

**Simulación Digital como Herramienta para la Gestión del Conocimiento en la
Construcción de Edificaciones en Concreto**



Alfonso Rafael Orozco Ovalle

Pontificia Universidad Javeriana

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Civil

Bogotá D.C

2013



**Simulación Digital como Herramienta para la Gestión del Conocimiento en la
Construcción de Edificaciones en Concreto**

Alfonso Rafael Orozco Ovalle

Trabajo de Grado para optar por el título de Ingeniero Civil.

Director de Trabajo de Grado: Adriana Gómez Cabrera

Pontificia Universidad Javeriana

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Civil

Bogotá D.C

2013



TABLA DE CONTENIDO.

1	INTRODUCCIÓN.....	7
1.1	PROBLEMA.....	7
1.2	JUSTIFICACIÓN.....	8
1.3	OBJETIVOS.....	10
1.3.1	OBJETIVO GENERAL.....	10
1.3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	10
1.4	ALCANCE Y DELIMITACIÓN.....	10
2	MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE.....	11
2.1	CONCEPTOS BÁSICOS.....	11
2.1.1	PRODUCTIVIDAD.....	11
2.1.2	LEAN CONSTRUCTION.....	12
2.2	SIMULACIÓN DIGITAL.....	16
2.2.1	DEFINICIÓN.....	16
2.2.2	CONCEPTOS PRINCIPALES.....	16
2.2.3	PASOS PARA ELABORAR UN MODELO DE SIMULACIÓN.....	17
2.2.4	VENTAJAS DE ELABORAR MODELOS DE SIMULACIÓN.....	18
2.3	DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD.....	19
2.4	CONCRETO PRE ESFORZADO.....	21
2.4.1	CONCRETO POSTENSADO.....	22
2.5	DESARROLLO HISTÓRICO Y CASOS DE ESTUDIO.....	23
2.5.1	CONTEXTO NACIONAL.....	23
2.5.2	CONTEXTO INTERNACIONAL.....	25
3	DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO DE CONSTRUCCIÓN.....	27
4	METODOLOGÍA.....	28
4.1	REGISTRO DE INFORMACIÓN.....	30
4.1.1	CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA DE CAPTURA.....	30
4.1.2	CAPTURA DE FOTOGRAFÍAS Y ORGANIZACIÓN DE INFORMACIÓN.....	34
4.2	CARACTERIZACIÓN DE PROCESOS CONSTRUCTIVOS.....	35
4.2.1	ANÁLISIS DE FLUJO DE TRABAJO.....	35
4.2.2	CARACTERIZACIÓN DE MANO DE OBRA.....	39
4.2.3	OBTENCIÓN DE DURACIONES.....	40
4.3	ELABORACIÓN MODELO DIGITAL.....	42
4.3.1	AJUSTES PROBABILÍSTICOS DE DATOS.....	42
4.3.2	CREACIÓN DEL MODELO ORIGINAL.....	44



4.3.3	VALIDACIÓN DEL MODELO.	46
4.3.4	EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS.	48
5	ANÁLISIS DE RESULTADOS.	49
5.1	INFORMACIÓN REGISTRADA.	49
5.1.1	DISPOSICIÓN DE LOS RECURSOS.	49
5.1.2	SECUENCIA Y CARACTERÍSTICAS DE ACTIVIDADES.	50
5.1.3	DISTRIBUCIÓN DEL TIEMPO EN OBRA.	51
5.2	SIMULACIÓN DIGITAL.....	53
5.2.1	MODELO ORIGINAL.....	53
5.2.2	ALTERNATIVA 1.....	57
5.2.3	ALTERNATIVA 2.....	59
5.2.4	ALTERNATIVA 3.....	60
5.2.5	ALTERNATIVA 4.....	62
5.2.6	COMBINACIÓN DE ALTERNATIVAS.	64
5.2.7	ANÁLISIS COMPARATIVO.....	65
6	CONCLUSIONES.	70
7	RECOMENDACIONES.	73
8	BIBLIOGRAFÍA.....	74



LISTADO DE FIGURAS.

<i>Figura 1. Factores que Inciden en la Productividad, Fuente: (Botero, 2006).</i>	11
<i>Figura 2. Productividad como un Proceso de Flujo: Ilustración Simple. Fuente: (Koskela, 1992).</i>	13
<i>Figura 3. Plan para Medición de Pérdidas. Fuente: (Páez, 2013).</i>	14
<i>Figura 4. Pasos para la creación de un modelo de Simulación. Fuente: (Banks, 1999).</i>	18
<i>Figura 5. Esquema sobre el concepto básico del pre esforzado.</i>	21
<i>Figura 6. Esquema general del sistema modelado experimental. Fuente: (Echeverry et al., 2008).</i>	24
<i>Figura 7. Vista en Arena del inicio del proceso constructivo. Fuente: (Gómez, 2010).</i>	24
<i>Figura 8. Actividades a caracterizar mediante simulación digital. Fuente: (Echeverry y Giraldo, 2012).</i>	25
<i>Figura 9. Esquema de la Losa analizada. Fuente: (Sosa et al., 2010).</i>	26
<i>Figura 10. Nueva Facultad de Artes Pontificia Universidad Javeriana. Fuente: ("LA ROTTA Arquitectos," 2013).</i>	27
<i>Figura 11. Plantas del Postensado para una de las placas. Fuente: (Parra, 2011).</i>	28
<i>Figura 12. Etapas de la Metodología del Proyecto.</i>	29
<i>Figura 13. Esquema del Sistema de Captura de Imágenes. Fuente: (Gómez et al., 2012).</i>	30
<i>Figura 14. Partes del Montaje del Sistema de Captura.</i>	32
<i>Figura 15. Unidad central de control.</i>	33
<i>Figura 16. Fotografía obtenida con el sistema de captura.</i>	33
<i>Figura 17. Fotografía obtenida manualmente desde el edificio Fernando Barón S.J.</i>	34
<i>Figura 18. Actividades dentro del flujo de trabajo.</i>	35
<i>Figura 19. Fotografía de la colocación de cimbra y camillas de la losa.</i>	36
<i>Figura 20. Fotografía de colocación de acero de refuerzo y acero de tensionamiento.</i>	37
<i>Figura 21. Fotografía de la colocación de las formaletas de borde.</i>	37
<i>Figura 22. Fotografía del proceso de vaciado del concreto.</i>	38
<i>Figura 23. Fotografía del proceso de tensionamiento de los cables.</i>	38
<i>Figura 24. Fotografía de las mangueras por las cuales se inyecta la lechada.</i>	39
<i>Figura 25. División del Área de la Losa en Zonas de Trabajo.</i>	41
<i>Figura 26. Documento de Texto en Bloc de Notas.</i>	43
<i>Figura 27. Resultados Obtenidos con el Input Analyzer.</i>	43
<i>Figura 28. Interfaz del software Arena 14.</i>	44
<i>Figura 29. Creación de un Proceso en Arena 14.</i>	45
<i>Figura 30. Creación de Horarios en Arena 14.</i>	46
<i>Figura 31. Cantidad de Personal Requerido por Actividad</i>	50
<i>Figura 32. Procesos que componen la ruta crítica.</i>	51
<i>Figura 33. Obreros a la espera de la llegada del concreto.</i>	53
<i>Figura 34. Modelo de Simulación Original en Arena 14.</i>	54
<i>Figura 35. Duración total promedio por alternativa.</i>	67
<i>Figura 36. Diferencia de duración en días respecto al modelo original por alternativa.</i>	68



LISTADO DE TABLAS.

<i>Tabla 1. Posibles Resultados para una variable aleatoria.</i>	19
<i>Tabla 2. Distribuciones de Probabilidad. Fuente: (Kelton et al., 2008).</i>	20
<i>Tabla 3. Características de las dos rondas del juego LEAPCOM™. Fuente: (Sacks y Esquenazi, 2007).</i>	26
<i>Tabla 4. Equipo Necesario para el montaje del Sistema. Fuente: (Gómez et al., 2012)</i>	31
<i>Tabla 5. Recursos correspondientes a mano de obra.</i>	40
<i>Tabla 6. Duraciones Obtenidas.</i>	42
<i>Tabla 7. Resultados replicaciones iniciales.</i>	47
<i>Tabla 8. Iteraciones realizadas para calcular replicaciones necesarias.</i>	48
<i>Tabla 9. Duraciones y valores estadísticos obtenidos para diez réplicas del modelo original.</i>	55
<i>Tabla 10. Uso promedio de cuadrillas en el modelo original.</i>	56
<i>Tabla 11. Duraciones y valores estadísticos obtenidos para diez réplicas de la alternativa 1.</i>	57
<i>Tabla 12. Uso promedio de cuadrillas en la alternativa 1.</i>	58
<i>Tabla 13. Duraciones y valores estadísticos obtenidos para diez réplicas de la alternativa 2.</i>	59
<i>Tabla 14. Uso promedio de cuadrillas para la alternativa 2.</i>	60
<i>Tabla 15. Duraciones y valores estadísticos obtenidos para diez réplicas de la alternativa 3.</i>	61
<i>Tabla 16. Uso promedio de cuadrillas para la alternativa 3.</i>	61
<i>Tabla 17. Duraciones y valores estadísticos obtenidos para diez réplicas de la alternativa 4.</i>	62
<i>Tabla 18. Uso promedio de cuadrillas para la alternativa 4.</i>	63
<i>Tabla 19. Duraciones y valores estadísticos obtenidos para diez réplicas de la combinación de todas las alternativas.</i>	64
<i>Tabla 20. Uso promedio de cuadrillas para la combinación de alternativas.</i>	64
<i>Tabla 21. Comparación de resultados entre alternativas.</i>	65



1 INTRODUCCIÓN.

A nivel mundial, la construcción es víctima de equivocaciones durante los procesos de planeación y ejecución de obras, producto de la programación desacertada y la asignación inadecuada de funciones y recursos. Esto ha llevado a que la construcción haya tenido que sufrir cambios en sus procesos de gestión, a raíz del no cumplimiento de plazos establecidos y de la improvisación (Botero, 2006).

Estos cambios se dan por medio de la filosofía *Lean Construction*, con el fin de mejorar la productividad en los proyectos de construcción, priorizando las actividades que agregan valor sobre aquellas que no agregan valor, tratando de reducir estas últimas a la menor cantidad o si es posible eliminarlas por completo (Koskela, 1992).

Aplicando la filosofía *Lean Construction*, esta investigación utilizó herramientas de simulación de procesos constructivos, partiendo de registros de imágenes provenientes de cámaras fotográficas instaladas en campo, que permitieron identificar elementos como materiales utilizados, tiempos empleados, cuadrillas y la disposición de estas en la actividad analizada. Con dicha información una vez sintetizada, se elaboraron los modelos de simulación en el software *Arena 14*, que facilitó la determinación de los factores más influyentes en el desarrollo del proceso constructivo. Posteriormente, se elaboraron otros modelos de simulación para distintos escenarios teóricos, obteniendo resultados favorables en cuanto a tiempo empleado y costos. Estos nuevos escenarios teóricos, se plantearon variando la cantidad y tipos de recursos.

Cada uno de los procedimientos involucrados en este trabajo, así como los resultados obtenidos; son descritos y enunciados detalladamente a continuación.

1.1 PROBLEMA.

En la gran mayoría de las industrias, se han utilizado herramientas adicionales para potencializar productividad y rendimiento, y adicionalmente para aumentar medidas de seguridad en quienes ejecutan las actividades. En la construcción sin embargo, la productividad se sigue viendo altamente interrumpida por hechos no tenidos en cuenta; y también en esta actividad, se siguen cometiendo múltiples errores que se vienen repitiendo desde hace décadas.

Todos estos errores se presentan con frecuencia debido a que en construcción, la magnitud del producto entregado, resulta mucho mayor que en otros sectores en la industria y esto termina afectando directamente los tiempos de entrega, lo cual genera mucho incumplimiento. Adicionalmente, el ciclo de producción en este caso es muy largo, mientras que en la industria suelen verse ciclos con productividades altas. Esto hace que las demoras en construcción resulten siendo bastante críticas (Botero, 2006).



Por consiguiente, es necesario implementar métodos que faciliten las correcciones necesarias para optimizar el tiempo productivo. Partiendo de dicha necesidad, es donde empieza el análisis de qué estrategias y herramientas son las adecuadas para establecer mejoras en los procesos constructivos.

Analizando el panorama nacional, el problema parece aún más crítico si se tiene en cuenta que según un estudio realizado por CAMACOL y el Consejo Privado de Competitividad; el trabajo no contributivo ocupa un 40% del trabajo en obra, siendo este un porcentaje muy elevado si se compara con los porcentajes de trabajo no contributivo en países potencia como Estados Unidos, en el cual el porcentaje es de 12%, mientras que internacionalmente el promedio es de 32% (Camacol y Consejo Privado de Competitividad, 2008).

A raíz de todo lo anterior, con un problema aún más agudo en Colombia, se han establecido metodologías de análisis de procesos constructivos, y una de esas es la simulación digital a través de distintos software, que permitan observar detalladamente donde se encuentran los problemas más influyentes y a partir de ahí proponer soluciones radicales. Sumado a esto, se ha empezado a aprovechar la información útil procedente de proyectos anteriores para mejorar la precisión de los escenarios analizados.

En esta investigación, se realizan modelos de simulación digital del proceso constructivo de losas postensadas. Los modelos parten de información obtenida de manera directa en campo, y con ayuda de la tecnología, lo cual permitió una mayor cercanía a la ejecución real del producto.

1.2 JUSTIFICACIÓN.

La información que se puede obtener de la ejecución de proyectos de ingeniería civil es una de las herramientas más importantes para la corrección de errores. Es ahí donde se utiliza la simulación digital como herramienta para la gestión del conocimiento, plasmando la información obtenida en campo para afinar la cercanía del modelo a los escenarios reales y posteriormente obtener propuestas de mejora para así ejecutar proyectos posteriormente de una manera mucho más óptima.

Estas prácticas, se llevan a cabo partiendo de la filosofía “Lean Construction”, que es básicamente un enfoque correspondiente a la gestión de la producción para diseñar facilidades de capital; cambiando la manera en la cual se trabaja a lo largo del proceso de entrega de la obra con un fin fundamental que consiste en eliminar actividades innecesarias que impidan la reducción de costos (Lean Construction Institute, 2012)

Actualmente, la productividad en procesos constructivos solo es estudiada para trabajos de investigación, dentro de universidades principalmente, esto porque no se cuenta con métodos que no afecten de forma importante la cantidad de recursos a invertir o el presupuesto total del



proyecto. Es ahí donde se justifica la verdadera importancia de la implementación de cámaras fotográficas, las cuales no obstruyen el funcionamiento de la obra ni tampoco engordan el presupuesto a invertir (Echeverry y Giraldo, 2012).

Muchas veces los planeadores de proyectos civiles, suelen alejarse de grandes alternativas por el simple hecho de evitar costos adicionales, que a la larga terminan siendo ahorros en muchos casos, y que cuando ocurren accidentes o errores que vinculen sobrecostos importantes, es cuando se vuelve evidente la importancia del uso de estos recursos que inicialmente parecían costosos e innecesarios. Lo cierto es que la simulación resulta siendo un instrumento que permite optimizar dentro de los proyectos de construcción, como ya se ha planteado con anterioridad, a partir de inferencias bayesianas para correlacionar las alternativas ejemplificadas (Frazier et al., 2011).

Las cámaras fotográficas facilitan mucho la obtención de datos reales, y aunque estos datos se complementan con información entregada por el personal de la obra, las fotografías obtenidas son clave para establecer duraciones de las actividades que van a ser caracterizadas. Más aún, el sistema empleado en esta investigación permite establecer la captura automática de fotos con una frecuencia de tiempo determinada, la cual se puede modificar con tan solo un clic.

Todas estas ideas que comparten objetivos comunes, provienen del intento de aprovechar de la mejor manera los avances tecnológicos a través de los años. En el caso específico de un proyecto correspondiente a una edificación en concreto, en etapas de diseños y cálculos estructurales, la principal herramienta es el uso de la tecnología y software que facilitan los procedimientos, al igual que para cálculos de cantidades de obra. Pero en la planeación del proceso constructivo, la vinculación con la tecnología aún no es la más fuerte.

Si se logran emplear correctamente las herramientas disponibles hoy en día, las obras se ejecutarán con mayor rapidez, se disminuirán los costos de construcción, habrá menor posibilidad de riesgos; lo cual facilitará mucho más los proyectos de construcción. Es por esto que se implementarán estas prácticas y conceptos dentro de la Universidad Javeriana, para sacar un mayor provecho de los registros obtenidos, es decir; hacer una mejor gestión del conocimiento, que consiste básicamente en la aplicación de los conocimientos de las empresas para mejorar su capacidad de resolución de problemas y de esta manera hacer una contribución a la sostenibilidad de sus ventajas competitivas (Civit y Sieber, 1999).

Todas estas herramientas apuntan a que los constructores logren la reducción de los costos totales del proyecto para convertir la construcción en un negocio cada vez más rentable, y que el cumplimiento absoluto de los plazos de entrega sea por fin una realidad, para que los clientes no sean afectados por las constantes demoras que se presentan.



1.3 OBJETIVOS.

1.3.1 OBJETIVO GENERAL.

- Elaborar modelos de simulación digital como herramienta de gestión del conocimiento del proceso constructivo de edificaciones en concreto, con base en lecciones aprendidas y métodos previamente utilizados.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Caracterizar procesos constructivos por medio de la captura de material digital para obtener información respecto a tiempos, recursos utilizados y secuencia de actividades.
- Identificar lecciones aprendidas en el proyecto que puedan servir como insumo para futuros proyectos.
- Elaborar modelos de simulación de los procesos constructivos de elementos estructurales, ejecutados en obra teniendo en cuenta las lecciones aprendidas.

1.4 ALCANCE Y DELIMITACIÓN.

Este trabajo, se llevó a cabo con información real captada de la etapa de construcción de las losas postensadas del nuevo edificio de la Facultad de Artes de la Pontificia Universidad Javeriana. La información se recopiló a través de un módulo programable de captura de imágenes, complementado con visitas de obra y consultas al personal de la obra para agrupar datos más exactos.

Con dichos datos como punto de partida, se realiza una simulación digital en el software Arena 14 que involucra los distintos procedimientos de la construcción de la losa, y dicho modelo se ejecuta según lo que se realizó en obra y posteriormente se altera según distintos escenarios propuestos como oportunidades de mejora que representen ventajas económicas y productivas. Con el análisis de los resultados, se pueden plantear propuestas que permitan a los constructores establecer medidas que reduzcan las pérdidas y evadan los sobrecostos en proyectos futuros que involucren el proceso constructivo evaluado.

2 MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE.

2.1 CONCEPTOS BÁSICOS.

A continuación, se presentan los conceptos básicos necesarios para tener en cuenta en la comprensión y realización de este trabajo de grado:

2.1.1 PRODUCTIVIDAD.

En este escenario, los procesos constructivos son estudiados como un sistema productivo, en el cual la productividad resulta de la relación entre la cantidad total producida (en este trabajo el ítem a producir son las losas postensadas) y la cantidad de recursos empleados (maquinaria, recursos humanos, material; etc.) en la ejecución. Lograr elevar la productividad, significaría encontrar mejores formas para emplear la mano de obra con más eficiencia, el capital físico y el capital humano (Banco Interamericano de Desarrollo, 2010).

Según Botero (2006), hay tres tipos de productividad en los proyectos de construcción:

- **Productividad de los materiales:** Evitar desperdicios.
- **Productividad de la mano de Obra:** Es el recurso que fija el ritmo de trabajo de la construcción.
- **Productividad de la Maquinaria:** Es importante su planeación por los altos costos de funcionamiento.

Es evidente que estos tres tipos de productividad afectan de manera directa el presupuesto de un proyecto, que en síntesis es lo que define si es viable y factible o si no lo es.

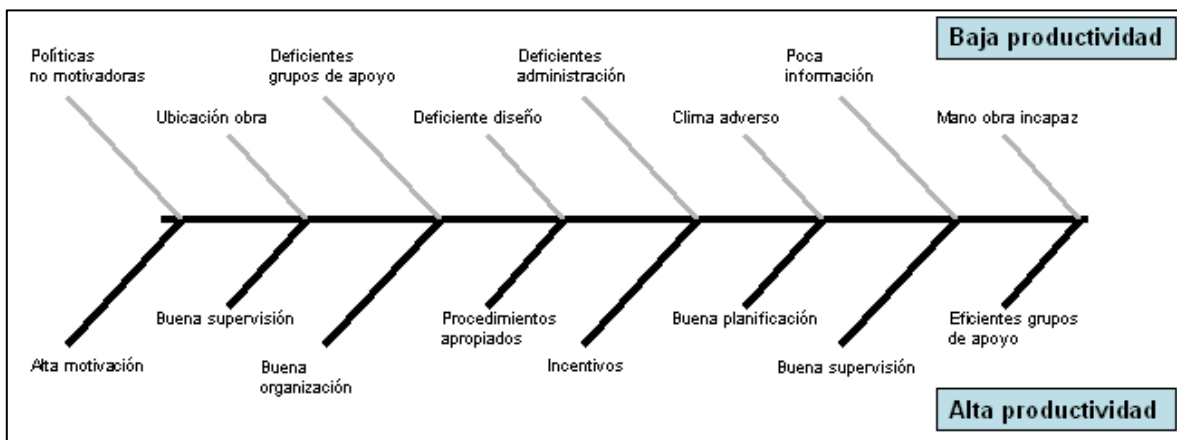


Figura 1. Factores que Inciden en la Productividad, Fuente: (Botero, 2006).



Desde la década de 1950, surgió una nueva filosofía sobre la producción en Japón, que tuvo su primera aplicación en el sistema productivo de Toyota. En aquel entonces, se eliminaron los inventarios y otros desperdicios a partir de lotes de producción más pequeños, y la implementación de nuevas herramientas y procedimientos como la reducción de los tiempos de montaje e instalación y algunas máquinas semiautónomas entre otros. A partir de ahí, la llamada “nueva filosofía de la producción”, fue desarrollada y refinada por ingenieros industriales, convirtiéndose así en la década de 1990 en el enfoque emergente convencional en las industrias (Koskela, 1992).

De acuerdo a la nueva filosofía de la producción, se puede establecer que el proceso productivo se compone de conversiones y flujos, siendo las conversiones todas las actividades de transformación que convierten los materiales y la información en productos pensando en los requerimientos del cliente, por lo tanto en el proceso de producción son las actividades que agregan valor; mientras que las pérdidas (actividades de flujos) son todas las actividades que no agregan valor, pero que sí consumen tiempo, recursos y espacio, generando costos en el proceso de producción (Botero y Álvarez, 2003).

En síntesis, la productividad es el término utilizado para determinar la eficiencia de las industrias a nivel mundial.

2.1.2 LEAN CONSTRUCTION.

La filosofía Lean Construction, es un enfoque introducido a la construcción en el cual se busca reducir las pérdidas al mínimo posible. Las pérdidas en las que se hace referencia, son aquellas producidas por el tiempo que se invierte en actividades que no agregan valor al producto final. Algunos de los ejemplos de actividades y sucesos que ocasionan pérdidas en la construcción son los siguientes (Páez, 2013):

- Esperas por falta de equipos, herramientas o materiales.
- Esperas debido a actividades previas que no se han terminado o están mal ejecutadas.
- Esperas por falta de una correcta instrucción para realizar el trabajo.
- Tiempo ocioso debido a la actitud del trabajador.
- Desplazamientos innecesarios debido a falta de recursos e inadecuada planeación del sitio del trabajo.
- Reprocesos por trabajo que no cumple con las especificaciones y cambio en los diseños.

La construcción vista como un proceso productivo, se puede ilustrar en la siguiente figura, en donde los cuadros sombreados representan las actividades que no agregan valor al producto:

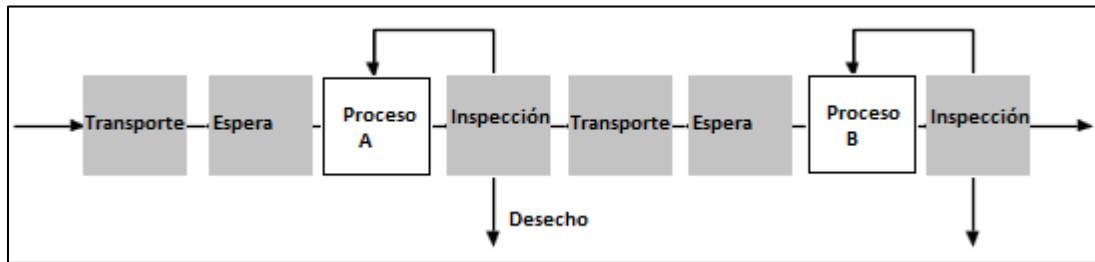


Figura 2. Productividad como un Proceso de Flujo: Ilustración Simple. Fuente: (Koskela, 1992).

Para comprender con exactitud la filosofía Lean Construction, es importante conocer tres categorías principales del trabajo realizado por los obreros (Botero y Álvarez, 2003):

- **Trabajo Productivo (TP):** El tiempo empleado por el trabajador en la producción de alguna unidad de construcción. Algunos ejemplos de trabajos productivos son la colocación de acero de refuerzo, el vaciado del concreto, la aplicación de pañetes o la colocación de enchapes.
- **Trabajo Contributivo (TC):** El tiempo empleado por el trabajador realizando tareas de apoyo necesaria para que se puedan ejecutar los trabajos productivos. Algunos ejemplos de trabajos contributivos son el transporte de material, la limpieza de superficies, mediciones, armado de andamios; etc.
- **Trabajo No Contributivo (TNC):** Cualquier otra actividad realizada por obreros y que no clasifica dentro de ninguna de las dos categorías anteriores, por lo cual son consideradas como pérdidas. Algunos ejemplos de trabajos no contributivos son cualquier tipo de esperas, descansos, reprocesos, tiempo ocioso como lo es la conversación de obreros; etc.

El enfoque Lean Construction se puede aplicar en todas las etapas de los procesos de construcción, y para esto es importante implementar algunos procedimientos clave como los que se muestran a continuación, en el cual se hace énfasis a la identificación y medición de pérdidas:

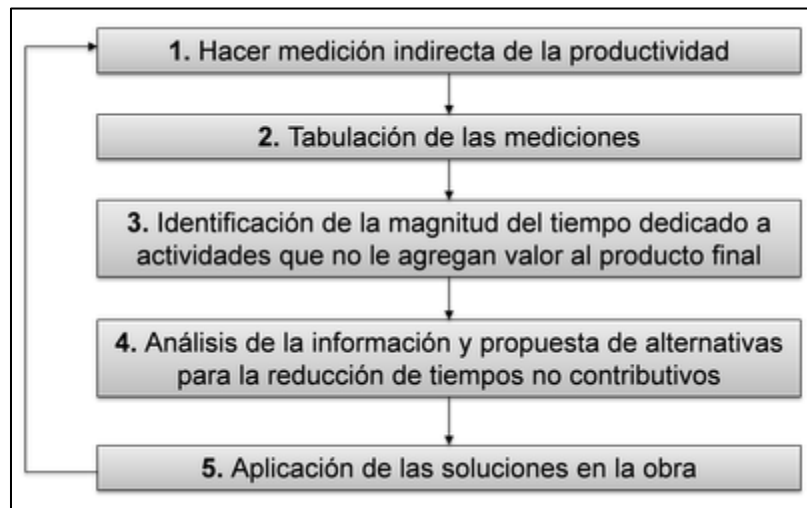


Figura 3. Plan para Medición de Pérdidas. Fuente: (Páez, 2013).

Para lograr obtener mejoras en los procesos constructivos, se deben tener en cuenta los siguientes aspectos claves que parten del enfoque Lean Construction según (Koskela, 1992):

- **Reducción de actividades que no agregan valor al producto:** Los flujos (pérdidas) son actividades que nacen en las directivas de los proyectos, que son quienes dictan indicaciones sobre procesos que son llevados a cabo por otras personas, lo cual termina generando pérdidas o re procesos. Se pueden eliminar estas actividades siempre y cuando esta decisión no desemboque en la causa de más pérdidas. Actividades de planeación, contabilidad o prevención de accidentes; son actividades que no agregan valor al producto final pero no se pueden eliminar porque evitan que se generen muchas más actividades que puedan ser consideradas pérdidas.
- **Incremento del valor final del producto:** Deben ser tenidas en cuentas las necesidades, pretensiones y requerimientos del cliente, para lograr satisfacción total. Se pueden definir dos tipos de clientes: las actividades próximas a una actividad (que tienen a la presente actividad como predecesora) y el cliente final.
- **Reducción de la Variabilidad:** Esto permite la obtención de un producto final más uniforme y además, la reducción de la variabilidad en la duración de los procesos disminuye la cantidad de actividades que no agregan valor.
- **Reducción de tiempos de ciclo:** Los tiempos de ciclo se pueden definir como la suma de los tiempos de procesado, inspección, espera y transporte. La reducción de tiempos de ciclo establece que se debe tender a desaparecer todos los flujos, con el fin de comprimir el ciclo y de esta manera consumir menos recursos. Así mismo, se reducen los tiempos de



entregas a los clientes, se facilita la gestión de la producción y se evita la reprogramación de actividades.

- **Simplificación de procesos:** Con este aspecto se busca la reducción de costos a través de la simplificación de los procesos, que puede ser entendida de dos maneras: La reducción del número de componentes en un producto y la reducción del número de pasos en el flujo de material o información.
- **Incremento de la flexibilidad:** Se puede lograr mayor flexibilidad a través de cuatro acciones principales: Minimizar los tamaños de los lotes para acercarse más a la demanda, reducir la dificultad de las configuraciones, personalizar lo más tarde posible en los procesos y entrenar un equipo de trabajo versátil.
- **Incremento en la transparencia:** Al incrementar la transparencia de los procedimientos, se es menos propenso a errar, aumenta la visibilidad de los errores y se aumenta la motivación para la improvisación. Esto se logra permitiendo que los procedimientos sean observables y comprensibles por los empleados y todos los involucrados en el proyecto.
- **Enfoque y control a todo el proceso:** Se compone de dos requisitos fundamentales: La medición de todos los procesos y la organización de un control autoritario para todos los procesos.
- **Mejoramiento continuo:** Se pueden lograr mejoramientos en los procesos con acciones como el monitoreo constante de los procesos, fijando objetivos de fortalecimiento y responsabilizando a los empleados por logros de mejoramiento entre otros.
- **Balance entre mejoramiento en flujos y mejoramiento en conversiones:** El balance se analiza mediante la comparación entre las mejoras obtenidas en los procesos de flujos y los procesos de conversión, para lo que se debe tener en cuenta que para optimizar, la tendencia debe ser a mejorar más en los flujos porque su mejoría no requiere tanta inversión como si sucede con las conversiones.
- **Puntos de referencia:** Se deben tener referencias sobre los procedimientos que están siendo llevados a cabo. Para esto es importante conocer los procesos, conocer los líderes de la industria o los competidores para encontrar, entender y comparar las mejores prácticas; e incorporando las mejores prácticas en los subprocesos que competen a nuestros proyectos.



2.2 SIMULACIÓN DIGITAL.

2.2.1 DEFINICIÓN.

La simulación, se puede definir como la imitación de la operación de un proceso de la vida real o la imitación de un sistema a través del tiempo. La simulación involucra la generación de una historia artificial del sistema analizado, y la observación de dicha historia para ilustrar inferencias acerca de las características operativas del sistema real representado. La simulación es una metodología indispensable de solución de problemas, que sirve para resolver muchos problemas de la vida real. Esta se utiliza para describir y analizar el comportamiento de un sistema, hacerse preguntas sobre este y acerca de la ayuda en el diseño de los sistemas (Banks, 1998)

También se puede definir la simulación como un modelo de un sistema real o inventado, con el propósito de evaluar el comportamiento del sistema bajo varias condiciones (Sadowski y Grabau, 2010).

2.2.2 CONCEPTOS PRINCIPALES.

- **Entidades:** Son aquellos ítems (documentos, clientes, partes; etc.) que están siendo producidos, servidos o intervenidos. Las entidades representan cualquier persona u objeto, ya sea real o imaginario, cuyo movimiento a través del sistema causa un cambio en el estado del sistema. Algunos ejemplos de entidades pueden ser los clientes moviéndose en un restaurante, las partes moviéndose en una fábrica o el acero en una obra para su colocación (Sadowski y Grabau, 2010).
- **Atributos:** Son las características y propiedades de las entidades. Entre ellas están los atributos físicos o tiempos de producción. Igualmente, los atributos considerados para un modelo de simulación son muy propios del sistema, y pueden no resultar útiles en otros casos (Echeverry y Giraldo, 2012).
- **Recursos:** Aquellos objetos usados para modelar un área en donde hay restricciones. Estas restricciones se generan por el número limitado de personas para ejecutar una acción, algún espacio de almacenamiento restringido, la capacidad de equipamiento; etc. Algunos ejemplos de recursos pueden ser las cuadrillas en una obra de construcción o los funcionarios de una caja en un banco. La capacidad de un recurso se define como el número de unidades idénticas correspondientes a un recurso como por ejemplo el número de cuadrillas que desempeñan una misma función. Las entidades agarran o se apoderan de los recursos y estas mismas liberan los recursos cuando ya no los requieren más (Sadowski y Grabau, 2010).



- **Actividades:** Son procesos con tiempo determinado y conocido. Su duración puede ser una constante, un valor aleatorio de una distribución estadística, el resultado de una ecuación, una entrada de un archivo diferente o un valor resultado del estado de un evento (Echeverry y Giraldo, 2012).
- **Cola:** El área en donde una entidad se ubica mientras espera por la disponibilidad de un recurso (Sadowski y Grabau, 2010).
- **Demora:** Es un intervalo de tiempo cuya duración es desconocida y que se da por combinaciones de las condiciones del sistema. Estas se presentan cuando una entidad queda en una cola esperando por la disponibilidad de un recurso para apoderarse de este (Echeverry y Giraldo, 2012).

2.2.3 PASOS PARA ELABORAR UN MODELO DE SIMULACIÓN.

Los pasos a seguir para elaborar un modelo de simulación van desde la formulación del problema, hasta la validación del modelo y el análisis e implementación de los resultados. El procedimiento más a detalle se muestra en el esquema presentado a continuación:

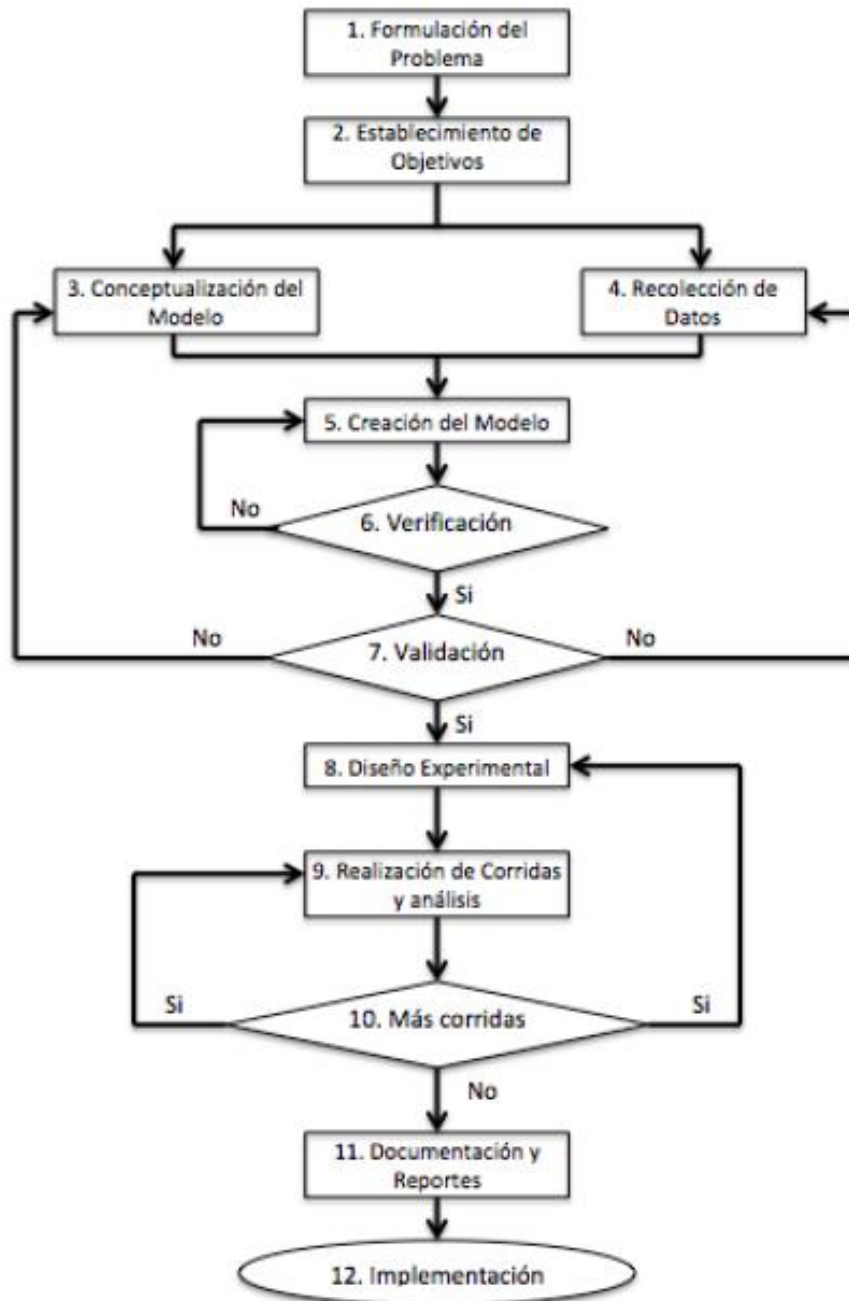


Figura 4. Pasos para la creación de un modelo de Simulación. Fuente: (Banks, 1999).

2.2.4 VENTAJAS DE ELABORAR MODELOS DE SIMULACIÓN.

Según (Banks, 1999) las principales ventajas de elaborar modelos de simulación son las siguientes:



- Permite evaluar todos los aspectos para la toma de decisiones en cambios o adiciones que se deseen implementar en un sistema.
- Se pueden explorar nuevas políticas y procedimientos operativos sin interrumpir la marcha de los procesos del sistema real.
- Puede presentar un proceso o fenómeno en la escala de tiempo que se requiera, obteniendo información más o menos detallada según las necesidades.
- Su análisis permite entender el porqué de algunas situaciones.
- Al tener un modelo válido de simulación, se pueden explorar diferentes posibilidades en cuanto al comportamiento de un sistema.
- Permite diagnosticar problemas presentes en los procesos de producción.
- Permite analizar en qué proceso se produce la demora general del sistema.
- Identifica restricciones o cuellos de botella en un proceso.
- Permite visualizar el plan de trabajo.
- Ofrece un punto de vista objetivo para la presentación de cambios.
- Prepara a los procesos para cambios.
- Resulta en una inversión baja con relación a los costos de implementación de los cambios.
- Se puede utilizar para la obtención específica de requerimientos en un sistema.

2.3 DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD.

Para comprender el concepto de lo que son las distribuciones de probabilidad, es importante saber en qué consiste una variable aleatoria. Una variable aleatoria, es aquella función que asocia un número real con cada uno de los elementos del espacio muestral (Walpole et al., 2007). La definición se puede entender mejor con el siguiente ejemplo:

Suponiendo que se sacan dos bolas de manera sucesiva y sin reemplazo, de una bolsa que contiene 4 bolas rojas y 4 negras; la variable aleatoria "Y" (número de bolas rojas) tendría los valores "y" presentados a continuación para cada posible resultado:

Espacio Muestral (Posibles Resultados)	Valores "y" de la variable Aleatoria "Y"
Roja, Roja	2
Roja, Negra	1
Negra, Roja	1
Negra, Negra	0

Tabla 1. Posibles Resultados para una variable aleatoria.



Las variables aleatorias pueden ser discretas o continuas. Una variable aleatoria es discreta si se puede contar su conjunto de resultados posibles, mientras que una variable aleatoria es continua si esta puede tomar valores en una escala continua con un número infinito de posibilidades (Walpole et al., 2007).

Por consiguiente, en cuanto a las distribuciones de probabilidad; estas pueden ser discretas cuando resultan de una serie de datos y la variable aleatoria se asocia con cierta probabilidad; o continuas cuando son el resultado de mediciones y no se pueden expresar en forma tabular (Canavos, 1998). En Arena 14, las distribuciones de probabilidad pueden ser tanto teóricas como empíricas. Las teóricas generan muestras con base en la formulación matemática y las empíricas dividen los datos reales en grupos y calculan los valores para cada uno (Kelton et al., 2008).

Para el modelo de simulación, se generarán variables aleatorias provenientes de la adaptación de datos reales a distribuciones de probabilidad. Estas variables aleatorias corresponden a la duración de las actividades. A continuación, se presentan los tipos de distribuciones de probabilidad utilizadas y sus parámetros:

Beta	Beta, Alfa
Erlang	Expomedia, K
Exponencial	Media
Gamma	Beta, Alfa
Lognormal	Log Media, Log Desv. Estándar
Normal	Media, Desv. Estándar
Triangular	Mínimo, Moda, Máximo
Uniforme	Mínimo, Máximo
Weibull	Beta, Alfa

Tabla 2. Distribuciones de Probabilidad. Fuente: (Kelton et al., 2008).

Al momento de ajustar distribuciones de probabilidad a un conjunto de datos, es importante tener en cuenta el tamaño de la muestra. Entre mayor sea el número de la muestra, más seguro será este ajuste probabilístico. Sin embargo, los tamaños de las muestras están determinados por la cantidad total de datos posibles de medir y por los márgenes de error y confianza establecidos por quien realiza el ajuste.

2.4 CONCRETO PRE ESFORZADO.

El pre esforzado, consiste en el pre cargado de una estructura en concreto previo a la aplicación de las cargas de diseño requeridas, hecho de tal forma que mejore el comportamiento general de esta. Debido a la muy baja resistencia del concreto a la tensión, el principio básico del pre esforzado es mantener el concreto en esfuerzos bajos o nulos de tensión. Finalmente, se pretende que un elemento estructural en concreto pre esforzado quede sometido a esfuerzos de flexo-compresión. Las condiciones del pre esforzado se logran introduciendo suficiente compresión axial para disminuir o eliminar los esfuerzos a tensión en el miembro cargado a través de cables de acero que son tensionados y luego sueltos para generar la compresión. Estos cables de acero (refuerzo activo) son adicionales al acero de refuerzo (refuerzo pasivo) (Muñoz, 2013).

Los cables que se tensionan, se ubican dentro de ductos que son los elementos que están en contacto directo con el concreto y por lo general son fabricados a base de plástico. Esto se hace de tal forma, para evitar que los cables le transmitan la tensión al concreto al momento de ser tensionados.

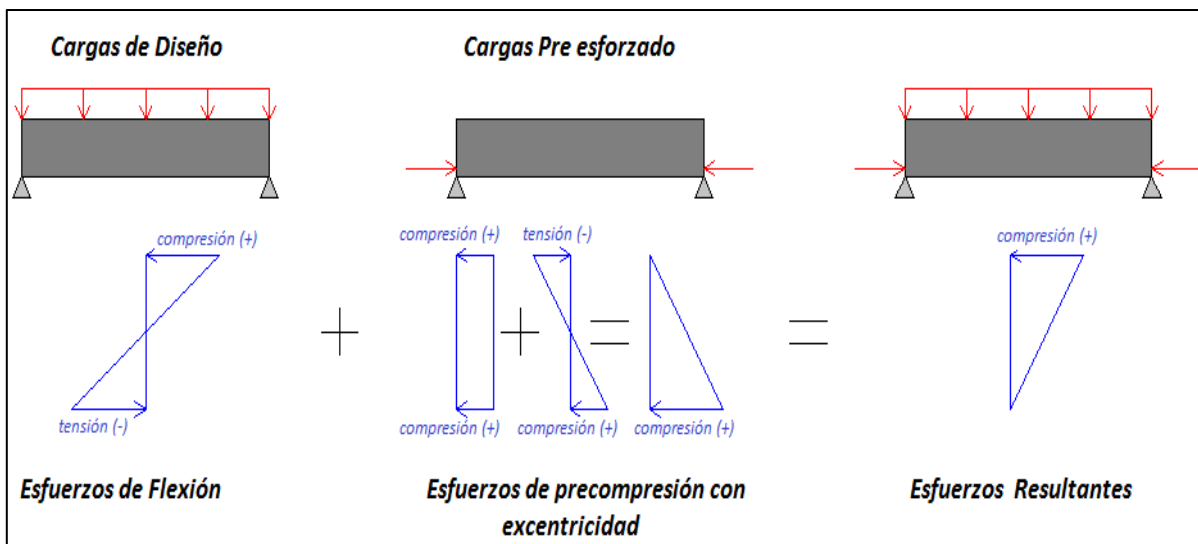


Figura 5. Esquema sobre el concepto básico del pre esforzado.

Dentro del pre esforzado se encuentran dos grandes categorías, el concreto pretensado que se realiza tensionando los cables de acero antes de fundir el concreto y es ideal para elementos prefabricados; y el concreto postensado que realiza tensionando los cables de acero después de fundido y endurecido del concreto, que se da por lo general para elementos elaborados in situ (Muñoz, 2013).



Como ya se mencionó anteriormente, el proceso constructivo a analizar en este trabajo de grado, es la construcción de una losa en concreto postensado. El proceso constructivo y otros detalles adicionales sobre elementos en concreto postensado son descritos en el siguiente numeral.

2.4.1 CONCRETO POSTENSADO.

Este tipo de concreto, en el que se somete al concreto a esfuerzos de compresión después del fraguado, puede ser adherido o no adherido. Cuando es adherido, se inyecta lechada (agua y cemento, algunas veces con aditivos) dentro de los ductos para generar la adherencia entre los cables, el ducto y el concreto. Cuando el postensado en cambio es no adherido, no hay inyección, lo cual toda la fuerza se concentra en los anclajes.

En la producción de losas postensadas adheridas, como lo es la del proceso constructivo a analizar; se llevan a cabo cinco etapas principales:

1. Una vez instaladas las camillas de soporte de la losa, se instalan tanto los ductos y cables del tensionamiento; como el acero pasivo de refuerzo. Todo se debe hacer acorde a las indicaciones del diseño estructural, y para la colocación del tensionamiento es importante tener en cuenta las formas de las parábolas o catenarias de los ductos, es decir, la posición del tensionamiento a lo largo y ancho del elemento.
2. Se funde el concreto de la losa.
3. Cuando el concreto haya requerido la resistencia requerida, especificada por el diseño; se procede a tensionar los cables por medio de gatos hidráulicos, transmitiendo la fuerza de este a través de anclajes. Para llevar a cabo el tensionamiento de los cables es importante tener en cuenta los siguientes aspectos:
 - Los cables se deben limpiar adecuadamente para poder hacer contacto ideal con las mordazas del gato hidráulico.
 - Para la verificación de que a los cables se les aplique la fuerza adecuada, se revisa la elongación de estos a través de marcas con pintura, y también se chequea la presión en el manómetro del gato
4. Se inyecta la lechada dentro de los ductos para garantizar la total adherencia entre cables, ducto y concreto.
5. Una vez fragüe la lechada de adherencia, se sueltan los cables de la tensión aplicada y así se genera finalmente la compresión deseada. Esta se produce debido a que los cables intentan recuperar su posición original.



2.5 DESARROLLO HISTÓRICO Y CASOS DE ESTUDIO.

Debido a la necesidad de mejorar la productividad en la industria de la construcción y obtener beneficios económicos en los proyectos, la simulación de procesos constructivos ha sido investigada últimamente, más que todo en universidades. Dentro de las investigaciones realizadas, se han simulado procesos tradicionales como la construcción de elementos convencionales como vigas y columnas, estructuras de cimentación, muros estructurales, muros divisorios, placas; etc.

2.5.1 CONTEXTO NACIONAL.

A principios de la década de los 90, el profesor Daniel Halpin desarrolló una herramienta llamada *Micro Cyclone* para representar operaciones de construcción. Posteriormente, utilizando dicha herramienta Ballesteros (1998) llevó a cabo una investigación sobre la productividad en la ingeniería civil. Navarro (2001) en cambio, utilizó la plataforma *STROBOSCOPE*® desarrollada por Julio Cesar Martínez basada en *Micro Cyclone*; para simular procesos constructivos de manera discreta (Martínez, 1996).

Córdoba y Delgado (2005) crearon una herramienta computacional denominada *SISPLAN*® en base a la simulación digital. La herramienta permite simular procesos constructivos y a su vez determinar cuál sería la manera más adecuada de asignar los recursos en dichos procesos para optimizar la productividad desde el punto de vista de tiempos y costos. *SISPLAN*® es una herramienta de simulación digital de procesos constructivos cuya finalidad es combinar estrategias por eventos, basada en el seguimiento del desarrollo de la ejecución de actividades que se presentan con tiempos específicos; con el fin de encontrar la combinación óptima de recursos para lograr la mayor productividad al menor costo.

Echeverry et al. (2008) desarrollaron una investigación en donde se utilizó la simulación digital con *Arena* para modelar la construcción de la estructura de muros y losas en concreto en proyectos inmobiliarios de una firma constructora colombiana. La obtención de datos se basó en fotos, videos y mediciones directas en obra.

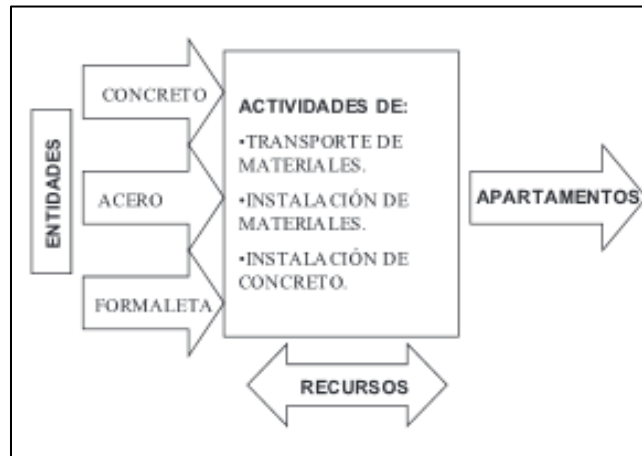


Figura 6. Esquema general del sistema modelado experimental. Fuente: (Echeverry et al., 2008).

Gómez (2010) lleva a cabo un estudio en donde por medio de mediciones en campo, obtiene información sobre productividad y rendimientos en la construcción de una edificación de 600 m². Con las mediciones realizadas, se definen los histogramas de los datos obtenidos para luego establecer las distribuciones de probabilidad que más se ajusten a cada grupo de datos, con la ayuda de la herramienta Input Analyzer del software Arena.

Posteriormente, se caracterizó el respectivo proceso constructivo para la creación de un modelo digital en el software Arena, en el cual los datos de entrada fueron las distribuciones de probabilidad para los rendimientos de cada proceso.

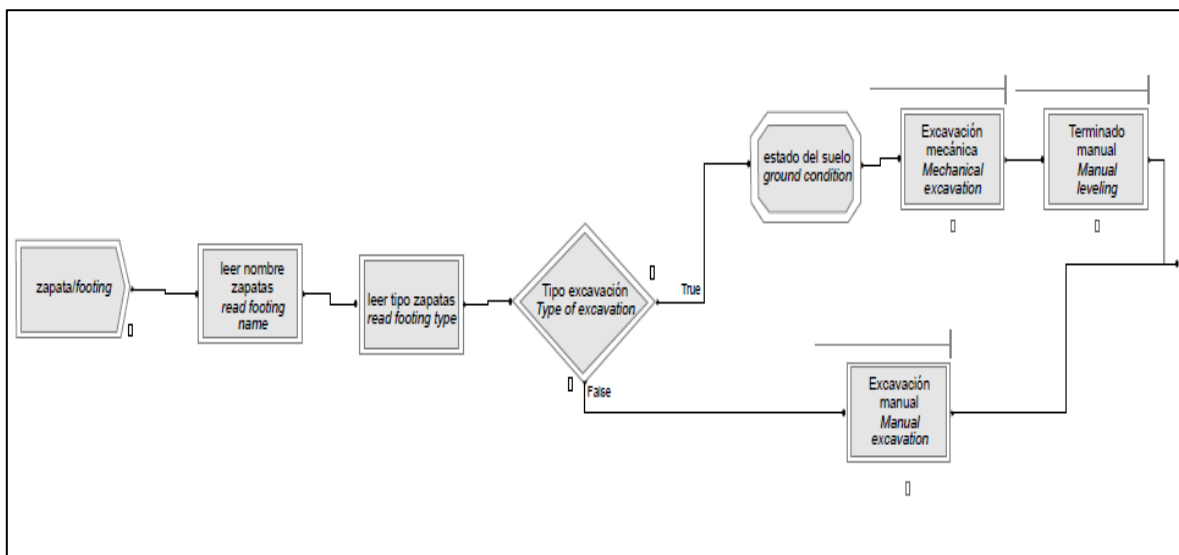


Figura 7. Vista en Arena del inicio del proceso constructivo. Fuente: (Gómez, 2010).

El modelo original fue modificado considerando opciones de mejora a partir de diferentes escenarios como contar con materiales siempre disponibles, aumento de personal de obra o la implementación de distintos métodos constructivos.

En la investigación de (Céspedes, 2010) se obtuvieron los rendimientos relativos a actividades principalmente de construcción de muros estructurales de concreto y mampostería por medio de auscultación en obra y análisis de videos *Time Lapse*. La captura de información se hizo con una videocámara de disco duro integrado que permitía grabación de 20 horas de trabajo en formato de baja resolución.

Echeverry y Giraldo (2012) caracterizan los procesos constructivos de una obra a través de videos *Time Lapse* identificando el flujo de trabajo y tiempos de ejecución para elaborar un modelo de simulación digital, y posteriormente identificar pérdidas y crear escenarios de mejora.

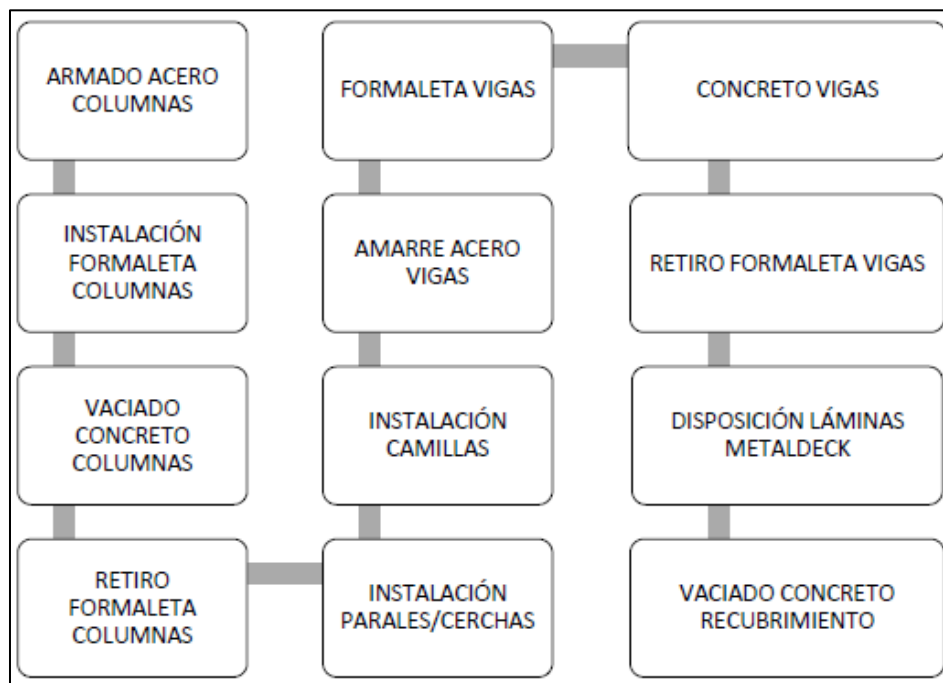


Figura 8. Actividades a caracterizar mediante simulación digital. Fuente: (Echeverry y Giraldo, 2012).

2.5.2 CONTEXTO INTERNACIONAL.

A nivel internacional, la simulación digital ha sido utilizada con distintos fines en pro del mejoramiento de la ingeniería civil. Lu (2003) establece predicciones sobre rendimientos en construcción apoyada en la simulación. En dicha investigación se utiliza *SDESA* (Simplified discrete-

event simulation approach for construction simulation) como herramienta principal, para hacer que la simulación de sistemas constructivos sea tan sencilla como la aplicación del método de ruta crítica. *SDESA* es desarrollada a través del software Access, y posteriormente es aplicada a la construcción de pavimentos. Esta herramienta puede ser utilizada potencialmente para otros propósitos especiales de simulación en complejos sistemas constructivos, para encontrar soluciones convenientes.

Sacks y Esquenazi (2007) desarrollan un juego llamado *LEAPCON™* el cual simula el proceso constructivo de un edificio de 8 pisos con 32 apartamentos utilizando piezas *LEGO®*. El juego se desarrolla en dos rondas, la primera simula el sistema constructivo tradicional; y la segunda aplica la filosofía Lean Construction. Las múltiples ejecuciones del juego permiten identificar tiempos de ciclo, flujo de caja y los niveles de trabajo en progreso.

Characteristic	Round one (Traditional management system)	Round two (LEAN construction system)
Game time	11 minutes	11 minutes
Batch Size	Entire Floor (4 apartments)	A single apartment
Flow system	Push, the goal of the contractors is to build as many apartments as they can	Pull, the flow of contractors is controlled by availability of design information
Work Groups	Specialized teams	Multi-skilled teams

Tabla 3. Características de las dos rondas del juego *LEAPCOM™*. Fuente: (Sacks y Esquenazi, 2007).

Chang y Lu (2008) utilizan un algoritmo para analizar el manejo de materiales en la construcción de un viaducto; mientras que Sosa et al. (2010) utilizan la herramienta *STROBOSCOPE®* para simular el proceso constructivo de losas prefabricadas, comparando distintos métodos constructivos de las losas para lograr optimizar tiempos y costos.

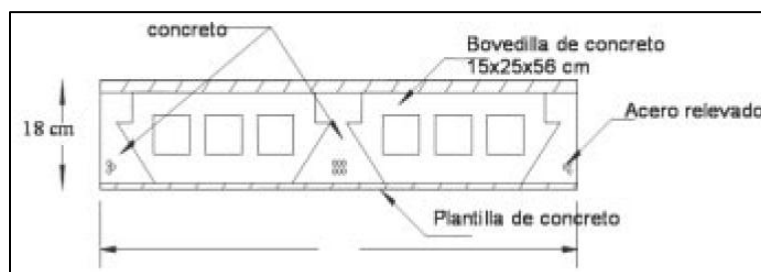


Figura 9. Esquema de la Losa analizada. Fuente: (Sosa et al., 2010).

3 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO DE CONSTRUCCIÓN.

El proyecto de construcción utilizado como base de esta investigación es el edificio correspondiente a la nueva Facultad de Artes de la Universidad Javeriana, el cual se encuentra en ejecución actualmente.

El edificio de la nueva Facultad de Artes de la Universidad Javeriana se ubica en la Calle 40 entre carreras 6A y 6B, en el campus de la Universidad. Este consiste en una torre compuesta de seis niveles y tres sótanos, con área de plataforma de cuatro niveles sobre el último sótano que conforma las plazas de acceso y circulación contra la torre. La tipología arquitectónica es de planta libre y la modulación de la estructura está organizada alrededor del punto fijo central, con ejes cada 8.00 metros en una dirección y cada 9.65m en la otra. En los costados norte y sur del edificio, la arquitectura dispone volúmenes en voladizo que se alternan cada dos pisos, albergando áreas para Galería, Música y Artes visuales respectivamente (CNI Ingenieros Ltda, 2011)

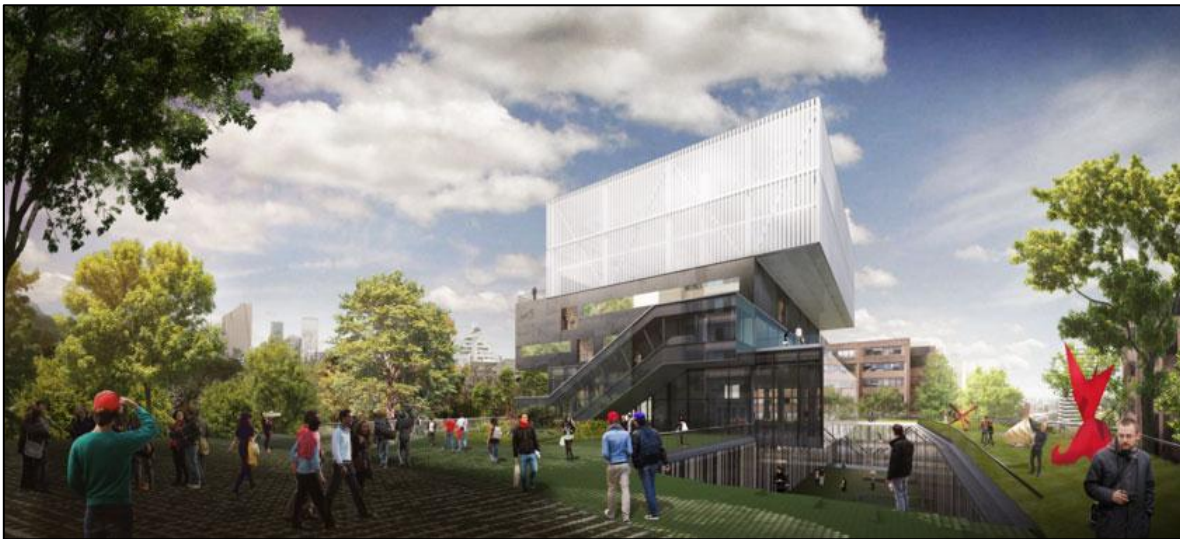


Figura 10. Nueva Facultad de Artes Pontificia Universidad Javeriana. Fuente: ("LA ROTTA Arquitectos," 2013).

La torre central del edificio cuenta con un núcleo principal en concreto, y elementos estructurales como vigas y columnas en acero. También cuenta con cuatro placas en concreto postensado, y el proceso constructivo de estas es el analizado a través de simulación digital en esta investigación.

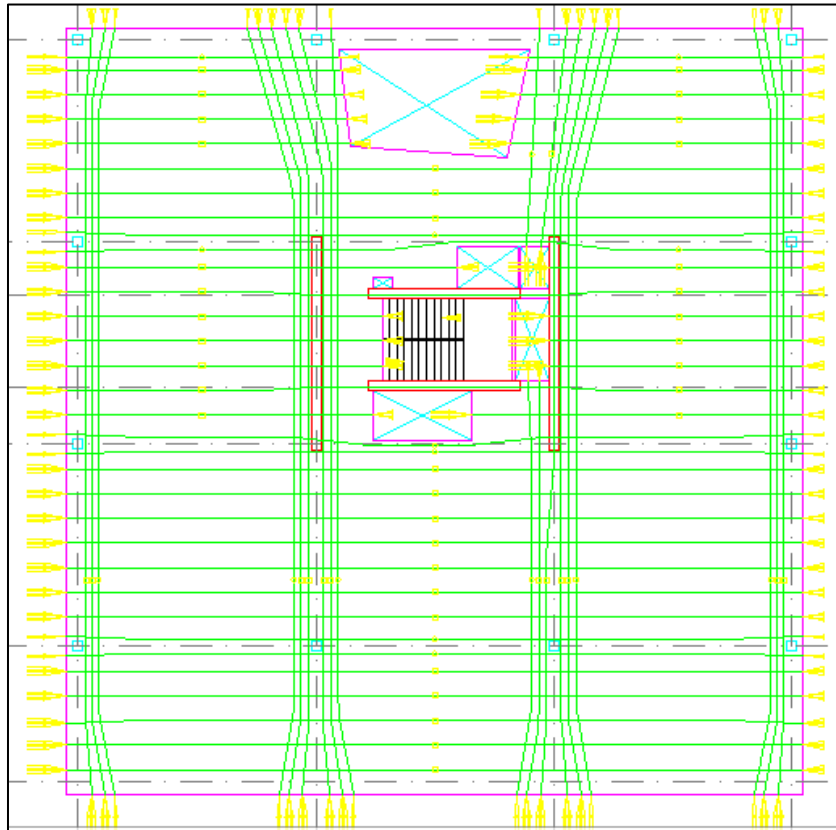


Figura 11. Plantas del Postensado para una de las placas. Fuente: (Parra, 2011).

4 METODOLOGÍA.

Para la ejecución de este trabajo de grado, se llevaron a cabo tres etapas principales. En la figura presentada a continuación, se presentan estas etapas en orden cronológico:



Figura 12. Etapas de la Metodología del Proyecto.

4.1 REGISTRO DE INFORMACIÓN.

La primera de las etapas principales para la ejecución del proyecto es el registro de información. En esta etapa se obtuvo toda la información que sirvió como punto de partida, y que posteriormente fue ajustada y validada.

4.1.1 CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA DE CAPTURA

Esta fase consiste en la configuración del sistema electrónico de captura de fotografías, las cuales son la fuente principal de información del proyecto. El montaje para la captura de fotografías se diseñó en el marco del proyecto de investigación “Aplicación de la metodología Time Lapse para el mejoramiento de procesos constructivos mediante simulación en el software Arena”, el cual fue financiado por la Vicerrectoría Académica de la Pontificia Universidad Javeriana (Gómez et al., 2012).

Las características principales de este sistema de captura es que cuenta con cámaras de alta definición, fuente de alimentación solar y permite la configuración de los intervalos de captura de imágenes a través de la web.

El funcionamiento del sistema de captura se ilustra en la imagen presentada a continuación:

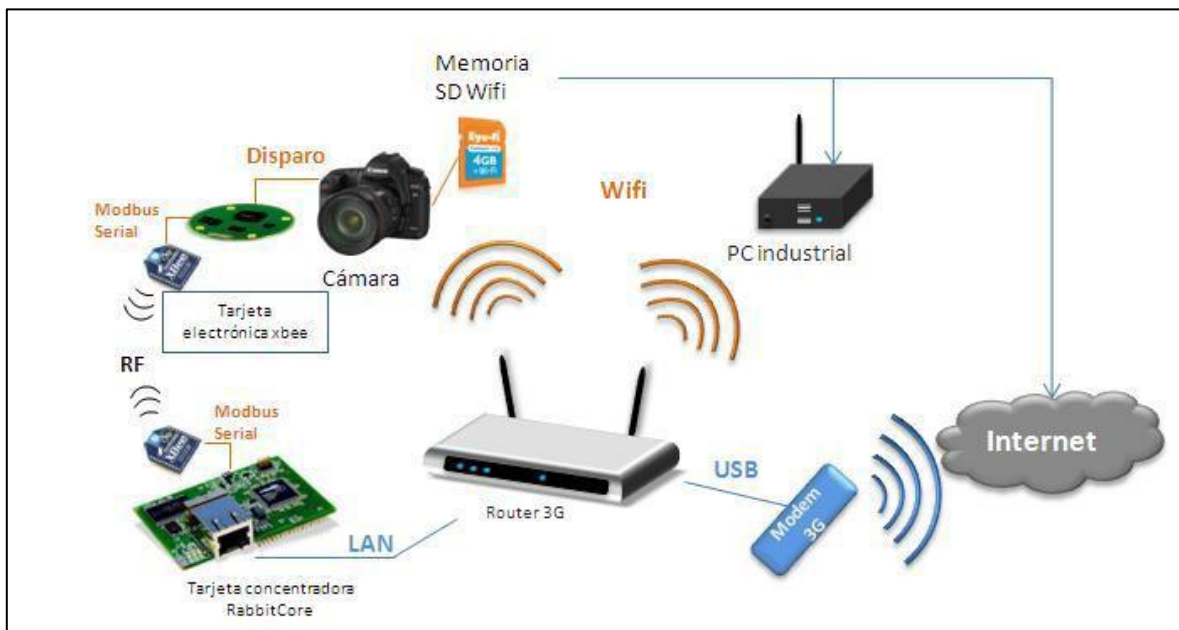


Figura 13. Esquema del Sistema de Captura de Imágenes. Fuente: (Gómez et al., 2012).

Para el montaje del sistema, fueron necesarios los siguientes equipos:



Equipo Necesario
1. Cámara Digital
Nikon D3100 14.2mp Digital Slr Camera With 18-55mm F/3.5-5.6 Af-S Dx Vr Nikkor Zoom Lens
2. Accesorios Cámara
Nikon Dr-6, Right Angle, Slip-On Finder
Eye-Fi Connect X2 Wifi 4gb Secure Digital Sdhc Memory Card
Sandisk 8gb Secure Digital High Capacity (Sdhc) Memory Card
Pro Optic Pro 52mm Circular Polarizer (Cpl)
Nikon 50mm F/1.2 Nikkor Ai-S Manual Focus Lens
Nikon Camera Control Pro 2
Nikon Mc-Dc2 Remote Release Cord
Nikon Ep-5a Power Supply Connector
Nikon Eh-5a Ac Adapter
Nikon Dg-2 2x Eyepiece Magnifier For Nikon
Nikon Dk-22 Eyepiece Adapter For Nikon Slr Cameras
3. Computadores
Computador De Escritorio
Mini Computador Portátil: Hp Mini 110-3026la N450
Computadores Industriales - Q-Box
4. Accesorios Montaje
Panel Solar: HQRP 20W Mono-Crystalline Solar Panel 20 Watt 12 Volt
Generador de Energía Eólico: Gudcraft CD500 500W Watt 12V

Tabla 4. Equipo Necesario para el montaje del Sistema. Fuente: (Gómez et al., 2012)

El sistema general, se compone de tres subsistemas, cada uno encargado del manejo de la energía, del control de secuencia de toma de imágenes, y del almacenamiento y consulta de las mismas. Estos tres subsistemas son (Gómez et al., 2012):

- Unidad central de control, conexión a internet y red wi-fi:** Esta consiste en un router inalámbrico para obtener conexión GPRS, en el cual se tiene red wi-fi y puertos Ethernet para lograr la conexión con otros dispositivos. Sobre un puerto Ethernet, está conectada una tarjeta rabbitcore, la cual actúa como unidad central de control. Esta unidad cuenta acceso a internet y da soporte a una página HTML desde la cual se puede manejar la configuración de la toma de fotografías. Este módulo tiene un enlace inalámbrico y actúa como Modbus-master para enviar y recibir datos de control y estado de los módulos de toma de imágenes. Esta unidad está conectada a la red pública de energía. La página HTML puede ser accedida a través de internet, utilizando una clave de acceso. En esta página se puede establecer la hora de inicio y fin de toma de imágenes diarias y el intervalo de captura de las mismas.

- **Captura de imágenes:** Consiste en una unidad autónoma de energía la cual carga una batería alimentada con paneles fotovoltaicos, y se encarga de capturar y almacenar las fotografías localmente. Esta unidad debe ser instalada al alcance de la red wi-fi y de la red de datos inalámbrica. A la cámara, se le conecta un nodo local por medio de un cable de disparo remoto que cuenta con un aislamiento óptico para la protección. Este nodo, es el encargado de disparar la cámara según los parámetros de configuración, desde la unidad central de control, comunicándose con esta por medio de una tarjeta XBee, la cual provee conectividad de tamaño pequeño y garantiza la entrega confiable de datos.
- **Computador de Almacenamiento:** Consiste en un computador industrial conectado a la red wi-fi, el cual actúa como sistema de almacenamiento local de las imágenes y cuenta con el software necesario para colocarlas en un servidor externo, por lo tanto las fotografías podrán ser accedidas remotamente. Se puede ingresar a este computador de forma remota, para verificar el funcionamiento general del sistema.



Figura 14. Partes del Montaje del Sistema de Captura.

Una vez montado el sistema completo de captura de fotografías, se procede a configurar las condiciones de captura de imágenes según la necesidad. Para esta investigación se estableció una configuración con intervalos de diez minutos entre fotos.

Figura 15. Unidad central de control.

La cámara fotográfica se ubicó en puntos estratégicos del edificio José Gabriel Maldonado S.J, perteneciente a la facultad de ingeniería de la Pontificia Universidad Javeriana. Desde este, se logró observar con claridad el panorama de la obra.



Figura 16. Fotografía obtenida con el sistema de captura.

4.1.2 CAPTURA DE FOTOGRAFÍAS Y ORGANIZACIÓN DE INFORMACIÓN.

Completados el montaje y configuración del sistema, este procede a capturar las fotografías y almacenarlas. Conforme se va almacenando un número considerable de fotografías, estas se van copiando del computador de almacenamiento en CDs. Al obtener un CD, se procede a analizar la información almacenada en este, para organizarla de tal manera que las fotos que no sean útiles para la investigación se eliminen y así facilitar el análisis. Las fotos eliminadas son aquellas que exceden los horarios de trabajo y también las correspondientes a domingos y festivos.

Después de deshacerse de la información inútil, se organizan las fotos según su fecha y hora de captura, para así identificar el flujo de las actividades en la obra. De esta manera, se podrán establecer tiempos de inicio y duraciones estimadas de los procesos constructivos a evaluar.

Adicionalmente, se obtienen otros registros fotográficos y de videos, independientes de las capturas automáticas. La obra analizada se encuentra en un lugar de la universidad visible desde múltiples puntos. Esto permitió la obtención de registros manuales desde el edificio Fernando Barón S.J, los cuales fueron de gran ayuda porque permitieron capturar algunos puntos ciegos para la cámara del sistema de captura y ayudan a entender el flujo de las actividades de la obra e identificar problemas o errores presentes en esta.



Figura 17. Fotografía obtenida manualmente desde el edificio Fernando Barón S.J

4.2 CARACTERIZACIÓN DE PROCESOS CONSTRUCTIVOS

La caracterización de los procesos constructivos consiste en la determinación de los detalles importantes de los procesos a analizar. Esta se realizó en tres partes determinantes: Análisis de flujo de trabajo, caracterización de mano de obra y obtención de duraciones.

Para esta etapa, fue de suma importancia realizar visitas de obra y hacer consultas tanto a personal de mano de obra como personal administrativo.

4.2.1 ANÁLISIS DE FLUJO DE TRABAJO.

El análisis de flujo de trabajo consiste en la comprensión del orden y secuencia de las actividades en la obra. Esto significa que a partir del análisis de flujo de trabajo se debe obtener información sintetizada que indique factores como qué actividades son predecesoras de otras, y los subprocesos incluidos en los procesos más generales.

Como herramientas principales para el análisis de flujo se utilizaron tanto las fotografías obtenidas con el sistema de captura, como las obtenidas manualmente. Además, con las visitas de obra y las consultas al personal de esta, se confirmó lo obtenido a través de las imágenes. El flujo de trabajo correspondiente es el siguiente:

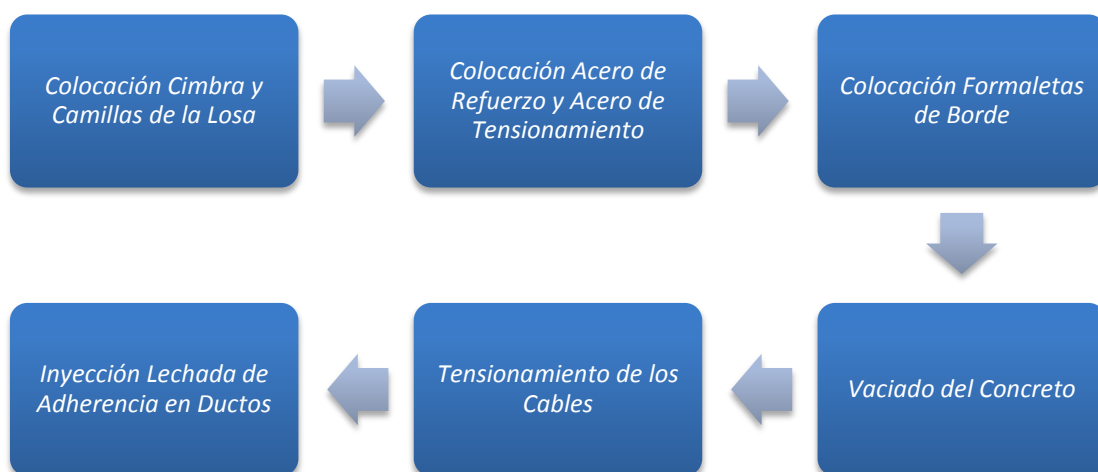


Figura 18. Actividades dentro del flujo de trabajo.

Las características correspondientes al flujo de trabajo en cada una de las actividades observadas, son las siguientes:

- **Colocación de Cimbra y Camillas de la Losa:** Este proceso consiste en el armado de la cimbra que servirá como soporte durante la construcción de la placa, y la colocación de las camillas correspondientes a la superficie de esta. La colocación de las camillas se va llevando a cabo a medida que se va levantando cimbra en zonas de la losa, es decir que no fue necesario que se terminara el levantado de la cimbra en toda el área de la losa para empezar con la colocación de las camillas.



Figura 19. Fotografía de la colocación de cimbra y camillas de la losa.

- **Colocación Acero de Refuerzo y Acero de Tensionamiento:** Una vez finalizada la colocación total de la cimbra y las camillas de la losa, se empiezan a colocar tanto el acero de refuerzo pasivo, como el acero correspondiente a los cables del tensionamiento, incluidos por supuesto los ductos. Las actividades se hacen de manera simultánea, con una cuadrilla de obreros para la colocación del acero de refuerzo pasivo perteneciente al constructor, y una cuadrilla de obreros para la colocación de todo lo referente al tensionamiento perteneciente a una empresa con la cual se subcontrató cada actividad correspondiente al postensado.



Figura 20. Fotografía de colocación de acero de refuerzo y acero de tensionamiento.

- **Colocación Formaletas de Borde:** La colocación de las formaletas del borde de la losa se inicia una vez terminada la colocación del acero de tensionamiento. Para este proceso es importante tener en cuenta que a las formaletas se les deben hacer agujeros que coincidan con la posición de los cables a tensionar, ya que estos exceden los límites del borde de la losa. Las formaletas de borde deben estar listas con anticipación a la llegada del concreto a la obra.

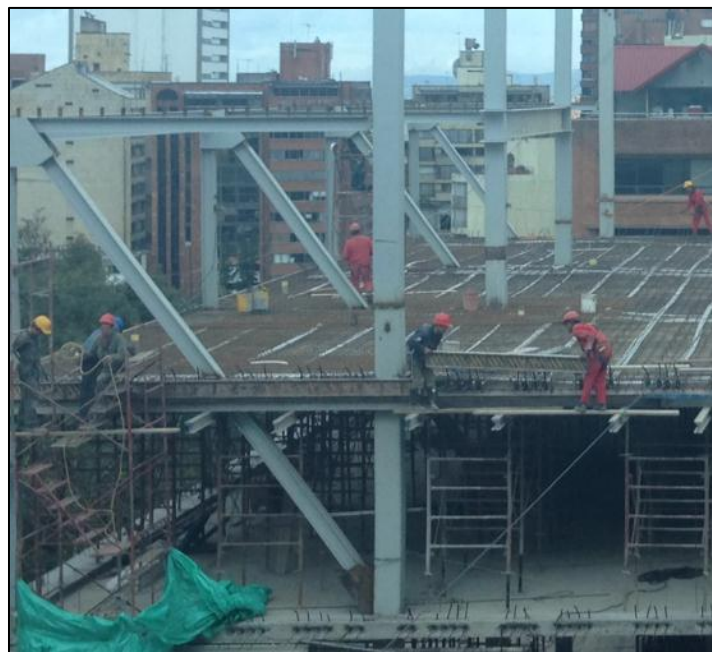


Figura 21. Fotografía de la colocación de las formaletas de borde.

- **Vaciado del Concreto:** Completadas todas las actividades anteriores, se procede a vaciar el concreto de la losa, el cual llega a esta en mixers pertenecientes a la empresa con la cual se haya contratado. Para esta actividad se requiere mano de obra tanto para el manejo de las bombas como para el fundido de la losa.



Figura 22. Fotografía del proceso de vaciado del concreto.

- **Tensionamiento de los Cables:** Los cables se deben tensionar luego de que el concreto haya adquirido la resistencia necesaria especificada por el ingeniero estructural a cargo. Se deben colocar anclajes que garanticen la transmisión de esfuerzos al concreto de la losa. En esta obra se tensionaron los cables pasados cinco días después del vaciado del concreto. Los cables van siendo limpiados para lograr buen contacto con las mordazas del gato que aplica la tensión.



Figura 23. Fotografía del proceso de tensionamiento de los cables.

- **Inyección Lechada de Adherencia en Ductos:** Al ser la losa analizada de tipo postensado adherido, se debe inyectar lechada de adherencia en los ductos para garantizar que los cables apliquen el esfuerzo a la losa al ser soltados de la tensión. La inyección se hace posterior al tensionamiento de los cables, y a través de mangueras que se colocaron durante la colocación general de todo el acero del tensionamiento. Al completarse el proceso, se deben cortar los excesos de cable.



Figura 24. Fotografía de las mangueras por las cuales se inyecta la lechada.

4.2.2 CARACTERIZACIÓN DE MANO DE OBRA.

Entendiendo la mano de obra como un recurso del proyecto, es importante conocer la capacidad y el flujo de esta en las respectivas actividades. Las cuadrillas de mano de obra varían según el tipo de actividad.

Para lograr caracterizar la mano de obra se realizaron visitas de obra para observar la disposición de esta. Adicionalmente se realizaron otras visitas a las oficinas de interventoría, dentro de las cuales se complementó la información previamente obtenida sobre las cuadrillas.

Es importante tener en cuenta que todas las actividades correspondientes al tensionamiento fueron subcontratadas, por lo cual la mano de obra para estas es independiente de la mano de obra de las demás actividades.

Los recursos correspondientes a mano de obra utilizados en la obra analizada fueron los siguientes:



Actividad	Recursos
Colocación Cimbra y Camillas de la Losa	15 oficiales
	15 ayudantes
Colocación Acero de Refuerzo	15 oficiales
	15 ayudantes
Colocación Acero de Tensionamiento	4 oficiales
	4 ayudantes
Colocación Formaletas de Borde	1 oficial
	2 ayudantes
Vaciado del Concreto	15 oficiales
	15 ayudantes
Tensionamiento de los Cables	1 oficial
	2 ayudantes
Inyección Lechada de Adherencia en Ductos	1 oficial
	2 ayudantes

Tabla 5. Recursos correspondientes a mano de obra.

Adicional a la tabla, es necesario añadir que el recurso que ejecuta la colocación de la cimbra y camillas de la losa, la colocación del acero de refuerzo; y el vaciado del concreto es la misma, y se compone de 15 cuadrillas de un oficial y un ayudante. Lo mismo sucede con el tensionamiento de los cables y la inyección de la lechada de adherencia; ambas actividades son ejecutadas por el mismo recurso compuesto por un oficial y dos ayudantes.

4.2.3 OBTENCIÓN DE DURACIONES.

Las duraciones de las actividades caracterizadas, son la raíz del modelo de simulación a elaborar. Para cada actividad, se obtuvieron múltiples duraciones de tal manera que se lograran establecer distribuciones de probabilidad para cada conjunto de datos. Estas distribuciones de probabilidad resultan siendo los datos de entrada al modelo de simulación.

Los tiempos obtenidos son resultado combinado de toda la información recopilada, es decir; sistema de captura automático, fotografías y videos obtenidos manualmente; visitas de obra y consultas con el personal administrativo de esta.

Para poder obtener duraciones de una actividad repetida, fue necesario establecer zonas de trabajo para algunas de las actividades. Para la colocación de la cimbra y las camillas de la losa, se dividió el área total de una losa en diez partes con igual área (sin incluir el núcleo central de ascensores y escaleras) para así poder establecer múltiples duraciones y formar así el conjunto de

datos para obtener la respectiva distribución de probabilidad. Lo mismo se hizo para las actividades de colocación de acero de refuerzo y vaciado del concreto. Las duraciones obtenidas para cada división del área de la placa, resultaron de sumar los tiempos obtenidos cada vez que las cuadrillas se dedicaban a alguna de las zonas. El esquema de división de la losa fue el siguiente, con las zonas de trabajo enumeradas y el área sombreada correspondiente a ascensores y escaleras:



Figura 25. División del Área de la Losa en Zonas de Trabajo.

Para las demás actividades, las duraciones se obtuvieron de manera diferente. Para la colocación del acero de tensionamiento se determinaron duraciones correspondientes al tiempo utilizado en colocar un ducto con todas sus piezas, al igual que la colocación de formaletas de borde, actividad en la cual las duraciones corresponden al tiempo utilizado en la colocación de una pieza. Para el tensionamiento de los cables, se determinaron duraciones correspondientes al tiempo utilizado en limpiar y tensionar un cable, y para el proceso de inyección, las duraciones corresponden al tiempo utilizado en completar la inyección de lechada por un ducto.

Finalmente, se establecieron diez duraciones por cada actividad caracterizada. El conjunto de datos resultantes fue el siguiente:



Actividad N°	1	2	3	4	5	6	7
Descripción	<i>Colocación Cimbra y Camillas de la Losa</i>	<i>Colocación Acero de Refuerzo</i>	<i>Colocación Acero de Tensionamiento</i>	<i>Colocación Formaletas de Borde</i>	<i>Vaciado del Concreto</i>	<i>Tensionamiento de los Cables</i>	<i>Inyección Lechada de Adherencia en Ductos</i>
Unidad	79 m2	79 m2	1 ducto	1 pieza	19.8 m3	1 ducto	1 ducto
Tiempos	8.50 horas	7.25 horas	0.25 horas	13 min	0.7 horas	2.5 min	5.2 min
	7.00 horas	7.20 horas	0.30 horas	10 min	1.3 horas	2.4 min	5.0 min
	5.75 horas	6.75 horas	0.20 horas	20 min	0.9 horas	2.1 min	4.8 min
	7.25 horas	7.50 horas	0.30 horas	20 min	0.8 horas	2.5 min	4.5 min
	5.50 horas	6.80 horas	0.10 horas	23 min	0.7 horas	2.6 min	5.0 min
	5.80 horas	6.00 horas	0.15 horas	20 min	0.8 horas	2.3 min	4.6 min
	5.20 horas	7.50 horas	0.20 horas	19 min	1.1 horas	2.7 min	5.5 min
	5.00 horas	7.00 horas	0.15 horas	27 min	0.7 horas	2.2 min	5.5 min
	4.50 horas	6.25 horas	0.10 horas	19 min	0.9 horas	2.6 min	4.5 min
5.00 horas	6.25 horas	0.10 horas	21 min	0.6 horas	2.0 min	4.0 min	
Total Necesario	790 m2	790 m2	222 ductos	44 piezas	198 m3	222 ductos	222 ductos

Tabla 6. Duraciones Obtenidas.

4.3 ELABORACIÓN MODELO DIGITAL.

Con el fin de simular el proceso constructivo de la losa postensada, se elaboró un modelo de simulación digital de dicho proceso, en el cual se involucran los procesos, los recursos (mano de obra) y las entidades correspondientes (cualquier tipo de material que dependa de un recurso para su uso y disposición). La creación de dicho modelo se compone de varias etapas, para lograr un análisis adecuado.

4.3.1 AJUSTES PROBABILÍSTICOS DE DATOS.

A los procesos que componen el modelo digital, les corresponden duraciones provenientes de la tabla presentada anteriormente. Debido a que los procesos no siempre tardan el mismo tiempo exacto en llevarse a cabo, a estas duraciones se les asigna la distribución de probabilidad que más se adapte a cada subconjunto de datos.

Estos ajustes probabilísticos se hacen mediante la implementación de la herramienta Input Analyzer del software Arena, la cual lee documentos de texto correspondientes a un conjunto de datos numéricos, para así otorgar la distribución adecuada. Para llevar a cabo este procedimiento, se crearon documentos de texto en Bloc de Notas para posteriormente importarlos al Input Analyzer.

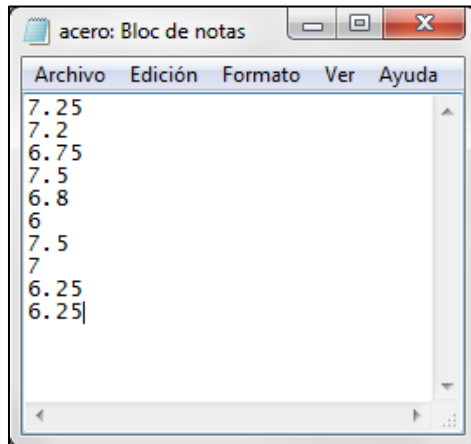


Figura 26. Documento de Texto en Bloc de Notas.

Una vez creados los documentos de texto, se importan al Input Analyzer y este entrega los resultados probabilísticos, incluida la distribución que mejor se adapte al conjunto.

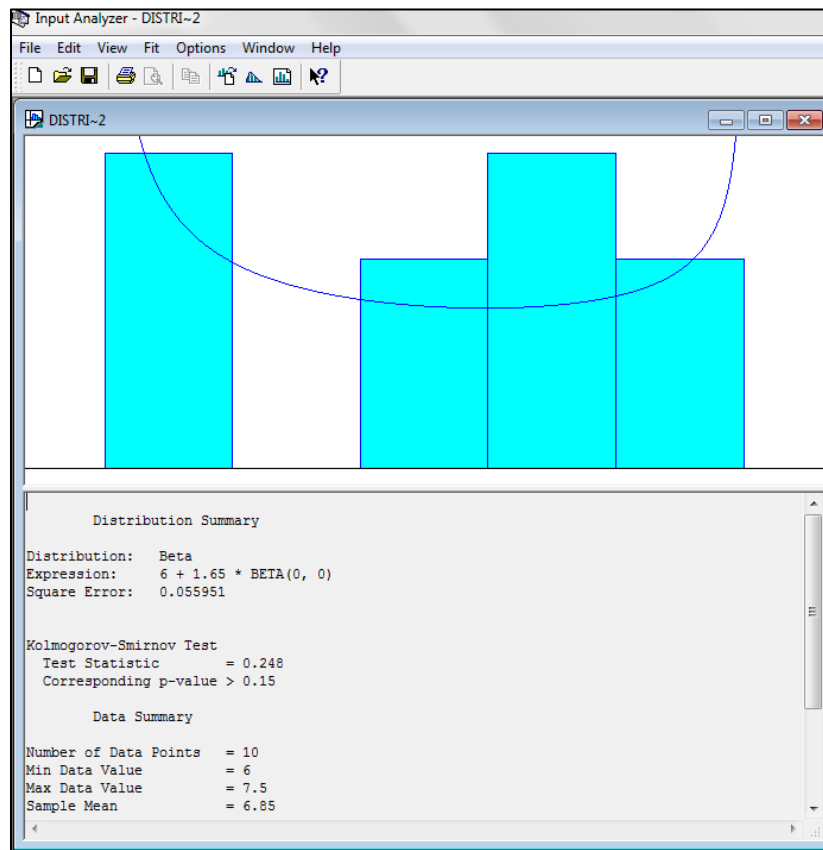


Figura 27. Resultados Obtenidos con el Input Analyzer.

Como se puede observar en la figura, el Input Analyzer otorga el tipo de distribución de probabilidad a la cual mejor se adaptan los datos, y la expresión correspondiente. Dicha distribución es determinada por el software luego de ajustar los datos a todas las distribuciones disponibles en este. La expresión de la distribución obtenida para cada conjunto de datos es la que finalmente define la duración de un proceso en el modelo de simulación digital. Las muestras de datos utilizadas se componen de diez puntos, y otorgaron resultados aceptables para la posterior creación del modelo de simulación.

4.3.2 CREACIÓN DEL MODELO ORIGINAL.

Una vez obtenidas las expresiones probabilísticas correspondientes a cada actividad, se puede iniciar la creación del modelo original. En este modelo se pretende simular el proceso constructivo manteniendo el orden y secuencia de las actividades tal y como se hicieron en obra. La modelación se hace a través del software Arena 14, en el cual se permiten definir cuadrillas, entidades y procesos; vinculados unos a otros según sea necesario.

En síntesis, la información de entrada al modelo estaba compuesta por distribuciones probabilísticas de duraciones obtenidas, fecha de inicio de las actividades, flujo de actividades identificado y la disposición del personal de obra.

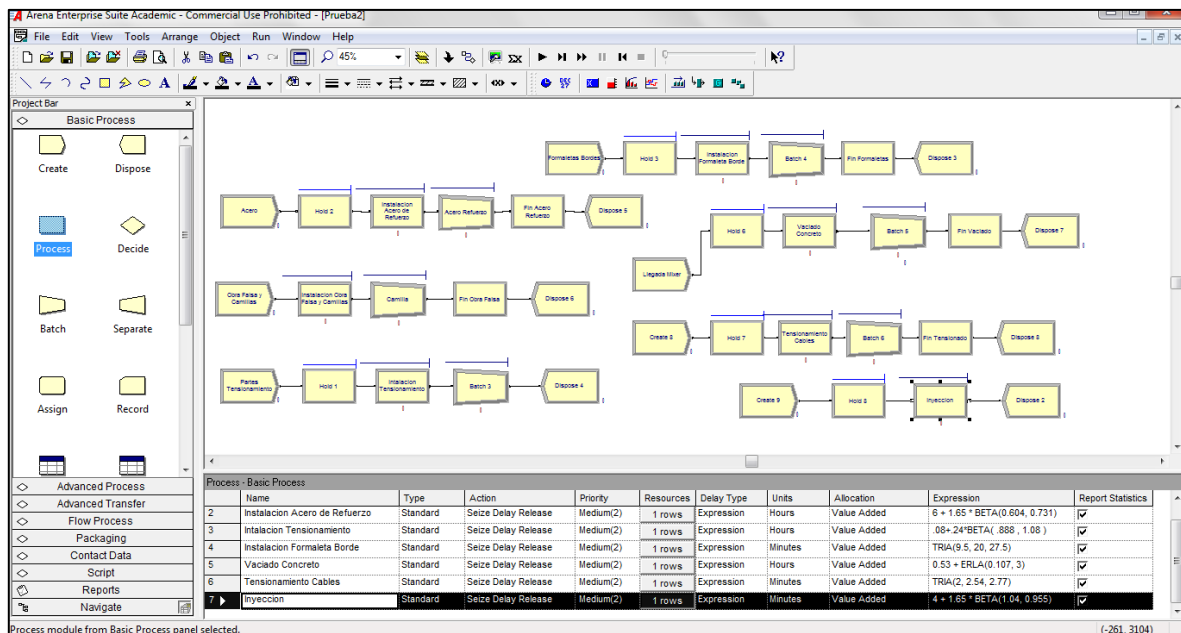


Figura 28. Interfaz del software Arena 14.

Una de las partes más importantes es la creación de los procesos involucrados en el modelo. En cada proceso se ven involucrados tanto los recursos como las entidades, es decir, que una entidad entra a un proceso llevado a cabo por cierto recurso, con una duración obtenida a partir de la expresión de distribución de probabilidad resultante para cada proceso.

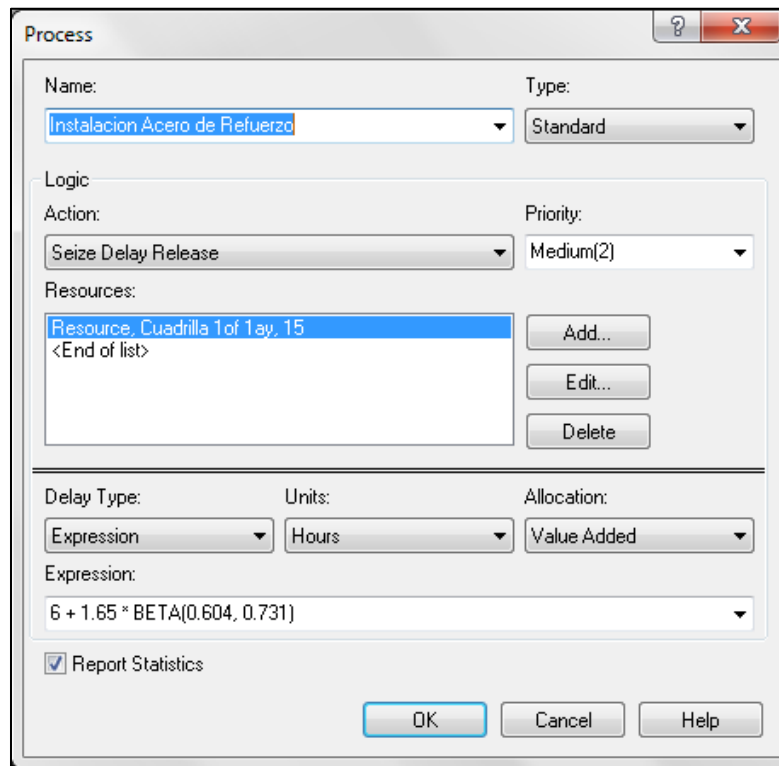


Figura 29. Creación de un Proceso en Arena 14.

En la figura anterior, se puede observar que para la creación de un proceso es indispensable definir los recursos necesarios para ejecutar el proceso, y la expresión probabilística que determina la duración de este. Las entidades que son intervenidas en el proceso se crean en un módulo aparte, que es conectado o vinculado al proceso.

Para adaptar los horarios del modelo a los horarios reales de trabajo, Arena permite definir estos horarios de manera muy sencilla. En este caso, se regularon los horarios de la mano de obra, asignando una capacidad nula en las horas que no se trabaja.

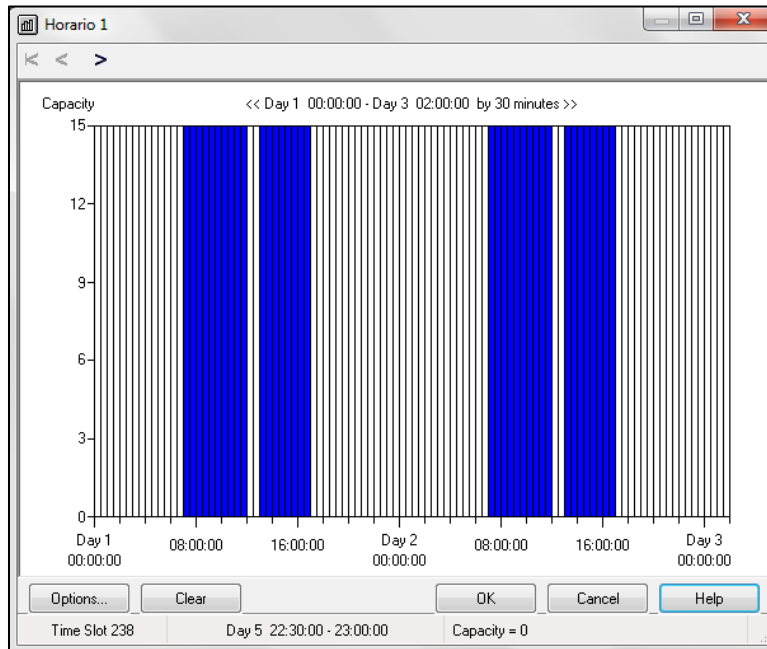


Figura 30. Creación de Horarios en Arena 14.

En la figura anterior se observa la interfaz para configurar horarios en Arena 14, en la cual las barras de color azul representan las horas de trabajo de algún recurso. Para crear un horario es importante tener en cuenta el día de inicio de todo el proceso analizado.

Una vez definidos los procesos, recursos, entidades y horarios; se procede a conectar las actividades según el flujo de trabajo identificado. Arena permite detener el flujo de entidades hasta cierto aviso o señal definida por el usuario, lo cual permite evitar que se inicien algunas actividades hasta no finalizar actividades previas.

4.3.3 VALIDACIÓN DEL MODELO.

La validación del modelo consiste en la confirmación de que este es parecido a la realidad. Para esta investigación se utilizó el método de intervalos de confianza, a través del cual se obtiene la longitud media H de dicho intervalo, para una confiabilidad del $100(1-\alpha) \%$, esto mediante la expresión (1) (Banks, 2005):

$$H = t_{\frac{\alpha}{2}, R-1} \frac{S}{\sqrt{R}} \quad (1);$$



En la cual R corresponde al número de replicaciones, S corresponde a la desviación estándar de la muestra y t es el valor correspondiente al porcentaje de confianza establecido (que para este caso se tomó de 95%) en la distribución t-Student.

Para obtener el número de replicaciones necesarias para garantizar la confiabilidad deseada, se empieza por hacer un número de replicaciones inicial para así calcular una desviación estándar inicial.

Replicación N°	Duración Total (Días)
1	19.55
2	19.6
3	19.56
4	21.56
5	18.79
6	18.78
7	19.56
8	21.66
9	18.89
10	19.55
Promedio	19.750
Desviación Estándar	1.04
Longitud Media (Half Widht de Arena)	0.79

Tabla 7. Resultados replicaciones iniciales.

El número de replicaciones necesarias para garantizar una confiabilidad del 95%, se obtienen a partir de la siguiente desigualdad (2):

$$R \geq \left(\frac{t_{\alpha/2} S_0}{H} \right)^2 \quad (2).$$

Las iteraciones realizadas para cumplir con la desigualdad, son presentadas a continuación:



<i>R</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>
<i>t</i>_{0.025, R-1}	2.45	2.36	2.31	2.26
$\left(\frac{Z_{\alpha/2} S_0}{H}\right)^2$	10.37	9.62	9.22	8.82

Tabla 8. Iteraciones realizadas para calcular replicaciones necesarias.

A partir de la tabla, se puede decir que las replicaciones necesarias para garantizar una confiabilidad del 95% fueron 10, por lo cual es suficiente con la cantidad de replicaciones hechas inicialmente.

Posteriormente, se obtiene el intervalo de confianza, a través de la ecuación (3):

$$\mu \pm t_{\frac{\alpha}{2}, n-1} S / \sqrt{R} \quad (3);$$

En la cual μ corresponde al promedio de los datos con el número de corridas determinado.

El rango de resultados correspondiente al intervalo de confianza resultó entre 20,5 y 19 días. El resultado promedio de las replicaciones realizadas corresponde a 19,75 días, valor que se encuentra dentro del intervalo de confianza establecido.

4.3.4 EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS.

Una vez completado y validado el modelo que simula el proceso constructivo original, se crean nuevos modelos basados en el original, en los cuales se alteran los procedimientos para evaluar alternativas y obtener lecciones de mejora.

La evaluación de las alternativas de mejora se hará basada en la duración total del proceso para cada una de las alternativas, para así determinar si existe mejoría o no a partir de los cambios. Las alternativas se eligieron en base a lo observado a través de las fotografías del sistema automático de captura, las fotografías y videos obtenidos manualmente; y lo observado y consultado en las visitas de obra. En el capítulo de análisis de resultados, se muestran las alternativas evaluadas y los resultados con cada una de estas.



5 ANÁLISIS DE RESULTADOS.

5.1 INFORMACIÓN REGISTRADA.

Con la información obtenida previa a la creación del modelo de simulación digital, se identificaron detalles importantes sobre la disposición de los recursos, la secuencia y características de actividades; y la distribución del tiempo en obra.

5.1.1 DISPOSICIÓN DE LOS RECURSOS.

En cuanto a la disposición de los recursos de mano de obra en el proceso analizado, se encontró que:

- Los procesos con mayor demanda de personal fueron la colocación de la cimbra y las camillas de la losa; la colocación del acero de refuerzo y el vaciado del concreto.
- Los procesos con menor demanda de personal fueron la colocación de las formaletas de borde, el tensionamiento de los cables y la inyección de la lechada de adherencia.
- Los procesos correspondientes al tensionamiento de la losa (colocación acero de tensionamiento, tensionamiento de cables e inyección de lechada de adherencia) fueron ejecutados por personal independiente del contratado por el constructor de la obra, ya que estos procesos son subcontratados con una empresa especializada en concretos pre esforzados.
- El personal que ejecutó los procesos de colocación de cimbra y camillas; colocación de acero de refuerzo y vaciado del concreto; fue el mismo. Esto quiere decir que el recurso es liberado cada vez que se termina uno de estos procesos.
- El personal que ejecutó los procesos de tensionamiento de cables e inyección de lechada de adherencia, fue el mismo. Esto quiere decir que el recurso se liberó cada vez que se terminó uno de estos procesos, aunque esto no es un factor determinante en estos, ya que el principal factor para el inicio son los días necesarios para que el concreto alcance su resistencia y permita la ejecución de las actividades, según lo especificado por el ingeniero estructural.

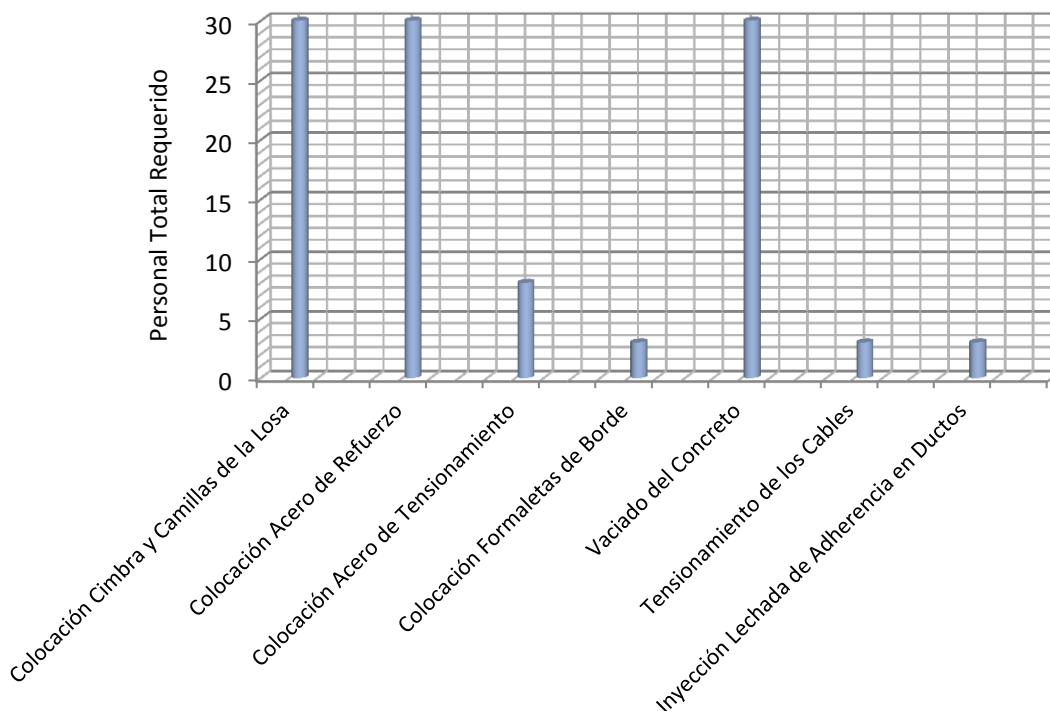


Figura 31. Cantidad de Personal Requerido por Actividad

5.1.2 SECUENCIA Y CARACTERÍSTICAS DE ACTIVIDADES.

En cuanto a la secuencia de las actividades analizadas, se encontró que:

- El proceso que más tardó en completarse fue la colocación del acero de refuerzo.
- El proceso que menos tardó en completarse fue el tensionamiento de los cables del postensado.
- La colocación del acero de refuerzo y del acero de tensionamiento no se inició hasta que no se terminó por completo la colocación de la cimbra y las camillas de la losa.
- La colocación de las formaletas de borde no se inició hasta que se completó la instalación del acero de refuerzo. Además, los agujeros necesarios para la colocación de esta (producto de la presencia de los cables del tensionamiento) se iban haciendo a medida que se iba colocando la formaleta.

- El proceso de tensionamiento de los cables se realizó de la siguiente manera: Se hacía la limpieza necesaria de un cable para garantizar la adecuada adherencia a las mordazas del gato hidráulico y posteriormente se tensionaba dicho cable. Este proceso se repitió para el número total de cables.
- Los procesos de colocación del acero de refuerzo y colocación de acero de tensionamiento se realizaron de manera paralela una vez terminada la colocación de la cimbra y camillas de la losa.
- La ruta crítica del proceso se compone de los siguientes procesos en orden respectivo: Colocación de cimbra y camillas de la losa, colocación de acero de refuerzo, colocación de formaletas de borde, vaciado del concreto, tensionamiento de los cables e inyección de lechada de adherencia.



Figura 32. Procesos que componen la ruta crítica.

5.1.3 DISTRIBUCIÓN DEL TIEMPO EN OBRA.

Durante la ejecución de los procesos analizados, se encontró que no todas las actividades agregan valor al producto final, es decir; que no todas las actividades son productivas sino que también aparecen actividades contributivas y no contributivas. Las actividades no contributivas son las que finalmente se consideran pérdidas (Botero y Álvarez, 2003).



A continuación se clasifican las actividades en actividades productivas, contributivas y no contributivas:

- **Actividades Productivas:**

1. Colocación de los parales.
2. Colocación de diagonales.
3. Colocación de viguetas metálicas.
4. Colocación de camillas de la losa.
5. Amarre de acero de refuerzo.
6. Colocación ductos de tensionamiento.
7. Colocación de cables de tensionamiento dentro de ductos.
8. Perforación de formaletas de borde.
9. Colocación de formaletas de borde.
10. Retiro de la formaleta.
11. Limpieza de los cables para el tensionamiento.
12. Colocación de cuñas.
13. Colocación de anclajes.
14. Tensionamiento de los cables.
15. Inyección lechada de adherencia.

- **Actividades Contributivas:**

1. Transporte de parales.
2. Transporte de viguetas metálicas.
3. Transporte de camillas.
4. Transporte del acero a un lugar cercano a su colocación.
5. Corte del acero.
6. Corte del alambre de amarre.
7. Colocación de dados de recubrimiento.
8. Verificación de posición del acero.
9. Verificación de posición y catenarias de ductos y cables de tensionamiento.
10. Transporte del concreto a la obra.
11. Vibración del concreto.
12. Curado del concreto.
13. Transporte del gato hidráulico.
14. Medición de los esfuerzos en los cables de tensionamiento a través de manómetros o por medio de la elongación del cable.

- **Actividades No Contributivas:**

1. Espera por transporte de parales, viguetas o camillas.

2. Espera por el transporte del acero.
3. Espera mientras llega el concreto.
4. Suspensión de actividades por malas condiciones climáticas.
5. Obreros hablando por celular.
6. Tiempo de ocio de obreros.
7. Tiempo de ocio y esperas producto de imprevistos.



Figura 33. Obreros a la espera de la llegada del concreto.

5.2 SIMULACIÓN DIGITAL.

Los resultados obtenidos a partir de la simulación digital, son principalmente correspondientes a duraciones totales del proyecto. A partir de esta información, fue posible evaluar alternativas alterando el flujo de actividades y la disposición de los recursos en obra para así identificar lecciones de mejora en la ejecución de este tipo de procesos.

5.2.1 MODELO ORIGINAL.

Como ya se mencionó anteriormente, el modelo original corresponde a la simulación de los procesos tales y como fueron ejecutados en vida real. De esta manera, se pudo obtener información que posteriormente fue comparada con los resultados de las alternativas.

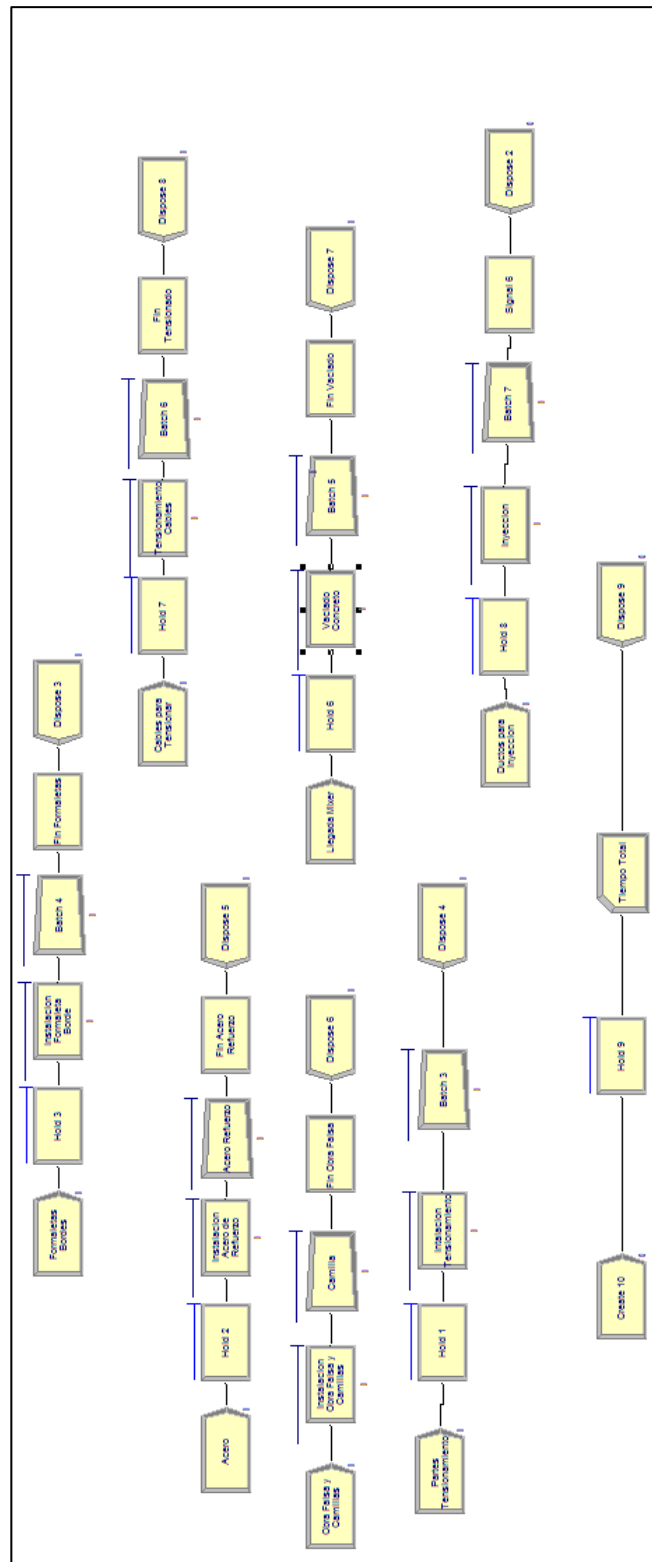


Figura 34. Modelo de Simulación Original en Arena 14.



A continuación se presentan los resultados obtenidos en cuanto a la duración total del proceso para el modelo original, tras diez replicaciones:

<i>Réplica N°</i>	<i>Duración Total (Días)</i>
1	19.55
2	19.60
3	19.56
4	21.56
5	18.79
6	18.78
7	19.56
8	21.66
9	18.89
10	19.55
<i>Promedio</i>	19.75
<i>Desviación Estándar</i>	1.04
<i>Varianza</i>	1.08

Tabla 9. Duraciones y valores estadísticos obtenidos para diez réplicas del modelo original.

Otro tipo de resultado obtenido a partir del modelo, es el número promedio de uso para cada cuadrilla en la duración total del modelo, que proviene de promediar la cantidad utilizada de una cuadrilla específica en diferentes etapas del proceso. Esta información se obtiene para todas las cuadrillas definidas en el modelo. Es importante tener en cuenta que en estos promedios se incluyen también las horas del día que no corresponden a jornadas de trabajo, ya que en el modelo se definió la duración de un día como 24 horas, por lo cual los valores promedio de uso de cuadrillas pueden parecer pequeños. Por otra parte, es necesario volver a mencionar que se cuentan con 15 cuadrillas del tipo 1 oficial + 1 ayudante; y que las actividades correspondientes a la colocación de la cimbra y camillas de la losa, la colocación del acero de refuerzo y el vaciado del concreto demandan las 15 cuadrillas, por lo cual el máximo uso de la cuadrilla de 1 oficial + 1 ayudante es 15. Además, se debe aclarar que las cuadrillas subcontratadas por el constructor solo están en la obra para las actividades que van a ejecutar en días determinados, y por esta razón dichas cuadrillas pueden presentar valores promedio de uso bajos. A continuación se presenta el número promedio de uso de cada cuadrilla para el modelo original:



Uso Promedio	
Cuadrilla	Modelo Original
1 oficial + 1 ayudante	4.414
Formaleta Bordes	0.029
Refuerzo Activo	0.088
Tensionamiento e Inyección	0.057

Tabla 10. Uso promedio de cuadrillas en el modelo original.

De lo observado en el modelo de simulación original, se puede afirmar que:

- La disposición de la mano de obra es ideal, ya que para una placa específica, las cuadrillas pertenecientes al constructor se encuentran en constante uso, exceptuando las actividades subcontratadas. Sin embargo, algunas de las actividades subcontratadas se llevan a cabo cuando ya se ha dado inicio a otras actividades correspondientes a una próxima placa, las cuales demandan la mano de obra que corresponde al constructor.
- En muchos casos, las entidades esperan a ser atendidas por los recursos a medida que estos cuenten con disponibilidad. Esto quiere decir que el aumento en la mano de obra, evidentemente agilizaría la ejecución de procesos como la colocación de la cimbra y camillas de la losa, la colocación del acero de refuerzo o la colocación del acero de tensionamiento.
- El principal factor determinante en la duración total del proceso, es la capacidad de las cuadrillas. Esto se evidencia en las cantidades de material agrupado a la espera de ser intervenido por recursos, como se observa en el modelo.
- Se observan actividades cuyo inicio es determinado por la disponibilidad de los recursos. Esto quiere decir que algunas actividades inician únicamente cuando cierta cuadrilla es liberada totalmente. La colocación del acero de refuerzo por ejemplo, no inicia hasta que no se termina por completo la colocación de la cimbra y camillas de la losa, esto se da por la disponibilidad de la mano de obra, pero con aumentos en esta se podría dar inicio a la colocación del acero de refuerzo sin necesidad de completar el área total de la losa en cimbrado y camillas.



5.2.2 ALTERNATIVA 1.

La primera alternativa evaluada consistió en permitir el inicio de la colocación del acero de refuerzo y de tensionamiento, una vez se haya completado tan solo el 20% del área total de la losa en cimbrado y camillas. Para esto, se estimó un aumento de personal contratado por el constructor para permitir el inicio de la colocación del acero de refuerzo sin haberse liberado la cuadrilla que ejecuta la colocación de cimbra y camillas, que en la realidad ejecutaba ambos procesos, uno tras otro.

A continuación se presentan los resultados obtenidos en cuanto a la duración total del proceso para esta primera alternativa, tras diez replicaciones:

<i>Réplica N°</i>	<i>Duración Total (Días)</i>
1	15.02
2	15.53
3	12.64
4	15.54
5	14.93
6	14.92
7	14.92
8	14.83
9	14.94
10	14.83
<i>Promedio</i>	14.81
<i>Desviación Estándar</i>	0.81
<i>Varianza</i>	0.65

Tabla 11. Duraciones y valores estadísticos obtenidos para diez réplicas de la alternativa 1.

Adicionalmente se presenta a continuación el número promedio de uso de cada cuadrilla para la alternativa 1:



Uso Promedio	
Cuadrilla	Alternativa 1
1 oficial + 1 ayudante	2.958
Cuadrilla Adicional	0.192
Formaleta Bordes	0.039
Refuerzo Activo	0.119
Tensionamiento e Inyección	0.076

Tabla 12. Uso promedio de cuadrillas en la alternativa 1.

De lo observado en el modelo de simulación para la primera alternativa, se puede afirmar que:

- La duración total promedio del proceso se reduce en 5 días aproximadamente.
- Con el aumento de mano de obra, se disminuye la cantidad de materiales agrupados a la espera por ser intervenidos.
- El aumento de personal es conveniente durante la ejecución de las primeras actividades como la colocación de la cimbra y camillas y colocación del acero de refuerzo. Esto se debe a que para vaciar el concreto de la placa no es determinante el aumento del personal contratado por el constructor, ya que lo que en realidad afecta la duración total del proceso críticamente, es el fraguado del concreto. El personal adicional podría desempeñar otras labores que no necesariamente correspondan a la construcción del núcleo central de la estructura. Esto queda evidenciado debido a que el uso promedio de la cuadrilla de 1 oficial + 1 ayudante, disminuye respecto al modelo original.
- El uso promedio de las demás cuadrillas disminuye. Esto se debe a que al agilizar las actividades iniciales del proceso, el tiempo de inactividad de estas cuadrillas disminuye.



5.2.3 ALTERNATIVA 2.

La segunda alternativa evaluada consistió en cambiar la actividad predecesora de la colocación de las formaletas de borde. Originalmente, se esperaba a que se terminara la colocación del acero de refuerzo para iniciar la colocación de las formaletas de borde, cuando lo que es verdaderamente determinante es la terminación de la colocación del acero de tensionamiento. Esto se debe a la necesidad de permitir el paso de los cables del tensionamiento a través de la formaleta, por medio de agujeros.

A continuación se presentan los resultados obtenidos en cuanto a la duración total del proceso para esta primera alternativa, tras diez replicaciones:

<i>Réplica N°</i>	<i>Duración Total (Días)</i>
1	17.13
2	19.56
3	17.01
4	21.55
5	18.87
6	16.81
7	19.56
8	16.85
9	16.93
10	17.04
<i>Promedio</i>	18.13
<i>Desviación Estándar</i>	1.65
<i>Varianza</i>	2.73

Tabla 13. Duraciones y valores estadísticos obtenidos para diez réplicas de la alternativa 2.

Adicionalmente se presenta a continuación el número promedio de uso de cada cuadrilla para la alternativa 2:



Uso Promedio	
Cuadrilla	Alternativa 2
1 oficial + 1 ayudante	4.823
Formaleta Bordes	0.032
Refuerzo Activo	0.097
Tensionamiento e Inyección	0.062

Tabla 14. Uso promedio de cuadrillas para la alternativa 2.

De lo observado en el modelo de simulación para la segunda alternativa, se puede afirmar que:

- La duración total promedio del proceso se reduce en 1,5 días aproximadamente.
- El cambio en el procedimiento, respecto al modelo original; permite disminuir la cantidad de material agrupado y además cambiar el tiempo de espera por tiempo dedicado a alistar la formaleta.
- El uso promedio de todas las cuadrillas aumenta respecto a los resultados del modelo original, debido a que la condición planteada en esta alternativa reduce el tiempo total del proceso y así los tiempos de inactividad de las cuadrillas.

5.2.4 ALTERNATIVA 3.

La tercera alternativa evaluada consistió en hacer los agujeros necesarios para las formaletas de borde con anticipación a la colocación de esta. Originalmente, los agujeros de estas formaletas, se hicieron justo antes de colocar cada pieza de la formaleta.

A continuación se presentan los resultados obtenidos en cuanto a la duración total del proceso para esta tercera alternativa, tras diez replicaciones:



Réplica N°	Duración Total (Días)
1	17.13
2	21.54
3	17.05
4	21.57
5	19.29
6	18.78
7	19.56
8	21.65
9	16.89
10	19.55
Promedio	19.30
Desviación Estándar	1.88
Varianza	3.52

Tabla 15. Duraciones y valores estadísticos obtenidos para diez réplicas de la alternativa 3.

Adicionalmente se presenta a continuación el número promedio de uso de cada cuadrilla para la alternativa 3:

Uso Promedio	
Cuadrilla	Alternativa 3
1 oficial + 1 ayudante	4.532
Formaleta Bordes	0.040
Refuerzo Activo	0.091
Tensionamiento e Inyección	0.059

Tabla 16. Uso promedio de cuadrillas para la alternativa 3.

De lo observado en el modelo de simulación para la tercera alternativa, se puede afirmar que:

- La duración total promedio del proceso se reduce en 0,5 días aproximadamente.



- El tiempo de colocación de una pieza de la formaleta, disminuye significativamente si se hacen los agujeros con anticipación. Sin embargo, la reducción en la duración total del proceso no es relativamente alta.
- El uso promedio de la cuadrilla encargada de la colocación de las formaletas de borde aumentó cerca del 36% respecto al uso de esta misma en el modelo original.
- El uso promedio de todas las cuadrillas aumenta respecto a los resultados del modelo original, debido a que la condición planteada en esta alternativa reduce el tiempo total del proceso y así los tiempos de inactividad de las cuadrillas.

5.2.5 ALTERNATIVA 4.

La cuarta alternativa evaluada consistió en modificar la secuencia del proceso de tensionamiento de los cables. Originalmente, se hacía la limpieza necesaria para un cable, seguida del tensionamiento de este mismo; mientras que en esta alternativa, se evaluó el procedimiento realizando la limpieza de todos los cables inicialmente, para luego si aplicar la tensión necesaria a cada uno de los cables.

A continuación se presentan los resultados obtenidos en cuanto a la duración total del proceso para esta cuarta alternativa, tras diez replicaciones:

<i>Réplica N°</i>	<i>Duración Total (Días)</i>
1	17.13
2	19.56
3	17.05
4	19.57
5	18.81
6	18.78
7	19.56
8	21.00
9	16.89
10	19.04
<i>Promedio</i>	18.74
<i>Desviación Estándar</i>	1.34
<i>Varianza</i>	1.79

Tabla 17. Duraciones y valores estadísticos obtenidos para diez réplicas de la alternativa 4.



Adicionalmente se presenta a continuación el número promedio de uso de cada cuadrilla para la alternativa 4:

Uso Promedio	
Cuadrilla	Alternativa 4
1 oficial + 1 ayudante	4.655
Formaleta Bordes	0.041
Refuerzo Activo	0.093
Tensionamiento e Inyección	0.052

Tabla 18. Uso promedio de cuadrillas para la alternativa 4.

De lo observado en el modelo de simulación para la cuarta alternativa, se puede afirmar que:

- La duración total promedio del proceso se reduce en 1 día aproximadamente.
- El hacer la limpieza previa de todos los cables, agiliza el proceso de tensionamiento de manera significativa. Esto se debe principalmente a la disminución interrupciones en la instalación y desinstalación del gato hidráulico para cada cable.
- El uso promedio de la cuadrilla encargada del tensionamiento de los cables e inyección de la lechada de adherencia respecto a los resultados del modelo original. Esto se debe a que el tensionamiento y la inyección son las últimas actividades de todo el proceso, y para esta alternativa el tensionamiento tarda menos por lo cual las horas de trabajo son menores para dicha cuadrilla.
- El uso promedio de las demás cuadrillas aumenta respecto a los resultados del modelo original, debido a que la condición planteada en esta alternativa reduce el tiempo total del proceso y así los tiempos de inactividad de las cuadrillas.



5.2.6 COMBINACIÓN DE ALTERNATIVAS.

Tras combinar todas las alternativas en un solo modelo, se obtuvieron los siguientes resultados en cuanto a la duración total del proceso, para diez replicaciones:

<i>Réplica N°</i>	<i>Duración Total (Días)</i>
1	11.58
2	11.72
3	11.54
4	11.58
5	11.51
6	10.98
7	11.59
8	11.53
9	11.24
10	10.93
<i>Promedio</i>	11.42
<i>Desviación Estándar</i>	0.27
<i>Varianza</i>	0.07

Tabla 19. Duraciones y valores estadísticos obtenidos para diez réplicas de la combinación de todas las alternativas.

Adicionalmente se presenta a continuación el número promedio de uso de cada cuadrilla para la combinación de alternativas:

<i>Uso Promedio</i>	
<i>Cuadrilla</i>	<i>Combinación de Alternativas</i>
<i>1 oficial + 1 ayudante</i>	3.819
<i>Cuadrilla Adicional</i>	0.249
<i>Formaleta Bordes</i>	0.094
<i>Refuerzo Activo</i>	0.154
<i>Tensionamiento e Inyección</i>	0.086

Tabla 20. Uso promedio de cuadrillas para la combinación de alternativas.



De lo observado en el modelo de simulación para la combinación de todas las alternativas, se puede afirmar que:

- La duración total promedio del proceso se redujo en 8,5 días aproximadamente.
- Algunas alternativas no representaron disminuciones muy amplias en cuanto a la duración total del proyecto, pero al combinar las alternativas ya es más evidente la reducción del tiempo empleado.
- La combinación de todas las alternativas es una buena manera de mejorar la disposición de los recursos en obra y de disminuir el tiempo de ocio o espera que padecen algunos de estos.
- En este escenario, todas las cuadrillas presentan mayores valores de uso promedio en comparación con las demás alternativas. Esto demuestra que agilizar ciertas actividades disminuye el tiempo de inactividad de la mano de obra.

5.2.7 ANÁLISIS COMPARATIVO.

Al comparar los resultados de todas las alternativas y de la combinación de estas, se obtuvieron los siguientes resultados:

Alternativa	Modelo Original	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Combinación
Promedio de Duración Total (Días)	19.75	14.81	18.13	19.30	18.74	11.42
Días de Diferencia Respecto al Modelo Original	0	4.94	1.62	0.45	1.01	8.33

Tabla 21. Comparación de resultados entre alternativas.

En la tabla anterior, se observan los parámetros más importantes para llevar a cabo la comparación de las alternativas. En la segunda fila de esta se observan las diferencias de duraciones entre cada alternativa y el modelo original, lo cual es de gran utilidad para evaluar el



impacto de cada alternativa en el proceso. Un factor determinante en el impacto de las alternativas es el tiempo que tardan en completarse originalmente las actividades modificadas por cada alternativa. Es decir que se hará más evidente el impacto causado por una alternativa en la cual se modificó una actividad que tardó originalmente una semana en completarse, que el impacto causado por una alternativa en la que se modificó una actividad que tan solo tardó originalmente un día en completarse.

En el gráfico presentado a continuación, se ilustra de mejor manera la duración total promedio de cada alternativa en compañía de la duración total promedio del modelo original, para facilitar la comparación entre estas:

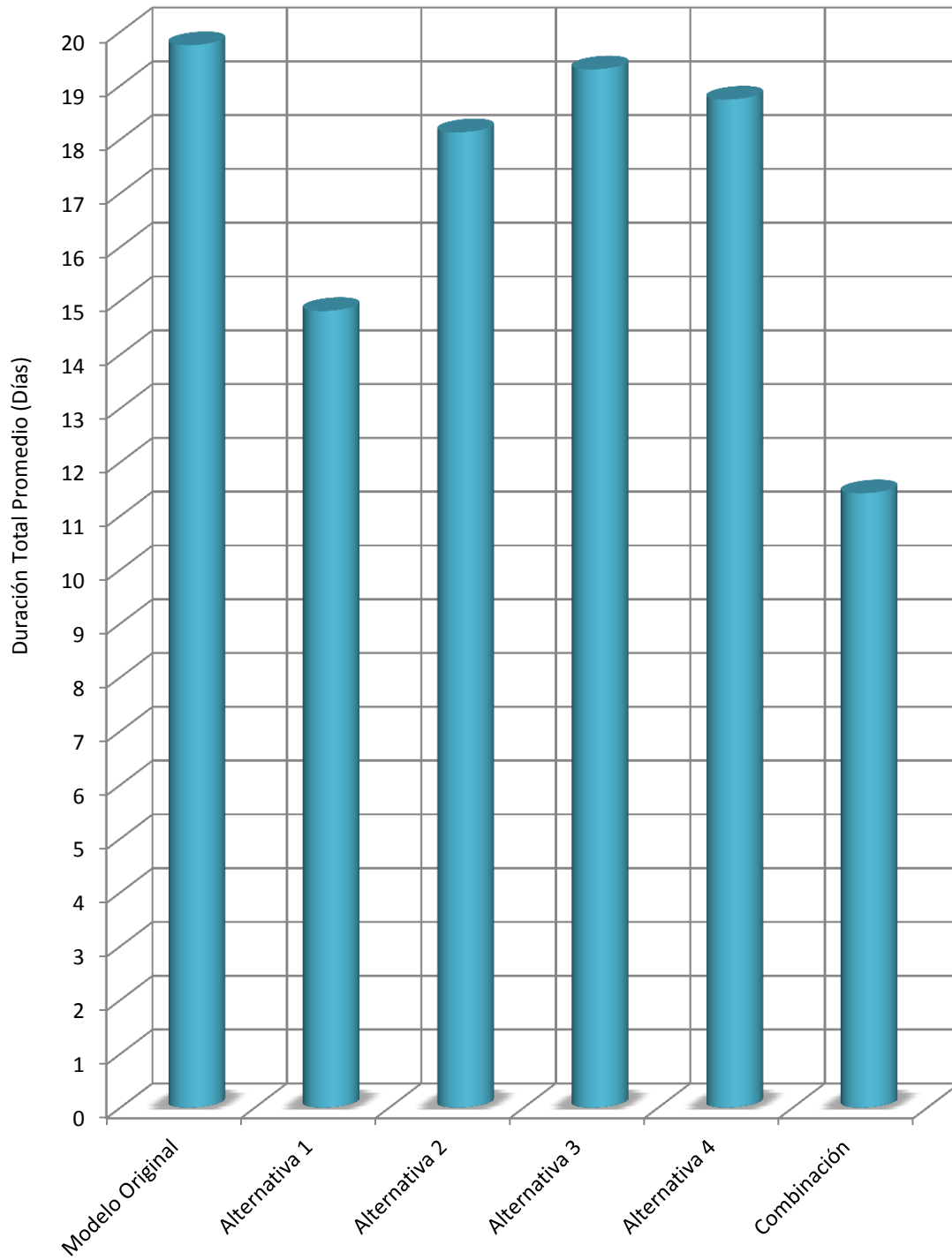


Figura 35. Duración total promedio por alternativa.

Adicionalmente, se presenta un gráfico en el cual se compara la diferencia en días respecto al modelo original, para cada alternativa:

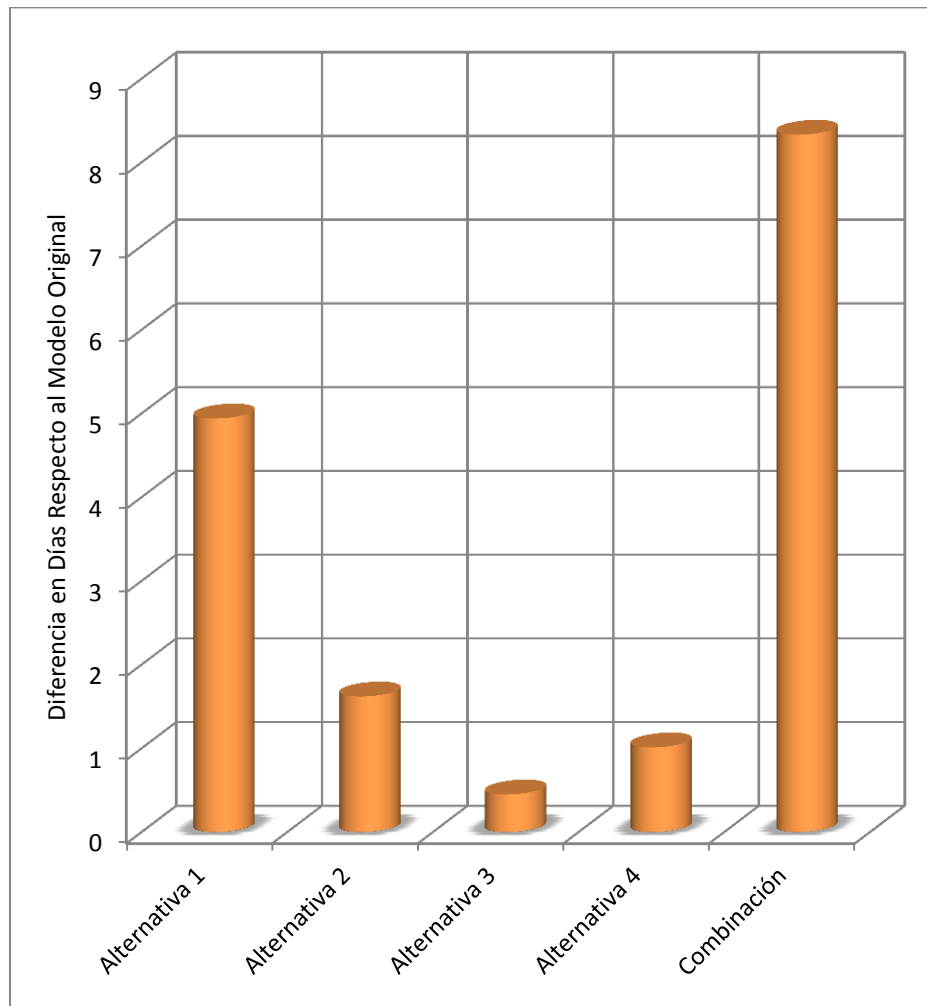


Figura 36. Diferencia de duración en días respecto al modelo original por alternativa.

A partir de la comparación entre todas las alternativas se puede afirmar que:

- La alternativa más influyente en la duración total promedio del proceso analizado es la alternativa 1. Esto se debe a que las actividades intervenidas en esta alternativa demandan mayor tiempo de ejecución, por lo cual una alteración en estas cambia significativamente la duración total del proyecto.
- La alternativa menos influyente en la duración total promedio del proceso analizado es la alternativa 3. A pesar de que el tiempo ahorrado por cada pieza que compone la formaleta



es considerablemente importante, a mayor escala pasa a ser menos influyente debido a que la colocación de la formaleta completa demanda poco tiempo en relación a otras actividades.

- La alternativa 1 presenta una reducción cercana al 25% en el tiempo total de ejecución del proceso.
- La alternativa 2 presenta una reducción cercana al 8% en el tiempo total de ejecución del proceso.
- La alternativa 3 presenta una reducción cercana al 2,5% en el tiempo total de ejecución del proceso.
- La alternativa 4 presenta una reducción cercana al 5% en el tiempo total de ejecución del proceso.
- La combinación de todas las alternativas presenta una reducción cercana al 42% en el tiempo total de ejecución del proceso.
- El tiempo reducido a través de la combinación de las alternativas es cercano a la sumatoria de los tiempos reducidos para cada una de las cuatro alternativas.



6 CONCLUSIONES.

- La simulación digital es una herramienta sumamente práctica para gestionar el conocimiento adquirido con la experiencia en proyectos de construcción y poder implementar lecciones aprendidas en tiempos futuros. A través de la esta se pueden evaluar cualquier tipo de procesos constructivos e identificar cuáles son los factores principales que afectan la productividad en construcción.
- Los resultados arrojados por el modelo de simulación digital en Arena 14 estuvieron muy cercanos a la realidad, difiriendo de la duración real obtenida en menos de 1,5 días. Esto comprobó además que la calidad de un modelo de simulación está determinada por los datos de entrada, que en este caso fueron conjuntos de datos de mediciones reales, vinculados al modelo por medio de distribuciones de probabilidad.
- Las distribuciones de probabilidad son una manera adecuada de simular la duración de una actividad en construcción. Los tiempos registrados con el modelo de simulación difieren mínimamente de los tiempos reales.
- El sistema electrónico de captura automática de fotografías es una herramienta que permite hacer un seguimiento constante a la obra. De esta manera se tiene un panorama general de lo que sucede en esta, sin la necesidad de permanecer tiempo completo.
- Las visitas de obra y las consultas con personal de esta misma son indispensables para validar la información obtenida a través del sistema automático de captura de fotografías. En muchas ocasiones se presentan puntos de la obra difíciles de capturar o actividades que no se logran identificar con claridad a través de las fotografías. Así mismo es indispensable la caracterización de los procesos constructivos que componen los modelos de simulación. Dentro de estos es importante conocer el flujo real de las actividades ejecutadas y la disposición de la mano de obra. Si se tiene información errónea sobre la mano de obra, el modelo de simulación digital puede resultar impreciso ya que la disponibilidad de los recursos se verá alterada por la falsa información.
- La simulación digital es una manera económica de evaluar alternativas a los procesos constructivos realizados normalmente. Realizar cambios a los modelos que simulan la realidad es muy simple y permite estimar duraciones de nuevos procesos, mientras que experimentar en campo podría resultar muy riesgoso.
- El software Arena 14 representa de manera impecable aspectos como la secuencia de actividades, la duración de estas y las esperas generadas en los procesos constructivos, lo



cual resulta en recomendaciones sumamente útiles para proyectos que cuenten con procesos de similares características a los analizados.

- En el proyecto de construcción analizado, el factor con mayor incidencia en la duración total de este es la capacidad y disposición de la mano de obra. En la mayoría de los procesos no se presentaron problemas por llegada de material a la obra, exceptuando el vaciado del concreto en el cual se desperdició algo de tiempo esperando por la llegada del concreto a obra.
- La supervisión en obra puede resultar muy útil para garantizar los rendimientos deseados. Constantemente se ve en los obreros comportamientos ociosos y acciones que podrían ser evitadas si se contase con mayor cantidad de supervisores. Estos comportamientos terminan afectando de manera directa la economía del proyecto.
- Las alternativas de evaluación más impactantes, son aquellas en las cuales se alteran actividades con duraciones largas en relación a la duración total del proceso. Es decir, que no es lo mismo alterar una actividad que tardó originalmente una semana en completarse, que alterar una que tardó originalmente un día en completarse; ya que las variaciones en los tiempos de la primera pueden resultar más extensas y por esto más incidentes en la duración total del proceso.
- La colocación del acero de refuerzo en la losa, es una actividad que demanda mucho tiempo en relación a otras actividades del proceso (7 días aproximadamente). Por esto, el inicio de esta actividad sin haber completado el total del área de la losa puede colaborar a cumplir con los plazos establecidos.
- El aumento del recurso humano, en este caso obreros; es indispensable para garantizar la reducción de tiempos de ejecución. Una de las razones por la cual la colocación del acero de refuerzo inicia al completarse todo el cimbrado e instalación de camillas, es porque la mano de obra que ejecuta ambas actividades es la misma. Esto significa que dicho recurso solo está disponible para la colocación del acero cuando ya ha terminado la actividad previa.
- La colocación del acero y los ductos del tensionamiento, no es una actividad que haga parte de la ruta crítica de la creación de una losa en concreto postensado. Esta colocación se hace en simultáneo con la colocación del acero de refuerzo, y se termina con una anterioridad considerable.
- El tipo de formaleta utilizada para losas postensadas no es igual a la formaleta de una placa normal, debido a la necesidad de perforar la formaleta para permitir el paso de los cables. Esto resulta en un proceso más retardado, por lo cual es recomendable preparar la



formaleta con anticipación, para que la perforación de esta no demore drásticamente dicho proceso. La colocación de esta formaleta depende en exclusiva de la finalización de la colocación de los cables de acero y ductos del tensionamiento, por lo cual se puede iniciar posterior a esto y no necesariamente posterior a la colocación del acero de refuerzo. Instalar la formaleta al finalizar la colocación del tensionamiento aumenta la holgura de dicho proceso.

- La limpieza previa al tensionamiento de todos los cables, resulta en una reducción del tiempo empleado en dicho proceso de 3 horas aproximadamente.
- Para analizar los tiempos de uso de los recursos, arrojados por el modelo de simulación digital en Arena 14, es importante tener en cuenta los calendarios definidos y la duración de un día en el modelo; es decir, tener en cuenta si para un día solo se consideran las horas de trabajo o las 24 horas que componen un día normal.
- Los tiempos de uso promedio de cada recurso, tienden a aumentar si la duración total del proceso disminuye. Esto quiere decir que mejorar cierta actividad, incide positivamente de manera indirecta en otras actividades.
- Analizando los tiempos de uso de los recursos, se pueden plantear opciones de mejora de la distribución del personal en obra. Dichos tiempos de uso son útiles para comprender que tanto está siendo utilizada la mano de obra, y si es posible vincular dicha mano de obra con otras actividades mientras esta se encuentre inactiva.



7 RECOMENDACIONES.

- El sistema electrónico de captura automática de fotografías podría ser implementado por constructores e interventores para realizar monitoreo de una manera más cómoda a la obra. En casos de ausencia de los dirigentes de obra por ejemplo, este sistema sería de gran ayuda para no perder detalle de lo sucedido.
- Las grandes empresas de construcción como la encargada de ejecutar el proyecto analizado, deben empezar a implementar la simulación digital para lograr optimizar tiempos y costos en sus obras.
- A los obreros se les deben asignar labores secundarias para así lograr disminuir la presencia de actividades no contributivas en construcción. Estas actividades no contributivas se generan principalmente cuando algún obrero está a la espera de que se complete algún trabajo llevado a cabo por un colega o cuando se producen esperas por transporte de material bien sea dentro de la obra o hacia esta.
- Para evitar retrasos en algunas actividades es fundamental agrupar los materiales necesarios en lugares cercanos a su ejecución. Los múltiples recorridos en busca de material son contraproducentes. Esto se puede mitigar empezando por ubicar grandes cantidades de material a ser usado en lugares cercanos a su ejecución, para posteriormente si iniciar con los procesos que involucren dichos materiales.
- Es importante plantear alternativas a los procesos originales de construcción, ya que es posible encontrar grandes ventajas y reducciones significativas en duraciones totales; tal y como se hizo en esta investigación.



8 BIBLIOGRAFÍA.

Ballesteros, L.F., 1998. *Estudios de productividad basados en tecnologías de diagnóstico y simulación digital*. Universidad de los Andes.

Banco Interamericano de Desarrollo, 2010. *La era de la Productividad. Como transformar las economías desde sus cimientos*. Carmen Pagés, Washington D.C, Estados Unidos.

Banks, J., 1998. *Handbook of Simulation: Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice*. John Wiley & Sons, New York, NY, USA.

Banks, J., 1999. *Introduction to simulation, in: Proceedings of the 31st Conference on Winter Simulation: Simulation—a Bridge to the Future - Volume 1, WSC '99. Presented at the Winter Simulation Conference, ACM, New York, NY, USA, pp. 7–13.*

Banks, J., 2005. *Discrete-event system simulation*. Pearson Prentice Hall.

Botero, L.F., 2006. *Construcción sin pérdidas: análisis de procesos y filosofía Lean Construction*, 2a ed. ed. Legis, Bogotá.

Botero, L.F., Álvarez, M.E., 2003. *Identificación de Pérdidas en el Proceso Productivo de la Construcción*. Rev. Univ. Eafit 130.

Camacol, Consejo Privado de Competitividad, 2008. *Competitividad de la actividad constructora de edificaciones: diagnóstico y recomendaciones de política*.

Canavos, G., 1998. *Probabilidad y Estadística.*, 2da ed. Mc Graw Hill, México.

Céspedes, J.D., 2010. *Mejoramiento de la Productividad en Construcción: Time-Lapse y Simulación Digital como herramientas de Análisis*. Universidad de los Andes.

Chang, W.-H., Lu, M., 2008. *Materials Handling System Simulation in Precast Viaduct Construction: Modeling, Analysis, and Implementation*. J. Constr. Eng. Manag.-Asce - J CONSTR ENG MANAGE-ASCE 134.

Civit, R.A., Sieber, S., 1999. *La gestión integral del conocimiento y del aprendizaje*. Econ. Ind. 63–72.



- CNI Ingenieros Ltda, 2011. *Edificio Facultad de Artes Pontificia Universidad Javeriana. Especificaciones Técnicas y Estructurales.*
- Córdoba, J.E., Delgado, M.Y., 2005. *Simulación Digital de Procesos Constructivos. Universidad de los Andes.*
- Echeverry, D., Páez, H., Mesa, H., 2008. *Simulación digital de procesos de construcción de estructura en concreto: casos de estudio práctico en Bogotá. Rev. Ing. Constr. 23, 13.*
- Echeverry, J.D., Giraldo, M.X., 2012. *Mejoramiento de Procesos Constructivos de una Edificación a Partir de Simulación Digital y Videos Time Lapse. Pontificia Universidad Javeriana.*
- Frazier, P.I., Xie, J., Chick, S.E., 2011. *Value of Information Methods for Pairwise Sampling with Correlations. Presented at the Winter Simulation Conference.*
- Gómez, A., 2010. *Simulación de Procesos Constructivos. Rev. Ing. Constr. 25, 121–141.*
- Gómez, A., Echeverry, J.D., Giraldo Palma, M.X., Otálora Sanchez, C., Cano Morales, M.L., 2012. *Mejoramiento de Procesos Constructivos a partir de un Módulo Programable para captura de imágenes y Simulación Digital. Rev. Ing. Constr. 27, 35–53.*
- Kelton, D., Sadowski, R., Sturrock, D., 2008. *Simulación con software Arena, 4ta ed. Mc Graw Hill, México.*
- Koskela, L., 1992. *Application of the New Production Philosophy to Construction. Stanford University.*
- LA ROTTA Arquitectos [WWW Document], 2013. URL <http://la-rotta.com/> (accessed 11.18.13).
- Lean Construction Institute, 2012. *What is Lean Construction [WWW Document]. Lean Constr. Inst. URL <http://www.leanconstruction.org/whatis.htm> Accedido en 2012/09/27 (accessed 9.26.12).*
- Lu, M., 2003. *Simplified Discrete-Event Simulation Approach for Construction Simulation. J. Constr. Eng. Manag.-Asce - J CONSTR ENG MANAGE-ASCE 129.*
- Martínez, J.C., 1996. *STROBOSCOPE. State and Resource Based Simulation of Construction Processes. University of Michigan.*



Muñoz, E., 2013. *Concreto Pre esforzado*.

Navarro, L., 2001. *Simulación Digital de Procesos Constructivos*. Universidad de los Andes.

Páez, H., 2013. *Lean Construction, Lean Construction Enterprise*. [WWW Document]. *Lean Constr. Enterp.* URL <http://www.leanconstructionenterprise.com/documentacion/lean-construction> (accessed 10.29.13).

Parra, N., 2011. *Proyecto Estructural Facultad de Artes Pontificia Universidad Javeriana*. Postensado Nivel 3.

Sacks, R., Esquenazi, A., 2007. *LEAPCON: Simulation of Lean Construction of High-Rise Apartment Buildings*. *J. Constr. Eng. Manag.-Asce - J CONSTR ENG MANAGE-ASCE* 133.

Sadowski, D., Grabau, M., 2010. *Arena Course Manual*. Rockwell Automation.

Sosa, J.A., Baeza, J.R., Arcudia, C., 2010. *Modelos para la simulación computarizada del proceso constructivo de la loza prefabricada L-18*. *Ing. Univ.* 11.

Walpole, R.E., Myers, R.H., Myers, S.L., Ye, K., 2007. *Probabilidad y Estadística paraa ingeniería y ciencias*, 8va ed. Pearson Educación, México.



ANEXOS.

- **Distribuciones de probabilidad resultantes en Input Analyzer.**
- **Modelo Original en Arena 14**
- **Carta de Autorización**
- **Descripción del Trabajo de Grado**