero incluye estudiar a fondo la operación que va a ser objeto de análisis —definición de las tareas, de los recursos asociados a las mismas y determinación de las actividades sucesoras y predecesoras de cada tarea—, el segundo consiste en detallar el modelo —identificar las unidades de flujo, desarrollar los ciclos de cada unidad, registrar los estados activos y pasivos de

cada recurso, integrar los ciclos hallados de cada unidad e iniciar las unidades de flujo—; por último, el tercer paso se basa en la simulación y experimentación, es decir, la ejecución en el computador de la simulación y la realización del análisis de sensibilidad (Vanegas & Halpin, 1994).

El modelamiento implementado por Halpin ha contribuido, desde entonces, al desarrollo de múltiples investigaciones sobre la simulación aplicada al sector de la construcción, así como a la generación de *software* de simulación bajo conceptos similares. Al mismo tiempo, se ha incentivado el mejoramiento del modelo por parte de otros autores. Algunos de estos han presentado propuestas como las siguientes: INSIGHT, de Paulson (1978); RESQUE, de Chang (1987); UMCYCLONE, de Ioannou (1989); COOPS, de Liu y Ioannou (1992); DISCO, de Huang y Halpin (1995); CIPROS, de Tommelein y Odeh (1994); STROBOSCOPE, de Martínez y Ioannou (1994); COST, de Cheng, Wu y Tseng (2000); GACOST, de Cheng y Feng (2002) (Martínez, 1996; AbouRizk y Mather, 1999; Cheng y Feng, 2003).



Gracias a los avances de la tecnología, ahora la simulación es más accesible y fácil de implementar. Se encuentran diferentes programas de uso general —Arena, Promodel, Ithink, Simulate, entre otros— para realizar simulaciones de operaciones de la construcción, con una versatilidad muy amplia, a diferencia de las limitaciones en capacidad, velocidad y plataformas en las que corren herramientas computacionales de décadas anteriores. Su utilización más extendida ocurre en Estados Unidos y Canadá. Winter Simulation Conference es

un evento internacional que se realiza cada año en los Estados Unidos y convoca investigadores de todos los sectores; donde la Ingeniería de la Construcción y la Administración de Proyectos hacen parte del programa.

En el ámbito latinoamericano, Chile cuenta con un desarrollo importante en el uso de la simulación digital. El Centro de Excelencia en Gestión de Producción, Gepuc, de la Pontificia Universidad Católica de Chile, adelanta trabajos de simulación de operaciones en la construcción, con la finalidad de mejorar los proyectos y optimizar las operaciones de proyectos de alto impacto en relación con sus plazos y costos. Para cumplir con dicho objetivo, busca experimentar con acciones de mejoramiento que ayuden a la toma de decisiones y para ello desarrolla modelos genéricos de simulación de operaciones que permitan modelar de forma más fácil y rápida proyectos que presenten características similares. También el grupo de investigación Norie, de la Universidad Federal de Rio Grande del Sur (UFRGS), en Porto Alegre, Brasil, adelanta trabajos en la aplicación de modelos de simulación de operaciones de la construcción.

En Colombia, la información sobre implementación de metodologías de simulación para los procesos constructivos es limitada, debido a la poca investigación desarrollada hasta la fecha. La Universidad de los Andes ha trabajado sobre este tema en la última década, bajo la modalidad de proyectos de grado, realizados por estudiantes de la Maestría en Ingeniería y Gerencia de la Construcción, con diferentes alcances como el desarrollo de una herramienta de simulación de procesos constructivos: MOCSPROC y SIPLAN (Córdoba & Delgado, 2002). Además, se han presentado casos de aplicación de la simulación digital en proyectos de construcción en la ciudad de Bogotá (Echeverry, Páez & Mesa, 2008).

## 2. Simulación

### 2.1 Definición de la simulación

Simulación es el proceso de diseñar y desarrollar un modelo de un sistema o proceso real y conducir experimentos con el propósito de entender el comportamiento del sistema o evaluar varias estrategias (dentro de límites impuestos por un criterio o conjunto de criterios) para la operación del sistema. (Shannon, 1998, 7)

Simulación es el desarrollo de un modelo lógico matemático de un sistema, de tal forma que se tiene una imitación de la operación de un proceso real o de un sistema a través del tiempo. La simulación involucra la generación de una historia artificial de un sistema, la observación de esta historia mediante la manipulación experimental, nos ayuda a inferir las características operacionales de tal sistema. (Banks, 1999, 7)

Las definiciones expuestas comprenden cinco conceptos: la existencia de un proceso real, el diseño de un modelo del proceso, el planteamiento de estrategias (escenarios) con las cuales se pueda modificar el comportamiento del proceso, la evaluación de los diferentes escenarios y la toma de decisiones para cumplir el objetivo propuesto. La simulación, por tanto, es una herramienta que se utiliza en la toma de decisiones en forma racional para el mejoramiento de los procesos.

## 3. Simulación digital en un proyecto de construcción en Colombia

### 3.1 Descripción del proceso de construcción objeto de estudio: preparación, transporte y disposición de concreto en etapa de estructura

El estudio que aquí se presenta fue realizado durante el año 2008 por el grupo de investigación Gescon del departamento de Ingeniería Civil de la Universidad EAFIT y contó con la participación de cinco empresas constructoras.

La investigación se llevó a cabo en proyectos de construcción de la ciudad de Medellín. Se tomaron datos para la modelación de una obra en particular, perteneciente a una empresa asociada al proyecto de investigación, con condiciones de transporte de material y dosificaciones de concreto diferentes, necesarias para la generación de los diversos escenarios propuestos.

El proceso real que se simuló —preparación de mezcla, transporte y disposición de concreto— se desarrolló dentro de un proyecto de construcción de una torre de apartamentos, con altura correspondiente a 24 pisos. Cada nivel contiene cuatro apartamentos con un área promedio por piso de 321 metros cuadrados. El sistema constructivo está basado en muros estructurales fundidos en concreto preparado en obra, con utilización de formaletería metálica manoportable.

El desarrollo de la fase estructural del proyecto requería la preparación de cerca de 2.122 metros cúbicos de concreto para losas de entrepiso y muros.

De acuerdo con el plan general, en la etapa de construcción de la estructura se necesitaba fundir diariamente un promedio de 19,3 metros cúbicos de concreto, entre muros y losa; actividad variable con el nivel de la losa y en la cual se invirtieron cuatro horas de trabajo en promedio. Se comenzó con la fundida de los muros de un apartamento y posteriormente la losa del apartamento contiguo.

En la obra, la preparación de mezcla se realizaba mediante dosificación del cemento almacenado por bulto. En esta forma, preparar un metro cúbico de concreto, requiere manipular un número variable de barcadas de acuerdo con la resistencia necesaria. Por consiguiente, la preparación de los 2.122 metros cúbicos de concreto exige un número de repeticiones muy altas de esa actividad; en tal sentido, conviene aumentar la eficiencia para incrementar la productividad.

La figura 1 presenta el diagrama de flujo de las actividades desde el momento de cargar el material hasta la fundida del concreto. En los numerales 8, 9 y 10 de la figura se observa el malacate de guía flexible (MGF), el sistema de transporte vertical empleado que consta de una estructura metálica empotrada al muro de la edificación con dos poleas; de este modo, es posible el ascenso y descenso de dos recipientes metálicos con la fuerza de dos motores de pluma tradicionales, conectados a cada uno de los recipientes por medio de cables.

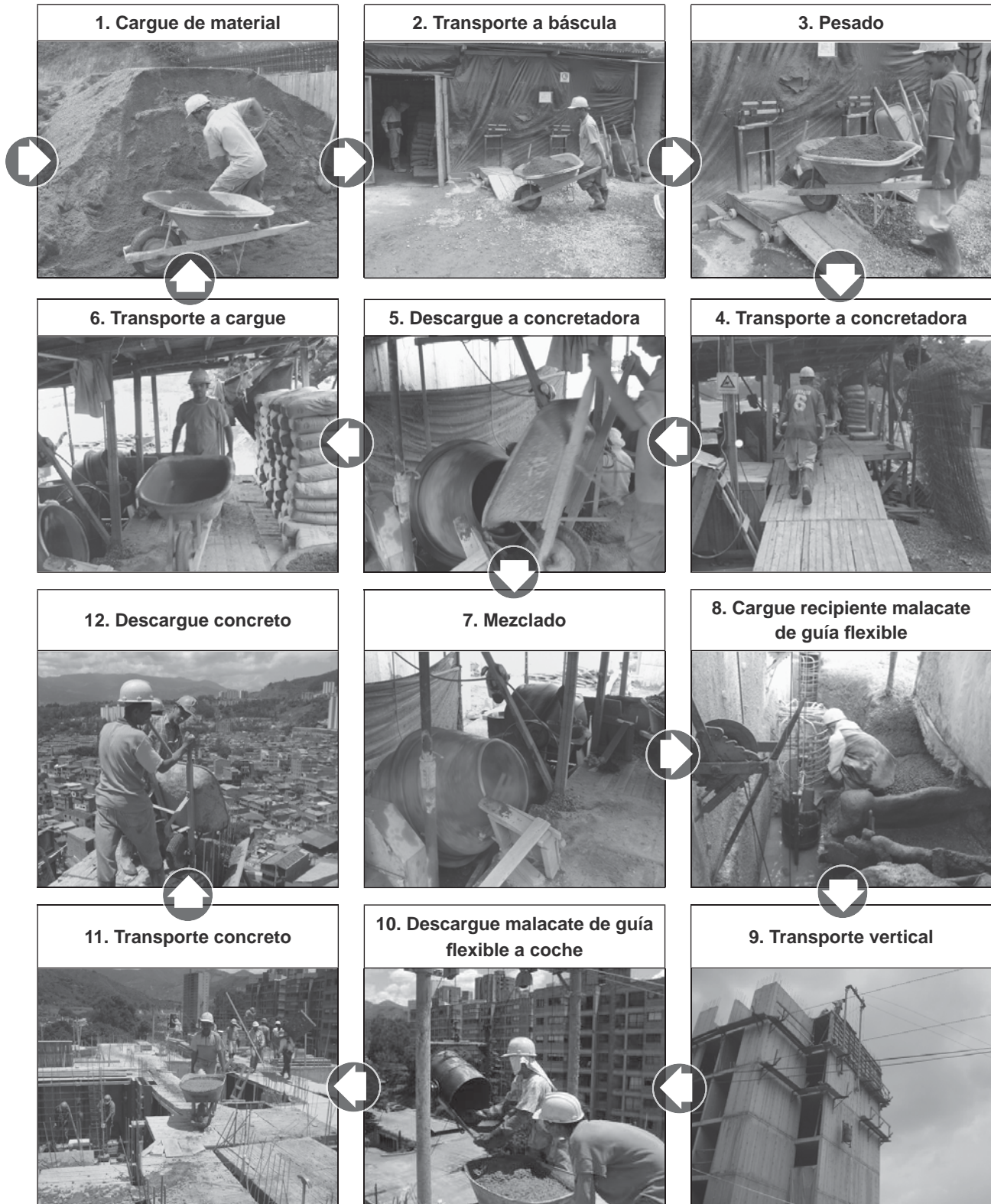
Las capacidades del recipiente y del coche son similares; de esta forma, no es necesario esperar un segundo recipiente para llenarlo. Las actividades que se presentan en el diagrama de flujo se repiten hasta completar el número de metros cúbicos programados para el día.

### 3.2 Fases de estudio del modelo de simulación

Con el objetivo de realizar una simulación planeada y organizada se siguieron las fases de estudio que a este respecto propone el grupo de trabajo de Jerry Banks *et al.* (2005). Tales pasos son, en su orden lógico, la formulación del problema, determinación de los objetivos, conceptualización del modelo y recolección de datos, creación del modelo, verificación, validación del modelo, diseño experimental, realización de corridas y análisis, documentación y reportes, implementación.

**3.2.1 Formulación del problema.** El transporte de material en la construcción está clasificado como trabajo contributivo o tareas de soporte, cuyos tiempos deben ser minimizados para una mayor productividad, según lo plantean Botero y Álvarez (2003). En su investigación, estos autores establecieron que el 49% de los tiempos de trabajo contributivo corresponden a transporte. En el trabajo no contributivo (actividades que no agregan valor), las esperas consumen el 36% de los tiempos. En el presente estudio, tanto transporte de material

**Figura 1.** Diagrama de flujo de las actividades del proceso



Fuente: elaboración propia.

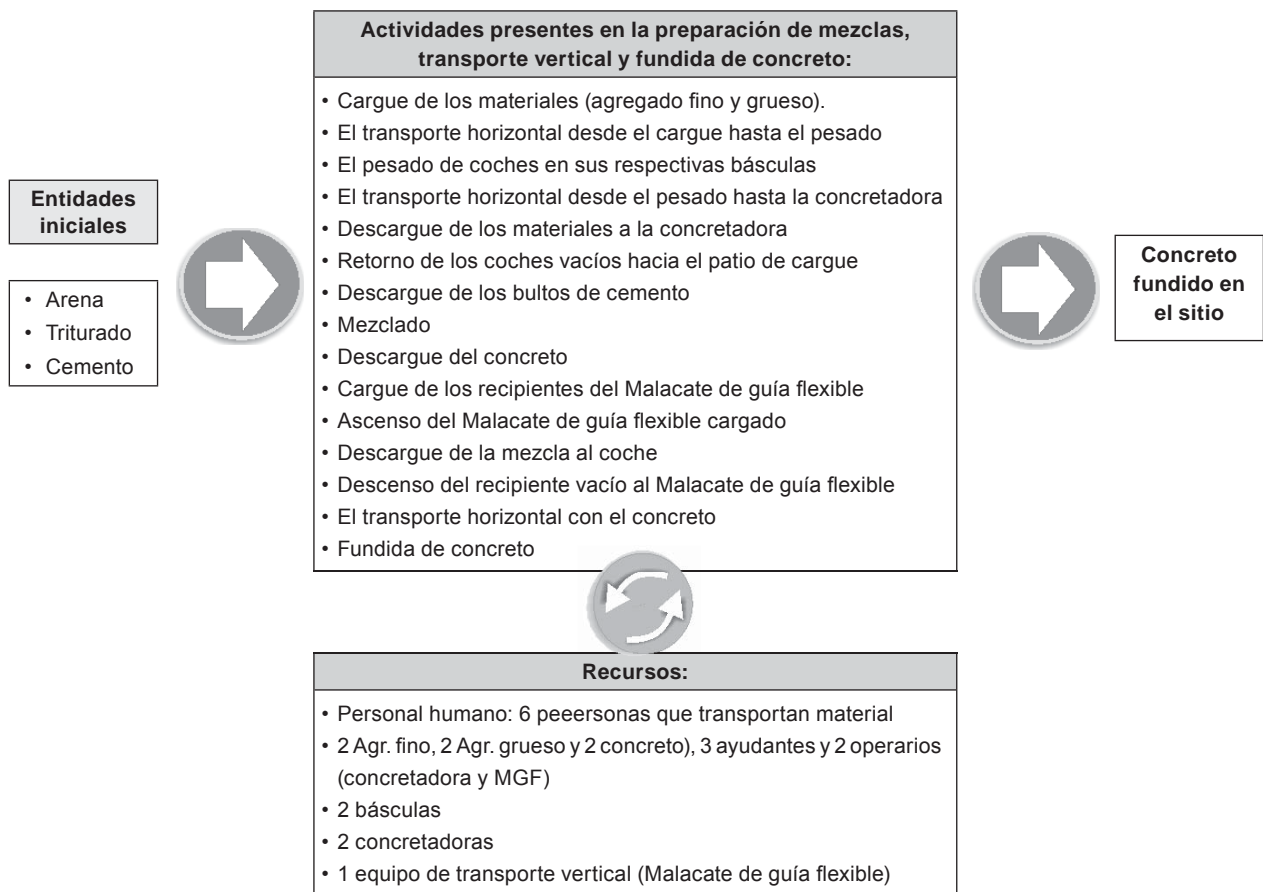
como esperas se simulan a través de escenarios diferentes, con el fin de minimizar sus tiempos y costos. Se trata de resolver la duda que presenta el personal directivo de la obra con respecto a si el malacate de guía flexible es el mejor sistema de transporte vertical para su proyecto en todos los niveles.

**3.2.2 Determinación del objetivo general.** El objetivo general consiste en establecer, a través del diseño de diferentes opciones, cuál es el escenario

más eficiente en términos de tipo de ejecución de los procesos que conlleve a la disminución de plazos y de costos.

**3.2.3 Conceptualización del modelo.** Para el modelo de simulación se tuvieron en cuenta todas las actividades, las entidades de entrada y los recursos indispensables para llevar a cabo las tareas requeridas en procura del producto final esperado: el concreto fundido en un sitio específico. La figura 2 presenta la conceptualización del modelo.

**Figura 2.** Esquema conceptual del modelo



Fuente: elaboración propia.

**3.2.4 Recolección de datos.** La información fue recogida entre los meses de abril y agosto de 2008, con base en formatos correspondientes a cada actividad; por tanto, se tuvieron en cuenta las variables del caso: tiempos invertidos, tipo de material transportado, la distancia recorrida, la hora de ejecución, las condiciones climáticas.

3.2.5 Creación del modelo. Se utilizó el *software* de simulación Arena, versión 12.0, desarrollado por la empresa Rockwell Software Inc., compañía líder a nivel mundial en perfeccionamiento e implementación de *hardware* y *software* de automatización y simulación.

En la tabla 1 se presentan las distribuciones de probabilidad utilizadas en el modelo de estudio.

**Tabla 1.** Distribuciones de probabilidad para simulación de actividades

Variable: Tiempo en minutos		Distribución	Parámetros	
Cargue	Agregado grueso	Lognormal	$\mu = 0,822$	$\sigma = 0,364$
	Agregado fino	Lognormal	$\mu = 0,769$	$\sigma = 0,281$
	De recipiente MGF	Lognormal	$\mu = 0,385$	$\sigma = 0,220$
Transporte horizontal	Desde cargue hasta pesado	Lognormal	$\mu = 0,018^*$	$\sigma = 0,006^*$
	Desde pesado hasta concretadora	Lognormal	$\mu = 0,021^*$	$\sigma = 0,008^*$
	Retorno de coches vacíos	Normal	$\mu = 0,014^*$	$\sigma = 0,002^*$
Transporte vertical	Ascenso de recipiente de MGF	Normal	$\mu = 0,0140^*$	$\sigma = 0,0013^*$
	Descenso de recipiente de MGF	Normal	$\mu = 0,003^*$	$\sigma = 0,0004^*$
Pesado	Pesado de material	Lognormal	$\mu = 0,272$	$\sigma = 0,113$
Descargue de concreto	De MGF a coche	Lognormal	$\mu = 0,278$	$\sigma = 0,069$
	De coche a muro	Weibull	Forma = 2,942	Escala = 0,205
	De coche a losa	Lognormal	$\mu = 0,124$	$\sigma = 0,046$
Mezclado	Agregados fino, grueso y cemento	Normal	$\mu = 2,759$	$\sigma = 0,380$

\* Los tiempos de transporte se dan en min/m

Fuente: elaboración propia.

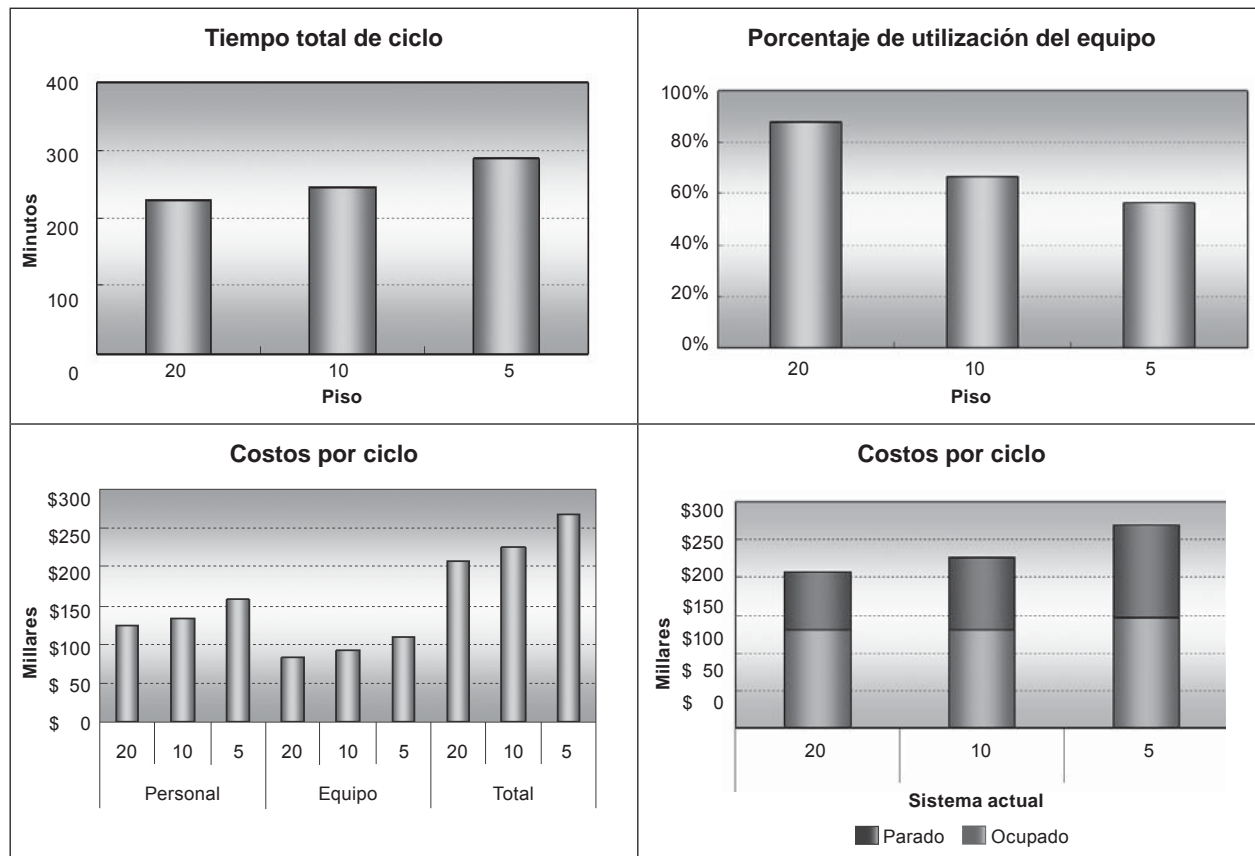
#### 4. Resultados de la simulación del modelo

Con la puesta en acción del modelo se analizaron las variables tiempo total de ciclo, porcentaje de tiempo de utilización del equipo y costos del recurso (personal y equipo utilizado en todo el proceso simulado). Los costos, a su vez, se discriminaron por el estado de los recursos, es decir, se determinaron los costos del recurso requerido y los costos del

recurso ocioso. Los resultados fueron examinados en tres diferentes alturas representativas (pisos 5, 10 y 20) con el fin de realizar la posterior comparación de los puntos mencionados para los diferentes escenarios.

Los tiempos totales de ciclo en los pisos 5, 10 y 20 fueron, respectivamente, 288,53; 243,20 y 224,79 minutos, como puede observarse en la figura 3. Los lapsos son cercanos a medio día laboral.

**Figura 3.** Resultados del proceso actual (malacate de guía flexible)



Fuente: elaboración propia.

El tiempo de ciclo y los costos totales por ciclo (personal + equipo) son mayores en los pisos 5 y 10 en comparación con el piso 20, dado que la resistencia del concreto por barcada, para un bulto de cemento, hace que sean necesarias más barcadas en esos pisos.

La figura 3 señala, además, que la proporción del tiempo de utilización del equipo se encuentra entre el 55% y el 88%, presentando mayor holgura de su capacidad en los primeros pisos. El porcentaje del costo del recurso ocioso es mayor en estos.

Las gráficas anteriores permiten observar que existe un alto porcentaje de los costos que se pagan por actividades que no agregan valor; dicho en forma más directa, las esperas y el tiempo ocioso son actividades que causan pérdidas, sobre todo en los

primeros pisos, cuando el malacate de guía flexible opera con menor porcentaje de utilización.

## 5. Escenarios

### 5.1 Escenario 1. Reducción de personal en zona de preparación de concreto

El plan contempla un obrero para el transporte de agregado fino y uno para agregado grueso, a diferencia del sistema real que tiene dos obreros para cada una de estas actividades.

La tabla 2 permite analizar detalladamente el porcentaje de tiempo que ocupa el personal que transporta el agregado y el operario de cemento en ambos contextos.

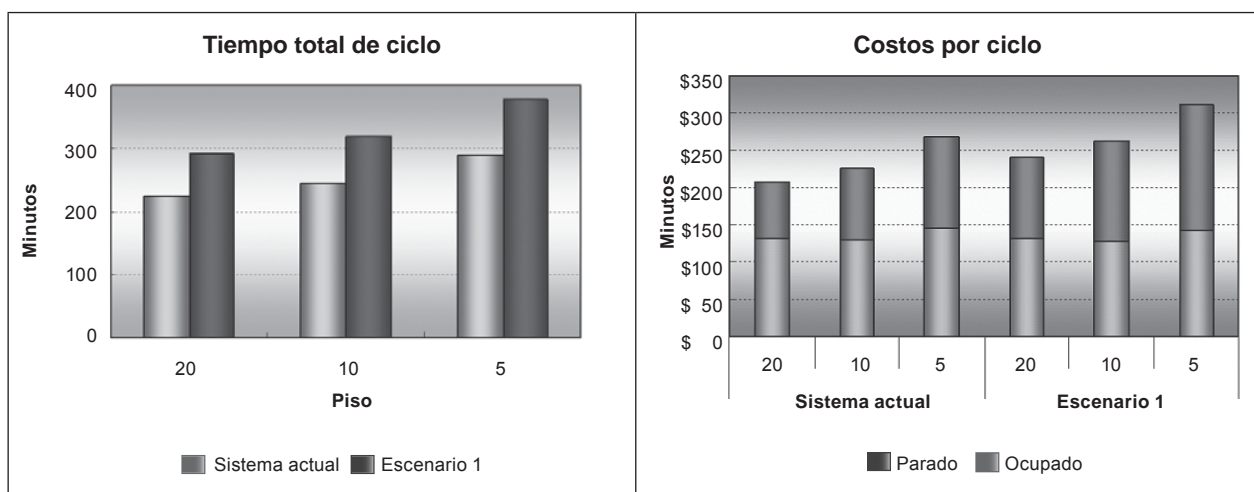
**Tabla 2.** Porcentaje de utilización del personal que transporta material

Operario / Piso	Actual			Escenario 1		
	20	10	5	20	10	5
Arena	58,3	59,1	59,3	89,8	90,1	90,5
Triturado	59,0	59,7	60,0	90,5	91,2	91,5
Cemento	30,4	30,8	30,9	23,0	23,0	23,6

Fuente: elaboración propia.

En la figura 4 se hace el cotejo de los resultados del sistema actual con los del Escenario 1. La disminución del número de obreros que transportan el agregado incrementa tanto el tiempo de ciclo como su costo, en todos los niveles de altura contemplados.

**Figura 4.** Comparación de los resultados del sistema actual con los del Escenario 1.



Fuente: elaboración propia.

El porcentaje de tiempo de utilización del recurso disminuye en el Escenario 1; pero al analizar los costos del recurso ocupado y parado, se puede concluir que los costos ocasionados por tiempo productivo (ocupado) en cualquier piso son similares entre el sistema actual y el Escenario 1. No ocurre lo mismo con los costos de tiempo ocioso del equipo. Ellos son mayores para todos los pisos en el Escenario 1.

Como se puede observar, el Escenario 1 incrementa significativamente el porcentaje de utilización de los obreros que transportan el agregado, y hace que las tareas a partir del descargue en la mezcladora tengan que esperar mucho más tiempo;

esto ocasiona que el porcentaje de utilización del recurso disminuya en forma global en el Escenario 1. Además, tener el personal utilizado en un porcentaje mayor del 80% indica que la capacidad del proceso está llegando al límite. Si se tiene en cuenta que el recurso es humano, se requiere disminuir tal porcentaje de utilización y considerar las condiciones y necesidades físicas del personal.

En consecuencia, el escenario 1 no es un escenario de mejoramiento, pues incrementa tanto el costo como el tiempo del proceso; por el contrario, disminuye la eficiencia del sistema.

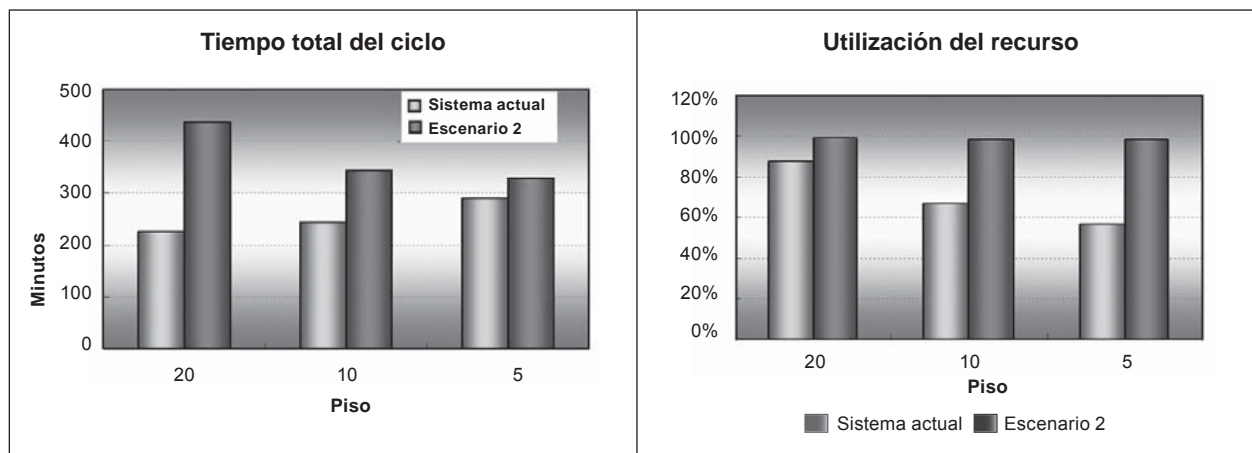
## 1.2 Escenario 2. Utilización de malacate tradicional para transporte vertical de concreto

Con base en el análisis del Escenario 1 se ve la necesidad de evaluar otras alternativas como el transporte vertical disponible. Se mantienen la dosificación del cemento por bulto y el número de

obreros en la zona de preparación de concreto asignados en el proceso real.

El malacate, como se sabe, es un equipo que opera a velocidad constante, por lo cual los tiempos de ascenso y descenso en la simulación son determinísticos. Los resultados correspondientes se presentan en la figura 5.

**Figura 5.** Comparación de los resultados del sistema actual con los del Escenario 2



Fuente: elaboración propia.

En la figura 5 se aprecia cómo el malacate tradicional presenta tiempos superiores de ciclo en los diferentes niveles, comparado con el malacate de guía flexible, pues incrementa sus tiempos a mayor altura sin importar que haya una disminución en el número de barcadas de concreto. La diferencia más alta se da en el piso 20 donde prácticamente duplica el tiempo de ciclo del malacate de guía flexible.

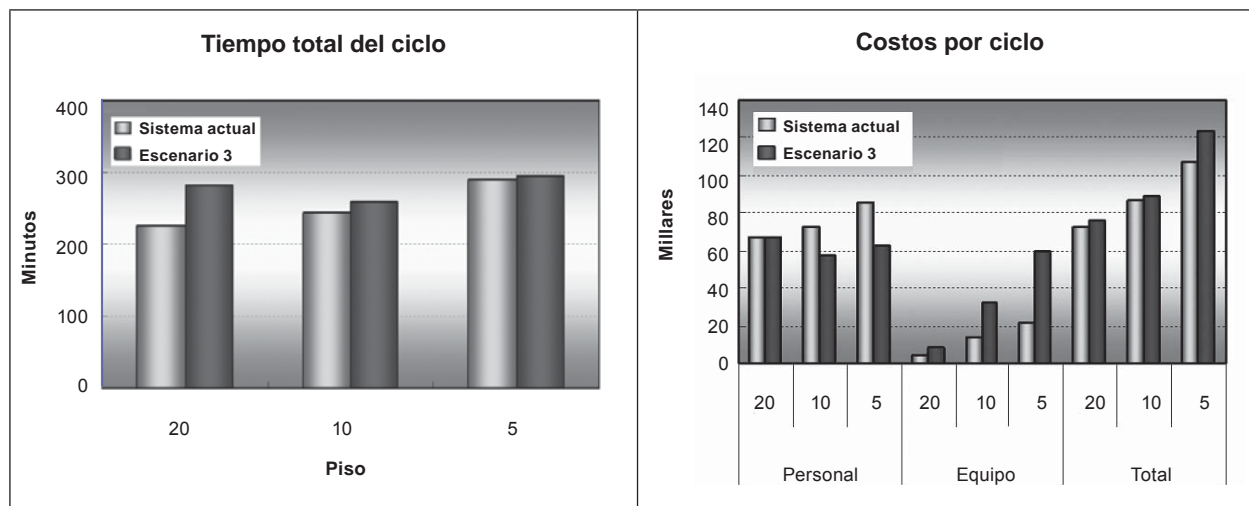
En cuanto al porcentaje de utilización del recurso, los valores del equipo malacate tradicional son mayores en todos los pisos porque el ascenso y descenso del material se hace más lento, lo que causa que el personal que transporta el agregado y el concreto en muros o en losa tengan que esperar más tiempo.

El uso del malacate tradicional incrementa de tal modo los tiempos de ciclo que se necesitaría de toda la jornada laboral solo para poder cumplir con la demanda de material en los pisos superiores, incrementando costos y retrasando el programa de obra actual.

## 1.3 Escenario 3. Utilización de la torre grúa para transporte vertical de concreto

En este nuevo escenario se cambió el malacate de guía flexible por la torre-grúa; el número de operarios en el área de preparación de concreto se mantuvo igual a los del proceso real. En el piso de disposición final de concreto no son necesarios los cocheros, dado que con la torre-grúa se alcanza el punto más alto de disposición. La figura 6 entrega los resultados obtenidos.

**Figura 6.** Comparación de resultados: sistema actual vs. Escenario 3 (torre-grúa)



Fuente: elaboración propia.

Los tiempos totales de ciclo del malacate de guía flexible y de la torre-grúa son muy similares en los pisos 5 y 10, pero en el piso 20 se nota una mayor diferencia que favorece el uso del malacate de guía flexible a este nivel. En cuanto a los costos de personal, la torre-grúa presenta menores costos que el malacate de guía flexible en los tres niveles, pero este efecto de economía se anula con los costos del equipo, haciendo, entonces, que los costos totales de la torre-grúa sean un poco mayores en cada uno de los tres niveles. La diferencia más marcada se produce en el piso 5. No sobra recalcar que estos costos fueron analizados con base en la utilización de los equipos en el proceso de fundida de concreto, ya que, como es sabido, la torre-grúa puede apoyar otras actividades (transporte de acero y formaletas) antes del inicio de la preparación de mezclas.

En tanto que se simuló el número de barcadas necesarias para fundir 19 metros cúbicos de concreto aproximadamente, de acuerdo con las necesidades diarias para el cumplimiento de lo planeado, esta diferencia de costos es muy significativa cuando se mira a la luz de la cantidad de concreto total de la obra.

En conclusión, al retomar los análisis de los tres escenarios anteriores se despeja la duda que tenía

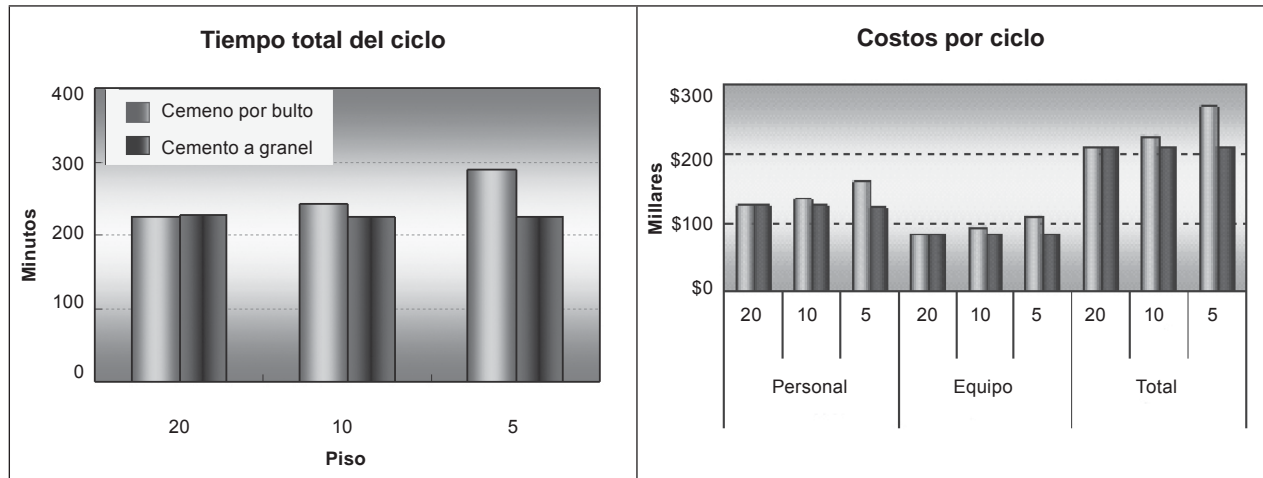
el personal directivo de obra de este proyecto: ¿el malacate de guía flexible que se utiliza, es realmente la mejor opción de transporte vertical de concreto? Se hace necesario analizar, entonces, un nuevo escenario: la preparación de concreto con dosificación a granel y transporte vertical por malacate de guía flexible, con igual número de operarios que presenta el proceso real.

#### 1.4 Escenario 4. Utilización de malacate de guía flexible para transporte vertical con dosificación de cemento a granel

Otro factor que puede ser determinante en el momento de elegir el método de trabajo de la actividad denominada preparación de concreto, es la forma de dosificación del cemento. El objetivo de este escenario es comparar sus resultados con el sistema de transporte en malacate de guía flexible con dosificación por bulto.

La ventaja que tiene la dispensación a granel es que no se limita a una cantidad de cemento múltiplo de 50 kilos; se puede asignar cualquier valor en un rango limitado por la capacidad de la mezcladora. La figura 7 entrega los resultados del caso.

**Figura 7.** Comparación de los resultados del sistema actual con los del Escenario 4



Fuente: elaboración propia.

Al ver la figura 7, se concluye que la dosificación del cemento a granel disminuye significativamente los tiempos de ciclo, así como los costos de ciclo desglosados por personal y equipo en los pisos 5 y 10. Para el piso 20 no presenta diferencias significativas con los resultados del malacate de guía flexible con dosificación por bulto de cemento.

Si se comparan los intervalos correspondientes a malacate de guía flexible con dosificación por bulto de cemento y con cemento a granel en el piso 5, se establece que entre ellos no hay traslape siendo mayores los valores del primero. En la medida que no hay traslape, puede concluirse que existe diferencia altamente significativa entre los promedios de los ciclos de ambos escenarios. La diferencia efectiva es favorable a la dosificación de cemento a granel (menores tiempos promedio de ciclo).

En el piso 10 de los mismos escenarios, los intervalos presentan un pequeño traslape. Esto indica una

diferencia significativa entre sus promedios, aunque esta desigualdad también es favorable al escenario de dosificación de cemento a granel. Por el contrario, al comparar los intervalos del piso 20, un intervalo prácticamente está contenido en el otro, lo cual indica que no hay disparidad significativa entre los promedios de los tiempos de ciclo de ambos escenarios.

Por otra parte, es importante enfatizar que el buen aprovechamiento del silo depende de la variación en la cantidad de cemento por pesar en los coches para las diferentes resistencias de concreto. La capacidad de las mezcladoras está dada por su propio volumen y no por el número de bultos de cemento, pues este varía con respecto a las distintas resistencias.

## Conclusiones

La implementación de la simulación digital en algunas actividades de proyectos de construcción, en la ciudad de Medellín, sirvió como acercamiento a la simulación de operaciones, tema aplicado en otros sectores industriales pero bastante desconocido en el sector de la construcción en Colombia. El aprendizaje del proceso y de la utilización de la herramienta computacional Arena, se constituye en el antecedente para el desarrollo de nuevos proyectos con diferentes empresas constructoras del medio. Los beneficios en la aplicación de la simulación redundarán en la generación de importante información para facilitar y hacer más efectivo y eficiente el proceso de planificación y control de los proyectos de construcción.

Los resultados del proceso corresponden a situaciones particulares en el contexto en el cual se ejecutaron los proyectos de construcción estudiados. Sin embargo, la aplicación de simulación en más proyectos podría consolidar algunos resultados que de manera general deberán tenerse en cuenta por los constructores; en especial, en la etapa de planificación y, en particular, en actividades y procesos constructivos comunes, como los transportes horizontales y verticales de materiales o la preparación de mezclas.

En el contexto de las condiciones en las que se realizó la simulación, se encontró que el escenario 4, donde se cambia el método de trabajo de dosificación, permite un desempeño superior al del sistema actual y, por tanto, reduce costos y tiempos del proceso.

## Bibliografía

AbouRizk Simaan M. y Kevin Mather. (1999). "Simplifying Simulation Modeling through integration with 3D CAD", *Journal of Construction Engineering and Management* (4). Reston, pp. 265-275

Banks, Jerry; Carson, John; Nelson, Barry & Nicol, David. (2005). *Discrete-event system simulation*. New Jersey: Prentice Hall, 608 p.

Banks, Jerry. (1999). "Introduction to simulation". Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference. Phoenix, pp. 7-13.

Botero, Luis F. y Martha E. Álvarez. (2003). "Identificación de pérdidas en el proceso productivo de la construcción", *Revista Universidad EAFIT*, 130. Medellín, pp. 65-78.

Cheng, Tao-Ming & Chung-Wei Feng. (2003). "An effective simulation mechanism for construction operations", *Automation in construction*, 3(12). Taiwan, pp. 227-244.

Córdoba, Jorge y María Delgado. (2002). *Simulación digital de procesos constructivos SISPLAN*. Trabajo de grado para optar al título de Magister en Ingeniería y Gerencia de la Construcción. Universidad de los Andes, Bogotá, 104 p.

Echeverry, Diego; Páez, Holmes y Mesa, Harrison. (2008). "Simulación digital de procesos de construcción de estructura en concreto: casos de estudio práctico en Bogotá", *Revista Ingeniería de Construcción*, 2(23). Santiago de Chile, pp. 64-71.

Halpin, Daniel W. & Leland S. Riggs. (1992). *Planning and analysis of construction operations*. New York: John Wiley & Sons, 381 p.

Huang, Rong-Yau & Daniel W. Halpin. (1995). "Graphical-based method for transient evaluation of construction operation", *Journal of construction engineering and management*, 2(121). United States, pp.222-229.

Kelton, David.; Sadowski, Randall. y Sturrock, David. (2008). *Simulación con software Arena*. Cuarta edición. México: McGraw Hill Interamericana, 629 p.

Martinez, Julio. (1996). Stroboscope state and resource based simulation of construction processes. A dissertation submitted in partial fulfillment of requirement of the degree of Doctor of Philosophy. University of Michigan. Ann Arbor, 504 p.

Páez, Holmes J. (2007). *Simulación digital para el mejoramiento de la planeación de procesos constructivos*. Trabajo de grado para optar al título de Magíster en Ingeniería y Gerencia de la Construcción. Universidad de los Andes. Bogotá, 62 p.

Shannon, Robert E. (1998). "Introduction to the art and science of simulation", Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference. Washington DC, pp. 7-14.

Vanegas, Jorge A. & Daniel W. Halpin. (1994). "Integrating process simulation into construction engineering education", *European Journal of Engineering Education*, 1(19). London, pp. 51-67.