

**PLANIFICACIÓN DE ESTRUCTURAS TEMPORALES DE UN PROYECTO DE
CONSTRUCCIÓN, CON BASE EN MODELOS BIM 5D Y DINÁMICA DE
SISTEMAS**

**JOSÉ ALBERTO GALVIS GUERRA
JONATHAN JAVIER RUIZ SARMIENTO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2016**

**PLANIFICACIÓN DE ESTRUCTURAS TEMPORALES DE UN PROYECTO DE
CONSTRUCCIÓN, CON BASE EN MODELOS BIM 5D Y DINÁMICA DE
SISTEMAS**

**JOSÉ ALBERTO GALVIS GUERRA
JONATHAN JAVIER RUIZ SARMIENTO**

Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero Civil

**Director
OMAR GIOVANNY SÁNCHEZ RIVERA
Magister en Ingeniería Civil**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2016**

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	12
1. METODOLOGÍA	15
1.1 FASE 1: IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES DE AFECTACIÓN EN LA PLANIFICACIÓN EN LA PLANIFICACIÓN DE ESTRUCTURAS TEMPORALES	16
1.2 FASE 2: ELABORACIÓN DE LA PLANIFICACIÓN DE ESTRUCTURAS TEMPORALES EN UN CASO ESTUDIO	16
1.2.1 Descripción del caso de estudio	16
1.2.2 Formulación del proceso de planificación	17
1.2.3 Planificación de la instalación y desinstalación de estructuras temporales en un caso estudio	21
1.3 FASE 3: ALGORITMO PARA LA PLANIFICACION DE ESTRUCTURAS TEMPORALES CON BIM 5D Y DINÁMICA DE SISTEMAS	22
2. RESULTADOS	23
2.1. FASE 1: IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES DE AFECTACIÓN EN LA PLANIFICACIÓN DE ESTRUCTURAS TEMPORALES	23
2.2. FASE 2: ELABORACIÓN DE LA PLANIFICACIÓN DE ESTRUCTURAS TEMPORALES EN UN CASO ESTUDIO	26
2.2.1 Planificación de la instalación y desinstalación de estructuras temporales en un caso estudio	27
2.2.2. Planificación de la instalación y desinstalación de estructuras temporales en un caso estudio.	27
2.3 FASE 3: ALGORITMO PARA LA PLANIFICACION DE ESTRUCTURAS TEMPORALES CON BIM 5D Y DINÁMICA DE SISTEMAS	33
2.3.1 Descripción del diagrama	33

3. DISCUSIÓN	36
4. CONCLUSIONES	39
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	40
BIBLIOGRAFIA	43

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Metodología de investigación	15
Figura 2. Estructuras temporales a utilizar.	17
Figura 3. Metodología para elaborar la planificación del caso estudio	18
Figura 4. Flujo de la formaleta en un proyecto de construcción	19
Figura 5. Comportamiento temporal de niveles del sistema	21
Figura 6. variables de afectación en planificación de estructuras temporalesFuente. Elaboración propia.	26
Figura 7. relación entre variables de afectación y variables del proyecto.	26
Figura 8. Modelo BIM 3D del caso estudio.	28
Figura 9. Modelado del sistema de instalación de formaleta en dinámica de sistemas	28
Figura 10. Simulación del almacenamiento de formaleta en dinámica de sistemas.	29
Figura 11. Simulación del armado de formaleta en dinámica de sistemas	30
Figura 12. Modelo BIM 5D del caso estudio.	32
Figura 13. Algoritmo de planificación de estructuras temporales con BIM 5D y dinámica de sistemas	33

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Flujos y niveles para dinámica de sistemas	27
Tabla 2. Cantidad de estructuras temporales	28

RESUMEN

TITULO: PLANIFICACIÓN DE ESTRUCTURAS TEMPORALES DE UN PROYECTO DE CONSTRUCCIÓN, CON BASE EN MODELOS BIM 5D Y DINÁMICA DE SISTEMAS*

AUTORES: JOSE ALBERTO GALVIS GUERRA
JONATHAN JAVIER RUIZ SARMIENTO**

PALABRAS CLAVE: Estructuras temporales, planificación, *building information modeling*, dinámica de sistemas.

DESCRIPCIÓN:

La deficiente planificación de estructuras temporales en proyectos de construcción ocasiona graves problemas de apilamiento de estas estructuras, generando pérdida de espacio, incomodidad, y principalmente pérdida de tiempo involucrado directamente todos los aspectos económicos del proyecto. Building Information Modeling (BIM), es la representación digital y automatizada de las diversas dimensiones de un proyecto, utilizando software comercialmente disponible. La dinámica de sistemas, permite modelar y estudiar el comportamiento temporal de un sistema en función del tiempo. Este estudio tuvo por objetivo proponer una metodología para la planificación de estructuras temporales, con base en modelos BIM 5D y dinámica de sistemas. La metodología se dividió en tres fases: en la primera fase, se identificó un conjunto de variables que afectan la planificación de estructuras temporales; en la segunda fase, se realizó la planificación de estructuras temporales de un caso estudio aplicando BIM 5D y dinámica de sistemas; finalmente, en la fase tres se elaboró un algoritmo para desarrollar la planificación de estructuras temporales con modelos BIM y dinámica de sistemas. Se encontró que el uso de BIM 5D y dinámica de sistemas es posible planificar la instalación de estructuras temporales en proyectos de construcción de concreto reforzado y permite la disponibilidad, consistencia, facilidad de acceso y confiabilidad de la información del proyecto, en pro de reducir la incertidumbre en la planificación identificando los periodos de inactividad de las estructuras temporales agregando valor al proceso constructivo, aumentando la calidad del proceso de toma de decisiones para la mejora continua del proceso de planificación.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil, Director

ABSTRACT

TITLE: TEMPORARY STRUCTURES PLANNING A CONSTRUCTION PROJECT, BASED ON BIM 5D MODELS AND SYSTEM DYNAMICS*

AUTHORS: JOSE ALBERTO GALVIS GUERRA
JONATHAN JAVIER RUIZ SARMIENTO**

KEYWORDS: temporary facilities, construction planning, building information modeling, system dynamics

DESCRIPTION

Poor planning of temporary structures in construction projects causes serious problems stacking of these structures, generating waste of space, inconvenience, loss of time and mainly involved directly all economic aspects of the project. Building Information Modeling (BIM) is the automated digital representation of the various dimensions of a project using commercially available software. System dynamics, allows to model and study the temporal behavior of a system as a function of time. This study aimed to propose a methodology for the planning of temporary structures, based on BIM 5D models and system dynamics. The methodology was divided into three phases: the first phase, a set of variables that affect the planning of temporary structures identified; in the second phase, temporary structures planning a case study applying BIM 5D and system dynamics performed; finally, in phase three an algorithm was developed to develop the planning of temporary structures with BIM models and system dynamics. It was found that the use of BIM 5D and system dynamics is possible to plan the installation of temporary structures in construction projects reinforced concrete and allows availability, consistency, accessibility and reliability of information project towards reducing identifying uncertainty in planning downtime of temporary structures adding value to the construction process, increasing the quality of decision-making process for continuous improvement of the planning process.

.

* Project of grade

** Faculty of Engineering Physical Mechanical, School of Engineering Civil. Director

INTRODUCCIÓN

Las estructuras temporales (ET) en un proyecto de construcción se definen como aquellas estructuras de estancia periódica en obra, que facilitan la construcción en sitio de los componentes del proyecto [1]. En la construcción de estructuras de concreto reforzado se requieren grandes cantidades de ET, como: formaletas, andamios, sistemas de apuntalamientos, torre grúa, entre otras.

En los proyectos de construcción es común utilizar formaletas alquiladas lo que obliga a los constructores a utilizarlas el máximo tiempo posible, generando tiempos no contributivos con el transporte interno de la formaleta [3], baja productividad debido a fallas en su suministro para la ejecución de actividades que las requieren para ser completadas [2].

Una adecuada planificación de los tiempos de instalación y desinstalación de las estructuras temporales es crucial en obra para controlar el transporte interno, el estancamiento y mejorar la productividad de la instalación de las ET.

Tradicionalmente, la planificación de proyectos de construcción es realizada en base a la experiencia de los involucrados y de la información disponible de procesos similares realizados en el pasado, utilizando herramientas que dan apoyo a esta planificación como las redes CPM, diagramas de Gantt y estructuras de desglose del trabajo, entre otras herramientas complementarias fundamentadas en análisis determinísticos.

La realidad de los proyectos indica que existe una alta variabilidad en el desarrollo de las actividades que conforman a los procesos constructivos, lo cual conlleva a afirmar que las técnicas y herramientas utilizadas para planificar los proyectos de

construcción presentan desventajas que limitan sus pronósticos y buen desempeño de los proyectos. Entonces, se hace necesario contar con adecuados instrumentos para la toma de decisiones, con el apoyo de las nuevas tecnologías y modelos de simulación que permitan tomar decisiones sobre la asignación de recursos a los procesos constructivos y prever con mejor certeza las situaciones que se darán en obra frente a cambios en algunas de las variables de entrada de los modelos de simulación planteados.

La simulación digital de procesos constructivos modela el estado del sistema a lo largo del tiempo, con base en aproximaciones continuas. Es decir, el estado del sistema (proceso de instalación de estructuras temporales) cambia continuamente y se basa en ecuaciones diferenciales para determinar los valores de las variables continuas del sistema [4]. La dinámica de sistemas, es un método de simulación que permite simular el comportamiento temporal de sistemas complejos (sistemas con realimentación) [5,6] de manera continua e identificar las relaciones entre los componentes y parámetros del sistema a modelar.

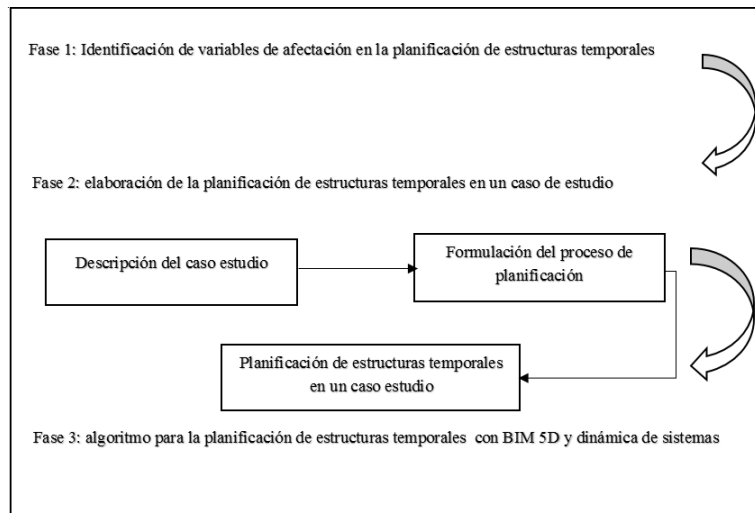
Por otro lado, la tecnología BIM *Building Information Modeling*, es una plataforma tecnológica que integra arquitectura, ingeniería y construcción, con el objetivo de modelar la geometría de las edificaciones con la información necesaria para facilitar su diseño y construcción [7]. Como parte de BIM la modelación BIM 5D, busca conectar la planificación de las actividades del proyecto de construcción con el modelo tridimensional del proyecto, con el fin de visualizar su crecimiento en el tiempo, identificando actividades hechas y ayudando a cuantificar la magnitud de los compromisos a ejecutar.

En este trabajo se presenta una metodología para la planificación de estructuras temporales en un proyecto de concreto reforzado, a partir de modelos BIM 5D y dinámica de sistemas.

1. METODOLOGÍA

En desarrollo de la investigación para planificar estructuras temporales, en un proyecto de concreto reforzado a partir de modelos BIM 5D y dinámica de sistemas, se ha desarrollado la metodología presentada en la figura 1. Esta se dividió en tres fases: la primera, consistió en identificar un conjunto de variables que afecten la planificación de es estructuras temporales en la construcción de proyectos de concreto reforzado; la segunda fase, contempló la planificación de estrucutras temporales de un caso de estudio, con base en un modelo BIM 5D y un modelo de simulación en dinámica de sistemas; y finalmente, la tercera fase consistió enelaborar un algoritmo para la toma de decisiones en la planificación de estructuras temporales en proyectos de construcción de estructuras de concreto reforzado.

Figura 1. Metodología de investigación



1.1 FASE 1: IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES DE AFECTACIÓN EN LA PLANIFICACIÓN EN LA PLANIFICACIÓN DE ESTRUCTURAS TEMPORALES

Esta fase consistió en identificar un conjunto de variables que afectan el proceso de planificación de estructuras temporales en la construcción de estructuras de concreto reforzado. El propósito de identificar las variables es establecer los componentes y parámetros suficientes para modelar el proceso de instalación de estructuras temporales mediante dinámica de sistemas y poder planificar de una mejor forma su instalación en obra.

1.2 FASE 2: ELABORACIÓN DE LA PLANIFICACIÓN DE ESTRUCTURAS TEMPORALES EN UN CASO ESTUDIO

Contemplóla elaboración de la planificación de la instalación de estructuras temporales para una edificación de concreto reforzado de tres plantas, con sistema estructural tipo portico, consistente en vigas, columnas y sistema de losa aligerada con viguetas en una dirección.

1.2.1 Descripción del caso de estudio. El caso de estudio consiste en un edificio residencial de tres plantas con sistema estructural tipo portico resistente a momentos. Los elementos estructurales que componen la estructura en concreto reforzado serán: para la cimentación, zapatas y vigas de fundación; para el soporte de la estructura serán vigas y columnas rectangulares con acero longitudinal y transversal; el sistema de entrepiso será una losa aligerada con casetones no removibles y viguetas rectangulares de sección continua.

Para la construcción de los componentes estructurales de la cimentación y el sistema de resistencia sísmica se utilizarán como estructurales temporales formaletas metálicas y andamios. Para la construcción de las losas de entrepiso

aligeradas se utiliza un armado de estructuras temporales denominado armado tipo cama, para el cual se utilizarán estructuras temporales como: parales, cerchas, camillas y crucetas. Toda la estructura temporal utilizada se asume que es alquilada para la modelación del proyecto. En la figura 2 se observan las estructuras temporales a utilizar.

Figura 2. Estructuras temporales a utilizar.

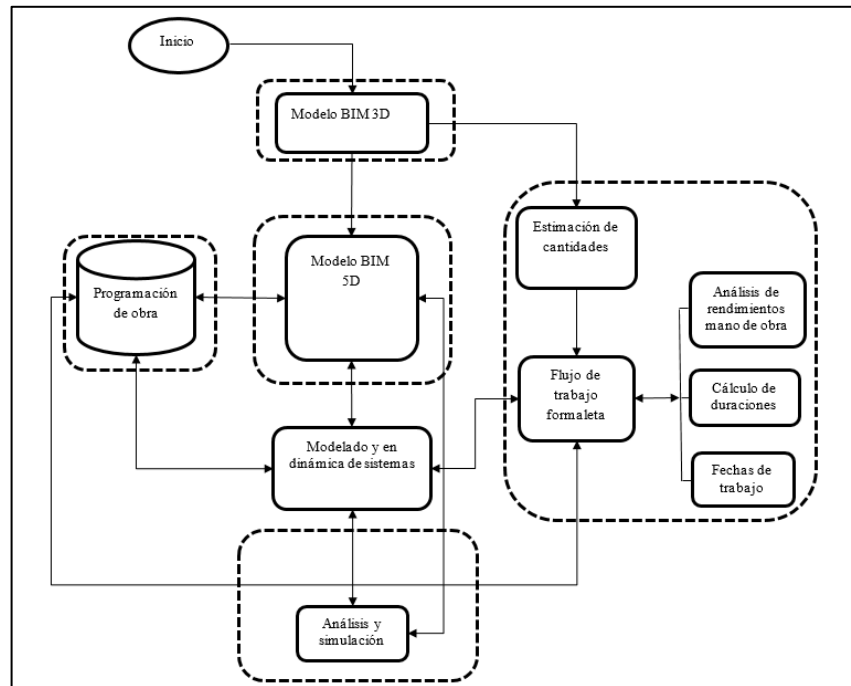


Fuente. Garcia vega equipos para construcción.

1.2.2 Formulación del proceso de planificación. La instalación de los diferentes tipos de estructuras temporales en un proyecto de construcción se debe planificar de tal forma que las variables de afectación de la planificación sean controladas para permitir el correcto desempeño de los proceso constructivos y que los objetivos del proyecto sean cumplidos. El objetivo de esta etapa, es definir la manera como se planifica la instalación y desinstalación de las estructuras temporales en proyectos de construcción de estructuras de concreto reforzado, mediante la utilización combinada de modelos BIM 5D y dinámica de sistemas.

Concretamente, para realizar la planificación de las estructuras temporales a utilizar en el caso de estudio planteado en esta investigación se plantea la metodología de la figura 3, consistente en las siguientes tareas:

Figura 3. Metodología para elaborar la planificación del caso estudio

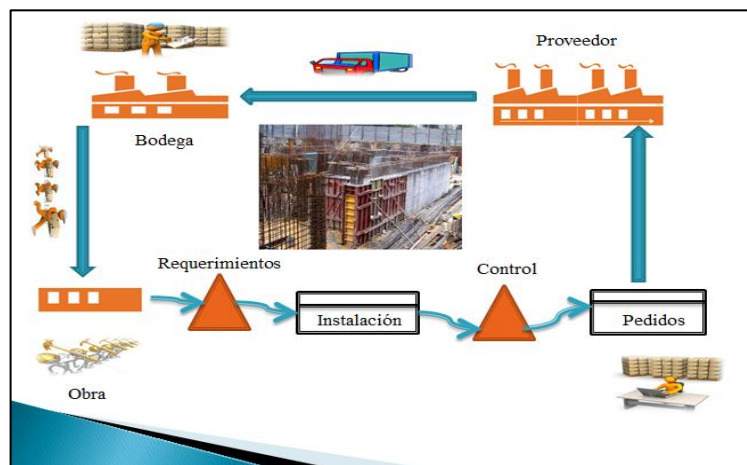


Tarea 1: elaboración de modelos BIM. Comprende la elaboración de modelos de información BIM de la edificación en estudio. Primero se realizará el modelo BIM 3D, el cual contendrá la geometría, las propiedades de los materiales, la ubicación espacial de cada elemento estructural y la modelación geométrica de cada estructura temporal requerida. Del modelo BIM 3D se extraerán las cantidades de formaleta y andamios necesarios para la construcción de la cimentación, losas, vigas y columnas del caso estudio. Seguidamente, se elabora el modelo de información BIM 5D bajo la metodología presentada en el artículo “ Metodología para la elaboración de modelos del proceso constructivo 5D con tecnologías *building information modeling*” [8], el cual permitirá unificar el modelo BIM 3D con la programación de actividades necesarias para la instalación y desinstalación de

formaleta y andamios obtenida a partir de la modelación en dinámica de sistemas para posteriormete elaborarla en Microsft Project, con el modelo BIM 5D se observará el procedimiento constructivo para ir probando la programación de obra obtenida de la instalación de las difrentes formaletas y andamios requeridos.

Tarea 2: modelado en dinámica de sistemas. El siguiente paso para la elaboración de la planificación comprenderá el uso de la dinámica de sistemas para modelar el proceso de instalación y desinstalación de formaleta como un sistema complejo (sistema con realimentación de variables). Principalmente, se modela el sistema presentado en la figura 4, que representa el flujo que debe seguir la formaleta en obra para su instalación.

Figura 4. Flujo de la formaleta en un proyecto de construcción



La modelación con dinámica de sistemas contempla principalmente la clasificación de las variables en: flujos, niveles, variables auxiliares y parametros.

En este sentido, un flujo se define como una razón de cambio que entrega cierta cantidad de formaleta en el tiempo a un lugar específico; un nivel es la acumulación de unidades a medida que pasa el tiempo en sitio determinado; una variable auxiliar almacena información necesaria para alimentar los flujos, por

ejemplo la programación de pedidos de las formaletas a los proveedores; un parametro en un valor constaste en el sistema, por ejemplo los precios de alquiler de las formaletas. A continuación se describen matematicamente como funcionan los diferentes tipos de variables del sistema en el tiempo.

La ecuación que gobierna un nivel en dinámica de sistemas en función del tiempo se representa de la siguiente forma:

$$N(t) = N(t_0) + \int_{t_0}^{t_f} (F_e - F_s) dt \quad (1)$$

Donde:

F_e : Flujo de entrada

F_s :Flujo de salida

La ecuación que gobierna un flujo se representa de la siguiente manera:

$$F(t) = N(t) * V(t) \quad (2)$$

Donde:

$N(t)$: Nivel

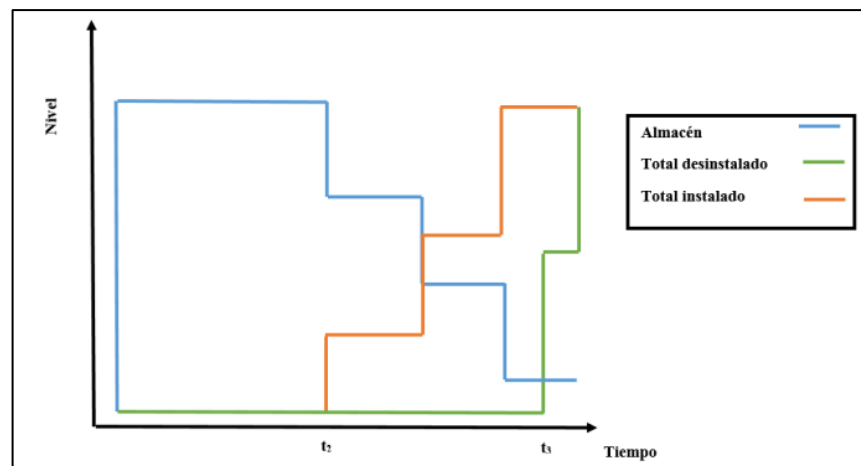
$V(t)$:Variable auxiliar

Una vez identificados los flujos, niveles y variables auxiliares que gobiernan la instalación y desinstalación de formaletas en el caso estudio, se procede con la modelación en dinámica de sistemas mediante el software evolución.

El objetivo con la modelación de las variables que gobiernan la instalación y desinstalación de estructuras temporales en el caso estudio será identificar las

zonas de apilamiento de formaletas, mediante la simulación temporal con dinámica de sistemas. En la figura 5, se esquematiza el comportamiento de los tres niveles definidos anteriormente para una estructura temporal dada obtenido con dinámica de sistemas, el grafico permite identificar los periodos de inactividad de la estructura temporal lo cuál será de utilidad para la toma de decisiones como por ejemplo la devolución del alquiler de estructuras temporales no usadas al proveedor. En el esquema presentado se identifica por ejemplo, que el pedido debió realizarse en el periodo t_2 y que en el periodo t_3 el total instalado es igual al desinstalado y el almacén permanece sin ninguna entrada, lo cual indica que el 100% de la estructural temporal alquilada fue devuelta. Bajo este razonamiento, se implementará en el caso estudio no acumular una cantidad de estructura temporal inicial para instalarla en algún elemento estructural, por el contrario, se decide que estructura desinstalada deberá prepararse para ser utilizada en el armado de los siguientes elementos estructurales del mismo tipo y que la cantidad que reste será devuelta al proveedor.

Figura 5. Comportamiento temporal de niveles del sistema



1.2.3 Planificación de la instalación y desinstalación de estructuras temporales en un caso estudio. Una vez formulado el proceso metodológico de como se planifica la instalación y desinstalación de las estructuras temporales

utilizando BIM y dinámica de sistemas para el caso de estudio planteado, se procederá con el desarrollo de cada una de las tareas propuestas en la formulación del proceso de planificación.

1.3 FASE 3: ALGORITMO PARA LA PLANIFICACION DE ESTRUCTURAS TEMPORALES CON BIM 5D Y DINÁMICA DE SISTEMAS

Esta fase consiste en proponer un algoritmo para planificar estructuras temporales en proyectos de construcción de concreto reforzado, utilizando modelos BIM 5D y dinámica de sistemas. La formulación del algoritmo se basará en los resultados que se obtengan de las etapas uno y dos de la presente investigación.

2. RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos a partir de la metodología formulada en la presente investigación.

2.1. FASE 1: IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES DE AFECTACIÓN EN LA PLANIFICACIÓN DE ESTRUCTURAS TEMPORALES

La planificación de proyectos de construcción se puede definir por la conformación de tres procesos: el planteamiento del problema, la programación de actividades y el control. En el planteamiento del problema se definen las metas a cumplir, se delimitan las partes y la manera como funcionarán; seguidamente en la programación de actividades, se define el orden de las actividades y su relación con los hitos del proyecto y finalmente se ordenan de acuerdo a las relaciones existentes entre las actividades; en el control se genera el procesamiento de la información y el análisis de la gestión de la planificación.

De acuerdo con la consulta bibliográfica realizada, se identificarán las siguientes actividades como principales variables que afectan la planificación de estructuras temporales:

Selección del tipo de sistema de encofrado a utilizar en el proyecto. De acuerdo con el tipo de sistema estructural a utilizar en un proyecto de construcción de estructuras de concreto de reforzado, los componentes estructurales del sistema pueden ser vigas, columnas y losas para sistemas aporticados; muros de concreto reforzado y losas macizas para sistemas de muros de carga; o se puede presentar una combinación de los elementos de un sistema aporticado y un sistema

de muros de carga denominado sistema dual o combinado [8]. De acuerdo al tipo de elemento estructural a construir, se hace necesario el uso de una estructura temporal denominada formaleta o encofrado, las cuales se puede clasificar en sistemas de encofrado vertical y horizontal. La selección del adecuado sistema de encofrado que permita obtener un mejor rendimiento de las cuadrillas de instalación es de gran utilidad para reducir los costos directos, existen factores que afectan la correcta selección del sistema de encofrado adecuado. En [9], se establecen como factores fundamentales de afectación: el diseño estructural, las especificaciones técnicas de construcción, las condiciones locales del sitio de trabajo y la organización del sitio. De acuerdo con esta problemática las variables de afectación de la planificación asociadas a la correcta selección del sistema de encofrado son: tipo de sistema estructural, forma de la edificación, rendimiento de las cuadrillas de encofradores.

Selección adecuada de estructuras temporales según el tipo de proyecto.

Las estructuras temporales representan un área de considerable atención en los proyectos de construcción. Sin embargo, en la actualidad la construcción no cuenta con procedimientos basados en las diferentes tecnologías emergentes en el sector para la formulación de una adecuada planificación de la instalación de estructuras temporales debido a la falta de formalización de procedimientos que representen situaciones específicas de los proyectos y que los planificadores puedan analizar y seleccionar la adecuada estructura temporal de acuerdo a las situaciones que se presenten en los proyectos de construcción. Para determinar adecuadamente las estructuras temporales se deben tener en cuenta dos variables, la primera es la geometría de los elementos estructurales y la segunda son las condiciones de sitio en que se realizará la instalación de las estructuras temporales [10].

Deficiente planificación del uso del espacio de trabajo. La planificación del uso del espacio de trabajo en obra es un proceso en el cual se determinan cuáles

estructuras de apoyo serán necesarias durante la construcción, donde serán localizadas y durante cuanto tiempo ocuparán espacio en la obra. La cantidad, tipo y tamaño de las estructuras temporales dependen del tipo de proyecto, tamaño, filosofía de diseño y de los procesos constructivos [11]. Realizar de forma adecuada la planificación del sitio de trabajo reduce el transporte de las estructuras temporales.

Falta de planificación de localización y espacio ocupado por las formaletas y demas equipos. Se debe determinar la ubicación y el área que consumen las estructuras temporales. Como factores importantes que afecta la localización y la cantidad de área a utilizar se encuentran la correcta verificación de la programación de obra y el rendimiento de la instalación, que a su vez afectan en forma directa el tiempo y el costo del proyecto [12].

Adicionalmente en [13], [14], [15] se presentan resultados de simulaciones de procesos constructivos para la construcción de estructuras de concreto reforzado basados en el flujo de trabajo real de cada proceso constructivo, con el objetivo de reducir los tiempos de cada una de las actividades que componen un proceso constructivo. Como principales variables de afectación de la planificación en la instalación de formaletas los autores, plantean el transporte excesivo de la formaleta internamente en la obra, la acumulación desorganizada de la formaleta lejos del sitio donde se realizará la instalación.

De acuerdo con la clasificación de actividades que afectan la planificación de estructuras temporales, se identifica el siguiente conjunto de variables (figura 6) más importante a tener en cuenta a la hora de planificar estructuras temporales. En la figura 7 se muestra la relación causa efecto de las variables de afectación sobre variables relacionadas directamente con la ejecución del proyecto de construcción.

Figura 6. variables de afectación en planificación de estructuras temporales Fuente. Elaboración propia.

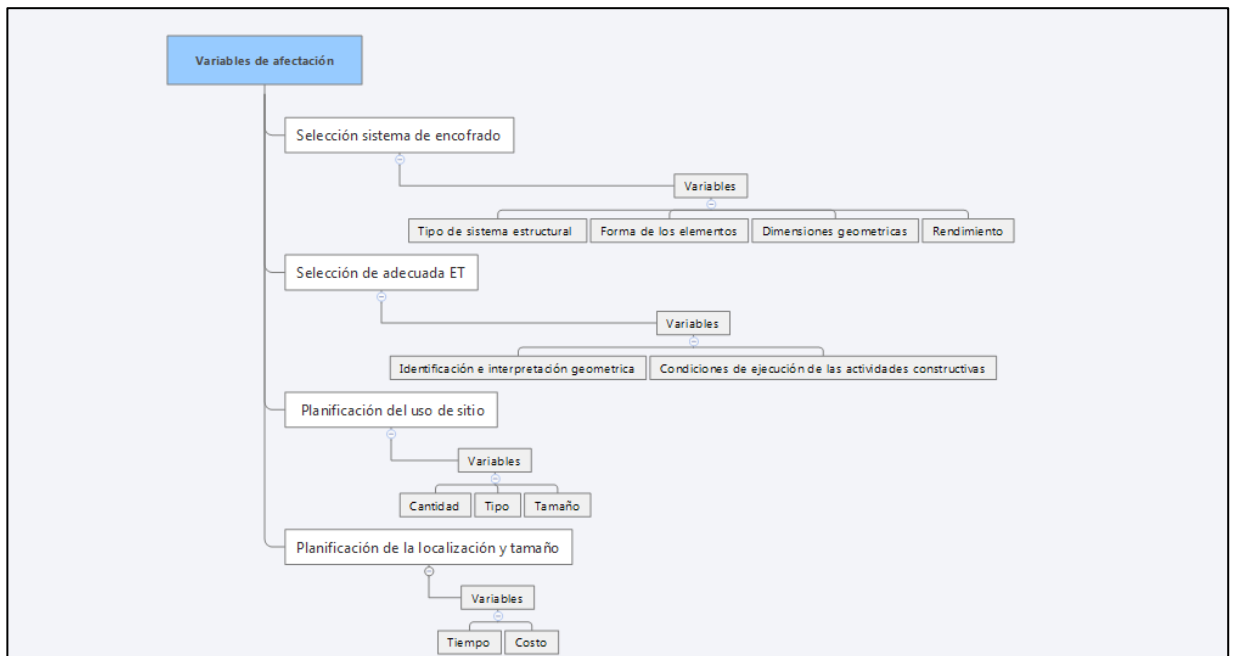
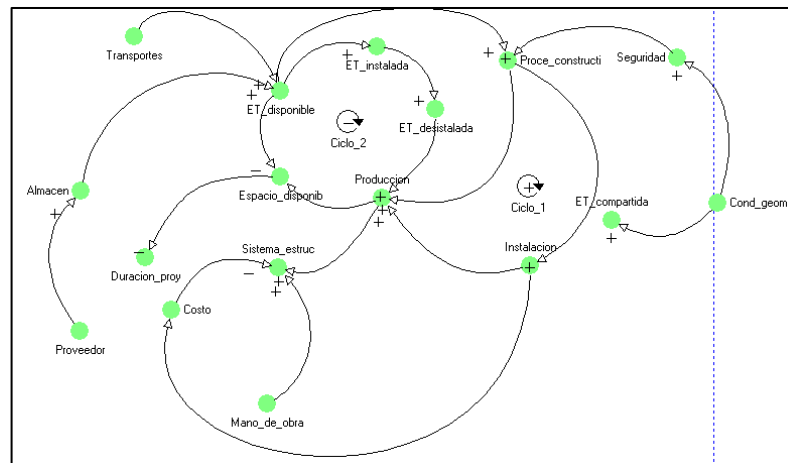


Figura 7. relación entre variables de afectación y variables del proyecto.



2.2. FASE 2: ELABORACIÓN DE LA PLANIFICACIÓN DE ESTRUCTURAS TEMPORALES EN UN CASO ESTUDIO

Para la elaboración de la planificación de estructuras temporales, del caso de estudio planteado en esta investigación se tuvo como referente la definición de

planificación dividida en tres componentes, el planteamiento del problema, la programación de actividades y la verificación del comportamiento de la programación de actividades. Para lo cual se procedió a ejecutar dos etapas: en la formulación del proceso de planificación se aborda el componente de planteamiento del problema, se describió que se debía planificar en función de las variable de afectación de la planificación de estructuras temporales; la segunda etapa contempló la programación y verificación de actividades respectivamente utilizando la propuesta formulada en la etapa uno.

2.2.1 Planificación de la instalación y desinstalación de estructuras temporales en un caso estudio Definición de flujos, niveles, variables auxiliares y parametros del sistema.

De acuerdo con el problema planteado a resolver utilizando dinámica de sistemas se definieron los siguientes niveles y flujos:

Tabla 1. Flujos y niveles para dinámica de sistemas

Flujos	Niveles
Proveedores	Almacén
Desinstalación	Desencofrados
Instalación	Encofrados

2.2.2. Planificación de la instalación y desinstalación de estructuras temporales en un caso estudio.

Tarea 1: elaboración de modelos BIM. A continuación se presenta el modelo BIM 3D de caso estudio, que contiene las estructuras temporales necesarias para la construcción del proyecto.

Figura 8. Modelo BIM 3D del caso estudio.

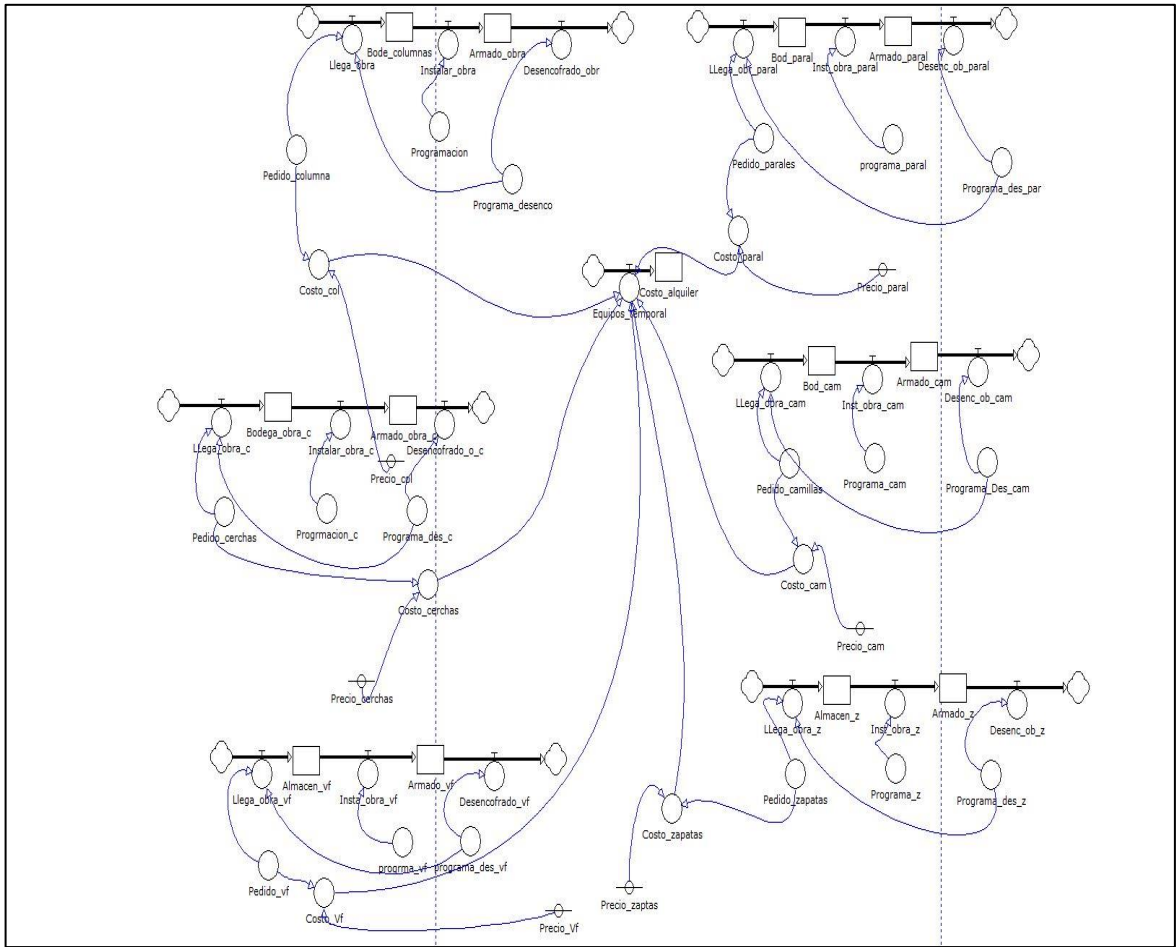


Tabla 2. Cantidad de estructuras temporales

Entrepiso	Parales	Cerchas	Camillas	Columnas
N+3.5	129	90	247	80
N+7	76	111	393	80
N+10.5	122	116	399	80
Cimentación				
Nivel	Zapatas	Vigas de fundación		
N-06	80	112		

Tarea 2: modelado en dinámica de sistemas. Se presentan los resultados de modelar en dinámica de sistemas el sistema de instalación y desinstalación de estructuras temporales en el caso estudio planteado en esta investigación.

Figura 9. Modelado del sistema de instalación de formaleta en dinámica de sistemas



En las figuras 11 y 12 se mostrarán los resultados de simular en dinámica de sistemas el almacenamiento de las formaletas para el caso estudio y la cantidad de formaleta armada en cada uno de los tiempos del proyecto. Estos graficos permitirán estudiar los periodos de estancamiento y su consecuencia sobre los costos directos del proyecto.

Figura 10. Simulación del almacenamiento de formaleta en dinámica de sistemas.

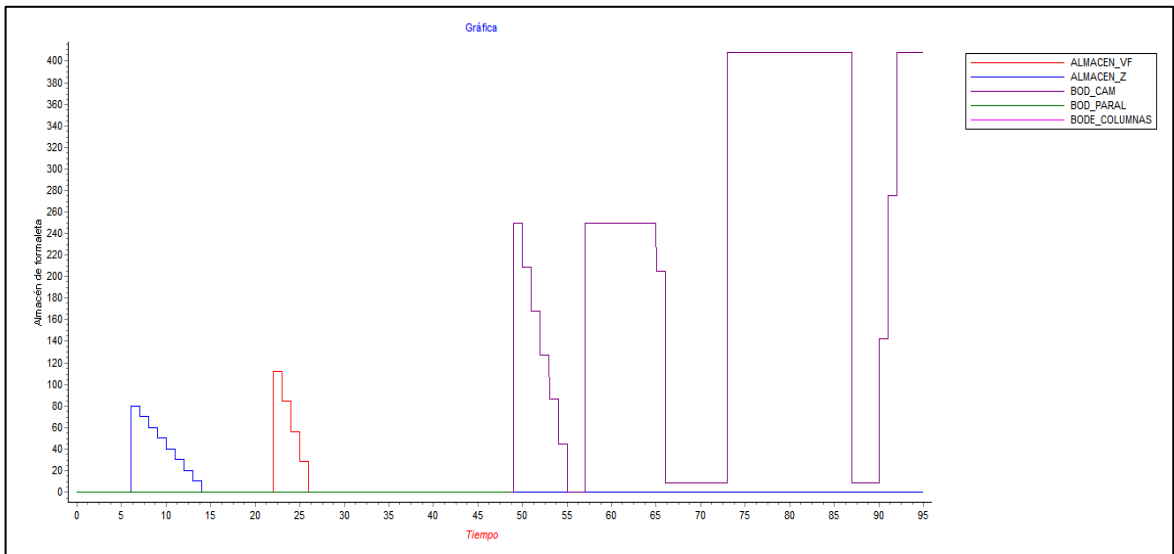
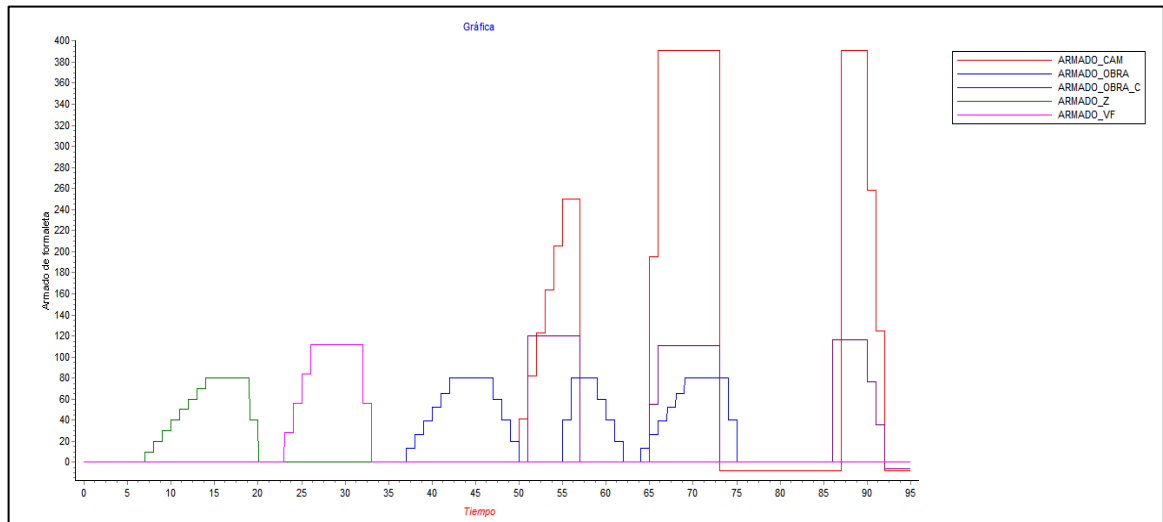
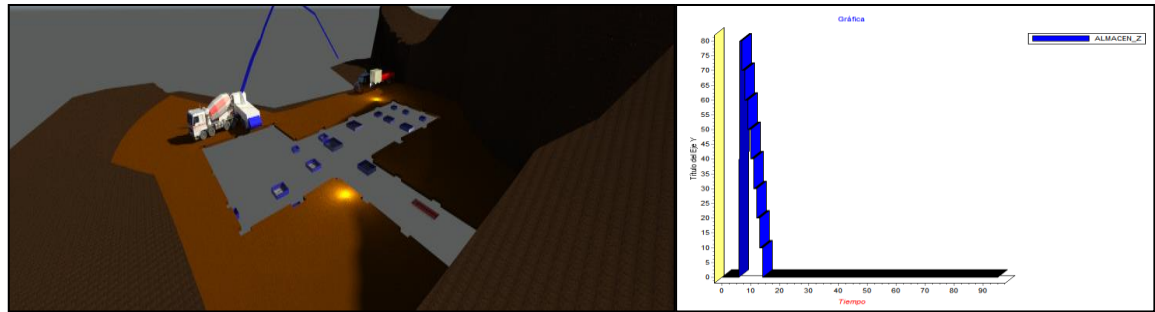


Figura 11. Simulación del armado de formaleta en dinámica de sistemas

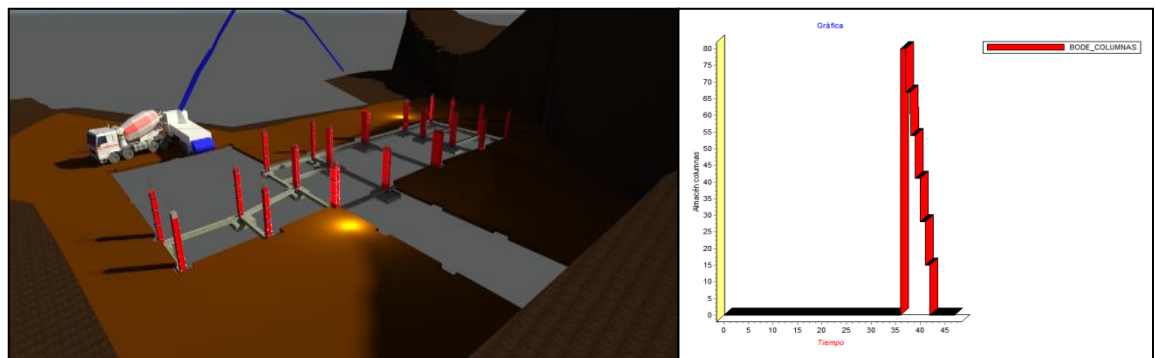


Una vez simulado en dinámica de sistemas el almacenamiento y tiempos de instalación de I caso estudio, en la grafica 13 se muestra el resultado del modelo de simulación BIM 5D, realizado para el caso estudio en base a la programación de obra obtenida., en cada periodo del proceso constructivo se asocia el grafico de evolución temporal del almacenamiento de cada tipo de formaleta utilizada en el proyecto.

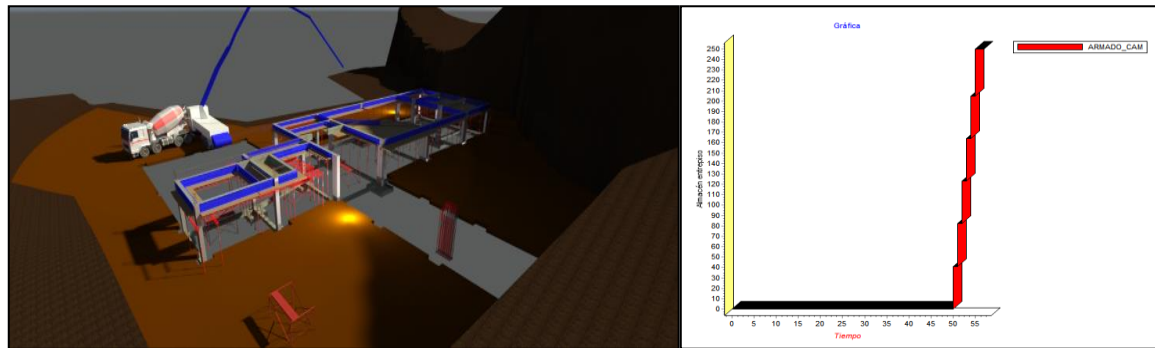
Figura 12. Modelo BIM 5D del caso estudio.



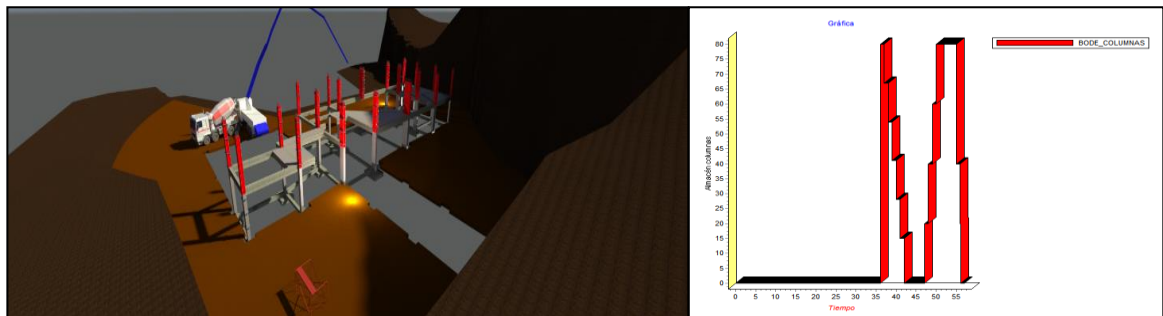
Fomaleta para zapatas Semana 3



Fomaleta para columnas Semana 6



Fomaleta para vigas Semana 8

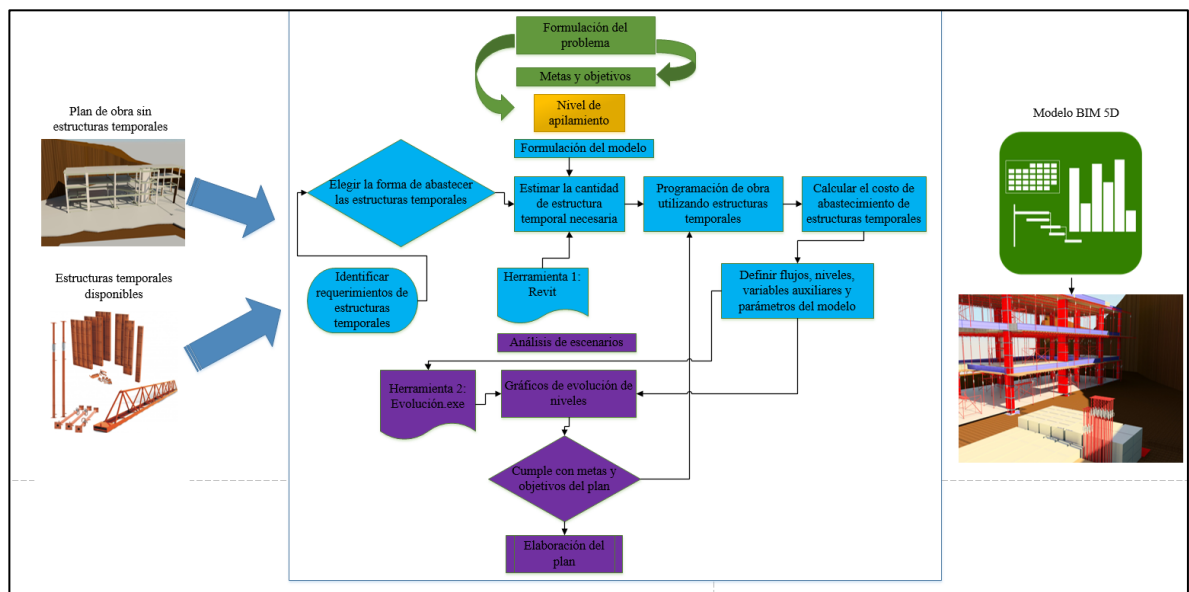


Fomaleta para columnas Semana 11

2.3 FASE 3: ALGORITMO PARA LA PLANIFICACION DE ESTRUCTURAS TEMPORALES CON BIM 5D Y DINÁMICA DE SISTEMAS

Conforme a la documentación consultada y de acuerdo al tipo de proyecto elegido en esta investigación para implementar BIM 5D y dinámica de sistemas para la planificación de estructuras temporales, se pensó y se diseñó un flujo de trabajo particular basandose siempre en el uso de BIM como punto central de comunicación y dinámica de sistemas como herramienta de apoyo, logrando de esta manera hacer la planificación de la instalación de estructuras temporales para un proyecto de concreto reforzado.

Figura 13. Algoritmo de planificación de estructuras temporales con BIM 5D y dinámica de sistemas



2.3.1 Descripción del diagrama El diagrama de trabajo propuesto se contemplo como un proceso de transformación en el cuál existen unas variables o componentes de entrada, se realiza un proceso y finalmente se obtiene una salida. A continuación se describen cada uno de los puntos que conforman el diagrama de trabajo.

Entradas: para hacer la planificación de la instalación de estructuras temporales para un proyecto de construcción, es necesario contar con dos componentes formulados en base a las variables de afectación de la planificación de estructuras temporales: el plan de obra (sin estructuras temporales) y el listado de estructuras temporales disponibles de acuerdo al tipo de proyecto a planificar.

Proceso: de acuerdo a las entradas definidas en el punto anterior, se da inicio al proceso de planificación. Empezando por la formulación del problema, en el cuál se identificán las necesidades de desarrollar una planificación con ciertas características impuestas por el proyecto el proyecto a planificar, obteniéndose de esta forma la respuesta a las siguientes preguntas:

- Qué se quiere planificar
- Cuánto se desea planificar
- Cómo se quiere planificar

Una vez delimitado el proceso de planificación, se continua con el planteamiento de ideales, metas y objetivos a lograr a lo largo del proceso de planificación. Se establecen los compromisos y responsabilidades de los planificadores, según los tiempos de entrega del proyecto. Luego de identificar las metas y objetivos, se procede con la formulación del modelo de planificación basado en dinámica de sistemas, para lo cual se definen componentes, variables, parametros y relaciones funcionales del sistema a modelar. Los componentes se clasificarán como flujos y niveles, los principales niveles a tener en cuenta serán: almacenamiento de estructuras temporales, instalación de estructuras temporales y desinstalación de estructuras temporales; los flujos se clasificarán en flujos de entrada y salida y alimentarán a los respectivos niveles según sea necesario, con el objetivo de almacenar información en los diferentes niveles.

- Cantidad de estructuras temporales que llegán a obra

- Cantidad de estructuras temporales que se arman en obra
- Cantidad de estructuras temporales que se desarman en obra

Las variables auxiliares a definir para alimentar los diferentes flujos serán:

- Programación de pedidos a proveedores
- Programación de armado de las estructuras temporales
- Programación de desinstalación de estructuras temporales

Los parametros considerados en el sistema serán los precios de alquiler o compra de las diferentes estructuras temporales.

Una vez formulado el modelo dinámico, se procede con la experimentación y análisis de escenarios planteados para determinar los periodos de instalación, desinstalación y devolución de cada una de las estructuras temporales de acuerdo con su comportamiento temporal obtenido a partir de los graficos de evolución con dinámica de sistemas. Y finalmente se elabora el plan.

Salidas: una vez realizado el proceso de planificación se obtiene el plan para la construcción del proyecto con las diferentes estructuras temporales seleccionadas y se verifica en modelo BIM 5D.

3. DISCUSIÓN

La planificación de estructuras temporales es una labor crucial y tiene un impacto significativo en la productividad y en el costo de los proyectos de construcción. La mala planificación genera conflictos de apilamiento que influyen en la productividad y en la seguridad de los proyectos [16, 17, 18]. En sitios de construcción con espacio reducido es necesario optimizar el uso del espacio consumido por las estructuras temporales, mediante la planificación, como en [19, 20, 21]. El espacio requerido por las instalaciones temporales se observaron en otros contextos, tales como el análisis de conflictos espacio-temporales [22], la integración de lo previsto y la planificación del espacio [23], y la gestión del espacio de trabajo [24]. En estos estudios, la influencia de los conflictos espaciales y los métodos para su gestión se discutieron; sin embargo, no se presento la planificación de la instalación de las estructuras temporales de acuerdo a la influencia que tienen diversas variables del proyecto sobre la misma. En estudios recientes [25] se han desarrollado modelos para la optimización de variables de decisión de adquisición del material y las capacidades de almacenamiento para alcanzar minimos costos de logística. En estos modelos, las tasas de demanda y las variables de adquisición de material influián sobre el área de almacenamiento requerida, y se calculaba de forma heurística. A pesar de la novedad de estos estudios, la incertidumbre de los proyectos de construcción se podría haber tenido en cuenta para la estimación de la tasa de demanda de material, para planificar de mejor forma el modelo propuesto.

Para la modelación dinámica de incertibumbres en proyectos de construcción, se ha utilizado muy a menudo la simulación, por ejemplo en [26] y [27]. En [28], se utiliza la simulación dinámica para gestionar la cadena de suministro en la construcción de tuneles, y se evalúa el efecto de la falta de espacio para el

almacenamiento de los revestimientos de segmentos de hormigón a lo largo del proyecto. La investigación demostró la utilidad de la simulación dinámica para crear un modelo de almacenamiento que pudiese predecir la escasez de espacio en cualquier instante del proyecto.

Este trabajo presenta un algoritmo para la planificación de estructuras temporales en base a modelos BIM 5D y dinámica de sistemas. Por lo general en la industria de la construcción y la academia se han concentrado en proporcionar métodos para diseñar adecuadamente las instalaciones temporales y controlar el espacio utilizado por las mismas [29]. Por otra parte, el enfoque aquí desarrollado se centra en la planificación de las instalaciones temporales para evitar problemáticas asociadas al apilamiento en sitio de las estructuras temporales, mediante la modelación en dinámica de sistemas, permitiendo establecer las relaciones funcionales entre las principales variables que intervienen en el proceso de instalación de las estructuras temporales. Por tanto, la principal contribución presentada en esta investigación es la planificación de sistemas de encofrado para estructuras de concreto reforzado estableciendo relaciones dinámicas entre las variables que afectan su planificación. Por otro lado, también se generan planos automáticos de las instalaciones mediante software BIM, permitiendo la visualización en el tiempo del plan generado a partir de la metodología propuesta.

El presente estudio permitió prever situaciones que probablemente sucedan en obra mediante el cambio de las variables auxiliares del modelo dinámico. El modelo de planificación utilizando modelación dinámica y BIM 5D es una buena herramienta que permite ir evaluando diferentes circunstancias de incertidumbre dado que permite retroalimentar las variables ingresadas y visualizar la magnitud de los compromisos adquiridos.

Con el caso estudio planificado se pudo observar el apoyo que brinda la simulación dinámica en la comprensión de la variación del almacenamiento de las

estructuras temporales en función del flujo entrada y salida del almacén y la realimentación que sufre el almacén al dejar de utilizar cantidades de estructuras temporales, mediante el grafico de evolución del almacén se identifican los perdios en cuales en función de los objetivos del proyecto algunas estructuras pueden ser devueltas al proveedor.

4. CONCLUSIONES

Se logró identificar que las principales variables que afectan la planificación de estructuras temporales comprenden desde la selección del sistema de encofrado adecuado, abarcando el tipo de sistema estructural, la geometría de los elementos, el rendimiento de las cuadrillas, la cantidad tipo y tamaño de las estructuras temporales.

Al realizar la planificación de las estructuras del caso estudio propuesto en la investigación, se observó que mediante dinámica de sistemas es posible detectar tiempos de devolución de las estructuras temporales para evitar sobrecostos en función de escenarios propuestos por los planificadores.

La planificación de estructuras temporales se puede realizar de una mejor forma al utilizar modelos dinámicos porque es posible observar de forma cuantitativa el comportamiento del sistema de instalación y desinstalación de estructuras temporales en el tiempo, en función de los tiempos de adquisición, de los tiempos de instalación y desinstalación de acuerdo con el rendimiento de las cuadrillas según el tipo de sistema de encofrado que se este utilizando, por ejemplo, en la construcción de una edificación con formaleta metálica alquilada.

El algoritmo propuesto resultado de utilizar dinámica de sistemas y modelos BIM para planificar estructuras temporales, permitió sistematizar el proceso de planificación de estructuras temporales para disminuir las problemáticas asociadas con la acumulación de estructuras temporales en obra y mejorar los tiempos de construcción y tener un modelo para anteponerse a situaciones negativas que afecten los objetivos del proyecto.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] K. Kim y J. Teizer, "Automatic design and planning of scaffolding systems using building information modeling," *Advanced engineering informatics*, vol. 28, pp. 66-80, 2013.
- [2] L. F. Botero, Análisis de Rendimientos y consumos de mano de obra en actividades de construcción. *Revista Universidad EAFIT*, [S.I.], v. 38, n. 128, p. 9-21, jun. 2012.
- [3] D. Echeverry, H. Paez, H. Meza, "simulación digital de procesos de construcción de estructura en concreto: casos de estudio práctico en Bogotá", *revista ingeniería de construcción*, vol. 23, no. 2, pp. 64-71, Ago, 2008.
- [4] S. Razavialavi, S. Abourizk, "a hybrid simulation approach for quantitatively analyzing the impact of facility size on construction projects", *automation in Construction*, vol. 60, pp. 39-48, Dic, 2015.
- [5] S. Nagapan, I. Rahman y A. Asmi, "A review of construction waste cause factors," de *Asian Conference on real state*, Malasya, 2011.
- [6] G. T, N. R y A. M, "Automation of scheme preparation and BOQ calculation for L&T-aluform," de *24th international symposium on automation & robotics in construction*, 2007.
- [7] A. M. Gonzalez, "Propuesta de implementación del sistema last Planner con el apoyo de la modelación 4D para la obra gruesa de edificaciones," tesis de pregrado, Departamento de ingeniería civil, Universidad de Chile, Santiago, Chile, 2012.

- [8] H. Porras, O. Sánchez, J. Galvis “metodología para la elaboración de modelos del proceso constructivo 5D con tecnologías building information modeling”. Revista GTI, vol. 14, no. 38, pp. 59-73, 2015.
- [9] Reglamento Colombiano de construcción sismo resistente, título C, 2010.
- [10] E.E. Elbeltagi, e.t. al, “Fuzzy logic model for selection of vertical formwork systems,” J. Constr. Eng. Manage, vol. 138,no. 7, pp. 832-840, jul, 2012.
- [11] J. Kim, M. Fischer, J. Kunz y R. Levitt, “Sharing of temporary structures: formalization and planning application,” Automation in construction, vol. 43, pp. 187-194, 2014.
- [12] J. Kim, M. Fischer, “Formalization of the features of activities and classification of temporary structures to support an automated temporary structure planning,” computing in civil engineering vol. x, no. x, pp. 338-346, Mes abreviado (tres primeras letras), 2007.
- [13] J. B. Whitman, “Construction site utilization planning best practices,” tesis de maestría, Departamento de ingeniería civil, Auburn University, Alabama, USA, 2014.
- [14] J.C. Socarras, “Aplicación de la herramienta time-lapse para la identificación y reducción de pérdidas en edificaciones con estructura en concreto,” tesis de pregrado, Departamento de ingeniería civil, Universidad javeriana, Bogotá, Colombia, 2012.
- [15] J.D. Echeverry, “Mejoramiento de procesos constructivos de una edificación a partir de simulación digital y videos time lapse,” tesis de pregrado, Departamento de ingeniería civil, Universidad javeriana, Bogotá, Colombia, 2012.

- [16] L.F. Alarcón, V. González “Buffers de programación: una estrategia complementaria para reducir la variabilidad en los procesos de construcción,” *Revista ingeniería de construcción*, vol. 18, no. 2, pp. 109-119, , 2003.
- [17] B. Akinci, M. Fischer, T. Zabelle, A proactive approach for reducing non-value adding activities due to time-space conflicts, Guarujá, São Paulo, Brazil, 6th Annual Conference of the International Group for Lean Construction 1998, pp. 1–18 (IGLC-6).
- [18] D.W. Halligan, L.A. Demsetz, J.D. Brown, C.B. Pace, Action response model and loss of productivity in construction, *J. Constr. Eng. Manag.* 120 (1) (1994) 47–64.
- [19] G.M. Winch, S. North, Critical space analysis, *J. Constr. Eng. Manag.* 132 (5) (2006), 473–481.
- [20] J. Xu, Z. Li, Multi-objective dynamic construction site layout planning in fuzzy random environment, *Autom. Constr.* 27 (2012) 155–169.
- [21] X. Ning, K.-C. Lam, M.C.-K. Lam, Dynamic construction site layout planning using max-min ant system, *Autom. Constr.* 19 (1) (2010) 55–65.
- [22] X. Ning, K. Lam, M. Lam, A decision-making system for construction site layout planning, *Autom. Constr.* 20 (4) (2011) 459–473.
- [23] B. Akinci, M. Fischen, R. Levitt, R. Carlson, Formalization and automation of timespace conflict analysis, *J. Comput. Civ. Eng.* 16 (2) (2002) 124–134.

- [24] P.P. Zouein, D. Shedid, ISSP: Integrated Schedule and Space Planner, Proceedings of the CIB W78 Conference on Distributing Knowledge in Building, Aarhus, Denmark 2002, pp. 75–83.
- [25] R. Chavada, N.N. Dawood, M. Kassem, Construction workspace management: the development and application of a novel nD planning approach and tool, *J. Inf. Technol. Constr.* 17 (2012) 213–236.
- [26] H. Said, K. El-Rayes, Optimizing material procurement and storage on construction sites, *J. Constr. Eng. Manag.* 137 (6) (2011) 421–431.
- [27] P. Tang, A. Mukherjee, N. Onder, Using an interactive schedule simulation platform to assess and improve contingency management strategies, *Autom. Constr.* 35 (2013) 551–560.
- [28] H. Said, M. Marzouk, M. El-Said, Application of computer simulation to bridge deck construction: case study, *Autom. Constr.* 18 (4) (2009) 377–385.
- [29] Y. Ebrahimi, S.M. AbouRizk, S. Fernando, Y. Mohamed, Simulation modeling and sensitivity analysis of a tunneling construction project's supply chain, *Eng. Constr. Archit. Manag.* 18 (5) (2011) 462–480.
- [30] K. Kim, J. Teizer, “Automatic design and planning of scaffolding systems using building information modeling,” *advanced engineering informatics*, vol. 28, pp. 66–80, ene, 2014.

BIBLIOGRAFIA

A. M. GONZÁLEZ, “Propuesta de implementación del sistema last Planner con el apoyo de la modelación 4D para la obra gruesa de edificaciones,” tesis de pregrado, Departamento de ingeniería civil, Universidad de Chile, Santiago, Chile, 2012.

B. AKINCI, M. FISCHEN, R. LEVITT, R. CARLSON, Formalization and automation of timespaceconflict analysis, *J. Comput. Civ. Eng.* 16 (2) (2002) 124–134.

B. AKINCI, M. FISCHER, T. ZABELLE, A proactive approach for reducing non-value addingactivities due to time-space conflicts, Guarujá, São Paulo, Brazil, 6th Annual Conferenceof the International Group for Lean Construction 1998, pp. 1–18 (IGLC-6).

D. ECHEVERRY, H. PAEZ, H. MEZA, “simulación digital de procesos de construcción de estructura en concreto: casos de estudio práctico en Bogotá”, *revista ingeniería de construcción*, vol. 23, no. 2, pp. 64-71, Ago, 2008.

D.W. HALLIGAN, L.A. DEMSETZ, J.D. BROWN, C.B. PACE, Action response model and loss ofproductivity in construction, *J. Constr. Eng. Manag.* 120 (1) (1994) 47–64.

E.E. ELBELTAGI, e.t. al, “Fuzzy logic model for selection of vertical formwork systems,” *J. Constr. Eng. Manage*, vol. 138,no. 7, pp. 832-840, jul, 2012.

G. T, N. R y A. M, “Automation of scheme preparation and BOQ calculation for L&T-aluform,” de 24th international symposium on automation & robotics in construction, 2007.

G.M. WINCH, S. NORTH, Critical space analysis, *J. Constr. Eng. Manag.* 132 (5) (2006), 473–481.

H. PORRAS, O. SÁNCHEZ, J. GALVIS “metodología para la elaboración de modelos del proceso constructivo 5D con tecnologías building information modeling”. Revista GTI, vol. 14, no. 38, pp. 59-73, 2015.

H. SAID, K. EL-RAYES, Optimizing material procurement and storage on construction sites, J. Constr. Eng. Manag. 137 (6) (2011) 421–431.

H. SAID, M. MARZOUK, M. EL-SAID, Application of computer simulation to bridge deck construction: case study, Autom. Constr. 18 (4) (2009) 377–385.

J. B. WHITMAN, “Construction site utilization planning best practices,” tesis de maestría, Departamento de ingeniería civil, Auburn University, Alabama, USA, 2014.

J. C. SOCARRAS, “Aplicación de la herramienta time-lapse para la identificación y reducción de pérdidas en edificaciones con estructura en concreto,” tesis de pregrado, Departamento de ingeniería civil, Universidad javeriana, Bogotá, Colombia, 2012.

J. D. ECHEVERRY, “Mejoramiento de procesos constructivos de una edificación a partir de simulación digital y videos time lapse,” tesis de pregrado, Departamento de ingeniería civil, Universidad javeriana, Bogotá, Colombia, 2012.

J. KIM, M. FISCHER, “Formalization of the features of activities and classification of temporary structures to support an automated temporary structure planning,” computing in civil engineering vol. x, no. x, pp. 338-346, Mes abreviado (tres primeras letras), 2007.

J. KIM, M. FISCHER, J. KUNZ Y R. LEVITT, "Sharing of temporary structures: formalization and planning application," *Automation in construction*, vol. 43, pp. 187-194, 2014.

J. XU, Z. LI, Multi-objective dynamic construction site layout planning in fuzzy random environment, *Autom. Constr.* 27 (2012) 155–169.

K. KIM Y J. TEIZER, "Automatic design and planning of scaffolding systems using building information modeling," *Advanced engineering informatics*, vol. 28, pp. 66-80, 2013.

K. KIM, J. TEIZER, "Automatic design and planning of scaffolding systems using building information modeling," *advanced engineering informatics*, vol. 28, pp. 66-80, ene, 2014.

L. F. BOTERO, Análisis de Rendimientos y consumos de mano de obra en actividades de construcción. *Revista Universidad EAFIT*, [S.l.], v. 38, n. 128, p. 9-21, jun. 2012.

L.F ALARCÓN, V. GONZÁLEZ "Buffers de programación: una estrategia complementaria para reducir la variabilidad en los procesos de construcción," *Revista ingeniería de construcción*, vol. 18, no. 2, pp. 109-119, , 2003.

P. TANG, A. MUKHERJEE, N. ONDER, Using an interactive schedule simulation platform to assess and improve contingency management strategies, *Autom. Constr.* 35 (2013) 551–560.

P.P. ZOUENIN, D. SHEDID, ISSP: Integrated Schedule and Space Planner, *Proceedings of the CIB W78 Conference on Distributing Knowledge in Building*, Aarhus, Denmark 2002, pp. 75–83.

R. CHAVADA, N.N. DAWOOD, M. KASSEM, Construction workspace management: the development and application of a novel nD planning approach and tool, *J. Inf. Technol. Constr.* 17 (2012) 213–236.

REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE, título C, 2010.

S. NAGAPAN, I. RAHMAN Y A. ASMI, “A review of construction waste cause factors,” de Asian Conference on real state, Malasya, 2011.

S. RAZAVIALAVI, S. ABOURIZK, “a hybrid simulation approach for quantitatively analyzing the impact of facility size on construction projects”, *automation in Construction*, vol. 60, pp. 39-48, Dic, 2015.

X. NING, K. LAM, M. LAM, A decision-making system for construction site layout planning, *Autom. Constr.* 20 (4) (2011) 459–473.

X. NING, K.-C. LAM, M.C.-K. LAM, Dynamic construction site layout planning using max-min ant system, *Autom. Constr.* 19 (1) (2010) 55–65.

Y. EBRAHIMY, S.M. ABOURIZK, S. FERNANDO, Y. MOHAMED, Simulation modeling and sensitivity analysis of a tunneling construction project's supply chain, *Eng. Constr. Archit. Manag.* 18 (5) (2011) 462–480.