

Simulación de operaciones y línea de balance: herramientas integradas para la toma de decisiones

Simulação de operações e linha balance: ferramentas integradas para decisão

Simulation operations and line of balance: integrated tools for decision making

Luis Fernando Botero Botero¹ y Harlem Acevedo Agudelo²

Recepción: 26-ene-2010/Modificación: 02-may-2011/Aceptación: 04-may-2011

Se aceptan comentarios y/o discusiones al artículo

Resumen

Este artículo presenta la implementación conjunta de la simulación de operaciones y de las líneas de balance como herramientas que contribuyen a mejorar la eficiencia de la planeación de proyectos de la construcción, donde su integración ha sido escasa en el ámbito nacional e internacional. El artículo expone los resultados de la simulación de las actividades asociadas a la etapa de estructura, armado y fundida de muros y losa, en una edificación en altura. Se modela el sistema de acuerdo con la forma como se ejecuta el proyecto por parte de los constructores y con la ayuda de las líneas de balance se generan dos escenarios alternativos con el fin de comparar los tiempos y los costos promedios de terminación del proyecto. En el primer escenario se aprovecha la holgura hallada en el sistema actual con relación a los tiempos de iniciación

¹ Magíster en ciencias de la administración, lfbotero@eafit.edu.co, profesor titular, coordinador del grupo de investigación GESCON (Gestión de la construcción), Departamento de Ingeniería Civil, Universidad EAFIT, Medellín, Colombia.

² Magíster en administración, hacevedo@eafit.edu.co, miembro del grupo de investigación GESCON, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad EAFIT, Medellín-Colombia.

de actividades, sin cambiar la cantidad de recursos humanos y de equipo. En segundo escenario, se aumenta levemente la cantidad de recursos humanos y se incrementa en un 25 % la cantidad de equipo de formaletería para muros y losa. A partir de los resultados, las empresas disponen de una metodología para la planeación y la selección del escenario adecuado, de acuerdo con su conveniencia.

Palabras claves: simulación, línea de balance, construcción, lean construction.

Resumo

Este artigo apresenta a implementação conjunta da simulação de operações e de linhas de balance como ferramentas que ajudam a melhorar a eficiência do planejamento de projetos de construção, onde houve pouca integração nos níveis nacional e internacional. O artigo expõe os resultados da simulação das atividades associadas com a etapa da estrutura, montagem e fundição de paredes e laje em um prédio de altura. Modela-se o sistema de acordo com a forma como o projeto é executado pelos construtores e com a ajuda das linhas de balanço de dois cenários alternativos são gerados para comparar os tempos eo custo médio de conclusão do projeto. No primeiro cenário aproveita a brecha encontrada no atual sistema com relação à data de início de atividades, sem alterar a quantidade de mão de obra e equipamentos. No segundo cenário, ele aumenta um pouco a quantidade de recursos humanos e incrementa em 25% a quantidade de equipamentos cofragem para parede e laje. A partir dos resultados, as empresas dispõem de uma metodologia para o planejamento e seleção do cenário apropriado de acordo com sua conveniência.

Palavras chaves: simulação, balance line, construção, lean construction

Abstract

This paper presents the joint implementation of the simulation of operations and lines of balance, as tools that help to improve the efficiency in construction project planning, where the integration of these tools has been scarce in the national and international field. This paper expounds the simulation results of the activities associated with the construction works of structure, assembly and casting of walls and slab, in a multi-story building. The construction system is modeled, according to the way it is done by the company, and with the help of the lines of balance, generating two alternative scenarios in order to compare the times and the average costs of project completion. The first scenario takes advantage of the slack found in the current system in relation to the time of initiation of activities, without changing the amount of human resources and equipment. In second scenario, the amount of human resources is slightly increased, and the amount of forms for walls and slab increases

by 25%. From the results, companies have a methodology for planning and selecting the appropriate scenario, according to their convenience.

Key words: simulation, line of balance, construction, lean construction.

1 Introducción

La complejidad de los procesos constructivos, representada por la gran cantidad de recursos utilizados y la interrelación de estos con múltiples actividades a ejecutar, plantean para el planificador el gran reto de optimizarlos, buscando la eficiencia para alcanzar altos niveles de productividad.

Sin embargo, el proceso de planificación de proyectos en el sector de la construcción, se encuentra en Colombia bastante influenciado por el conocimiento empírico y la experiencia adquirida a lo largo de los años por el planificador, así como el tratamiento determinístico de las diferentes variables que intervienen en los procesos, aumentando en gran parte la incertidumbre y la variabilidad, propia de los proyectos de construcción.

La simulación de operaciones y las líneas de balance son dos herramientas utilizadas para la planificación y control de actividades repetitivas y similares. Aunque si bien son múltiples los beneficios de estas herramientas, ellas son utilizadas de manera escasa e independiente debido a su desconocimiento, y su implementación conjunta es prácticamente nula en el ámbito nacional e internacional. El actual proyecto enfoca su atención en la integración de las metodologías mencionadas y la sinergia que se presenta en su uso conjunto, desde la generación de escenarios a partir del análisis de la línea de balance del sistema de construcción actual hasta su modelamiento por medio de la aplicación de la simulación de operaciones en el desarrollo de la etapa de estructura, de un proyecto de construcción de vivienda en altura de 17 pisos de apartamentos, buscando con ello la comparación en términos de las variables costo y tiempo que permita la disminución de la incertidumbre y facilite así la toma de decisiones.

Este estudio brinda, adicionalmente, al grupo de trabajo asociado a la planeación y a la ejecución de proyectos de construcción una metodología que puede emplearse en diferentes actividades con base en las necesidades de la empresa.

2 Revisión bibliográfica

2.1 Simulación de operaciones en el sector de la construcción

Daniel W. Halpin implementa la simulación de operaciones, con el desarrollo del programa CYCLONE (CYCLlic Operations NETwork) a mediados de la década del setenta. Esta herramienta consta de una red ensamblada por medio de nodos que describen las operaciones de construcción y aquellos elementos necesarios para el correcto flujo de las entidades, como las actividades, los contadores de los ciclos finalizados en la operación, las colas que indican el estado pasivo o tiempo ocioso de los recursos, los conectores (flechas) que indican la dirección del flujo de los recursos entre los estados activos y pasivos de la red [1].

El modelamiento implementado por Daniel Halpin ha contribuido, desde entonces al desarrollo de múltiples investigaciones sobre la simulación aplicada al sector de la construcción, así como a la generación de software de simulación bajo conceptos similares y al mejoramiento del modelo por parte de otros autores. Algunos de estos desarrollos son: INSIGHT por B. C. Paulson (1978), RESQUE por D. Y. Chang (1987), UM-CYCLONE por P. G. Ioannou (1989), COOPS por Liu y Ioannou (1992), DISCO por Huang R. (1995), CIPROS por Tommelein y Odeh (1994), STROBOSCOPE por Martinez y Ioannou (1994), COST por T. M. Cheng, S. T. Wu y Y. W. Tseng (2000), GACOST por T. M. Cheng y C. W. Feng (2002) [2, 3, 4].

Actualmente son utilizados diferentes programas de simulación de uso general, como ARENA, PROMODEL, ITHINK, SIMULATE, entre otros, para realizar simulaciones de operaciones de la construcción, gracias a la gran versatilidad que estos poseen, a diferencia de las limitaciones en capacidad, velocidad y plataformas en las que corren, herramientas computacionales de décadas anteriores [5].

Cada vez son mayores las aplicaciones de la simulación de operaciones en la construcción alrededor del mundo, con mayor implementación en Estados Unidos y Canadá. Winter Simulation Conference¹ se realiza cada año en los Estados Unidos y convoca investigadores de este tema de todos los sectores, donde la ingeniería de la construcción y la administración de proyectos hacen parte del evento.

¹Winter Simulation Conference, <http://wintersim.org/> (Nov. 2008).

En el ámbito latinoamericano, Chile cuenta con un desarrollo en la implementación de la simulación digital. El Centro de Excelencia en Gestión de Producción (GEPUC), de la Pontificia Universidad Católica de Chile, adelanta trabajos de simulación de operaciones en la construcción, con la finalidad de mejorar los proyectos y optimizar las operaciones de construcción de alto impacto en relación a sus plazos y costos [6]. De manera similar, el grupo de investigación NORIE de la Universidad Federal de Rio Grande del Sur (UFRGS), en Porto Alegre–Brasil, adelanta trabajos en la aplicación de modelos de simulación de operaciones de la construcción [7].

En Colombia, la implementación de metodologías de simulación para los procesos constructivos es limitada, debido a la escasa investigación desarrollada hasta la fecha. La Universidad de los Andes ha trabajado sobre este tema en la última década. Sus trabajos han tenido diferentes alcances como el desarrollo de herramientas de simulación de procesos constructivos, MOCS-PROC y SISPLAN [8] –programadas en Visual Basic y fundamentadas en la herramienta Micro Cyclone– y la aplicación de la simulación en dos proyectos de construcción en la ciudad de Bogotá [9] –enfocados en el proceso crítico de los proyectos en la etapa de estructura de la construcción, con la finalidad de adelantar la fecha de entrega, teniendo por lo tanto, el tiempo como única variable de decisión.

El grupo GESCON de la Universidad EAFIT implementó la simulación del proceso de preparación de mezclas, transporte y disposición de concreto en un proyecto de construcción de vivienda en altura [10]. En el estudio se establecieron diferentes escenarios (reducción de personal en zona de preparación de concreto, utilización de diferentes sistemas de transporte vertical y cambio en el método de trabajo para la dosificación de concreto), buscando establecer cuál de ellos es el más eficiente en términos de dos variables: disminución de plazos y de costos.

2.2 Línea de balance

La línea de balance fue desarrollada por la compañía Goodyear Tire & Rubber Company en la década del cuarenta y posteriormente implementada por la armada norteamericana en la década del cincuenta [11].

La línea de balance fue aplicada inicialmente en la industria manufacturera

como técnica de programación y control del flujo de la línea de producción de los productos terminados.

Los conceptos de la línea de balance han sido aplicados en la industria de la construcción como método de planeación. En diferentes estudios se han realizado diferentes variaciones a esta técnica con la finalidad de ajustarla a las necesidades propias del sector constructor. Algunos de estos desarrollos son: Velocity Diagrams por W. Roech (1972), Construction Planning Technique (CPT) por S. Peer & S. Selinger (1973), Production Method (VPM) por J.J. O' Brien (1975), Linear Scheduling Method (LSM) por D. W. Johnston (1981), Time Space Scheduling Method (TSSM) por O. Stradal & J. Cacha (1982), and Repetitive Project Model (RPM) por R. M. Reda (1990). [11, 12, 13].

A pesar de su uso cada vez mayor, la línea de balance había tenido dificultades en su implementación, tales como muchos usuarios utilizaban el método sin considerar todas las conexiones lógicas entre actividades, el tiempo requerido para realizar el control manualmente era alto. Debido a estos factores, se desarrolló en Finlandia la primera aplicación computacional que hacía posible el control sistemático de la programación DYNAProject, que facilitó el uso de la línea de balance para la planificación de proyectos constructivos. Soini, Leskela & Seppanen, reportan beneficios en su aplicación, como disminución del riesgo de la programación, obtención de alternativas para facilitar el análisis, recorte en la duración del proyecto, visualización de la viabilidad de los escenarios propuestos y de puntos de control de la operación [14].

En el año 2002 David Arditi et al, presentan las bases para un uso correcto de las líneas de balance, en el cual es importante diferenciar entre actividades lineales e independientes de características repetitivas en un proyecto de construcción y las que no cumplen con esta condición. Para estas últimas no es adecuado el uso de las líneas de balance [15].

Desde su fundación en el año 2007 la empresa Vico Software Inc. ha desarrollado una serie de programas aplicados al mejoramiento de los procesos de la industria de la construcción. Este es el caso del software Vico Office Schedule Planner, que mediante los diagramas de línea de balance permite identificar los cuellos de botella y demás conflictos, así mismo la optimización de las cuadrillas de trabajo contratadas para el desarrollo de las actividades.

Durante el año 2009 GESCON desarrolló una investigación en la cual integró dos herramientas: la simulación de operaciones y el análisis de las

líneas de balance, en el sector de la construcción con la creación de un modelo y la generación de escenarios a partir del análisis de la línea de balance del proceso constructivo implementado por la empresa [16]. El presente artículo presenta la metodología, los resultados y las conclusiones de esta investigación.

3 Metodología

3.1 Descripción del sistema actual

El proyecto de construcción estudiado (llamado a partir de ahora sistema actual), en la etapa de estructura, se ejecutó con procesos simultáneos de muros estructurales y losas en diferentes zonas de cada piso, sin que hubiera hacinamiento en el área de trabajo. La figura 1 y la tabla 1 muestran la secuencia de ejecución de las actividades correspondientes.

El plan de trabajo diario de las actividades en la etapa de estructura empleado por la empresa consistió en armado y fundida de muros que hacen parte de una zona determinada, así mismo y paralelamente armado y fundida de losa de la zona precedente. Las flechas de la figura 1 indican el flujo de las actividades. De acuerdo con este plan de trabajo la velocidad de avance programada es una zona por día (muros de una zona y losa de la zona anterior).

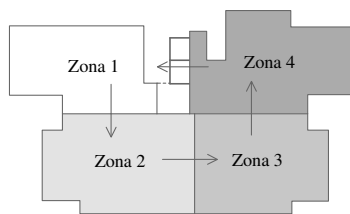


Figura 1: zonificación del área de trabajo

Se realizaron mediciones de campo de cada una de las actividades de armado y fundida de losa. Con estas mediciones se realizó la línea de balance que permitió determinar la existencia o no de holguras entre inicio de actividades y a partir de ellas establecer posibles escenarios que permitan llevar a cabo comparaciones. La figura 2 presenta la línea de balance del sistema actual.

Tabla 1: secuencia de actividades por jornada laboral

Componente de la estructura	Actividad	Día				
		1	2	3	4	5
Armado y fundida de muros estructurales	Desencofrado de muros	Zona 4*	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4
	Armado malla de muro	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 1**
	Instalaciones eléctricas y/o sanitarias					
	Marcación y taladro de muro					
	Transporte de formaletería					
	Formaletería					
	Revisión de muro					
Fundida de concreto						
Armado y fundida de losa	Desencofrado losa	Zona 3*	Zona 4*	Zona 1	Zona 2	Zona 3
	Formaletería losa	Zona 4*	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4
	Armado de vigas					
	Colocación de porón					
	Instalaciones eléctricas losa					
	Colocación de malla losa					
	Fundida de concreto losa					

* piso anterior
 ** piso superior

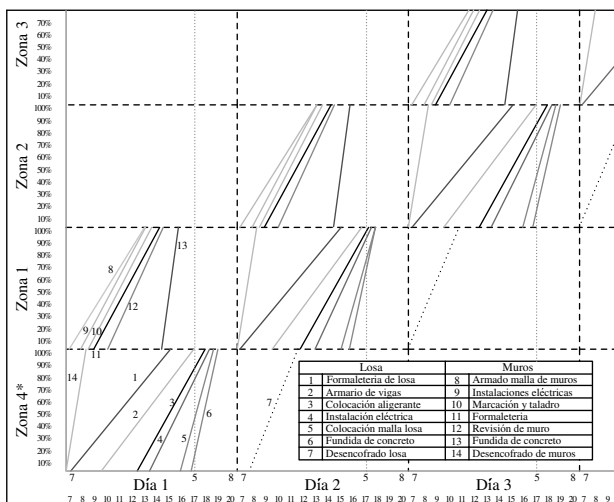


Figura 2: línea de balance sistema actual

3.2 Fases de estudio del modelo de simulación

Diferentes autores que han estudiado el tema de simulación, han estructurado una serie de pasos con los cuales recomiendan abordar un estudio de simulación de operaciones. La figura 3, presenta las fases para un estudio de simulación, de acuerdo con lo sugerido por Banks, Carson, Nelson y Nicoli [17].

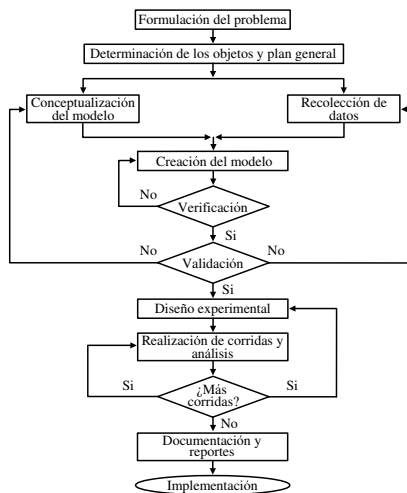


Figura 3: pasos para un estudio de simulación digital

Inicialmente, la línea de balance del sistema actual nos permite visualizar las dificultades presentadas en el proceso y con ello se realiza la formulación del problema y se plantean los objetivos y el plan general que dan pie a cada escenario de mejoramiento.

Con base en la información suministrada en el proyecto de construcción se continúa con la conceptualización del modelo, teniendo en cuenta todas las actividades mencionadas en la tabla 1, las entidades de entrada y los recursos indispensables para llevar a cabo las tareas.

Paralelamente, se realizaron las mediciones de campo que permitieron el desarrollo de las distribuciones de probabilidad que rigen los tiempos de ejecución de las actividades por cuadrilla, las cuales fueron establecidas a través de una prueba de bondad del ajuste mediante la Chi-cuadrado (χ^2) a un nivel

de significancia del 5%, tal como se muestra en las tablas 2 y 3. Las tablas 2 y 3 presentan las distribuciones y los parámetros de las actividades en muros estructurales y en armado y fundida de losa con las cuales fue modelado el sistema.

Tabla 2: distribuciones y parámetros de las actividades en muros estructurales

Actividad	Distribución de probabilidad	Parámetros
Armado malla	Normal	$\mu : 0,00973; \sigma : 0,00086$ (h/kg)
Instalaciones eléctricas	Triangular	Mín: 0,0745; moda: 0,15 y máx: 0,267 (h/und)
Instalaciones sanitarias	Uniforme	Mín: 0,15 y máx: 0,18 (h/und)
Marcación	Empírica	DISC(0,2667; 0,013; 0,4667; 0,019; 0,5333; 0,025; 0,8667; 0,031; 1,00; 0,037) (h/m)
Taladro de muro	Normal	$\mu : 0,0279; \sigma : 0,0055$ (h/m)
Transporte de formaletería	Uniforme	Mín: 0,20 y máx: 0,25
Formaletería	Normal (muro largo)	$\mu : 0,0457; \sigma : 0,0114$ (h/m ²)
	Normal (muro mediano)	$\mu : 0,0566; \sigma : 0,0192$ (h/m ²)
	Lognormal (muro corto)	$\mu : 0,1038; \sigma : 0,0270$ (h/m ²)
Revisión de muro	Uniforme	Mín: 0,15 y máx: 0,25 (h/und)
Fraguado	Determinística	8 h
Desencofrado	Uniforme (muro largo)	Mín: 0,0117 y máx: 0,0407 (h/m ²)
	Normal (muro mediano)	$\mu : 0,0249; \sigma : 0,0063$ (h/m ²)
	Normal (muro corto)	$\mu : 0,0294; \sigma : 0,0060$ (h/m ²)

La creación y ejecución del modelo que consiste en llevarlo al computador por medio de un lenguaje de simulación y correrlo para validar sus resultados fue realizado con el software Arena, versión 12.0, desarrollado por la empresa Rockwell Software Inc.

Tabla 3: distribuciones y parámetros de las actividades en armado y fundida de losa

Actividad	Distribución de probabilidad	Parámetros
Formaletería losa	Uniforme	Mín: 0,050 y máx: 0,065 (h/m ²)
Armado de vigas	Normal	μ : 0,0772; σ : 0,0026 (h/m)
Colocación de aligerante	Uniforme	Mín: 0,0225 y máx: 0,0262 (h/und)
Instalaciones eléctricas losa	Normal	μ : 0,0379; σ : 0,0039 (h/sal)
Colocación de malla losa	Uniforme	Mín: 0,006 y máx: 0,011 (h/m ²)
Fraguado losa	Determinística	8 h
Desencofrado losa	Triangular	Mín: 0,029; moda: 0,033 y máx: 0,044 (h/m ²)

La simulación se realizó en las operaciones llevadas a cabo correspondientes a la etapa de estructura de una construcción de dos torres de 17 pisos de apartamentos. Dado que esta etapa está compuesta por tareas repetitivas permite de una parte, tener una buena estimación de los tiempos de ejecución y de otra, la validación de ellos.

3.3 Escenarios de mejoramiento

Con base en los resultados de la primera simulación del sistema actual y los análisis realizados sobre la línea de balance se crearon dos escenarios con el fin de incrementar la productividad de la programación y ejecución, ya sea disminuyendo la desviación de costos o la de plazos presupuestados.

3.3.1 Escenario 1 El escenario 1 intenta disminuir la extensión de la jornada laboral más allá de las cinco y media de la tarde, valiéndose de la holgura de tiempo entre inicio de actividades sucesivas, sin cambiar la cantidad de obra programada para cada día ni la cantidad de recurso humano y equipo, asignada a las actividades. Puede notarse en la figura 2, que entre el inicio de formaletería de losa y el de armado de vigas transcurren tres horas aproximadamente, tiempo durante el cual se avanza en el 25–30 % de la formaletería de losa programada para ese día. Es posible entonces adelantar el inicio de

armado de vigas, sin que se presenten interferencias de obreros en la zona de trabajo.

Adelantar el inicio de armado de vigas, permite ganar tiempo de inicio en las actividades sucesoras y a su vez, que la hora de finalización de la fundida de concreto sea más temprana. Para el escenario 1 se obtuvo la línea de balance que puede observarse en la figura 4.

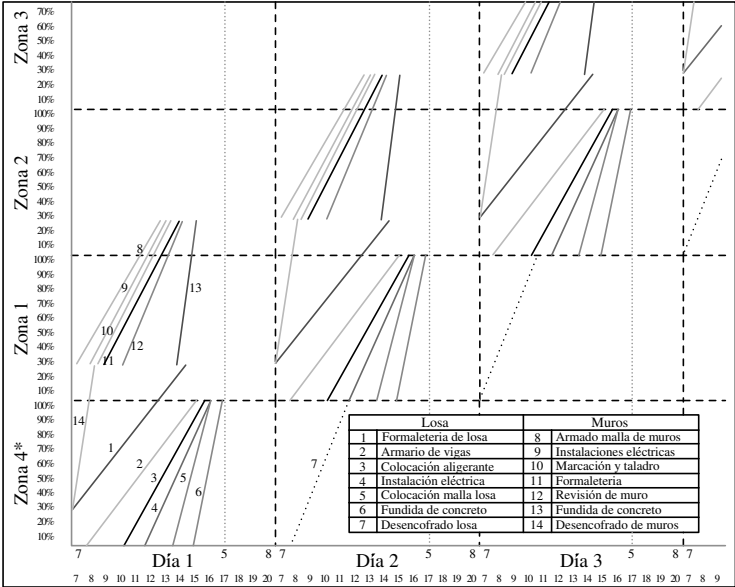


Figura 4: línea de balance escenario 1

3.3.2 Escenario 2 En este escenario se pretende realizar mayor cantidad de obra con respecto a la programada en el sistema actual, con el fin de disminuir la fecha de finalización del armado y fundida de la estructura, así como los costos asociados a este proceso. El propósito es llevar a cabo –en promedio– una zona y cuarta por día, distribuida de la siguiente manera: para armado y fundida de muros el plan es armar y fundir una zona y cuarta diariamente y para armado y fundida de losa varía de un día al otro, esto es, un día se realiza una zona y al otro día zona y media, teniendo para este último día el avance de un cuarto de losa de armado de formaletería y una disponibilidad de formaletería que no atrase su inicio en la mañana, tal como se avanza en

el escenario 1. Para ello, se hace necesario incrementar la formalettería de losa y de muros en un porcentaje del 25 % aproximadamente, con respecto al sistema actual, y aumentar el personal humano en una cuadrilla de formalettería de muros, dos cuadrillas de armado de muros/vigas y un instalador eléctrico. El programa diario para este escenario se detalla en la figura 5.

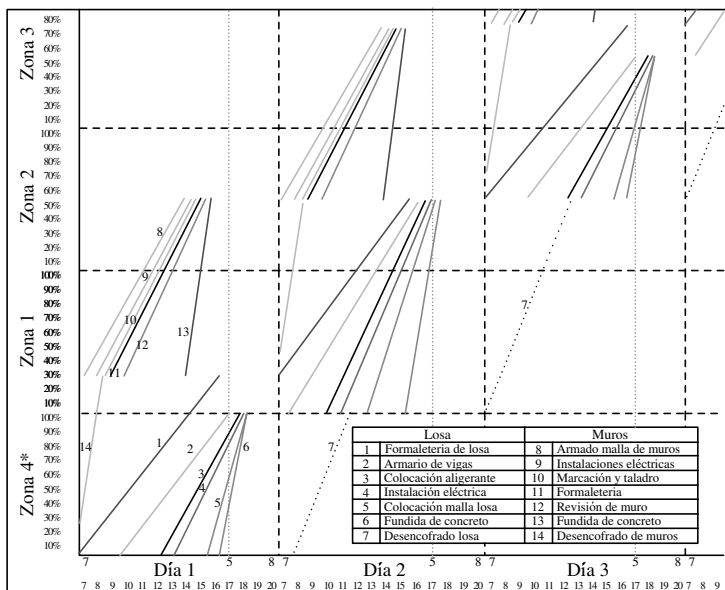


Figura 5: línea de balance escenario 2

Con base en las líneas de balance y las distribuciones de los tiempos de las actividades se realizó la simulación de las tres opciones anteriores: sistema actual, escenario 1 y escenario 2.

4 Resultados

En el desarrollo de un proyecto hay dos parámetros muy importantes que hablan de la eficiencia de la planeación y desempeño del mismo, el cumplimiento del plazo de entrega y de los costos presupuestados. Es ideal que ambos se cumplan, mejor aún, que tanto el tiempo y los costos se recorten sin afectar la calidad del producto. Por lo anterior, es importante realizar comparaciones

entre todos los escenarios: sistema actual y escenarios propuestos para establecer cuál de ellos es el mejor, por alguno de los anteriores aspectos, o por ambos.

La tabla 4 permite realizar tales comparaciones a nivel general: estimación del promedio de los costos totales y del tiempo de finalización del proyecto. Estos costos sólo consideran aquellos relacionados con el recurso humano y equipo que son los factores que varían en los escenarios propuestos, sin tener en cuenta los materiales y los costos administrativos. El costo del recurso humano fue cuantificado con el valor de horas diurnas.

Tabla 4: promedios de tiempo y de costos totales

Configuración	Tiempo promedio de terminación		Costos			
	Un piso	17 pisos	Un piso		17 pisos	
			SMMLV*	\$	SMMLV	\$
Actual	99,94 horas 4,16 días	1699,9 horas 11,3 semanas	35,9	17'858.221	610,3	303'589.740
Escenario 1	100,05 horas 4,17 días	1700,85 horas 11,3 semanas	34,7	17'246.202	589,9	293'185.434
Escenario 2	83,04 horas 3,46 días	1411,65 horas 9,1 semanas	34,2	17'000.472	581,5	289'008.020

*SMMLV: Salario Mínimo Mensual Legal Vigente

Como puede observarse en cuanto al tiempo, no es una variable que sirva para definir entre el sistema actual y el escenario 1. Entre estos dos modelos se elegiría adaptar el escenario 1 por cuanto la diferencia en costos promedio del total de 17 pisos está muy cercana de 10 millones de pesos. En este escenario, no se generan horas extras.

La apropiación de este método de trabajo conlleva tres grandes ventajas:

- Generación de una disciplina de trabajo planeado a partir del análisis de las líneas de balance que les permite aprovechar al máximo las horas programadas de la jornada laboral, trayendo como consecuencia una mejor calidad de vida de los trabajadores y profesionales que podrán disponer de más tiempo para el descanso y demás actividades personales.
- Para la empresa, esta práctica a corto plazo le reeditará en términos de una mayor aceptación entre sus clientes por el cumplimiento de la entrega.

- A largo plazo le originará ahorros significativos en el desarrollo de proyectos similares.

Si se compara el sistema actual con el escenario 2, se puede notar que tanto el tiempo de entrega como los costos totales son menores en el segundo caso. Aunque en este segundo escenario se generan horas extras, el proyecto termina dos semanas antes y en costos el ahorro corresponde a \$14'581.720 en promedio para los 17 pisos. Este ahorro no tiene en cuenta la disminución de los costos administrativos asociados.

Las ventajas que conlleva el escenario 2 apuntan a:

- La disminución de plazos, aunque también se ve reflejada una disminución de los costos, debido al menor tiempo de utilización de equipo como formaletería y torre grúa, que tienen gran pesos en los costos totales.
- Flexibilidad de recursos: dos semanas de anticipación en la entrega del proyecto permite tener disponibilidad de los trabajadores y equipo para próximos proyectos.

5 Conclusiones

Las técnicas aplicadas permitieron conocer con gran detalle la interacción de las actividades que se realizaron simultáneamente dentro del proyecto de construcción, con base en la medición y el análisis de la información.

De acuerdo con los resultados obtenidos en el análisis comparativo del sistema actual con el escenario 1 se prefiere este último, dado que los costos promedio son menores, con la misma cantidad de obra realizada. Al comparar el sistema actual con el escenario 2, éste último disminuye los costos promedio y la fecha de entrega. Depende de la empresa decidir por cuál de estos escenarios opta de acuerdo con su conveniencia.

La simulación de escenarios alimentada a partir del análisis de las líneas de balance permite la comparación y la toma de decisiones con menor incertidumbre que la proporcionada a través del conocimiento empírico.

Dado que los proyectos de construcción se componen en gran medida por tareas repetitivas, la metodología implementada en el estudio puede expandirse a otras actividades de la construcción, permitiendo desglosar y analizar

los procesos constructivos, con la utilización de la simulación de operaciones, y concebir escenarios, con la ayuda de las líneas de balance.

El proceso de planeación de actividades y definición de costos de un proyecto, requiere de un excelente conocimiento con el fin de mejorar la certeza de los pronósticos. Tal conocimiento puede obtenerse a través de la experiencia, en cuyo caso resulta más lenta su consecución. Herramientas como la línea de balance y la simulación de operaciones, permiten más rápidamente y con menos incertidumbre, generar la información necesaria para una acertada toma de decisiones en las etapas de planificación y ejecución de proyectos de construcción, tal como lo evidencia el ejercicio realizado.

Referencias

- [1] D. W. Halpin y L. S. Riggs. *Planning and analysis of construction operations* New York: John Wiley & Sons. 381 (1992). Referenciado en 32
- [2] Tao Ming Cheng y Chung Wei Feng. *An effective simulation mechanism for construction operations* *Automation in construction*. **12**(3), Taiwan, 227–244 (2003). Referenciado en 32
- [3] S. AbouRizk y K. Mather. *Simplifying simulation modeling through integration with 3D CAD*. *Journal of Construction Engineering and Management*, 265–275 (July–August 1999). Referenciado en 32
- [4] Julio Martinez. *Stroboscope state and resource based simulation of construction processes*. *University of Michigan*, 1996. Referenciado en 32
- [5] D. Kelton, R. Sadowski y D. Sturrock. *Simulación con software Arena*. *McGraw Hill Interamericana*, Cuarta edición, México, 629 (2008). Referenciado en 32
- [6] Vicente González, Luis Fernando Alarcón and Pedro Gazmuri. *Design of work in process buffers in repetitive building projects: a case study*. 14th annual conference of international group for lean construction. Proceedings IGLC–14, Santiago, Chile, 2006. Referenciado en 33
- [7] Fabio K. Schramm, Guilherme L. Silveira and Carlos T. Formoso. *A proposal for reusing simulation models in the design of production systems in construction*. *CIBW782008 International Conference on Information Technology in Construction*, Santiago, Chile, 2008. Referenciado en 33

- [8] J. E. Córdoba y M. Delgado. *Simulación digital de procesos constructivos SISPLAN*. Universidad de los Andes, Santa Fe de Bogotá, 104 (2002). Referenciado en 33
- [9] Diego Echeverry, Holmes Páez y Harrison Mesa. *Simulación digital de procesos de construcción de estructura en concreto: casos de estudio práctico en Bogotá*. *Revista Ingeniería de Construcción*, **23**(2), 64–71 (2008). Referenciado en 33
- [10] Luis F. Botero y Harlem Acevedo. *Simulación digital en un proyecto de construcción en Colombia*. *Revista Universidad EAFIT*, **45**(155), 45–59 (2009). Referenciado en 33
- [11] David Arditi, Onur Behzat Tokdemir and Kangsuk Suh. *Effect of learning on line of balance scheduling*. *International Journal of Project Management*, **19**(5), 265–277 (July 2001). Referenciado en 33, 34
- [12] D. W. Johnston. *Linear scheduling method for highway construction*. *Journal of the Construction Division ASCE*, **107**(2), 247–61 (1981). Referenciado en 34
- [13] R. M. Reda. *RPM: Repetitive project modeling*. *Journal of Construction Engineering and management ASCE*, **116**(2), 216–30 (1990). Referenciado en 34
- [14] M. Soini, I. Leskelä and O. Seppänen. *Implementation of line of balance based scheduling and project control system in a large construction company*. *12th Annual conference of Lean Construction*, Elsinore, Denmark, 2004. Referenciado en 34
- [15] David Arditi, Onur B. Tokdemir and Kangsuk Suh. *Challenges in line of balance scheduling*, *Journal of Construction Engineering and Management*, **128**(6), 545–556 (December 2002). Referenciado en 34
- [16] Luis F. Botero y Martha E. Álvarez. *Simulación digital, una herramienta útil para la planificación y ejecución de los proyectos de construcción en Colombia Segunda fase*. Informe de investigación, *Universidad EAFIT*, 127 (2009). Referenciado en 35
- [17] J. Banks, J. Carson, B. Nelson and D. Nicol. *Discrete-event system simulation*. *New Jersey: Prentice Hall*, 4th ed., 608 (2005). Referenciado en 37