

Simulación de eventos discretos y líneas de balance, aplicadas al mejoramiento del proceso constructivo de la cimentación de un edificio

Adriana Gómez Cabrera¹, Natalia Quintana Pulido² y Jorge Orlando Ávila Díaz³

Recepción: 22-07-2014 | Aceptación: 04-11-2014 | En línea: 30-01-2015

MSC: 93C65

doi:10.17230/ingciencia.11.21.8

Resumen

El objeto de este trabajo fue establecer propuestas de mejoramiento al proceso de planeación de tiempos y costos en la etapa de cimentación de un edificio, a partir de la integración de herramientas como simulación de eventos discretos, programación con líneas de balance y metodologías Building Information Modeling - BIM. A partir de mediciones en campo se levantó información para la elaboración de un modelo de simulación de eventos discretos que imitara el proceso constructivo real. Se propusieron y modelaron alternativas de mejora, a partir de los principios de la filosofía Lean Construction y la programación de líneas de balance encontrando reducciones en tiempo y costo. También se realizó la animación virtual de las alternativas a partir de metodologías BIM. Se concluye que la integración de las herramientas utilizadas es de gran utilidad en la planeación y toma de decisiones en un proyecto civil.

Palabras clave: simulación de procesos constructivos; flujos de trabajo; línea de balance; BIM; lean construction

¹ Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia, adrianagomez@javeriana.edu.co.

² Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia, maribel.quintana@javeriana.edu.co.

³ Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia, avila-jorge@javeriana.edu.co.

Discrete Event Simulation and Line of Balance Diagram, Applied to the Improvement of the Foundation Construction Process

Abstract

The objective of this study is to propose a new method to enhance the time- and cost-planning process for the construction of building foundations via integration of discrete-event simulation, line-of-balance diagram, and Building Information Modeling (BIM) tools. In order to calibrate a discrete-event simulation model, field measurements of workflow, resource consumption, activity duration, and restrictions were obtained from real construction projects. Based on Lean Construction methods and line-of-balance diagrams, which allow reduction in time and cost, a number of planning alternatives were proposed. In addition, virtual animation of such alternatives was performed through BIM methodologies. It is concluded that planning tool integration is a robust technique for planning and decision-making in civil engineering projects.

Key words: simulation of construction processes; workflows; line of balance diagram; BIM; lean construction.

1 Introducción

En Colombia, muchas construcciones se realizan con una deficiente planeación, que en la mayoría de los casos ocasiona sobrecostos y retrasos en la programación; para disminuir estos inconvenientes se han estudiado metodologías enfocadas a mejorar los procesos de planeación y seguimiento de una manera efectiva, que ofrezcan herramientas que hagan más sencilla la toma de decisiones, mitiguen riesgos, disminuyan tiempos de ejecución y reduzcan costos.

En la búsqueda de mejorar la productividad en la construcción, se propuso la filosofía Lean Construction [1], que se fundamenta en dar prioridad a las actividades que agregan valor al producto sobre las que no. Para la implementación de esta, se han utilizado diferentes herramientas y técnicas. Un proceso “Lean” es aquel que no tienen desperdicios, por esta razón es imprescindible identificar estos desperdicios en cada uno de los procesos, con el fin de eliminarlos por completo evitando que vuelvan a aparecer[2]. Entre los procesos constructivos que hacen parte del desarrollo de un proyecto se pueden identificar actividades productivas, que agregan valor a la

actividad, actividades contributivas, que aportan un soporte a las actividades productivas, y las actividades no contributivas que se consideran como pérdidas en el proyecto [3].

La simulación de eventos discretos (SED permite desarrollar y experimentar modelos digitales desarrollados en computador de sistemas complejos, con el fin de entender su comportamiento. Esta rama de la investigación de operaciones ha experimentado un crecimiento importante en el área de construcción y en muchos casos integrada con la filosofía Lean Construction [4]. La simulación se puede emplear para dar solución a problemas reales, describiendo y analizando comportamientos de lo que denota en el comportamiento del sistema, estableciendo incógnitas y logrando responder a estas, para establecer criterios para diseñar procesos reales [5].

Aunque las investigaciones sobre simulación en la industria de la construcción están avanzando académicamente, su aplicación en el sector aún es limitada debido a que se sigue trabajando con las técnicas tradicionales que a menudo son insuficientes. Algunas de las herramientas que se han utilizado son CYCLONE (1977), INSIGHT (1987), RESQUE (1987), UMCYCLONE (1989), Micro-CYCLONE (1990), STROBOSCOPE (1994), ABC (1999), HK CONSIM (2003) [4].

Investigaciones académicas han relacionado Lean Construction con SED, con el objetivo de crear escenarios inspirados en la filosofía, que permitan realizar análisis del tipo ¿Qué pasa si?, [6]. También se ha simulado la construcción de proyectos expuestos a frecuentes cambios en diseño, encontrando que se pueden analizar varios escenarios con el fin de seleccionar el más apropiado para llegar a una planeación eficiente [7]. Otros autores simularon la construcción de procesos constructivos de edificación para optimizar el desarrollo de la obra; se realizaron comparaciones entre la planificación teórica del proyecto y la ejecución real del mismo concluyendo que la SED es una herramienta de gran utilidad en la planificación, ejecución y control de proyectos de construcción [8]. También esta herramienta ha sido utilizada en la construcción de cimentaciones, con la herramienta stroboscope encontrando que es posible la automatización de la planificación y el análisis de los procesos de construcción, mediante el uso de modelos de simulación [9]. Adicionalmente también se ha utilizado la SED junto con análisis de lógica difusa para la identificación de riesgos en construcción, la investigación permitió crear un marco genérico de gestión de riesgos para

el posterior control y la mitigación de los mismos [10].

En Colombia se han desarrollado investigaciones relacionadas con la simulación de eventos discretos de procesos de construcción de estructura en concreto. Se utilizó la herramienta Arena y se generaron diferentes escenarios para la ejecución del proceso constructivo, analizando la logística de obra, recursos involucrados y métodos constructivos encontrando disminuciones en tiempo considerables [11],[12]. También la SED ha sido aplicada en el país como herramienta para la gestión del conocimiento en proyectos de construcción [13]. Otra aplicación de SED a nivel país, se refiere a la preparación de mezclas, transporte y disposición de concreto utilizando el software Arena, analizando las variables de tiempo y costo, permitiendo un desempeño superior al del sistema manejado inicialmente, reduciendo costos y tiempo del proceso [14]. Otros estudios en Colombia han implementado SED y líneas de balance, una técnica de programación que permite mostrar el trabajo que se realiza en un proyecto de construcción como una sola línea, o barra, en una gráfica, en vez de una serie de actividades como se haría en un diagrama de barras, resultante de CPM, PDM o PERT [15]. La implementación conjunta de la simulación de operaciones y la técnica de líneas de balance permitió la comparación y la toma de decisiones con menor incertidumbre que la proporcionada a través del conocimiento empírico [16].

Otro tipo de simulación digital es la propuesta de Building Information Modeling (BIM), una tecnología de modelación y asociación de los procesos para producir, comunicar y analizar la construcción de modelos, los modelos BIM se caracterizan por los componentes de construcción con representaciones digitales inteligentes que pueden ser asociados con gráficos, datos de atributos y reglas paramétricas [17]. BIM ha demostrado ser una herramienta eficiente para la disminución de incompatibilidades en diseños, generar valor en los proyectos de construcción ya que es posible “construir” virtualmente el proyecto antes de construirlo en la realidad y se pueden analizar diferentes dimensiones del proyecto como por ejemplo su desempeño ambiental, ciclo de vida, iluminación, etc. Esto ha sido demostrado en diferentes estudios [18],[19], en algunos de los cuáles se ha integrado BIM con otras herramientas como Lean construction y sostenibilidad [20],[21],[22].

BIM ha alcanzado recientemente gran atención en la industria de la construcción debido a que permite visualizar a los constructores el proyec-

to en un entorno simulado pudiendo identificar el potencial de diseño o problemas de funcionamiento [23], también han sido identificadas barreras en la implementación de BIM en empresas constructoras como por ejemplo la ausencia de proyectos que permitan evidenciar sus beneficios y la resistencia al cambio [24]. En otros estudios, BIM también ha sido implantado unido a la realidad virtual inmersiva [25], y también se ha desarrollado la integración de SED con BIM, encontrando que la simulación es un soporte para la programación de tiempos en proyectos, ya que brinda datos de entrada eficientes relacionados con duraciones de actividades y por el otro lado, BIM brinda información requerida en la simulación como cantidades de obra a ejecutar. Otro trabajo de investigación plantea la creación de un marco de integración SED-BIM para la planeación y seguimiento de procesos constructivos agregando valor a los procesos. BIM brinda información sobre el producto a construir, cuyo flujo de trabajo de refleja en el modelo de simulación digital [26]. Otra investigación plantea utilizar modelos BIM a partir de prototipos virtuales que permitan garantizar la “constructabilidad” (constructability-buildability) que unido a un análisis de los pasos a llevar a cabo, los recursos utilizados y un análisis de layout (logística de obra) permiten hacer análisis de tipo ¿Qué pasa si? para tomar mejores decisiones en proyectos de construcción [27]. También se han realizado investigaciones que plantean BIM como herramienta para la generación de valor en proyectos de construcción, resaltando la importancia de la utilización de tecnologías en el sector. BIM es presentada como una manera de maximizar los recursos, reducir esfuerzos y minimizar riesgos que puedan generar impactos negativos en las etapas de construcción y ejecución de proyectos [28]. En este artículo se presenta una integración entre SED, líneas de balance y BIM creando vínculos que permitan intercambiar información obtenida a través de las diferentes herramientas y tecnologías utilizadas.

2 Metodología

El estudio de caso contempla la construcción de un edificio de 9 pisos y 1 sótano, con área total construida de 11,400 m². Del sótano al 5º piso estará conformado estructuralmente por un sistema aporticado en concreto reforzado a la vista. Del 6º al 9º piso el edificio estará conformado por

una estructura metálica aporticada con placas de entrepiso en lámina colaborante. Las columnas del proyecto se cimentarán por medio de caissons excavados manualmente por el sistema de anillos empotrados. Los modelos de simulación de eventos discretos fueron elaborados en el software Arena®, los datos de entrada para generarlos fueron los flujos de trabajo de cada proceso, las duraciones de las actividades y los recursos empleados para su ejecución; los flujos fueron definidos mediante el análisis de los diseños, visitas de obra y con el apoyo de imágenes digitales.

2.1 Simulación de eventos discretos

A partir de los planos y cronograma del proyecto, visitas de campo, registro fotográfico y videos, se identificaron los procesos principales de la etapa de cimentación del edificio, estos procesos fueron construcción de caissons, pilotes, muros de contención y vigas de cimentación. Como soporte en esta actividad se contó con un módulo programable para captura de imágenes, previamente diseñado [11] que permitió obtener suficientes imágenes como la que se presenta en la Figura 1.



Figura 1: Fotografía cámara aérea

Se establecieron los flujos de trabajo de cada uno, y a partir de estos

procesos y los flujos de trabajo se construyó el modelo de simulación del estado inicial del proyecto mediante el software Arena®. Se realizó la conceptualización del modelo partiendo de los flujos de trabajo establecidos, se definieron las actividades predecesoras para cada actividad y se tuvo en cuenta el desarrollo de cada uno de los procesos. A manera de ejemplo en la Figura 2 se presenta el flujo de trabajo de los caissons.

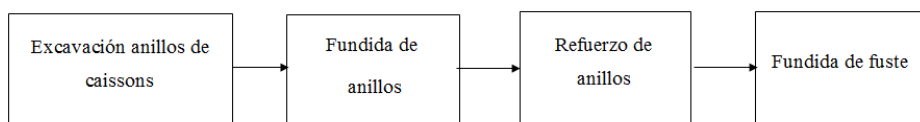


Figura 2: Flujo de trabajo caissons

Los datos recopilados fueron ingresados en la herramienta Input Analyzer de Arena® la cual toma los datos observados, los ajusta varias distribuciones de probabilidad y sugiere la más apropiada. Como ejemplo en la Figura 3 se presenta el histograma de una distribución de probabilidad generado por esta herramienta. Finalmente Input Analyzer suministró la función de probabilidad para cada grupo de datos la cual fue ingresada al modelo de Arena®.

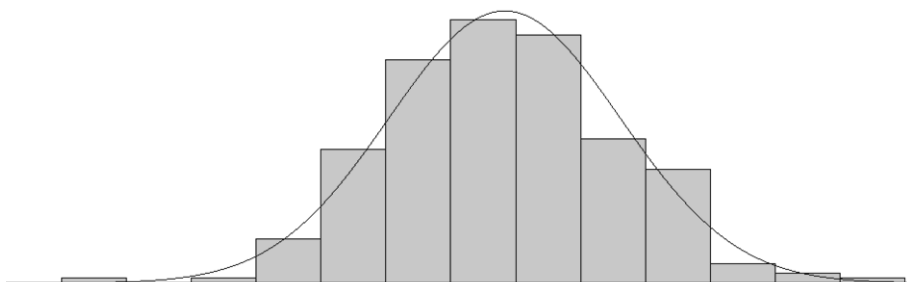


Figura 3: Ejemplo función de distribución

El modelo de simulación de eventos discretos está compuesto por cuatro módulos: caissons, pilotes, muros de contención y vigas. Al modelo fueron ingresados los recursos disponibles en el proyecto. Las fechas de inicio de las actividades son ingresadas desde Excel, a través de una interfaz desarrollada con el objetivo de minimizar la digitación manual en el modelo. La duración

total del modelo fue el resultado de la diferencia entre la fecha de inicio del proyecto y la fecha de la última actividad ejecutada a la fecha de corte.

El modelo fue validado estadísticamente por medio del método de los intervalos de confianza, comparando el error obtenido entre la duración real del proyecto y los resultados de la modelación, El resultado promedio de las replicaciones realizadas corresponde a 194.49 días y la del proyecto real fue de 196.

2.2 Programación de obra con líneas de balance

La Línea de Balance es una técnica de programación que permite mostrar el trabajo que se realiza en un proyecto de construcción a partir de actividades representadas como una sola línea, o barra, en una gráfica [29]. Consiste en un gráfico elementos vs. Tiempo y su propósito es balancear la velocidad de avance de todas las actividades involucradas en el proyecto y programar las actividades eliminando las interferencias entre ellas. Si la velocidad de avance de la actividad predecesora es menor, será entonces necesario considerar una holgura de término entre las dos de manera que las líneas no se crucen. En el presente estudio, con base en la información suministrada por el proyecto se construyó un diagrama de actividades donde se calcularon los rendimientos de la programación del estado inicial del proyecto y se seleccionaron los tiempos de espera condicionados que evitaran el riesgo de interferencias entre actividades.

Observando el diagrama se consideraron posibles alternativas, y dependiendo de los resultados obtenidos se pudo cambiar el rendimiento de algunas actividades variando el número de cuadrillas, el número de los integrantes de las cuadrillas o la duración de las actividades. De esta manera se eliminaban interferencias que por restricciones técnicas no debían presentarse. A través de la metodología de líneas de balance se mostró la secuencia de ejecución de las actividades comprendidas en la etapa de cimentación del edificio en una sola línea o barra.

En la Figura 4 se visualiza la línea de balance realizada con base en la programación inicial para las excavaciones de caissons y en la Figura 5 se presenta la alternativa propuesta para estas excavaciones obteniendo una duración menor; esto se logró reduciendo holguras y tiempos muer-

en obra se dibujaron uno a uno los anillos de caissons, fustes, pilotes, muros de contención, y vigas de cimentación construidas hasta la fecha de corte.

Una imagen del modelo finalizado, se presenta a continuación en la Figura 6.

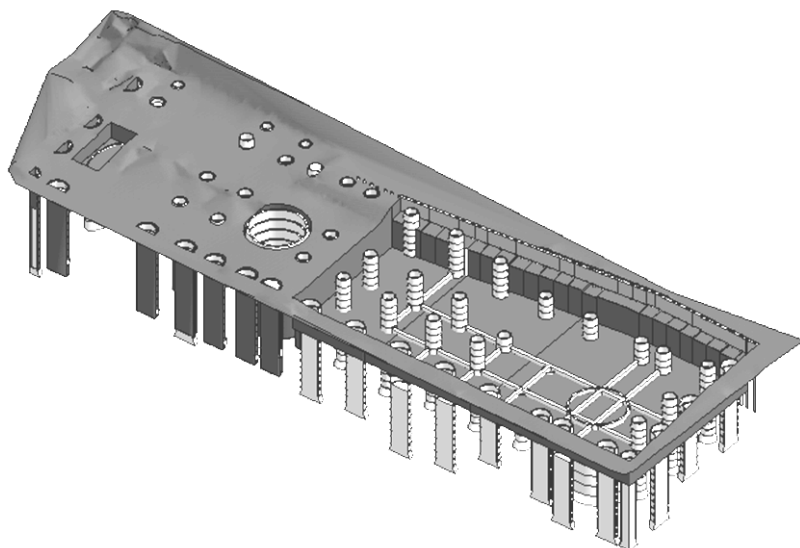


Figura 6: Modelo terminado

Una vez terminado el modelo de Revit® se procedió a exportarlo e importarlo en Navisworks® que también pertenece a la casa Autodesk®, para hacer la simulación en el tiempo se generó una programación detallada en Project®, se enlazaron las actividades del modelo con las actividades de la programación inicial del proyecto.

3 Alternativas de mejoramiento

Después de verificar y validar el modelo de simulación de eventos discretos, se procedió a plantear alternativas de mejoramiento de acuerdo con lo observado en campo y de acuerdo con la filosofía Lean Construction; se plantearon doce alternativas.

- Alternativa 0: Corresponde al modelo original que representa la construcción real de la obra.

En las alternativas 1, 2 y 3 se buscó hacer un balance de cuadrillas, ya que de acuerdo con los porcentajes de utilización de recursos que dio como resultado el modelo de simulación, y de acuerdo con el alto porcentaje de actividades no contributivas que se observó en las visitas de campo, se concluyó que era viable disminuir los recursos empleados sin afectar la duración del proyecto.

- Alternativa 1: Reducción del personal de la primera quincena de diciembre de 2013: de 59 a 30 ayudantes y de 24 a 16 oficiales, manteniendo fija la duración del proyecto.
- Alternativa 2: Reducción personal de la segunda quincena de febrero de 2014: de 51 a 24 ayudantes y de 21 a 13 oficiales, manteniendo fija la duración del proyecto.
- Alternativa 3: Disminución del número total de recursos de personal: de 454 a 314 ayudantes y de 161 a 149 oficiales, manteniendo fija la duración del proyecto.

El objetivo de las alternativas 4 a 8 fue aumentar la productividad reduciendo los tiempos de ciclo, mediante la implementación de maquinaria y equipos; para esto se manejaron rendimientos teóricos tomados de otros proyectos en proceso de construcción.

- Alternativa 4: Consiste en la utilización de una retoexcavadora pequeña en la excavación de los caissons circulares de 3.5 metros de radio. En el edificio en estudio, esta actividad se realizó manualmente con tiempos de ciclo altos.
- Alternativa 5: Para la excavación de la totalidad de los caissons que se realizó manualmente en el edificio estudiado, se implementó el uso de martillos eléctricos.
- Alternativa 6: Para este escenario se usó pólvora para fragmentar la roca en la actividad de excavación de los caissons.

- Se aumentó el volumen del balde que se manejó en la obra para el retiro de escombros en las excavaciones de los caissons.
- En la actividad de excavación de los muros de contención, se utilizó una retroexcavadora pequeña, ya que en la obra se realizó manualmente y había espacio para el uso de la retroexcavadora.

Se realizaron algunas combinaciones con las alternativas que era técnicamente viable combinar.

- Alternativa 9: Combinación de alternativas 4 y 5.
- Alternativa 10: Combinación de alternativas 6 y 7.
- Alternativa 11: Combinación de alternativas 4 y 8.

Las alternativas 1 a 11 fueron modeladas en Arena®, para determinar sus duraciones. Para mejorar el proceso de producción en la obra y reducir la variabilidad, en este caso reducir la variación en la duración de las actividades, se propuso una alternativa mediante la técnica de programación con líneas de balance.

- Alternativa 12: Teniendo en cuenta la programación inicial entregada por la obra y la programación real ejecutada, se plantea una alternativa para reducir las holguras y balancear los rendimientos mediante las líneas de balance elaboradas.

4 Resultados y análisis

4.1 Resultados de la simulación de eventos discretos

De acuerdo con el modelo inicial, Arena® presenta como resultado que se puede construir la cimentación del edificio en un tiempo de 194.49 días, que comparado la duración real del proyecto que corresponde a 196 días, se obtiene un error de 0.8 %. En la Figura 7 y en la Figura 8 se muestra gráficamente la comparación de los resultados obtenidos para cada una de las alternativas teóricas simuladas.

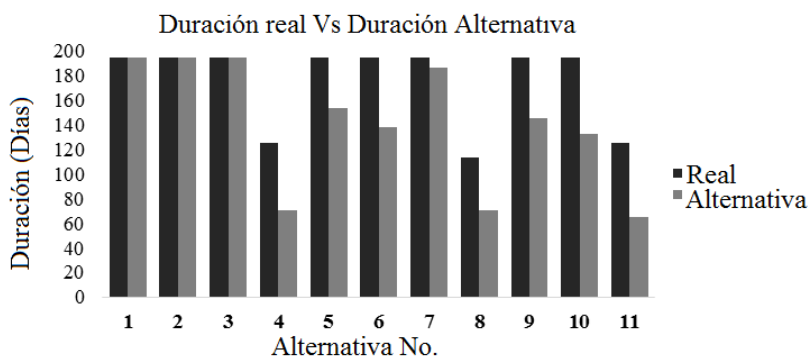


Figura 7: Disminuciones en duración alternativas teóricas

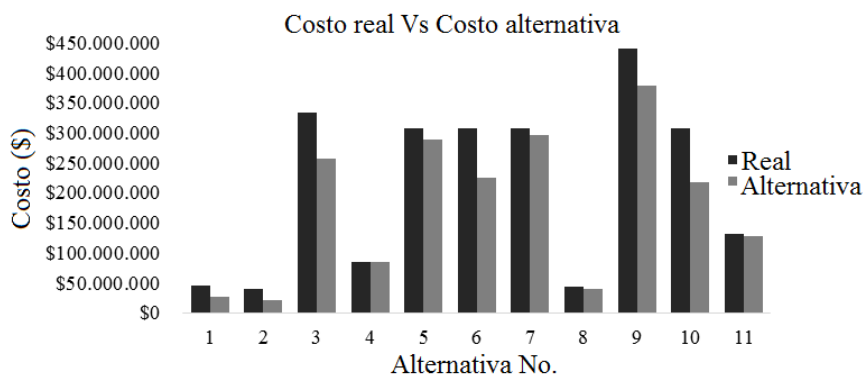


Figura 8: Disminuciones en costo alternativas teóricas

Con las alternativas propuestas se obtuvo una disminución en el tiempo de hasta el 48 % (alternativa 11) y de hasta el 47.5 % en costo (alternativa 2) según la actividad ejecutada; algunas alternativas fueron más eficientes que otras debido a que los rendimientos teóricos empleados fueron mayores. En términos generales, es viable implementar estas alternativas en el proyecto ya que con todas se obtienen reducciones en tiempo o en costo o en tiempo y costo; la selección de la alternativa o alternativas a implementar, dependerá del objetivo del dueño del proyecto y de su necesidad de terminar la obra anticipadamente o reducir costos.

4.2 Resultados de programación con líneas de balance

Como resultado de la alternativa número 12, se obtuvo una disminución del 7 % en el tiempo total de la obra con respecto a la programación inicial.

4.3 Resultados de la simulación en el tiempo

Al simular el modelo original y las alternativas propuestas se encontró que la simulación en el tiempo permitió observar de manera gráfica que no hubo avance significativo de los trabajos en los primeros dos meses del proyecto, permitió observar de manera gráfica que en algunos caissons se inició su construcción, luego se detuvo y fue retomada mucho tiempo después, se evidenció gráficamente que la obra no se ejecutó de una manera organizada. También se visualizó el avance e impacto en el proyecto de las alternativas propuestas.

5 Conclusiones

De acuerdo con los resultados de las alternativas propuestas, es importante mencionar que en relación a la duración, la alternativa que más impactó el proyecto es la número once que es la combinación de las alternativas 4 y 8. Con esta alternativa se reduce en un 48 % la duración de las actividades de caissons de 7 metros de diámetro y los muros de contención.

En relación a los costos, la alternativa que más impactó el proyecto es la número dos, con esta alternativa se reduce en un 47.5 % el costo del personal que laboró en la segunda quincena del mes de febrero de 2014.

En la ejecución del proyecto se observó que la excavación de los caissons fue la actividad que más afectó la duración del proceso constructivo debido a que se realizó manualmente, por consiguiente, seis de las alternativas propuestas están enfocadas a optimizar esta actividad.

Con la alternativa planteada mediante la técnica de líneas de balance, se redujo la duración total del proyecto en un 7 %, debido a que balancearon las velocidades de las actividades involucradas en el proyecto, y se buscó mantener la holgura mínima entre estas.

Mediante la simulación de procesos constructivos se obtienen duraciones de actividades y del proyecto que reflejan el tiempo de ejecución de manera acertada, es preciso realizar una validación estadística para demostrar que puede usarse como una herramienta confiable de planeación de proyectos en la Ingeniería Civil.

A partir de la simulación de eventos discretos es posible proponer alternativas de mejora a los procesos constructivos, modelarlas y definir si son viables o no antes de su ejecución, evitando de esta manera sobre costos y tiempos excesivos en la construcción de actividades.

Las alternativas de mejora propuestas en el proyecto permitieron reducciones de tiempo y costo. Aunque en algunas la reducción del costo no fue significativa, la reducción de tiempo sí puede representar grandes beneficios para el contratista como ahorros en carga prestacional y costos indirectos, para el dueño uso del bien de manera anticipada, y para los demás interesados del proyecto.

La simulación en el tiempo permite visualizar gráficamente diferentes alternativas de planeación y ejecución de proyectos de construcción antes de que sean ejecutadas, con el fin de seleccionar la más viable técnica y económicamente.

La técnica de líneas de balance proporciona información suficiente para analizar y determinar si la programación de un proyecto es eficiente, buscando mantener la holgura mínima entre actividades y una velocidad de avance constante, adicionalmente es una herramienta muy útil para detectar interferencias.

La integración de herramientas de simulación de eventos discretos junto con las metodologías BIM, si se aplican de una manera adecuada, pueden llegar a ser de gran utilidad en la planeación y toma de decisiones en un proyecto civil, ya que con el uso de BIM se puede visualizar al detalle el proceso constructivo de los modelos de SED, y definir si es factible técnicamente su implementación.

De acuerdo con los tiempos empleados en la construcción de los modelos de Arena® y Revit® en el proyecto, se encontró que una vez se adquiriera el conocimiento suficiente en el empleo de estos programas, su implementación en una empresa constructora no requerirá de una gran cantidad de recursos y si traerá beneficios en la planeación de proyectos.

La integración de la simulación de eventos discretos, líneas de balance y metodologías BIM, permiten con mayor facilidad la detección de errores en diseño, interferencias e inconvenientes en planeación, que al ser corregidos de manera temprana, se pueden obtener resultados de mayor calidad a menores costos y en un menor tiempo de ejecución en los proyectos.

6 Conclusiones

Se recomienda emplear tecnologías y herramientas computacionales que estimulen la investigación en la planeación de proyectos y que ayuden a disminuir el grado de incertidumbre, ya que en la actualidad este proceso está basado principalmente en la experiencia de los profesionales.

Durante la planeación de un proyecto de construcción, se recomienda evaluar la posibilidad de utilizar maquinaria y equipos que incrementen la productividad. En principio la maquinaria y equipos pueden parecer sobrecostos pero al comparar su valor con la carga salarial que generan los días adicionales de ejecución, pueden representar ahorros para el proyecto.

Es importante capacitar y motivar a los trabajadores del sector de la construcción para evitar la alta rotación, y de esta forma poder generar curvas de aprendizaje en las obras.

Es importante que en un proyecto de construcción los diseñadores, el contratista y la interventoría trabajen en forma integrada para evitar la fragmentación del mismo y por ende disminución de la productividad.

Referencias

- [1] L. Koskela, "Application of the new production philosophy to construction," Stanford University, Tech. Rep. 72, 1995. [Online]. Available: <http://cife.stanford.edu/sites/default/files/TR072.pdf> 158
- [2] E. Camargo and J. Gonzalez, "propuesta de un sistema operativo de gestión basado en la filosofía "lean construction" que permita estandarizar las actividades implicadas en el montaje de la estructura metálica de un edificio," Universidad de La Salle, Tech. Rep., 2011, especialización en gerencia de proyectos en ingeniería. [Online]. Available: <http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/2251/T91.11%20C172p.pdf?sequence=1> 158

- [3] L. Botero, *Construcción sin pérdidas: Análisis de procesos y filosofía Lean Construcción*. Legis S.A., 2006. 159
- [4] S. AbouRizk, “Role of simulation in construction engineering and management,” *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 136, no. 10, pp. 1140–1153, 2010. [Online]. Available: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000220](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000220) 159
- [5] J. Banks, J. Carson, B. Nelson., and D. Nicol, *Discrete-event system simulation*. Pearson Prentice Hall, 2005. 159
- [6] R. Labban, S. AbouRizk, Z. Haddad, and A. Elersy, “A discrete event simulation model of asphalt paving operations,” in *Simulation Conference (WSC)*. Washington, DC: IEEE, Dec 2013, pp. 3215 – 3224. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1109/WSC.2013.6721687> 159
- [7] F. Berner, V. Kochkine, I. Habenicht, and S. Spieckermann, “Simulation in manufacturing planning of buildings,” in *Simulation Conference (WSC)*. Washington, DC: IEEE, Dec 2013, pp. 3306–3317. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1109/WSC.2013.6721695> 159
- [8] *Simulación de procesos constructivo utilizando tecnología 4D. Caso: Obra Parque la Música Residencial. 5th International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management*, 2011. 159
- [9] J.-P. Pantouvakis and A. Panas, “Computer simulation and analysis framework for floating caisson construction operations,” *Automation in Construction*, vol. 36, no. 0, pp. 196 – 207, 2013. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580513000484> 159
- [10] H. X. Li, M. Al-Hussein, Z. Lei, and Z. Ajweh, “Risk identification and assessment of modular construction utilizing fuzzy analytic hierarchy process (ahp) and simulation,” *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 40, no. 12, pp. 1184–1195, 2013. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1139/cjce-2013-0013> 160
- [11] A. Gomez, J. D. Echeverry, M. X. Giraldo, C. Otalora, and M. Cano, “Mejoramiento de procesos constructivos a partir de un módulo programable para captura de imágenes y simulación digital,” *Ingeniería de construcción*, vol. 27, pp. 35 – 53, 08 2012. [Online]. Available: http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-50732012000200003&nrm=iso 160, 162
- [12] A. Gómez, “Simulación de procesos constructivos,” *Ingeniería de Construcción*, vol. 25, pp. 121 – 141, 2010. [Online]. Available: http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-50732010000100006&nrm=iso 160

- [13] A. Gómez and A. Orozco, “Simulación digital como herramienta para la gestión del conocimiento en la construcción de edificaciones en concreto,” *INGE CUC*, vol. 10, no. 1, pp. 75–82, 2014. [Online]. Available: <http://revistascientificas.cuc.edu.co/index.php/ingecuc/article/view/346> 160
- [14] L. B. Botero and H. A. Agudelo, “Simulación digital en un proyecto de construcción en colombia,” *Revista Universidad EAFIT*, vol. 45, no. 155, 2011. [Online]. Available: <http://publicaciones.eafit.edu.co/index.php/revista-universidad-eafit/article/view/4> 160
- [15] J. H. Loría, “Programación de obras con la técnica de la línea de balance,” Academia de Ingeniería, Tech. Rep., 2011. 160
- [16] L. B. Botero and H. Acevedo, “Simulación de operaciones y línea de balance: herramientas integradas para la toma de decisiones,” *Ingeniería y Ciencia - ing.cienc.*, vol. 7, no. 13, 2011. [Online]. Available: <http://publicaciones.eafit.edu.co/index.php/ingciencia/article/view/399> 160
- [17] C. Eastman, P. Teicholz, R. Sacks, and K. Liston, *BIM Handbook Introduction*. John Wiley & Sons, Inc., 2008, pp. 1–24. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1002/9780470261309.ch1> 160
- [18] P. C. Suermann and R. R. Issa, “Evaluating the impact of building information modeling (bim) on construction,” in *1 International conference on construction applications of virtual reality*. State college, 2007. [Online]. Available: <http://itc.scix.net/data/works/att/04b1.content.05264.pdf> 160
- [19] H. Xu, J. Feng, and S. Li, “Users-orientated evaluation of building information model in the chinese construction industry,” *Automation in Construction*, vol. 39, no. 0, pp. 32 – 46, 2014. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580513002161> 160
- [20] P. Martinez, V. González, and E. Fonseca, “Integración conceptual Green-Lean en el diseño, planificación y construcción de proyectos,” *Revista Ingeniería de Construcción*, vol. 24, no. 1, pp. 342–382, 2009. [Online]. Available: <http://www.al-dia.uchile.cl/sistema/tablas/listar.asp?r=2858> 160
- [21] R. Sacks, L. Koskela, B. A. Dave, and R. Owen, “Interaction of lean and building information modeling in construction,” *Journal of construction engineering and management*, vol. 136, no. 9, pp. 968–980, 2010. 160
- [22] R. Volk, J. Stengel, and F. Schultmann, “Building information modeling (bim) for existing buildings — literature review and future needs,” *Automation in Construction*, vol. 38, no. 0, pp. 109 – 127, 2014. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092658051300191X> 160

- [23] S. Azhar, “Building information modeling (bim): Trends, benefits, risks, and challenges for the aec industry,” *Leadership and Management in Engineering*, vol. 11, no. 3, pp. 241–252, 2011. [Online]. Available: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)LM.1943-5630.0000127](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)LM.1943-5630.0000127) 161
- [24] H. Yan and P. Damian, “Benefits and barriers of building information modelling,” in *12th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering*, 2008. 161
- [25] M. König, C. Koch, I. Habenicht, and S. Spieckermann, “Intelligent bim-based construction scheduling using discrete event simulation,” in *Proceedings of the Winter Simulation Conference*. Winter Simulation Conference, 2012, p. 59. 161
- [26] W. Lu and T. Olofsson, “Building information modeling and discrete event simulation: Towards an integrated framework,” *Automation in Construction*, vol. 44, no. 0, pp. 73 – 83, 2014. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580514000879> 161
- [27] H. Li, N. Chan, T. Huang, H. Guo, W. Lu, and M. Skitmore, “Optimizing construction planning schedules by virtual prototyping enabled resource analysis,” *Automation in Construction*, vol. 18, no. 7, pp. 912 – 918, 2009. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580509000582> 161
- [28] K.-F. Chien, Z.-H. Wu, and S.-C. Huang, “Identifying and assessing critical risk factors for {BIM} projects: Empirical study,” *Automation in Construction*, vol. 45, no. 0, pp. 1 – 15, 2014. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580514001071> 161
- [29] *Planificación y control de proyectos*. Ediciones Universidad Católica de Chile, 2009. 164