

**SIMULACIÓN DIGITAL PARA EL MEJORAMIENTO DE LA PLANEACIÓN  
DE PROCESOS CONSTRUCTIVOS**

**HOLMES JULIÁN PÁEZ MARTÍNEZ**

**Tesis de grado para optar el título de Magíster en Ingeniería Civil,  
área de Ingeniería y Gerencia de la Construcción**

**Asesor:**

**ING. DIEGO ECHEVERRY CAMPOS Ph D.**

**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL  
MAGÍSTER EN INGENIERÍA CIVIL  
ÁREA DE INGENIERÍA Y GERENCIA DE LA CONSTRUCCIÓN  
BOGOTA  
2007**

Bogotá, Enero de 2007

**Señores:**

**Universidad de los Andes**

**Atn. Ing. Eduardo Behrentz**

**Coordinador Postgrado en Ingeniería Civil**

**Referencia: Tesis de Grado**

Por medio de la presente pongo a su consideración el documento titulado “Simulación Digital para el Mejoramiento de la Planeación de Procesos Constructivos” para optar el título de grado de Magíster en Ingeniería Civil.

Quiero agradecer la colaboración del Ing. Diego Echeverry Campos quien fue el orientador y guía de este trabajo. También quiero agradecer a mi familia por su apoyo constante, a la constructora ConConcreto S.A. por abrir las puertas de sus proyectos y a todas las personas que hicieron posible el desarrollo de este trabajo.

Atentamente,

-----  
HOLMES JULIÁN PÁEZ MARTÍNEZ

**TABLA DE CONTENIDO**

<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>8</b>
1.1 ASPECTOS GENERALES .....	8
1.2 OBJETIVO GENERAL .....	10
1.3 OBJETIVOS ESPECIFICOS .....	10
1.4 ALCANCE .....	11
<b>2. METODOLOGÍA .....</b>	<b>13</b>
<b>3. SIMULACION DIGITAL .....</b>	<b>17</b>
3.1 ASPECTOS GENERALES .....	17
3.1.1. Simulación continua .....	19
3.1.2. Simulación discreta .....	19
3.2 CONCEPTOS PARA LA MODELACIÓN DE SISTEMAS .....	19
3.2.1 estado de las variables del sistema .....	20
3.2.2. Entidades .....	20
3.2.3. Atributo .....	20
3.2.4. Recursos .....	21
3.2.5. Actividades .....	21
3.2.6 evento .....	22
3.2.7. Simulación de eventos discretos .....	22
3.3 FASES DEL ESTUDIO DE UNA SIMULACION .....	23
<b>4. SISTEMA MODELADO .....</b>	<b>26</b>

4.1	FASES DE ESTUDIO DEL MODELO SIMULADO .....	29
4.1.1.	Formulación del problema .....	30
4.1.2.	Determinación de los objetivos y plan general .....	30
4.1.3.	Conceptualización del modelo .....	31
4.1.4.	Recolección de datos .....	32
4.1.5.	Creación del modelo .....	36
4.1.6.	verificación y validación de los datos .....	38
4.1.7.	Realización de corridas y análisis .....	38
4.1.8.	Documentación y reportes .....	40
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS OBTENIDOS CON LA SIMULACIÓN DEL MODELO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>42</b>
<b>6.</b>	<b>ESCENARIOS DE MEJORAMIENTO .....</b>	<b>46</b>
6.1	CONSTRUCCIÓN DE UNA TORRE A LA VEZ .....	46
6.2	DISMINUCIÓN DE TIEMPOS NO CONTRIBUTIVOS POR	
6.3	ESPERAS DE LLEGADA DE CONCRETO A LA OBRA .....	48
6.4	CAMBIAR EL NÚMERO DE OBREROS DE LAS CUADRILLAS DE TRABAJO .....	50
<b>7.</b>	<b>GENERALIZACIÓN DEL MODELO EXPERIMENTAL Y CONCLUSIONES .....</b>	<b>53</b>
7.1	FORMULACIÓN DEL PROBLEMA .....	54
7.2	DETERMINACIÓN DE LOS OBJETIVOS Y PLAN GENERAL .....	54
7.3	CONCEPTUALIZACION DEL MODELO .....	55
7.4	RECOLECCION DE DATOS .....	56

7.5	CREACIÓN DEL MODELO .....	56
7.6	VERIFICACION Y VALIDACION DE LOS MODELOS .....	57
7.7	GENERACIÓN DE ESCENARIOS DE MEJORAMIENTO .....	57
7.8	SEGUIMIENTO A LOS ESCENARIOS DE MEJORAMIENTO .....	58
<b>8.</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>59</b>
<b>9.</b>	<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>61</b>

**INDICE DE TABLAS**

Tabla 1.	Duraciones probabilísticas de los procesos de construcción .....	35
Tabla 2.	Promedios mensuales de consumos de mano de obra .....	36
Tabla 3.	Resultado de corridas del modelo .....	40
Tabla 4.	Resultado de principales indicadores de desempeño del modelo experimental .....	44
Tabla 5.	Resultado del modelo modificado con los escenarios de mejoramiento .....	52

**INDICE DE FIGURAS**

Figura 1.	Esquema general de un modelo de simulación digital .....	23
Figura 2.	Fases del estudio de una simulación .....	24
Figura 3.	Esquema general del sistema modelado experimental de muros estructurales .....	32
Figura 4.	Modelo realizado en Arena .....	37
Figura 5.	Distribución normal de las corridas de la simulación del modelo experimental .....	42
Figura 6.	Comparativo entre duraciones de construcción de pisos para una torre .....	45

## **1. INTRODUCCIÓN**

### **1.1 ASPECTOS GENERALES**

Debido a la gran variabilidad de los factores que intervienen en los proyectos constructivos, su planeación tiene una notable incertidumbre. En Colombia y en otros países la planeación de las obras de construcción ha sido influenciada por el conocimiento empírico basado en la experiencia acumulada con los años, por parte de ingenieros y arquitectos. Aunque la experiencia es indispensable para que las planeaciones sean lo más precisas posible, la realidad indica que no es suficiente para lograr el mejor tratamiento a las variables que intervienen en la construcción. El trabajo que se presenta a continuación está basado en la necesidad de incorporar a la planeación de procesos constructivos modelos que simulen el comportamiento probabilístico de las variables de tiempo y costo lo más cercano posible a la realidad futura del proyecto de construcción, reduciendo de esta forma la incertidumbre presente en la planificación.

Con la utilización de variables de costo, tiempo y calidad de manera probabilística, y no determinística como normalmente se realizan los presupuestos de obras de construcción, se pueden generar escenarios pesimistas, más probables y optimistas de la realidad futura del proyecto. Estos escenarios generan un acercamiento más preciso a lo que realmente se obtendrá con el proyecto, reduciendo de esta forma la diferencia entre lo presupuestado inicialmente y lo



que realmente produjo la ejecución del proyecto de construcción. Con frecuencia los presupuestos no proporcionan una información confiable y en la mayoría de los casos los costos reales superan en gran medida a los presupuestados, reduciendo de esta forma la generación de valor del negocio, debiéndose en gran parte a que durante la ejecución de la obra surgen costos adicionales que no estaban contemplados en un inicio, aumento inesperado de los costos de materiales y mano de obra, no cumplimiento de la programación inicial, entre otros. Los cambios en las variables de costo, tiempo y calidad siguen comportamientos que se repiten en proyectos de construcción de características similares, pero que no se aplican en los presupuestos, debido a que no existe en algunos casos la información suficiente y confiable para generar el componente no determinístico de las variables o simplemente porque cada nuevo proyecto es una isla de los que anteriormente se habían ejecutado, desechando de esta forma toda la información del pasado. Los presupuestos de construcción en Colombia se realizan en la mayoría de los casos basados en la experiencia de los profesionales, en bases de datos que con frecuencia no corresponden a la realidad o ajustados a limitantes presentes externamente en costo, tiempo y calidad que se asumen con la intención de ganar a cualquier precio la asignación de un determinado contrato. Teniendo en cuenta lo anterior, el presente trabajo muestra procedimientos que incorporan a la planeación del proyecto variables más acordes con la realidad.

## **1.2 OBJETIVO GENERAL**

El proyecto tiene como propósito aplicar la teoría de Simulación Digital para el mejoramiento de los procesos constructivos, apoyándose en un proyecto de construcción inmobiliario real con el objetivo de validar los resultados obtenidos y realizar los lineamientos para la generación de la estructura para el mejoramiento de las planeaciones en construcción.

## **1.3 OBJETIVOS ESPECIFICOS**

Para dar cumplimiento con el desarrollo del presente proyecto se deben lograr los siguientes objetivos específicos:

1. Generar un plan general de trabajo en el que se incluya un cronograma detallado para dar cumplimiento a cada una de las actividades que demande este proyecto.
2. Realizar una revisión bibliográfica de la información existente en el tema de Simulación Digital.
3. Buscar alternativas de aplicación en proyectos de construcción inmobiliaria con el objetivo de validar el proyecto.

4. Seleccionar herramientas computacionales que sean factibles para la aplicación de este proyecto.
5. Aplicar una metodología estructurada en donde estén claramente definidos los procesos que se lleven a cabo en el proyecto.
6. Aplicar modelos de Simulación Digital en el proyecto de construcción inmobiliaria, teniendo como objetivo la validación de la información obtenida.
7. Realizar los análisis de la información obtenida a lo largo del proyecto y generar la documentación necesaria para generar los aportes objetivos del presente trabajo.
8. Reportar y comunicar los logros obtenidos con el proyecto con el fin de que sea útil para futuros trabajos en el tema.

#### **1.4 ALCANCE**

Al terminar este proyecto, se espera haber aplicado modelos de Simulación Digital para el mejoramiento de la planeación de la obra de construcción inmobiliaria seleccionada para este propósito. Después de realizar todos los pasos necesarios para crear los modelos de Simulación Digital se pretende generar las propuestas

de mejoramiento del proyecto de construcción. Finalmente, se espera proponer unos lineamientos generales para la aplicación de la Simulación Digital en proyectos inmobiliarios en Colombia, teniendo en cuenta gran parte de las variables que intervienen en el sistema.

## 2. METODOLOGÍA

La metodología que se utilizó para llevar a cabo el proyecto es la siguiente:

1. Revisión y entendimiento de bibliografía existente en el tema de Simulación Digital, respecto a su teoría y aplicación tanto de manera general como específicamente en los proyectos de construcción. Se tomó como base las tesis realizadas en el tema en años pasados en la Universidad de los Andes y seguidamente de información proveniente de bases de datos acreditadas de acuerdo a los parámetros de calidad que se requirieron.
2. La revisión bibliográfica es un proceso que se realizó a lo largo de todo el proyecto pero una vez se tuvo el suficiente manejo del tema se procedió a generar una estructura detallada de los trabajos que se realizarían, especificando cada uno de los pasos necesarios para llevar a cabo el proyecto.
3. Se buscó alternativas para la aplicación real en una obra de construcción inmobiliaria. Finalmente, se tuvo la posibilidad de aplicar la Simulación Digital en una obra perteneciente a una constructora local que ofreció todos los recursos para que se llevara a cabo el proyecto.

4. Se realizó un trabajo paralelo entre la selección de una herramienta computacional que fuera accesible para el proyecto y el inicio de la toma de datos que alimentaría los modelos de Simulación Digital que se realizaron.
  
5. La selección de la herramienta computacional para la creación de los modelos se partió de la necesidad de tener un software que estuviera al alcance de las posibilidades del proyecto, que fuera apropiado para los trabajos que se realizaron y que se tuvieran ejemplos de aplicación de este tipo de trabajo en proyectos anteriores. La Universidad de los Andes básicamente cuenta actualmente con dos aplicaciones que son perfectamente viables para la Simulación Digital de proyectos constructivos, estos son Stroboscope y Arena. Stroboscope es un software desarrollado por Julio C. Martínez y es utilizado en la asignatura de Herramientas Computacionales de la Maestría en Ingeniería Civil en el área de Gerencia de Proyectos de la Universidad de los Andes, este software a servido como herramienta para el montaje de modelos en construcción. Arena es un software desarrollado por Rockwell Software y es utilizado en algunas asignaturas del Departamento de Ingeniería Industrial de la Universidad de los Andes especialmente en la materia de Simulación de Eventos Discretos. Arena está siendo implementado actualmente por algunas Universidades Brasileñas en el campo específico de la construcción, con muy buenos resultados. Arena y Stroboscope fueron los candidatos principales para seleccionar el mejor software para montar los modelos del proyecto de

construcción inmobiliaria seleccionado. Finalmente, se decidió aprovechar los recursos que ofrecía Arena y se procedió a incorporar la información obtenida de la toma de datos de la obra de construcción modelo para este trabajo.

6. El proceso de la toma de datos inició con la determinación de qué procesos de construcción de la obra inmobiliaria se someterían a la producción de los modelos de Simulación Digital. De acuerdo con información obtenida del GEPUC de la Universidad Católica de Chile que adelanta desde hace unos años investigaciones y trabajos prácticos en el tema de Simulación Digital, la elaboración de modelos que comprendan casi en su totalidad todos los procesos constructivos de una obra arrojan resultados no muy confiables y se ha comprobado que no son muy acordes con la realidad que se presenta en la obra. Teniendo en cuenta lo anterior, se seleccionaron para este trabajo los procesos constructivos que estuvieran sobre la ruta crítica de la programación de obra existente. De esta forma se empezaron a tomar datos de duraciones de actividades de construcción de muros y losas estructurales de tres torres del proyecto de construcción. Se tomaron datos tanto de actividades muy detalladas que intervenían en el proceso de construcción como de actividades más generales, ambas con una influencia ponderada en la duración total de cada una de las procesos de construcción.

7. Una vez se recolectó toda la información para alimentar los modelos se llevó a cabo un proceso para la realización de cada uno de los modelos de Simulación Digital necesarios para lograr los objetivos propuestos en este trabajo. Terminados los modelos y ya realizadas sus respectivas calibraciones se procesó toda la información obtenida de estos con el objetivo de validar más tarde los datos, respecto a la evolución de los procesos constructivos en la realidad de la obra inmobiliaria.
8. Con la validación de los modelos realizados se llevó a cabo el planteamiento de escenarios de mejoramiento para los procesos existente en la obra, con el objetivo de reducir en tiempo y costo las actividades de la ruta crítica y por consiguiente la duración del proyecto de construcción. Los escenarios de mejoramiento por medio de los procedimientos propuestos sirvieron como base para modificaciones de planeación de la obra inmobiliaria.
9. Finalmente, se elaboró la documentación total del proyecto realizado el cual contiene toda la información disponible que se obtuvo por el desarrollo de este trabajo.



### **3. SIMULACIÓN DIGITAL**

#### **3.1 ASPECTOS GENERALES**

La simulación en general es la imitación de la operación de un proceso real o sistema a través del tiempo. La simulación incorpora la generación de una historia artificial que representa el comportamiento de las variables que contiene un sistema (Banks, 1999).

La simulación digital comprende metodologías para la representación de sistemas por medio de modelos matemáticos, con el propósito de comprender su funcionamiento e imitar su comportamiento con la ayuda de herramientas computacionales.

El análisis del comportamiento de un sistema se ha realizado comúnmente por medio de dos metodologías: Experimentar con el sistema actual y experimentar con un modelo del sistema actual o futuro. En la industria de la construcción los proyectos que se realizan son únicos, debido a esto, es poco probable encontrar un sistema funcionando que iguale las condiciones del nuevo proyecto. De esta forma, se hace más conveniente el análisis por medio de un modelo del sistema. El estudio de un sistema por medio de un modelo puede realizarse mediante un modelo físico o matemático. El imitar un proyecto de construcción, en este caso el sistema, se hace muy inconveniente por medio de un modelo físico, ya que esto supondría un esfuerzo bastante grande para la creación del modelo mismo y convirtiéndose inviable principalmente por los altos costos que conllevaría. El

modelo matemático queda entonces como la solución más apropiada para la imitación de los sistemas de construcción, desde el punto de vista económico por su relación beneficio costo. Los modelos matemáticos a su vez tiene dos vías para realizarse, una es analizar el sistema analíticamente y la otra es la simulación. Como ya se ha mencionado, debido a la gran complejidad de las relaciones de las variables en construcción, su análisis analítico demandaría un gran esfuerzo y poca validez de los datos que arrojan los modelos. De esta forma la simulación queda como el camino más apropiado para la creación de modelos de procesos constructivos. Adicionalmente, por medio de la simulación se pueden analizar diferentes alternativas para los procesos constructivos a un costo relativamente bajo, ya que una vez montado el modelo principal o inicial del sistema, es muy fácil hacer modificaciones del mismo para crear nuevos escenarios de funcionamiento del sistema, esto principalmente porque no se requieren recursos físicos para la generación de los modelos. En décadas atrás montar un modelo para simular un sistema era una labor muy dispendiosa, debido a la precariedad en capacidad y velocidad de las herramientas computacionales, pero actualmente, debido al avance de la tecnología en este campo, la simulación se hace accesible y fácil de implementar.

La metodología de simulación se puede clasificar en dos tipos de acuerdo a las características del sistema que se está modelando, estas son: la simulación continua y la simulación discreta.

### **3.1.1. Simulación continua**

En los modelos de simulación continua el estado de las variables pueden cambiar en cualquier punto de la línea de tiempo continuo del sistema. Comúnmente los modelos continuos son caracterizados en términos de ecuaciones diferenciales cuyo comportamiento simula el sistema real. Para los procesos de construcción no se requiere un grado de detalle como el que incorpora un modelo continuo del sistema, por lo que su utilización no es estrictamente necesaria para llevar a cabo un proyecto como el presente.

### **3.1.2. Simulación discreta**

En la simulación de eventos discretos el estado de las variables del sistema cambian en puntos específicos en el tiempo, esto nos permite analizar el modelo en los momentos en que se requieran. Para los procesos de construcción los modelos discretos son totalmente aplicables, no sin esto disminuir de forma considerable los resultados que se obtienen con las simulaciones.

## **3.2 CONCEPTOS PARA LA MODELACIÓN DE SISTEMAS**

Con el propósito de que un sistema sea analizado, existe una serie de términos que deben ser definidos. A continuación se presentan las definiciones de términos basados en la teoría disponible de Banks (2000), Carson y Nelson (1996) y Law y Kelton (1991).

### **3.2.1 Estado de las Variables del Sistema**

El estado de las variables del sistema es el conjunto de toda la información necesaria para definir que está sucediendo en un determinado punto en el tiempo. El estado de las variables a través del tiempo es el objetivo del análisis del sistema (Banks 1999). Un ejemplo de esto es el tiempo promedio que debe esperar un trabajador de la construcción para iniciar una actividad determinada.

### **3.2.2. Entidades**

Una entidad es la representación de un objeto que debe ser explícitamente definido. Una entidad puede moverse por el sistema, un ejemplo de esto son los trabajadores de la construcción que se mueven de una actividad constructiva a otra. Una entidad estática es definida por su inmovilidad en una determinada actividad del sistema, por ejemplo, una torre grúa para el transporte vertical y horizontal de un determinado material.

### **3.2.3. Atributo**

Un atributo es una propiedad de una entidad. La edad de los trabajadores, su cargo, su especialidad y su experiencia son atributos de las entidades llamadas “trabajadores de la construcción”. Es muy importante la adecuada definición de los atributos de las entidades, ya que esta en algún punto de la simulación puede definir los movimientos de las entidades en el sistema que se modeló.

### **3.2.4. Recursos**

Los recursos son entidades que ofrecen servicios a las entidades que se mueven por el sistema. Un almacenista es un ejemplo de recurso para los trabajadores de la construcción, ya que presta el servicio de almacenamiento de equipos y herramientas necesarios para desarrollar los diferentes procesos constructivos.

### **3.2.5. Actividades**

Las actividades son cada uno de las subdivisiones de lo que se hace en el sistema. Cada actividad tiene incorporados una duración probabilística, unos recursos asociados a la actividad y una función que determina la forma como circularán las entidades en la actividad. Un ejemplo de actividad en un sistema de construcción es la fundición de concreto en un área determinada. La duración de esta actividad puede estar determinada por una distribución de probabilidad triangular, algunos de los recursos necesarios para realizar la actividad son la torre grúa para el transporte del concreto y el equipo para el afinado de las superficies, la entidad básica en esta actividad es el concreto y su forma de procesamiento es una cola FIFO (first-in-first-out), es decir, el primer concreto que es transportado por la torre grúa es el primero en ser instalado en la formaleta que está dispuesta para la actividad como un recurso.

### **3.2.6 Evento**

Un evento es una acción que ocurre en un punto determinado en el tiempo y que cambia el estado del sistema. La ocurrencia de un evento altera o desencadena la ejecución de otros eventos relacionados con el anterior. Un ejemplo de esto es la llegada de concreto a la obra lo cual genera que se ejecuten actividades como el transporte interno de material y mano de obra.

### **3.2.7. Simulación de eventos discretos**

La simulación de modelos con eventos discretos en síntesis es aquella que el estado de las variables que incorpora el sistema cambia en puntos determinados en el tiempo debido a la ocurrencia de un evento (Banks 1999).

En la figura 1 se muestra un esquema general de un modelo de simulación de la construcción de apartamentos. Se tiene como entradas del sistema los materiales necesarios para la realización de los apartamentos, estos materiales son procesados por actividades de construcción las cuales tienen asociados unos costos y duraciones probabilísticas y unos recursos necesarios para su ejecución. Finalmente, se obtiene el producto final del sistema que en este caso son los apartamentos terminados.



**Figura 1. Esquema general de un modelo de simulación digital**

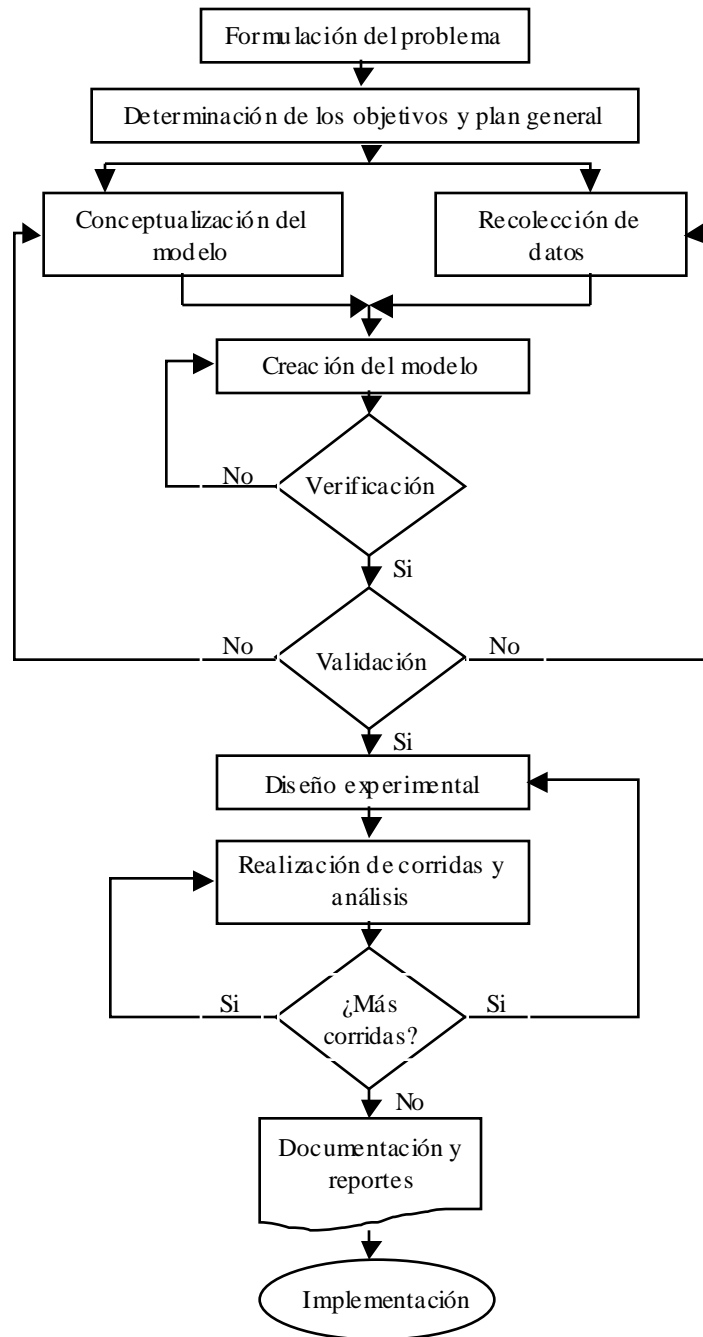
### **3.3. FASES DEL ESTUDIO DE UNA SIMULACIÓN**

Con la intención de que el proceso de simulación se realice de una forma estructurada, variados autores han propuesto una serie de pasos para el estudio de un sistema por medio de la simulación digital. En la figura 2 se presentan las fases del estudio de una simulación propuestos por Banks, Carson y Nelson (2000).

Un plan para crear la simulación de un sistema, inicia con la formulación del problema a resolver. Se determina la necesidad, el alcance y los objetivos que se desean lograr con la simulación. Es importante hacer un inventario general de la información que estaría disponible para el trabajo posterior, ya que esto en gran parte determinará la precisión a la que se llegará con los resultados. Una vez planteada la formulación del problema, los objetivos y una estrategia general de trabajo, partiendo de la base de que el problema al que se enfrenta es candidato

seguro para una simulación, se deben realizar dos actividades en paralelo, estas son: la conceptualización del modelo y la recolección de datos. Seguidamente se realiza la codificación del modelo y se efectúa una verificación y validación del mismo. Si en el anterior paso no se obtienen los resultados acordes con la precisión requerida, se hacen de nuevo iteraciones de recolección de datos y modificaciones al modelo hasta obtener unos resultados adecuadamente validados. Posteriormente, con el modelo definitivo se proceden a realizar las corridas de la simulación, una vez se ha seleccionado el nivel de confianza apropiado, teniendo en cuenta que el tamaño del error en los datos que se está dispuesto a tolerar es directamente proporcional a qué tan crítico es el trabajo que se está realizando (Webster, 2000). Finalmente, se realiza la documentación necesaria de los resultados de la simulación y se genera un reporte final para efectuar la implementación de la solución propuesta al problema.





**Figura 2. Fases del estudio de una simulación<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> BANKS, DISCRETE EVENT SYSTEM SIMULATION. Prentice-Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 2000

#### **4. SISTEMA MODELADO**

Con el objetivo de generar un punto de partida para el aporte técnico del presente trabajo, es todo es, para presentar los lineamientos para la Simulación Digital para el Mejoramiento de la Planeación de Procesos Constructivos, con base en estudios realizados a un sistema específico de construcción ubicado en Bogotá – Colombia, a continuación se presenta una descripción general de un sistema simulado que se tomó como modelo experimental para el desarrollo de este estudio.

El presente trabajo se enfocó en la planeación de procesos durante la etapa de construcción del proyecto. Es igualmente importante la planeación que se realiza durante la obra ya que aunque ya debe haberse efectuado una planeación inicial antes de empezar la obra de construcción que debe abarcar todos los aspecto relevantes del futuro proyecto, también existen grandes oportunidades de mejora que solo se encuentran cuando se empieza a construir, es decir, la determinación de controles que hagan más eficientes los procesos, acortando su duración. Como se había comentado anteriormente, los proyectos de construcción adolecen de cambios durante la obra que provocan aumentan negativamente los costos y plazos del proyecto, pero cabe anotar, que durante la obra se pueden realizar cambios que disminuyan los costos asociados a la construcción y hagan que las duraciones de los procesos sean más cortas. Debido a que se encuentran modificaciones que pueden mejorar la obra, se deben contemplar nuevas planeaciones para que estas mejoras si surtan los efectos que se desean. Por lo

anterior, el presente trabajo se fundamenta en la detección y propuestas de mejora por medio de la simulación digital, para obtener planeaciones a corto, mediano y largo plazo con muchas más ventajas para el proyecto.

El modelo experimental se realizó analizando la construcción de un proyecto inmobiliario en la ciudad de Bogotá – Colombia. La obra consta de 192 apartamentos de vivienda de estrato medio, cada uno con un área de 72 m<sup>2</sup>, el sistema constructivo es en muros y losas estructurales en concreto, torres de 6 pisos de altura y 4 apartamentos por piso. En el momento de empezar con las mediciones la obra de construcción ya estaba avanzada parcialmente, por tal motivo, se decidió modelar la construcción de la estructura de las torres faltantes, estas son: torre 14 sur, 12 sur y 13 occidental.

En la foto 1 se muestra una torre típica del proyecto de construcción modelado. Su estructura se encuentra construida en muros estructurales hasta el piso 4 y la losa de entrepiso hasta el piso quinto. En el momento en que fue tomada la foto (octubre 31 de 2006) se estaba procediendo a instalar la malla de refuerzo estructural.



**Foto 1. Torre típica del proyecto en construcción.**



**Foto 2. Torre típica del proyecto de construcción terminada en estructura.**



**Foto 3. Torre típica del proyecto de construcción en proceso estructura.**

#### **4.1. FASES DE ESTUDIO DEL MODELO SIMULADO**

Debido a que en el momento de la decisión de empezar las modelaciones del sistema experimental ya la obra de construcción inmobiliaria había iniciado, no fue posible crear propuestas de mejoramiento antes de la construcción del proyecto. Por lo anterior, se optó por enfocarse en la planeación detallada e intermedia durante la realización de la obra, que también es fundamental, ya que corrige problemas que no se habían contemplado desde la planeación del proyecto y que son especialmente importantes en el punto de que logra aproximar lo más preciso posible lo que se hace realmente en la obra con lo inicialmente planteado.

#### **4.1.1. Formulación del problema**

El sistema a modelar surge de la necesidad de reducir los tiempos de construcción en la obra. Esta tiene inconvenientes con el transporte de la formaleta, tiempos no contributivos relativamente altos y falta de materiales en el sitio de las actividades, entre otros, que han afectado negativamente el cumplimiento de la programación de obra inicial.

#### **4.1.2. Determinación de los objetivos y plan general**

El objetivo general planteado fue el de generar escenarios de mejoramiento para la reducción de la duración de los procesos constructivos, por medio de la generación de modelos discretos del sistema. Para lo anterior se creó un plan general para la identificación de las causas predominantes de los tiempos no contributivos en la obra. Se determinó por medio de toma de datos de duración de actividades y observaciones del sistema, que uno de los puntos críticos era el transporte de formaleta internamente en la obra, ya que debido a que este equipo era alquilado se tenía la prevención de que se debía utilizar la totalidad del tiempo, es decir, aunque se tuviera que transportar de una torre hacia otra por medio de la torre grúa y perder tiempo valioso en ese proceso, se realizaba con el fin de que en ningún momento se detuviera el uso de la formaleta. El segundo punto para mejorar en el sistema se identificó por medio de la medición de los tiempos de arribo del concreto transportado por mixer desde una planta productora de concreto cercana. Se detectó una marcada impuntualidad de la llegada de material, que se convertía

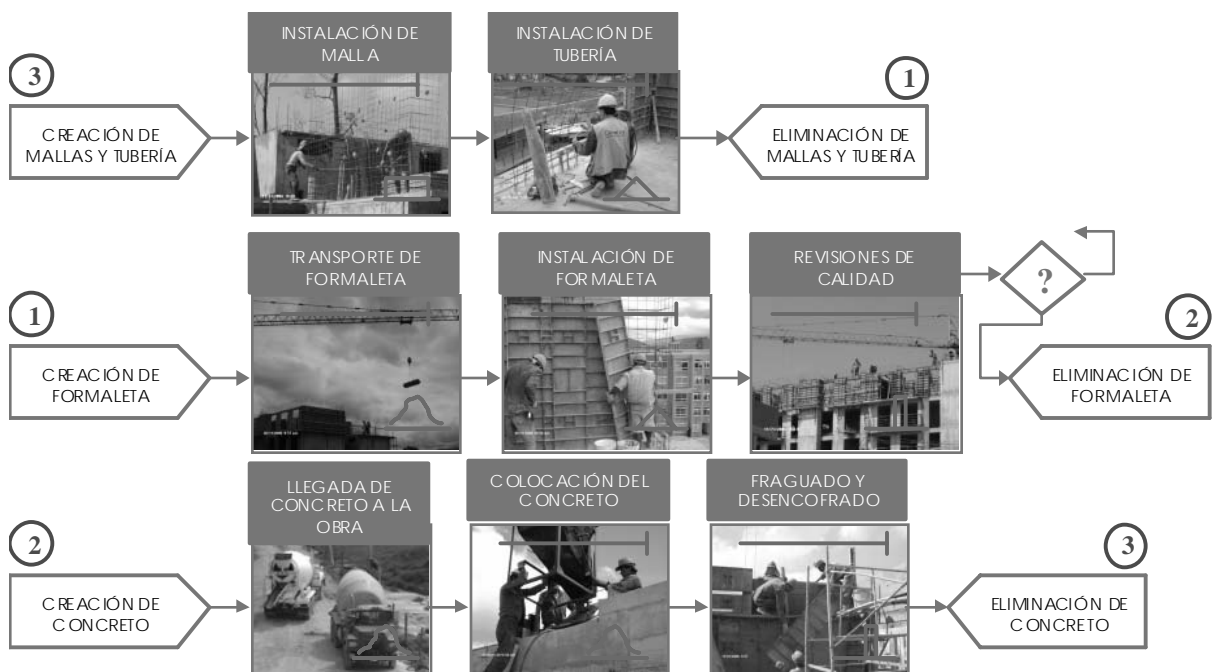
frecuentemente en un caso de retraso de las actividades de fundición de muros y losas estructurales. El anterior análisis se realizó con el fin de asegurarse de las ventajas que traería una simulación del sistema, confirmándose una excelente oportunidad para que por medio de esta metodología se llegara a plantear escenarios de mejoramiento que influyeran notablemente en la reducción de tiempos de construcción en la obra. El plan general consistió en simular el sistema tal y como es realmente, con el fin de obtener los indicadores de desempeño de cada una de las variables del modelo y posteriormente crear modelos alternativos basados en los escenarios de mejoramiento planteados y obtener finalmente los indicadores de desempeño en el caso de que se efectuaran las mejoras al sistema recomendadas.

#### **4.1.3. Conceptualización del modelo**

El alcance de las modelaciones fue determinado para simular discretamente la construcción de la estructura de 3 torres del proyecto inmobiliario. Las actividades de estructura se encuentran dentro de la ruta crítica de la programación de la obra, por este motivo, al reducir las duraciones de esta, se obtienen disminuciones directas de los procesos constructivos relacionados con la estructura de las torres.

En la figura 3 se presenta un esquema general del sistema modelado experimental de la construcción de muros estructurales. La simulación se compone de las entradas, que en este caso son las entidades: Concreto, acero y formaleta, que se van a mover por el sistema. Existe una serie de actividades para el procesamiento de las entidades que ingresan y salen de cada una de ellas. Adicionalmente, para el

desarrollo de cada actividad se cuenta con unos recursos necesarios, estos son: Equipo de construcción, equipo de transporte horizontal y vertical y cuadrillas de trabajo (mano de obra). Finalmente se obtiene el producto terminado de la serie de procesos constructivos, que en el sistema se representan como unidades de  $m^3$  de concreto instalado en los muros estructurales.



**Figura 3. Esquema general del sistema modelado experimental de muros estructurales.**


#### 4.1.4. Recolección de datos

Entre los meses de junio y octubre de 2006 se recolectaron los datos que alimentaron el sistema. Los datos que se tomaron fueron de dos tipos: de tiempos



de duración de actividades de construcción y de costos directos asociados a esas actividades. Con el esquema definitivo de procesos constructivos se tomaron muestras de tiempos para cada una de las actividades, refinando con el tiempo las formas de tomar las mediciones, hasta llegar a unos procedimientos que reflejaban con precisión las duraciones probabilísticas reales que tenía el sistema. Los costos asociados al modelo son principalmente: costo de arrendamiento de la fomaleta, costo del concreto, costo de arrendamiento de torre grúa y costos de mano de obra de los subcontratos.

El formato 1 se diseñó para la toma de duración de actividades de cada uno de los procesos de construcción de la estructura de tres torres del proyecto inmobiliario.

FORMATO PARA LA TOMA DE DURACIÓN DE ACTIVIDADES				
Proyecto:				
Fecha:				
hora:				
Actividad:			Nombre de entidad:	
Recursos utilizados:			Unidad de medición de la entidad:	
Observaciones generales:			Cantidad de entidad:	
Muestra No.	Duración (min.)	No. de oficiales trabajando	No. de ayudantes trabajando	Observaciones

**Formato 1. Formato para la toma de duración de actividades**

En la tabla 1 se muestra la información obtenida de las duraciones de cada una de las actividades de los modelos realizados. Las duraciones se expresan en forma de distribuciones de probabilidad, y además se presentan los recursos necesario para llevar a cabo cada uno de los procesos constructivos.

Entidad	Unidad de medición de la entidad	Actividad	Recursos utilizados	Distribución de probabilidad	Parámetros de la distribución (min.)	Observaciones
Malla de acero para reforzamiento de muros	Malla 15x15 de 2.0x2.4	Transporte de malla	1 torre grúa 1 operario de torre grúa 1 ayudante de torre grúa 2 obreros ayudantes	Uniforme	Valor mínimo: 1.3 Valor máximo: 2.2	El modelo de construcción de muros inicia con esta actividad.
Malla de acero para reforzamiento de muros	Malla 15x15 de 2.0x2.4	Instalación de malla	2 obreros oficiales 2 obreros ayudantes	Uniforme	valor mínimo: 5.3 Valor máximo: 8.1	Una vez almacenada la malla en un piso determinado se transporta hacia su destino manualmente por parte de los obreros y se instala.
tubería para las instalaciones eléctricas	metros lineales de tubería	Instalación de tubería eléctrica	2 obreros oficiales 1 obrero ayudante	Triangular	Valor mínimo: 2.7 Valor medio: 3.9 Valor máximo: 5.0	La tubería queda embudada en el muro y luego de realizarse la fundición de concreto se realiza una prueba de sondeo de la tuberías.
Tubería para las instalaciones hidrosanitarias	metros lineales de tubería	Instalación de tubería hidrosanitaria	2 obreros oficiales 1 obrero ayudante	Uniforme	Valor mínimo: 2.1 Valor máximo: 4.8	La tubería hidrosanitaria debe pasar por una prueba de estanquidad y presión
Paquete de módulos de formaleta para muros	Paquete de 10 módulos de formaleta de 0.5X2.3	Transporte de formaleta	1 torre grúa 1 operario de torre grúa 1 ayudante de torre grúa 1 obrero oficial 1 obrero ayudante	Normal	Valor medio: 3.8 Desviación estándar: 1.4	La formaleta se transporta por medio de una torre grúa desde el piso inicial hasta su posición final
Módulos de formaleta para muros	Módulo de formaleta de 0.5X2.3	Instalación de formaleta para muros	10 obreros oficiales 15 obreros ayudantes	Normal	Valor medio: 1.7 Desviación estándar: 0.5	La formaleta instalada se somete a mediciones para asegurarse de que esté plomada.
Módulos de formaleta para muros	Juego de formaleta	Pruebas de calidad de la instalación de la formaleta	1 maestro 1 obrero oficial	Determinístico	Valor determinístico: 40	La duración de la actividad es un valor en la mayoría de los casos al valor determinístico mostrado.
Concreto para muros	0.5 m3 de concreto (balde)	transporte de concreto en la obra	1 torre grúa 1 operario de torre grúa 1 ayudante de torre grúa 2 obreros oficiales 2 obreros ayudantes	Normal	Valor medio: 2.5 Desviación estándar: 0.8	El transporte de concreto en la obra inicia cuando este llega a la obra transportado por el mixer.

**Tabla 1. Duraciones probabilísticas de los procesos de construcción**

Concreto para muros	0.5 m3 de concreto (balde)	Fundición de concreto	1 torre grúa 1 operario de torre grúa 1 ayudante de torre grúa 4 obreros oficiales 6 obreros ayudantes	Normal	Valor medio: 5.5 Desviación estándar: 0.6	Cada balde de concreto transportado por la torre grúa es fundido por los obreros que se muestra.
Concreto para muros	Muros de 2 aptos.	Fraguado de concreto de muros	-	Determinístico	Valor de terminis tico: 500	Se entiende en esta actividad de fraguado el tiempo necesario para poder desencofrar los muros y no el tiempo para que adquiera el concreto determinada resistencia.
Módulos de formaleta para muros	Módulo de formaleta de 0.5X2.3	Desencofrado de formaleta de muros	4 obreros oficiales 6 obreros ayudantes	Triangular	Valor mínimo: 1.2 Valor medio: 1.5 Valor máximo: 1.8	El desencofrado de formaleta de muros se realiza el día siguiente a la fundición de concreto.
Paquete de módulos de formaleta para los as	Paquete de 10 módulos de formaleta de 0.6X2.3	Transporte de formaleta para los as	1 torre grúa 1 operario de torre grúa 1 ayudante de torre grúa 1 obrero oficial 1 obrero ayudante	Normal	Valor medio: 4.0 Desviación estándar: 1.6	La formaleta se transporta por medio de una torre grúa desde el piso inicial hasta su posición final
Módulos de formaleta para los as	Módulo de formaleta de 0.6X2.3	Instalación de formaleta para los as	8 obreros oficiales 13 obreros ayudantes	Normal	Valor medio: 1.2 Desviación estándar: 0.4	La formaleta instalada se somete a mediciones para asegurarse de que esté plomada.
Módulos de formaleta para los as	Juego de formaleta	Pruebas de calidad de la instalación de la formaleta	1 maestro 1 obrero oficial	Determinístico	Valor de terminis tico: 30	La duración de la actividad es un valor en la mayoría de los casos al valor determinístico mostrado.
Malla de acero para reforzamiento de los as	Malla 10x10 de 3.0x2.0	Transporte de malla para los as	1 torre grúa 1 operario de torre grúa 1 ayudante de torre grúa 2 obreros ayudantes	Uniforme	Valor mínimo: 1.8 Valor máximo: 2.5	El transporte de malla para los as es un poco más demorado que el de muros debido al tamaño de la malla.
Malla de acero para reforzamiento de los as	Malla 15x15 de 3.0x2.0	Instalación de malla para los as	2 obreros oficiales 2 obreros ayudantes	Uniforme	valor mínimo: 4.3 Valor máximo: 5.5	Una vez almacenada la malla en un piso determinado se transporta hacia su destino manualmente por parte de los obreros y se instala.
Concreto para los as	0.5 m3 de concreto (balde)	transporte de concreto en la obra	1 torre grúa 1 operario de torre grúa 1 ayudante de torre grúa 2 obreros oficiales 2 obreros ayudantes	Normal	Valor medio: 2.1 Desviación estándar: 0.7	El transporte de concreto en la obra inicia cuando este llega a la obra transportado por el mixer.
Concreto para los as	0.5 m3 de concreto (balde)	Fundición de concreto	1 torre grúa 1 operario de torre grúa 1 ayudante de torre grúa 3 obreros oficiales 5 obreros ayudantes	Uniforme	Valor mínimo: 7.4 Desviación estándar: 9.3	Cada balde de concreto transportado por la torre grúa es fundido por los obreros que se muestra.
Concreto para los as	Losas de 2 aptos.	Fraguado de concreto de losas	-	Determinístico	Valor de terminis tico: 1200	Se entiende en esta actividad de fraguado el tiempo necesario para poder desencofrar los muros y no el tiempo para que adquiera el concreto determinada resistencia.
Módulos de formaleta para los as	Módulo de formaleta de 0.6X2.3	Desencofrado de formaleta de losas	4 obreros oficiales 6 obreros ayudantes	Normal	Valor medio: 1.8 Desviación estándar: 0.9	El desencofrado de formaleta de losas se realiza al tercer día de la fundición de concreto.

**Tabla 1. Duraciones probabilísticas de los procesos de construcción (continuación)**

En la tabla 2 se muestran los consumos de mano de obra que se tomaron como parámetros para la determinación de la duración probabilística de cada uno de los procesos de construcción de los modelos realizados.

ACTIVIDADES	INDICADOR	PROMEDIOS MENSUALES								
		FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPT	OCTUBRE
Fundición de concreto de vigas de cimentación (m3)	Trabaj/m3	0.48				0.51	0.58	-	-	-
	HH/m3	4.26				3.05	2.91	-	-	-
Fundición de concreto de losas de contrapiso (m3)	Trabaj/m3	0.63	0.48			0.68	0.35	0.35	-	-
	HH/m3	4.58	2.40			3.40	2.78	2.73	-	-
Fundición de concreto de losas de entrepiso (m3)	Trabaj/m3		0.49	0.68	0.82	0.93	0.86	0.83	0.81	0.70
	HH/m3		2.42	2.90	3.53	3.70	3.87	3.77	3.72	3.82
Fundición concreto de muros estructurales (m3)	Trabaj/m3	0.51	0.69	0.59	1.07	0.93	0.81	0.80	0.79	0.71
	HH/m3	2.78	2.66	2.86	4.93	3.95	4.04	3.97	3.92	4.05
Instalación de formaleta de losas de entrepiso (m2)	Trabaj/m2		0.07	0.06	0.11	0.10	0.10	0.10	0.10	0.07
	HH/m2		0.75	0.91	1.27	1.23	1.58	1.55	1.53	1.73
Instalación de formaleta de muros (m2)	Trabaj/m2	0.03	0.04	0.04	0.05	0.06	0.06	0.06	0.05	0.04
	HH/m2	0.41	0.48	0.55	0.69	0.77	0.77	0.75	0.73	0.81
Instalación de malla de refuerzo de muros y losas (Kg)	Trabaj/Kg			0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
	HH/Kg			0.04	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05

**Tabla 2. Promedios mensuales de consumos de mano de obra**

#### 4.1.5. Creación del modelo

Como ya se había mencionado, de acuerdo con un proceso de selección para la determinación de qué herramienta computacional era la más conveniente para el proyecto, se decidió utilizar Arena software desarrollado por Rockwell Software.

La creación del modelo tal como lo presentaba la realidad de la obra fue una labor que se inició con la observación de los procesos constructivos de la muros y losas estructurales, haciendo descripciones detalladas de cada una de las actividades, de los recursos necesarios para llevarlos a cabo y especialmente de la secuencia que siguen cada uno de los eventos que se presentan en el modelo. Las precedencias de las actividades no siguen solamente un comportamiento de acuerdo a su duración en el tiempo, sino precedencias probabilísticas de acuerdo con el desarrollo de los procesos reales. En la figura 4 se muestra un esquema de la modelación realizada en Arena.

**Figura 4. Modelo realizado en Arena**

#### **4.1.6 Verificación y validación de los datos**

Como ya se había mencionado, el proyecto de construcción que se tomó como modelo experimental ya estaba en la etapa de construcción de la obra, cuando se empezaron a realizar las mediciones, lo que significó una gran ventaja al tener la posibilidad de validar realmente los datos de indicadores de desempeño que arrojaba la simulación.

Para la verificación y validación de los datos se seleccionaron puntualmente tres torres de la obra, ya que por su avance, eran las candidatas más apropiadas para obtener el objetivo esperado. El proceso de verificación y validación se realizó como lo propone Banks (2000) de forma iterativa hasta llegar a un modelo con suficiente cuerpo como para imitar de forma muy precisa el verdadero comportamiento del sistema modelado. Como se presenta más adelante en los resultados de la simulación, se llegó a un grado de precisión bastante alto, todo esto formalmente validado con lo que se observó en la realidad de la obra de construcción.

#### **4.1.7. Realización de corridas y análisis**

Para la determinación del número de corridas del modelo necesario para obtener un nivel de confianza adecuado en los resultados, se aplicó un análisis basado en el Teorema del Límite Central, el cual dice que a medida que  $n$  (número de muestras) se vuelve más grande, la distribución de las medias muestrales se aproximará a una distribución normal. Basados en lo anterior, se determinó el valor inferior de

número de corridas necesario, que en este caso son muestras de los resultados del modelo, ofrecieran un nivel de confianza alrededor del 95%. Con un intervalo de confianza del 95% que da un valor de Z de 1.96, una desviación estándar resultante de un muestreo piloto ( $n > 30$ ) que dio como resultado 6 días y un error tolerable de 2 días, arrojó que el número de corridas apropiado debería ser no menor a 35.

$$n = \frac{Z^2 \times \sigma^2}{(\bar{X} - \mu)^2}$$

(1)

Donde  $n$  = tamaño muestral para intervalos de la media poblacional.

En la tabla 3 se muestra los resultados para 35 corridas del modelo del sistema de construcción de 3 torres de la obra inmobiliaria.

Muestra No.	Duración de simulación (min.)
1	118
2	117
3	118
4	118
5	121
6	116
7	117
8	117
9	117
10	116
11	119
12	120

13	119
14	115
15	119
16	115
17	118
18	116
19	118
20	120
21	117
22	117
23	114
24	116
25	118
26	117
27	119
28	119
29	120
30	116
31	119
32	118
33	115
34	118
35	119

**Tabla 3. Resultado de corridas del modelo**

#### **4.1.8. Documentación y reportes**

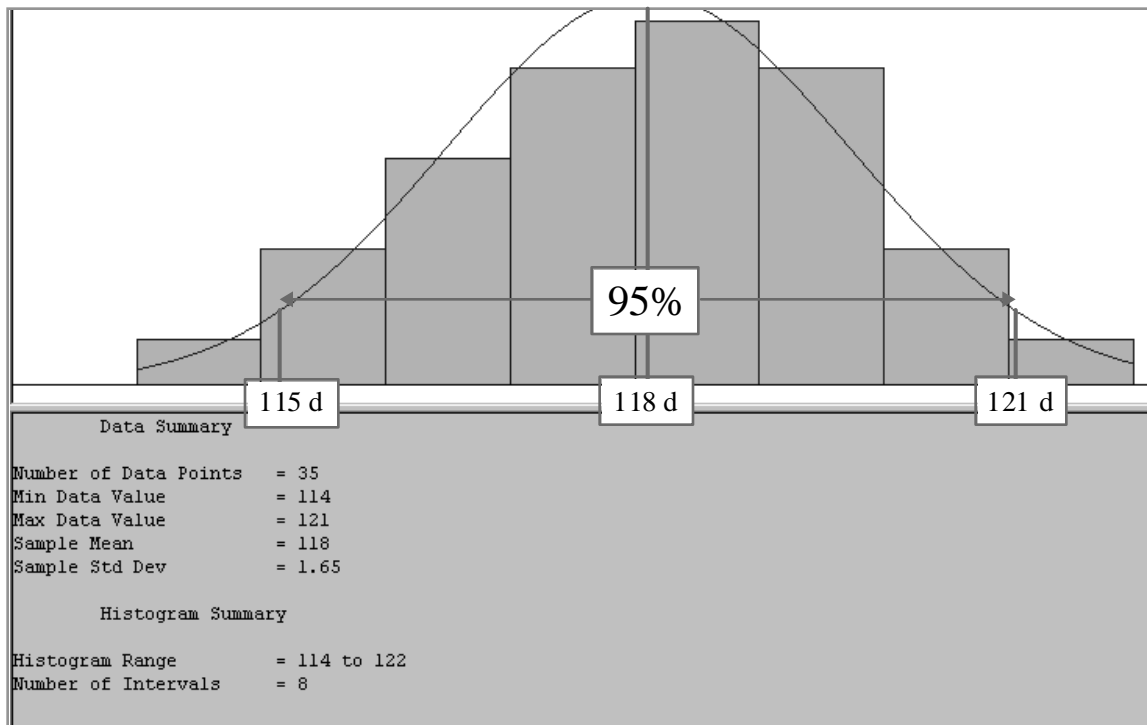
Después de haber generado el número necesario de corridas y de documentar cada una de ellas para la obtención de los resultados definitivos, se procedió a generar un reporte general y plantear los escenarios de mejoramiento, basándose en los indicadores de desempeño del modelo experimental. Como se mencionó anteriormente, el sistema fue modelado tal y como se presenta en la realidad, es decir, las entidades, recursos y actividades que se observaron realmente. Esto se realizó con el fin de generar un modelo validado del sistema, para que



posteriormente se creara sobre esa simulación los escenarios de mejoramiento propuestos, estos si, con las modificaciones del caso para obtener la reducción de tiempos de duración de los procesos constructivos requeridos.

## 5. RESULTADOS OBTENIDOS CON LA SIMULACIÓN DEL MODELO EXPERIMENTAL

La simulación realizada del modelo experimental se realizó específicamente para la construcción de tres torres de la obra en cuestión. En la figura 5 se presenta la distribución normal de las corridas de la simulación del modelo como se presenta en la realidad y la duración de simulación promedio (118 días).



**Figura 5. Distribución normal de las corridas de la simulación del modelo experimental.**

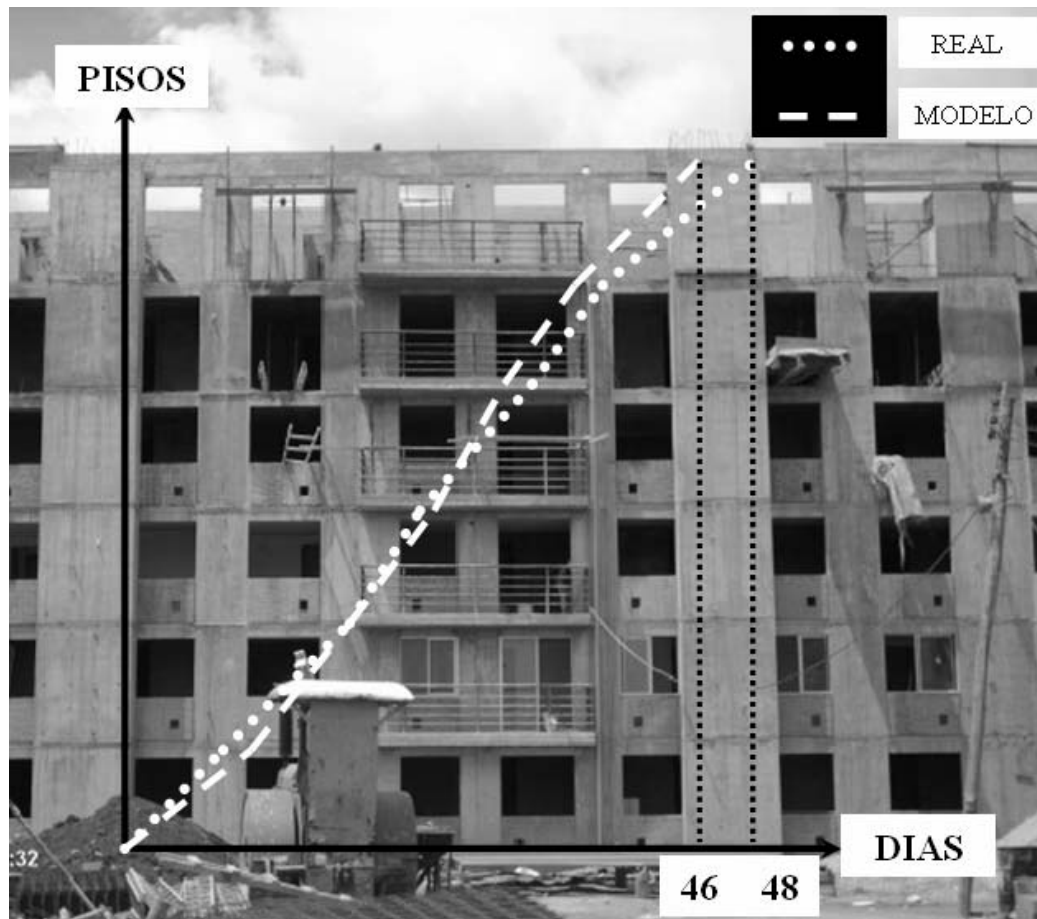
En la tabla 4 se presentan los resultados para cada uno de los indicadores de desempeño más relevantes, con un número de corridas igual a 35.

RESULTADOS DE SIMULACIÓN DE EVENTOS DISCRETOS				
OBRA: ANDALUCÍA ETAPA II				
ESCENARIO REAL				
Número de corridas: 35				
Fecha: OCT 15 DE 2006				
MEDIDA DE DESEMPEÑO	VALOR	RESULTADO		
		RESULTADO PROMEDIO	MIN	MAX
Producción total de muros estructurales en concreto (P)	890 m3			
Producción total de losas de entrepiso en concreto (P)	670 m3			
Producción semanal de muros estructurales en concreto		44 m3	27 m3	56 m3
Producción semanal de losas de entrepiso en concreto		37 m3	14 m3	44 m3
Tiempo total de simulación	118 días			
Tiempo de espera del concreto (muros) en la cola de cargue en planta		2.15 min/m3	0.71 min/m3	4.29 min/m3
Tiempo de espera del concreto (muros) en la cola de cargue en planta		2.15 min/m3	0.71 min/m4	4.29 min/m3
Cantidad de concreto (muros) transportada en mixer		6.5 m3	2 m3	7 m3
Cantidad de concreto (muros) transportada en mixer		6.1 m3	1.9 m3	7 m3
Tiempo de cargue de concreto en la planta		0.7 min/m3	0.65 min/m3	0.82 min/m3
Tiempo de transporte de concreto (muros) de la planta a la obra		10.5 min	8 min	20 min
Tiempo de transporte de concreto (losas) de la planta a la obra		10.2 min	7.8 min	18 min
Tiempo de transporte de concreto (balde 0.5 m3 - muros) con la torre grúa en obra		3.5 min	2.8 min	5 min
Tiempo de transporte de concreto (balde 0.5 m3 - losas) con la torre grúa en obra		2.6 min	2.1 min	5.4 min

Tiempo en cola del proceso de transporte con torre grúa del concreto de muros		9.1 min	7.4 min	12.2 min
Tiempo en cola del proceso de transporte con torre grúa del concreto de losas		8.3 min	6.5 min	10.1 min
Tiempo de fundición de 1m <sup>3</sup> de concreto de muros		1.7 min	1.5 min	1.9 min
Tiempo de fundición de 1m <sup>3</sup> de concreto de losas		0.8 min	0.7 min	1.4 min
Tiempo de afinado de superficie de 1 m <sup>2</sup> de losa		7.2 min	6.6 min	8.1 min
Tiempo en desencofrado de un juego de formaleta de muros		91 min	84 min	120 min
Tiempo en desencofrado de un juego de formaleta de losas		58 min	45 min	133 min
Porcentaje de tiempo con respecto al tiempo de simulación total de utilización de formaleta de muros	70%			
Porcentaje de tiempo con respecto al tiempo de simulación total de utilización de formaleta de losas	75%			
Tiempo de curado de muros		18 horas	16 horas	29 horas
Tiempo de curado de losas		35 horas	30 horas	47 horas
Porcentaje de tiempo con respecto al tiempo de simulación total de utilización de cuadrilla de muros	78%			
Porcentaje de tiempo con respecto al tiempo de simulación total de utilización de cuadrilla de losas	71%			

**Tabla 4. Resultado de principales indicadores de desempeño del modelo experimental.**

En la figura 6 se muestra una gráfica (construcción de pisos vs. duración en días) para la simulación del modelo y los resultados que se dieron en la realidad para la torre 14 sur.



**Figura 6. Comparativo entre duraciones de construcción de pisos para una torre.**

Se conduyó con los resultados antes presentados que el modelo del sistema real imita con muy buena precisión lo que realmente se presenta en la obra, lo que indicó que es totalmente válida la utilización de estas metodologías para generar los escenarios de mejoramiento de reducción de tiempo de construcción del proyecto.

## **6. ESCENARIOS DE MEJORAMIENTO**

Como el propósito fundamental de crear modelaciones de un sistema es crear propuestas de mejoramiento del mismo, a continuación se presentan las alternativas para la reducción de tiempos de construcción que se propones a partir del análisis del modelo básico experimental que imita el sistema tal como se presentaba en la obra de construcción inmobiliaria.

### **6.1 CONSTRUCCIÓN DE UNA TORRE A LA VEZ**

Como se mencionó anteriormente la construcción de las estructuras de la obra en cuestión se hacen en simultáneo, esto debido en gran parte a que la formaleta es arrendada y se tiene la prevención de que no se debe dejar en ningún momento sin usarla en las actividades de estructura. Este fenómeno causa que la formaleta se tenga que transportar de una torre hacia otra, incrementando notablemente los tiempos de esperas de las cuadrillas de muros y losas. Esta situación no sería tan preocupante si no se tuviera un cronograma de entrega de los apartamentos diferente para cada una de las torres, pero debido al ritmo de ventas de cada una de las torres tienen una fecha de entrega para sus clientes finales, es decir, existen unas torres que son más prioritarias terminar que otras. El esquema de construcción de varias torres simultáneamente no es conveniente visto desde el punto de vista de la planeación de tiempos de la obra, pero es también importante analizarlo desde la planeación de costos. Sumado a las altas posibilidades de no entregar los apartamentos a tiempo, se tienen otros inconvenientes desde la

perspectiva de productividad de la obra. Durante los meses de julio y agosto de 2006 se realizaron mediciones indirectas de la productividad de la obra, en las actividades específicas de instalación de formaleta y fundición de concreto de muros y losas estructurales. La conclusión obtenida con las mediciones fue que el tiempo de espera promedio de las cuadrillas de muros debido al transporte innecesario de formaleta de una torre hacia otra es 2.5 horas, en un ciclo entre fundidas de concreto en promedio de 3 días laborales (8 horas diarias para la Legislación Colombiana). Aunque este valor no se revierte de forma directa en costos para la constructora del proyecto, ya que las actividades de estructura están subcontratadas a precios unitarios, si se convierten acumuladamente en tiempos en los que se podría dedicar tiempo a actividades que le agreguen valor al producto final, siendo una mejora para la constructora o dueño del proyecto.

El arrendamiento de la formaleta que se tiene en la obra es de \$ 22'000,000 (pesos colombianos)/mes, calculando el dinero perdido por el tiempo de transporte de formaleta de una torre hacia otra (tiempos no contributivos) se tiene un valor de \$ 2'291,000 durante un mes en promedio. Con los anteriores valores se llegó a la conclusión que de acuerdo con las observaciones tomadas del sistema es mucho más efectivo tener la formaleta sin utilizar un tiempo máximo de 4 días al mes, pero sin moverla hacia otra torre, es decir, tener la formaleta almacenada en una misma torre durante ese valor máximo de tiempo, pero construir la estructura de una torre a la vez, dándole prioridad a aquellas que tienen una fecha de entrega más temprana. En el caso de que el tiempo acumulado de almacenamiento de la

formaleta en una torre supere 4 días al mes ya se convierte desde el punto de vista de costos para el proyecto, más recomendable transportar la formaleta hacia otra torre.

De acuerdo con las propuestas antes planteadas se procedió a modificar el modelo del sistema a simular con los cambios que requieren la construcción de la estructura de una torre a la vez. Se tuvo que eliminar el tiempo de transporte de la formaleta de una torre hacia otra e incluir los tiempos de espera por almacenamiento de formaleta. Con estas modificaciones se llegó a la conclusión de que era muy probable terminar la estructura de las tres torres modeladas en un tiempo de 103 días como valor esperado de 35 corridas del modelo modificado, esto es, 15 días menos de los que se demoraría terminar con el esquema de construcción que se tiene actualmente. Adicionalmente, la puntualidad de las entregas aumentaría ya que se estaría construyendo las torres en el orden que determina la fecha de entrega de los apartamentos.

## **6.2 DISMINUCIÓN DE TIEMPOS NO CONTRIBUTIVOS POR ESPERAS DE LLEGADA DE CONCRETO A LA OBRA**

El concreto que se utiliza en la obra fue contratado por valor global de  $m^3$ , es decir, el costo por unidad es por concreto preparado y transportado hasta el sitio de construcción del proyecto. De acuerdo con mediciones realizadas de julio a septiembre de 2006 se determinó que existían demoras considerables en la llegada del concreto a la obra. Aunque existe una programación de cantidad de concreto



requerida cada semana, que se le envía al proveedor de concreto, las mediciones indicaron que existía una gran impuntualidad en el aprovisionamiento del material, lo que significaba que durante el tiempo en que no había concreto en la obra y las cuadrillas ya estaban listas para empezar a fundir el material, estas dedicaban el tiempo a actividades no contributivas, como espera, tiempo ocioso y descansos innecesarios. Los tiempos de demora por concreto siguen un comportamiento probabilística que dependen en gran parte por variables externas al control del proyecto, como: el clima, la demanda de concreto para otros proyectos, el día de la semana, entre otras. Para induir en el modelo real del sistema este comportamiento se ajustó una distribución de probabilidad normal a estos tiempos, teniendo en cuenta los suficientes datos para que se obtuvieran unos niveles de confianza adecuados.

La propuesta de escenario de mejoramiento se enfocó en el control de la llegada de mixer a la obra, llevando formatos de seguimiento del material, para luego convertirse en una prueba de reclamo contractual frente al proveedor del concreto.

Con el fin de que el modelo modificado, incorporando una mayor puntualidad de la llegada de concreto a la obra no arrojará unos resultados tan optimistas, sino más bien, adecuados a la realidad de una obra de estas características, se decidió disminuir en un 60% las demoras por falta de material en la obra. El resultado para el modelo modificado (eliminación de transporte de formaleta de una torre a otra y aumento de puntualidad de llegada de mixer a la obra) fue que el tiempo de

construcción de la estructura de las tres torres se pueden realizar con bastante probabilidad en 96 días, como valor promedio para 35 corridas del nuevo modelo.

### **6.3 CAMBIAR EL NÚMERO DE OBREROS DE LAS CUADRILLAS DE TRABAJO**

Entre los meses de julio y septiembre de 2006 se realizaron mediciones de balances de cuadrillas de trabajo de muros y losas estructurales. De acuerdo con las mediciones se determinó que era conveniente aumentar el número de obreros de cada una de las cuadrillas. El valor sugerido para la cuadrilla de muros fue de 15 oficiales y 25 ayudantes y para la cuadrilla de losas 12 oficiales y 20 ayudantes, para un número total de trabajadores para la estructura de 72. Este valor se obtuvo de acuerdo con un trabajo de optimización de personal, ya que como es de conocimiento general aumentar indiscriminadamente el personal de trabajo en construcción llega a un nivel que es inconveniente para un desarrollo normal de los procesos constructivos, debido a la disminución improcedente del espacio de trabajo de cada uno de los trabajadores.

Realizando una combinación de los tres escenarios de mejoramiento recomendados y luego de realizar las corridas del modelo de simulación definitivo se obtuvo un tiempo de duración para la terminación de la estructura de las tres torres de la obra de 92 días laborables, es decir, 26 días menos de lo que se demoraría si se siguiera con el esquema de construcción actual.

RESULTADOS DE SIMULACIÓN DE EVENTOS DISCRETOS				
OBRA: ANDALUCÍA ETAPA II				
ESCENARIO DE MEJORAMIENTO: COMBINACIÓN				
Número de corridas: 35				
Fecha: OCT 15 DE 2006				
MEDIDA DE DESEMPEÑO	VALOR	RESULTADO		
		RESULTADO PROMEDIO	MIN	MAX
Producción total de muros estructurales en concreto (P)	890 m3			
Producción total de losas de entrepiso en concreto (P)	670 m3			
Producción semanal de muros estructurales en concreto		70 m3	42 m3	82 m3
Producción semanal de losas de entrepiso en concreto		52 m3	21 m3	57 m3
Tiempo total de simulación	92 días			
Tiempo de espera del concreto (muros) en la cola de cargue en planta		2.13 min/m3	0.74 min/m3	4.29 min/m3
Tiempo de espera del concreto (muros) en la cola de cargue en planta		2.11 min/m3	0.62 min/m4	4.33 min/m4
Cantidad de concreto (muros) transportada en mixer		6.5 m3	2.4 m3	7 m3
Cantidad de concreto (muros) transportada en mixer		6.1 m3	1.8 m3	7 m3
Tiempo de cargue de concreto en la planta		0.68 min/m3	0.62 min/m3	0.80 min/m3
Tiempo de transporte de concreto (muros) de la planta a la obra		10.6 min	7.0 min	21 min
Tiempo de transporte de concreto (losas) de la planta a la obra		10.7 min	7.2 min	18 min
Tiempo de transporte de concreto (balde 0.5 m3 - muros) con la torre grúa en obra		3.1 min	2.8 min	4.7 min
Tiempo de transporte de concreto (balde 0.5 m3 - losas) con la torre grúa en obra		2.0 min	1.7 min	4.8 min
Tiempo en cola del proceso de transporte con torre grúa del concreto de muros		7.2 min	5.1 min	11.0 min
Tiempo en cola del proceso de transporte con torre grúa del concreto de losas		5.8 min	4.8 min	8.1 min
Tiempo de fundición de 1m3 de concreto de muros		1.1 min	0.9 min	1.7 min
Tiempo de fundición de 1m3 de concreto de losas		0.4 min	0.3 min	0.7 min

Tiempo de afinado de superficie de 1 m <sup>2</sup> de losa		7.0 min	6.0 min	7.8 min
Tiempo en desencofrado de un juego de formaleta de muros		85.2 min	75 min	110 min
Tiempo en desencofrado de un juego de formaleta de losas		42 min	35 min	112 min
Porcentaje de tiempo con respecto al tiempo de simulación total de utilización de formaleta de muros	92%			
Porcentaje de tiempo con respecto al tiempo de simulación total de utilización de formaleta de losas	89%			
Tiempo de curado de muros		18 horas	14 horas	27 horas
Tiempo de curado de losas		33 horas	28 horas	46 horas
Porcentaje de tiempo con respecto al tiempo de simulación total de utilización de cuadrilla de muros	90%			
Porcentaje de tiempo con respecto al tiempo de simulación total de utilización de cuadrilla de losas	86%			

**Tabla 5. Resultado del modelo modificado con los escenarios de mejoramiento**

## 7. GENERALIZACIÓN DEL MODELO EXPERIMENTAL Y CONCLUSIONES

El modelo experimental que se tomó fue la base para la generalización de la Simulación Digital para el Mejoramiento de la Planeación de Procesos Constructivos.

En la ciudad de Bogotá y en otras ciudades de Colombia la construcción de vivienda por el sistema de muros y losas estructurales es muy común desde hace ya unos años, por lo que el modelo experimental se convierte en un buen punto de partida para demostrar las ventajas de la simulación de procesos constructivos, debido a la alta aplicación que tiene en el mercado local.

Debido a que los proyectos de construcción son únicos, es indispensable tratar el tema de una generalización de los procesos para simular en forma muy cuidadosa, ya que se puede caer en el error de aplicar simulaciones que no tiene ninguna o poca relación con el sistema que se está analizando.

A continuación se hace un repaso de cada uno de los pasos propuestos por Banks (2000) para la simulación de un sistema, incorporando las variables más relevantes a los sistemas de construcción en Colombia.

## **7.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

La formulación del problema a resolver es quizás el paso más importante y fundamental de un proyecto de simulación de un sistema, ya que de este depende en gran parte el rumbo y el resultado final del trabajo. Se recomienda como primera instancia dedicar todo el tiempo necesario para identificar el problema que se quiere resolver. No empezar a simular o tomar datos hasta que no se tenga plenamente identificada la necesidad a resolver. Existen dos grandes puntos de partida para la formulación del problema. El primero es el análisis detallado de la programación de tiempo del proyecto, determinando en primera instancia los cuellos de botella en la ruta crítica de la construcción, ya sea por motivos de falta de personal o cuadrillas inadecuadas, insuficiencias en las entradas de material a la obra, entre otras. El segundo punto es la planeación de costos, que está ligada directamente con la programación de la obra y que en últimas decidirá sobre la conveniencia o no de la implementación de un escenario de mejoramiento propuesto. En definitiva la formulación del problema debe basarse en las modificaciones del sistema que minimicen la función de costos y tiempos del proyecto sin sacrificar la calidad de los trabajos realizados de acuerdo a los parámetros que dicta el mercado.

## **7.2 DETERMINACIÓN DE LOS OBJETIVOS Y PLAN GENERAL**

Aunque la determinación de los objetivos es uno de los pasos iniciales en un proyecto de simulación, es recomendable hacer periódicamente revisión de ellos, ya que al realizar los análisis del sistema en estudio se puede encontrar información

que puede modificar los objetivos inicialmente planteados. Este tema es delicado de manejar sobre el punto de que se debe tener un grado alto de pragmatismo para llevar a cabo un proyecto de este tipo, de lo contrario se entraría a un círculo vicioso de iteraciones que cambiarían constantemente el objetivo de las modelaciones. Finalmente, no se debe descartar un cambio en los objetivos si se encuentra que modificándolos se puede llegar a unos escenarios de mejoramiento mucho más eficientes y efectivos.

### **7.3 CONCEPTUALIZACIÓN DEL MODELO**

La conceptualización del modelo parte de una adecuada observación del sistema en estudio. Como ya se había mencionado, la planeación de los proyectos constructivos se hace por lo general basado en sistemas inexistentes (por construir). El modelo experimental que se simuló hacía parte de un subgrupo de la planeación, que es la que se hace sobre los proyectos en marcha, que es igualmente importante y valiosa para incrementar la precisión de los resultados de la obra comparados con el plan inicial. Debido a que este trabajo se fundamentó en una planeación durante la etapa de construcción del proyecto, las observaciones del sistema son fundamentales para una correcta conceptualización del modelo. Finalmente, es importante tener en cuenta que entre más simplificado sea el modelo, sin sacrificar la precisión de los resultados, es mucho más conveniente que un modelo robusto que se haga difícil de controlar.

## **7.4 RECOLECCIÓN DE DATOS**

La recolección de datos y la creación de las bases de datos de duración de actividades y rendimiento de los recursos son el alimentador de información principal del sistema modelado, ya que esto en definitiva es lo que proveerá todas las duraciones de cada uno de los procesos constructivos. Una adecuada delimitación de rangos de tiempo para cada una de las actividades es muy importante. Por ejemplo, según el modelo experimental no es adecuado tomar tiempos individuales de cada uno de los trabajadores de una cuadrilla, para luego calcular el tiempo que se demora toda la cuadrilla en fabricar una unidad de construcción cualquiera. Se recomienda tomar muestras del trabajo en conjunto de cada cuadrilla, ya que en definitiva el resultado de esta no es la suma del trabajo individual de cada trabajador, por el contrario, el trabajo en equipo determina el avance de las obras del proyecto.

## **7.5 CREACIÓN DEL MODELO**

Debido a la complejidad de los modelos en construcción, se hace indispensable la utilización de una herramienta computacional para la creación de los modelos del sistema. Actualmente, en el mercado se pueden obtener software a un costo relativamente bajo, comparado con los buenos resultados que puede traer esta metodología para una constructora. Para una adecuada codificación del modelo se recomienda que la persona a cargo de esta labor tenga unos conocimientos adecuados, no solo en el funcionamiento del software, sino también de las teorías



de simulación, esto con el fin de que los modelos imiten con muy buena precisión el sistema.

## **7.6 VERIFICACIÓN Y VALIDACIÓN DE LOS MODELOS**

El presente trabajo trata sobre la planeación en la etapa de construcción del proyecto, por este motivo, la validación de los datos es una tarea relativamente sencilla. De acuerdo con los resultados obtenidos con la validación del sistema se deben realizar iteraciones hasta calibrar el modelo de forma tal, que los resultados que arrojen estén muy cercanos con la realidad observada en la obra.

## **7.7 GENERACIÓN DE ESCENARIOS DE MEJORAMIENTO**

La generación de escenarios de mejoramiento parte de la formulación del problema a resolver que inicialmente se planteó. Pero es importante saber que durante los pasos siguientes a la formulación del problema pueden encontrarse oportunidades interesantes para mejorar este. Los escenarios deben estar ambientados en soluciones realmente factibles, desde el punto de vista de tiempos, costo y calidad del producto, y esto debe estar acorde con las variables que determinan el tipo de proyecto que se está construyendo. La generación de soluciones debe tener en cuenta los recursos disponibles con los que se cuenta para implementar las mejores, y el grado de satisfacción que ofrecerá al cliente al que se le está proponiendo estos escenarios. Si el cliente de ninguna forma está de acuerdo con las soluciones planteadas, es inconveniente avanzar en ese tipo de mejoras, más bien se deben explotar las flexibilidades que ofrece la obra y tener presente que es

mucho más recomendable reducir tiempos y recursos que adicionar costos a la construcción para disminuir la duración de las actividades. En conclusión es mejor simplificar el sistema haciéndolo mucho más “Lean” que robustecerlo de inversiones. Lo anterior siempre y cuando sea posible desde un punto de vista práctico, pero de acuerdo al tipo de cliente no se debe descartar la opción de incrementar el apalancamiento operacional para obtener mejoras en el sistema.

### **7.8 SEGUIMIENTO A LOS ESCENARIOS DE MEJORAMIENTO**

En el caso en que se consiga implementar los escenarios de mejoramiento, es importante hacerles un control de seguimiento para corroborar su efectividad. Existen actualmente metodologías que a un costo muy bajo logran hacer un seguimiento confiable a la productividad de los proyectos de construcción. Algunas de estas metodologías son el Lean Construction y el Last Planner, ya que sus ventajas en obra están comprobadas. Para lograr una adecuada comparación entre el comportamiento del sistema sin mejoras y luego de las mejoras, se debe tener en el mejor de los casos medición de la productividad antes y después de la implementación de las soluciones.

## 8. CONCLUSIONES

La obra de construcción inmobiliaria que se tomó como sistema para la simulación del modelo experimental, presentó las condiciones adecuadas para llevar a cabo el presente trabajo. Se analizaron en detalle todas las actividades para la construcción de las estructuras de las torres, partiendo de la observación en el tiempo y la toma de datos de información. Desde el inicio del proyecto se delimitaron los alcances que tendría el modelo y finalmente los escenarios de mejoramiento propuesto, teniendo presente las posibilidades que se tenían al aplicar metodologías como la Simulación Digital para el Mejoramiento de la Planeación de Procesos Constructivos.

La generalización de modelos de sistemas constructivos para la aplicación en diferentes proyectos inmobiliarios se fundamenta en la necesidad de simplificar el tiempo para desarrollar un proyecto de las características del presente. Las generalizaciones se deben tomar como punto de apoyo para aprovechar todas las ventajas que ofrecen los sistemas de mejoramiento. Debe tenerse especial cuidado en aplicar adecuadamente las recomendaciones ofrecidas en la generalización de los modelos, ya que cada proyecto de construcción es diferente, y como tal, posee sus propias variables y un comportamiento único para cada uno de las obras de construcción.

En proyectos futuros de modelación de sistemas se recomienda aplicar la metodología de Simulación Digital a proyectos constructivos diferentes al modelo

experimental del presente trabajo, de esta forma, se estaría validando la utilización de estos procedimientos y su efectividad en la mejora de la planeación de procesos constructivos a nivel local y avanzando en la generalización para utilización práctica.

Finalmente, es indispensable comprobar por medio de la valoración cuantitativa de costos la conveniencia de la aplicación de la Simulación Digital, ya que de esta forma se lograría impactar en su implementación real en los proyectos de construcción.

## 9. REFERENCIAS

- Banks, J., Carson, J., Nelson, B., Nicol, D., 2000. *Discrete-Event System Simulation*. 3<sup>ra</sup> Ed., New Jersey: Prentice-Hall.
- Banks, J., 1998. *Handbook of Simulation: Principles, Methodology, Advancer, Applications and Practice*. 1<sup>ra</sup> Ed., New York: John Wiley & Sons.
- Barrie, D., Paulson, B., 1992. *Professional Construction Management: Including CM, Design-Construct and General Contracting*. 3<sup>ra</sup> Ed., United State: McGraw-Hill.
- Córdoba, J., Delgado, M., 2002. *Simulación Digital de Procesos Constructivos "Sisplan"*. Tesis de Maestría en Ingeniería Civil. Bogotá, Colombia: Universidad de los Andes.
- Gallardo, R., 1999. *Modelación y Simulación de Procesos Constructivos para el Mejoramiento de la Productividad*. Tesis de Maestría en Ingeniería Civil. Bogotá, Colombia: Universidad de los Andes.
- Granados, J., 2001. *Modelo Computacional de Procesos Constructivos MOCSPROC*. Tesis de Maestría en Ingeniería Civil. Bogotá, Colombia: Universidad de los Andes.

Kelton, D., Sadowski, R., Sadowski, D., 2004. *Simulation with Arena*. 3<sup>ra</sup> Ed., Boston: McGraw-Hill

Navarro, L., 2001. *Simulación Digital de Procesos Constructivos*. Tesis de Maestría en Ingeniería Civil. Bogotá, Colombia: Universidad de los Andes.

Oglesby, C., Parker, H., Howell, G., 1989. *Productivity Improvement in Construction*. 1<sup>ra</sup> Ed., United State: McGraw-Hill.

Paulson, B., 1995. *Computer Applications in Construction*. 1<sup>ra</sup> Ed., United State: McGraw-Hill.