

Simulación de procesos constructivos utilizando tecnología 4D. Caso: Obra Parque La Música Residencial

Carlos Martínez¹, Moisés Martínez², Mariano Briceño Yépez³, Zulay Giménez Palavicini⁴

¹ Universidad Politécnica de Madrid. cimarpe@gmail.com

² Inversiones Bricket C.A. Urb. Del Este. Av. Concordia Esquina 3 y 4 . Qta. Bricket ACV N° 8. Barquisimeto. Edo. Lara. Venezuela moalmaro@gmail.com

³ Inversiones Bricket C.A. Presidencia. Urb. Del Este. Av. Concordia Esquina 3 y 4 . Qta. Bricket ACV N° 8. Barquisimeto. Edo. Lara. Venezuela. mby@bricket.com.ve

⁴ Universidad Centrooccidental Lisandro Alvarado UCLA. Decanato de Ingeniería Civil. Antigua escuela ferroviaria. Prolongación Av. L a Salle. Barquisimeto. Venezuela. zulaygimenez@ucla.edu.ve

Palabras clave: construcción virtual, modelo 4D, productividad, control de tiempos, control de calidad

1. Introducción

En el diseño y planificación de una obra civil a menudo hay que tomar decisiones complejas e importantes para el futuro del proyecto, estas decisiones no solo tienen que ver con la parte técnica estructural sino también con la parte constructiva y económica, siendo de gran riesgo en muchos casos para el éxito del proyecto. Estas variables pueden estar relacionadas con: Establecer la maquinaria a utilizar, el balance de las cuadrillas de trabajo, la ruta o trazabilidad de ejecución, los materiales a utilizar, el método constructivo, etc. Para tomar esta decisión el ingeniero podría hacer un ensayo de campo para cada una, pero esto resultaría muy costoso, también podría generar un modelo matemático o estadístico de simulación, pero resultaría lento y se necesita grandes habilidades matemáticas además de dejar de lado múltiples variables imposibles de incluir en el modelo.

Las herramientas de visualización y modelación de construcción surgen como una alternativa en la cual apoyarse para la toma de decisiones y la planificación de proyectos, debido a que permiten la detección de problemas tempranamente, las deficiencias de los sistemas constructivo y pérdidas de recursos más elevados en las distintas fases del proceso, permitiendo tomar los correctivos necesarios mucho tiempo antes de que suceda el problema.

La simulación de procesos constructivos es la representación de un proceso o sistema a través de un modelo computacional, con el cual se puede experimentar y probar distintas alternativas, de modo de tener una mejor base para tomar la decisión correcta. Esto nos permitiría poder ver desde diferentes puntos de vista las diversas maneras en que pudiera desarrollarse dicho proceso. La simulación es una metodología que permite apoyar la toma de decisiones.

En el diseño de sistemas, antes de que estos sean construidos, se pueden analizar los diferentes escenarios del proceso y del avance de la obra, pudiendo observar e identificar los

posibles causantes de retrasos o trabas en los el desarrollo de la obra, probando diferentes políticas de operación, antes de que estas sean implementadas.

Por sí misma, la simulación de procesos constructivos no resuelve los problemas, sino que ayuda a:

- Identificar los problemas de tipo más relevantes.
- Evaluar cuantitativamente las soluciones que pudieran aplicarse.
- Determinar cuál de las soluciones sería la más apropiada, pudiendo ser evaluada desde diferentes puntos de vista, esto con el fin de poder seleccionar la mejor alternativa y hasta la más económica.

Las Ventajas con respecto de análisis tradicionales se pueden listar:

- Se incorpora el efecto de la variabilidad en el rendimiento del proceso productivo.
- Permite modelar relaciones lógicas complejas.
- Utilización de recursos y mejor distribución de los mismos.
- Rendimiento de los trabajadores.
- Restricciones.
- Cantidad máxima de trabajadores por espacio.
- Asignación de prioridades a trabajos más importantes.

Esta simulación puede dirigirse a diferentes procesos constructivos; en este caso particular es la construcción de una edificación de tipo residencial en la cual se presentan diferentes procesos repetitivos que fueron simulados con el fin de determinar los retrasos originados en el desarrollo de la obra y así optimizarlos. También se establecieron comparaciones entre la planificación teórica del proyecto y la ejecución real existente hasta una fecha determinada.

Como objetivos generales del proyecto se planteo la aplicación de diferentes herramientas computacionales de simulación para optimizar y gestionar un proyecto de obra civil, así como también el diseño de la trazabilidad teórica o secuencia constructiva ideal de los elementos estructurales de la infraestructura y superestructura de la obra, la evaluación de las diferentes alternativas de la programación y secuencia del proceso constructivo utilizando simulación 4D, analizando así las diferentes variables que pudieran influir en el rendimiento de la obra. Esto permitió establecer comparaciones entre la trazabilidad teórica y la trazabilidad real ejecutada, así como también entre la programación inicial y el cumplimiento de lo programado, analizando las variables que pudieron influir en dicha variabilidad. El caso de estudio fue la obra “Parque La Música Residencial”.

2. Metodología

La simulación se enfocó directamente en prever las dificultades que podían presentarse en el desarrollo y construcción de la obra en estudio (Parque la Música Residencial) y de la comparación entre el modelo de simulación con la realidad del proceso. Esto constituyó por lo tanto un análisis y su respectiva localización de las fallas y retrasos que se presentaron con el fin de poder optimizar el proceso constructivo.

Para la realización del modelo se necesitó crear un plan estratégico de construcción virtual guiado desde la concepción del proyecto hasta el inicio de la ejecución de la obra, para ello

fue necesario recurrir a herramientas computacionales modernas que interactúan entre sí para formar el concepto de simulación 4D como una integración.

La simulación 4D define la inclusión de la cuarta dimensión a los modelos 3D conocidos anteriormente permitiendo de esta manera visualizar en tiempo real el avance de la obra y poder crear cambios dentro de la trazabilidad de ejecución sin necesidad de pruebas de campo que a la larga se traducen en costo y tiempo perdido dentro del proyecto.

Como un paso inicial se estableció y definió lo que se quería simular, dentro de las múltiples variables que pudieran encontrarse en un proyecto fue necesario establecer el rango de estudio. Para el caso de este trabajo de investigación se delimitó el estudio a los elementos estructurales de la infraestructura (cabezales y vigas de riostras) y superestructura (pantallas y losas) de los seis primeros niveles de la torre “A” del proyecto.

La empresa promotora y constructora proporcionó la información técnica del proyecto referente a los planos digitales de la edificación y todos los detalles constructivos que fueron necesarios para la elaboración del modelo, así como la información pertinente a los rendimientos esperados en función de la cantidad de personal, materiales y equipos disponibles para la ejecución de la obra.

Utilizando como base la planta de fundaciones (cabezales y vigas de riostra) de la torre “A” y torre “B” de la edificación, se analizó la trazabilidad de ejecución planificada para la realización del proyecto.

Seguidamente se comenzó la creación del modelo partiendo de los planos estructurales de la planta de cada nivel y se elaboraron los elementos en tercera dimensión con la utilización del software “Autocad Architecture 2008”, es decir los elementos estructurales en dos dimensiones se convirtieron en sólidos o figuras en tercera dimensión.

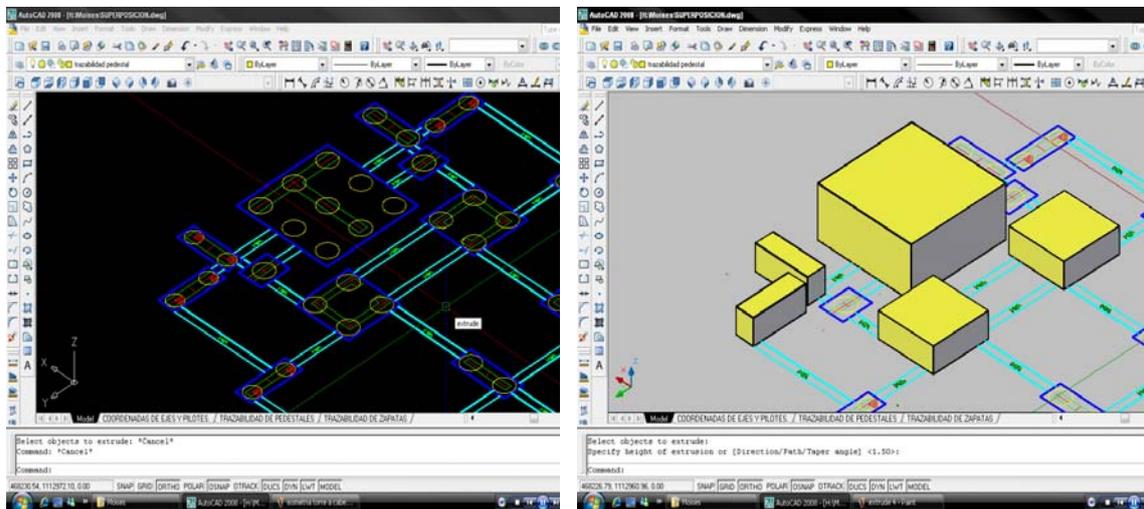


Figura 1: Conversión de elementos estructurales de dos a tres dimensiones.

Estos sólidos se clasificaron e identificaron cuidadosamente por “Layers” o capas según el orden de ejecución esperada, tratando de crear nombres o códigos para estos layers de fácil manejo debido a que los mismos serían utilizados en otras partes de la programación.

Una vez levantadas las plantas estructurales de cada nivel en tercera dimensión, se acoplaron secuencialmente según orden de construcción con el objetivo de descartar incongruencias en los diseños geométricos de los elementos así como también colisiones entre los mismos. Estas colisiones están referidas directamente a la disposición de ejecución de los elementos estructurales planificados que pudieran generar un retraso en la programación original establecida y ocasionar cambios en la trazabilidad diseñada.

Posteriormente se procedió con la creación de una base de datos recurriendo al programa “Microsoft Office Access 2007”, dicha base de datos fue la encargada de realizar la interface entre el modelo 3D y la programación de obra esperada. En ella se encuentran incluidos cada uno de los Layers que identifican los diferentes elementos estructurales que componen el modelo, acompañados de una codificación o “Level” que los relaciona dentro del ambiente del programa SmartPlant Review (SPR) y del respectivo archivo al cual pertenecen.

La asignación del tiempo de ejecución, fecha de inicio, fecha de fin, precedencias de construcción, recursos (horas hombre, materiales) entre otros, estuvo basada en el Diagrama de Gantt y la Teoría de Precedencias y es lo que hizo posible la inserción del tiempo como una cuarta dimensión al modelo tridimensional existente. Estos tiempos de duración de construcción de los elementos fueron calculados en base la cantidad de cuadrillas disponibles para la realización de los mismos y teniendo en cuenta la existencia de los equipos y materiales necesarios para garantizar que no existiesen retrasos en su elaboración. La planificación fue realizada en obra con bases en una planificación previa realizada por los ingenieros de producción y proyectistas. Una vez realizada dicha planificación fue discutida con el personal que se encargaría directamente de su ejecución con el fin de lograr su aprobación y establecimiento de plazos de ejecución de la estructura en estudio.

La interface del modelo tridimensional con el tiempo como una cuarta dimensión se realizó en el software Smartplant Review, una vez acoplados se procedió a la ejecución del programa de simulación, en el cual se visualizó el avance teórico de la obra en tiempo real.

Una vez ejecutado el proceso de simulación se procedió a establecer evaluaciones de rendimientos de obra y comparaciones entre lo planificado y lo ejecutado mediante la construcción de gráficas que representaban la evolución del proceso y el porcentaje de cumplimiento de lo programado. Los datos recogidos permitieron comparar y relacionar la actualidad de la obra para así poder optimizar los procesos que estaban ocasionando algún retraso, lo cual generó una serie de resultados que sirvieron para decidir hasta qué punto era posible optimizar el proceso. Esta optimización estuvo dirigida directamente al ahorro del factor tiempo, generando así un proceso más preciso y libre de retrasos.

3. Resultados

3.1. Diseño de la secuencia constructiva ideal de los elementos estructurales de la infraestructura y superestructura de la obra “Parque la Música Residencial”.

Para la elaboración de la secuencia constructiva de los pilotes se ensayaron distintas rutas de trabajo en función de mantener ciertos criterios normativos y de constructabilidad que fueron discutidos con los contratistas para la perforación de los pilotes. La trazabilidad definitiva aprobada por el departamento de producción del proyecto, permitió facilitar el acceso a los camiones de concreto sin hacer interferencia con otros contratistas de otras actividades.

3.2. Determinación de incongruencias en los diseños geométricos de los elementos estructurales así como también colisiones entre los mismos.

La simulación de procesos constructivos requiere una serie de pasos previos en los que se debe hacer una revisión de los planos del proyecto, esto permite detectar errores de diseño así como de dibujo. Por otro lado también se debe hacer una revisión general del cronograma de ejecución del proyecto.

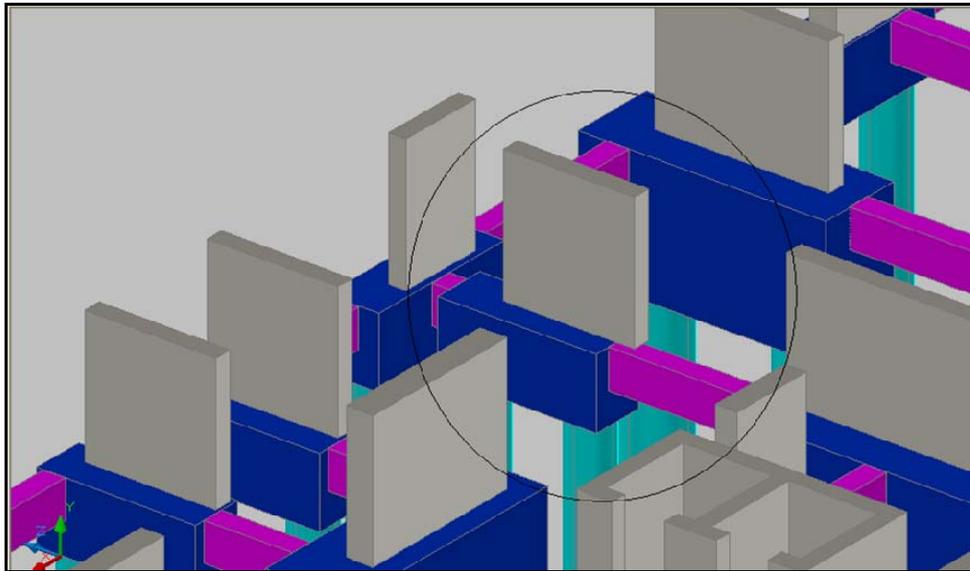


Figura 2: Detalle del elemento estructural desplazado

En el caso de los planos, una vez realizadas la clasificación de las plantas por separadas estas son levantadas en modelos 3D para después ser ensambladas en función a una referencia externa una a una hasta construir el modelo general del proyecto con los elementos que se van a simular.

En el proceso del ensamblaje de los elementos estructurales del proyecto en estudio se detecto un desplazamiento en una pantalla ubicada en el nivel E2 con respecto al cabezal donde sería ubicada ésta.

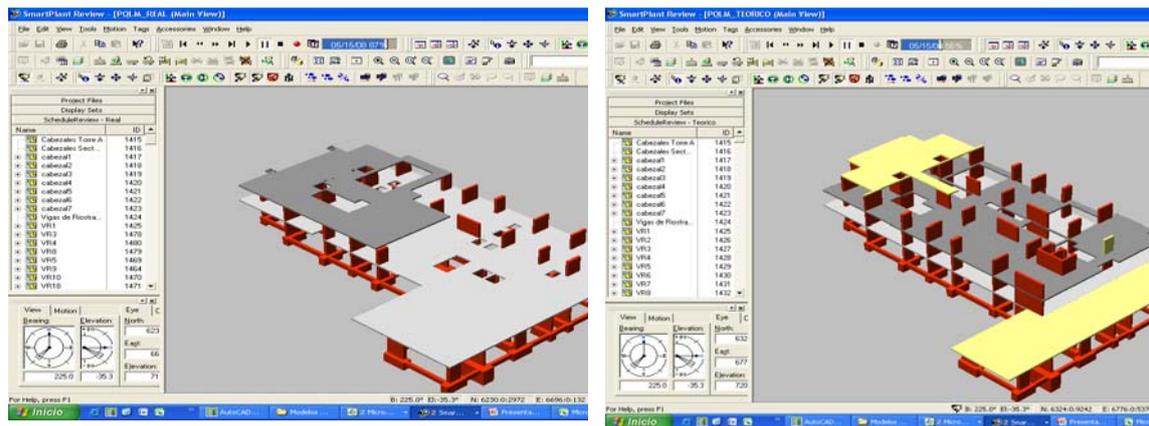
El hecho de detectar incongruencias geométricas en los planos es una de las bondades de la modelación 4D, puesto que la superposición de plano es un paso previo a la generación de la simulación dinámica.

3.3. Evaluación de las diferentes alternativas de la programación y secuencia del proceso constructivo utilizando simulación 4D, analizando las diferentes variables que pudieran influir en el rendimiento de la obra.

La obra cuenta con una octava versión de su programación general, puesto que se han hecho mejoras en el proceso y se ha tratado de acercar lo más posible el programa teórico a la realidad. Variables como las duraciones de ciertas actividades, detectar solapes de actividades que dependen entre si y hacer más sensato el programa son las que han motivado a cambiar la fecha de entrega, el uso de la simulación 4D como herramienta de apoyo para la toma de decisiones se hace de una meritoria importancia que le da al gerente del proyecto una visión más clara y una proyección más precisa de la obra. Antiguamente Para resolver este tipo de problemas se usaron técnicas durante años como lo es la línea de balance, las empresas contratistas involucradas en proyectos de envergadura la utilizan para resolver problemas

logísticos, sin embargo con la implementación de las tecnologías de la información (Simulación 4D) se facilita y simplifica aun más la línea de balance pudiéndose obtener una perspectiva más clara del proyecto.

Para el mes de mayo de 2008, la obra contaba con poco cumplimiento en las actividades planificadas cada semana. Para mejorar esta situación se hizo una investigación de la producción semanal asociada a los recursos, determinándose el personal necesario para disminuir el atraso gradualmente a lo largo de 3 meses, obteniéndose una proyección de la obra.



Modelo real

Modelo teórico

Figura 3: Estatus de la obra al 15 de mayo de 2008, momento en el que se hizo el ejercicio.

El ejercicio involucró los recursos usados en obra con la producción de cada semana, para determinar si la manera en que se estaba trabajando era óptima para mantener los estándares de productividad deseado. Mediante la modelación 4D se pudo observar el estatus de la obra para una fecha concreta, detectándose de esta manera que las metas propuestas por la planificación inicial no se estaban cumpliendo, por tanto se decidió aumentar la producción y medir el impacto en las cantidades de obra producidas.

El correctivo consistió en organizar las cuadrillas de trabajo de manera de avanzar simultáneamente en vaciado de placa como en vaciado de pantallas, incrementando y especializando el personal de estas actividades con el objetivo de favorecer la curva de aprendizaje.

3.4. Visualización de la programación de obras

Generalmente las programaciones que se realizan en PERT, CPM o en GANTT no se visualiza el avance de la obra de manera racional, sino a través de barras, nodos, etc. Sin embargo con esta simulación se puede apreciar literalmente como se va construyendo el edificio virtualmente. No se requiere imaginación, ni preparación para entender e interpretar la información presentada.

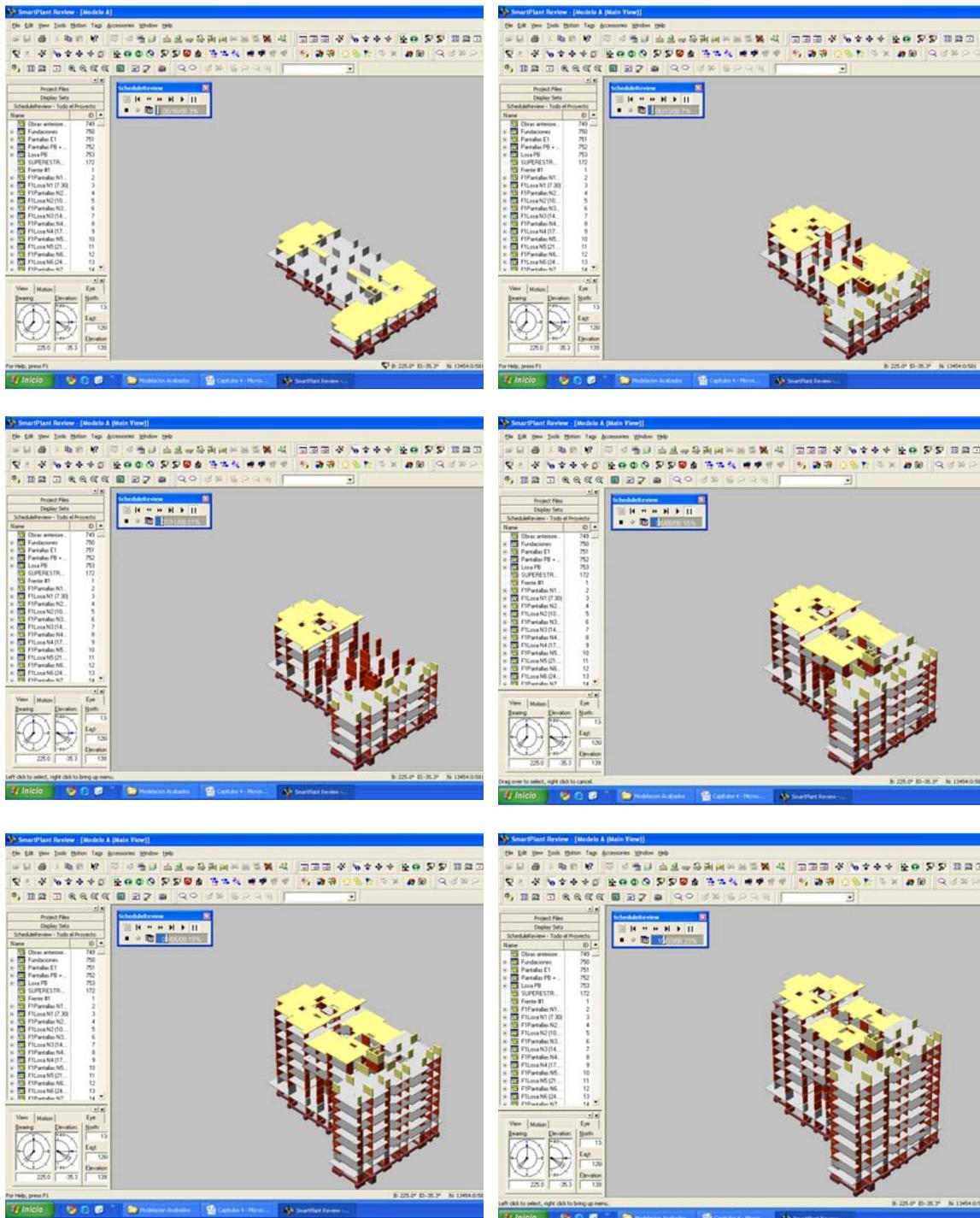


Figura 4: Diversas fechas de simulación

4. CONCLUSIONES

Con la investigación realizada se pudo comprobar que la simulación de procesos constructivos utilizando tecnología 4D es una herramienta de gran utilidad en la planificación, ejecución y control de proyectos de edificación.

Desde el punto de vista de planificación permite enfocar de una manera más específica la programación de la ejecución de las diferentes actividades de la obra con mayor cautela y seguridad, permitiendo así que no existan choques entre el desarrollo de los elementos que componen la obra ni retrasos por los mismos.

Respecto a la ejecución se demostró que tiene gran utilidad en el seguimiento de la obra y el manejo de los tiempos reales de ejecución estimados en la planificación del proyecto. El control en cuanto a la ejecución y construcción de los elementos fue manejado de una manera más sencilla, puesto que con la simulación se logró dar un mejor trato de la planificación a corto plazo y a su vez permitió dar un control más directo en relación a la estimación de cantidades de obra.

Por otra parte la simulación del proceso constructivo de la obra “Parque la Música Residencial” permitió lograr el diseño de una secuencia constructiva, así como también crear varias opciones de trazabilidad para la creación de diferentes frentes de trabajo que logró el mejor desenvolvimiento de los procesos dentro de la obra, permitiendo así que los mismos no generaran interferencias entre unos y otros. Igualmente permitió detectar incongruencias entre los elementos estructurales de la infraestructura y superestructura de la edificación.

La simulación 4D permitió establecer comparaciones entre un modelo de seguimiento teórico, el cual estaba ajustado a una programación creada por los ingenieros del departamento de producción y un modelo real que se regía por el seguimiento diario de las actividades que se desarrollaban en la obra, así como la medición de rendimientos existentes en el desarrollo y ejecución de la edificación. Con esta comparación entre el modelo real y teórico de avance de obra, la cual arrojó como resultado el cálculo del retraso de la obra respecto del cronograma original esperado, se tomaron acciones correctivas en cuanto a la planificación realizada semanalmente y a corto plazo con el fin de disminuir el retraso existente.

Las técnicas de construcción virtual son una potente herramienta gerencial en los proyectos civiles, permitiendo así disminuir activamente la probabilidad de incrementar los tiempos y costos usados en la construcción. Agregar variables a los modelos es el objetivo de los investigadores de esta área, pudiendo así bajar los tiempos que se toman los gerentes en tomar una decisión clave para el futuro del proyecto; actualmente los costos se ingresan al modelo como una quinta dimensión, y en un corto periodo de tiempo las conclusiones que se pueden sacar de una propuesta van más allá de las implicaciones en el tiempo, estas repercuten directamente en el análisis financiero y el control presupuestal. Estas tecnologías son el punto de inicio de un nuevo mundo que se avecina en la gestión eficiente de los proyectos de construcción.

Agradecimientos

Agradecemos a la empresa Inversiones Bricket C.A. por su apertura ante nuevos retos e innovaciones tecnológicas que aportan mayor productividad y desarrollo a las soluciones constructivas de nuestro país.

Referencias

Akinci, B., Fischer, M., Levitt, R. and Carlson, R. (2000). *Formalization And Automation Of Time-Space Conflict Analysis*. Working Paper #59 [versión electrónica]. CIFE, Stanford.

- Alarcón, L. (2005a) *Tecnología De Información Para El Mejoramiento De La Gestión De Proyectos En Chile: Modelación Multidimensional* [versión electrónica]. Publicación GEPUC. Santiago de Chile.
- Alarcón, L. (2005b). *Lean Construction Y Tecnología De Información, Innovación Estratégica Para La Construcción*. [versión electrónica]. Publicación GEPUC. Santiago de Chile.
- Aouad, G., Lee, A., Wu, S., (2004). *Constructing The Future nD Modeling* [versión electrónica]. London.
- Botero, L. (2006). *Construcción Sin Perdidas, Análisis De Procesos Y Filosofía Lean Construction*. Medellín: Construdata.
- Fischer, M., Haymaker, J., Liston, K. (2003). *Benefits Of 3D And 4D Models For Facility Managers And AEC Service Providers. 4D CAD And Visualization In Construction* [versión electrónica]. Stanford.
- Fuster, A. (2004). *Elaboración De Una Guía Práctica Para El Uso Conjunto De Análisis Y Simulación De Operaciones De Construcción*. Santiago de Chile: PhD tesis.
- Goldstein, H. (2001). 4D: Science Fiction Or Virtually Reality?, (<http://www.construction.com/NewsCenter/it/archive/01-20010416pf.jsp>)
- Hänninen, R. (2006). *Building Lifecycle Performance Management And Integrated Design Processes: How To Benefit From Building Information Models And Interoperability In Performance Management*. Presentation Watson Seminar Series Stanford University [versión electrónica]. Stanford.
- Menéndez, J., Garnica, R. (2001). *Simulación De Procesos Constructivos De Naturaleza Cíclica*. XIII Congreso Nacional De Ingeniería Civil. Puno.
- Mourgues, C. Fischer, M. (2001). *Investigación En Tecnologías De Información Aplicadas A La Industria A/E/C (arquitectura, ingeniería y construcción)*. CIFE Technical Report #124 [versión electrónica]: Stanford University. Stanford.
- Rischmoller, L., Alarcón, L. (2003a). *Planificación Y Programación De Obras De Construcción: Simulación 4D*. Revista BIT [versión electrónica]. Santiago de Chile.
- Rischmoller, L., M. Fisher, R. Fox and L. Alarcón. (2003b). *4D Planning And Scheduling (4D-PS): Grounding Construction IT Research In Industry Practice*, Construction Information Technology CIB W78 International Conference – IT in Construction in Africa, Mpumalanga, South Africa.
- Smith, S. (2001). 4D CAD Goes Beyond Mere Representation, "4D Is Far Ahead Of Where Most Of The Construction Industry Is Willing To Think" (http://www.aecvision.com/October2001/1_feature_full.pdf).
- V. Kamat, J. Martínez. (2004). *Comparison of simulation-driven construction operations visualization and 4D CAD*. Proceedings of the winter simulation conference [versión electrónica]. Virginia. (2004).