

**ANÁLISIS DEL FLUJO DE CAJA DE LA CONSTRUCCIÓN DE UN PROYECTO
CON MODELOS BIM 5D Y DINÁMICA DE SISTEMAS**

OMAR GIOVANNY SÁNCHEZ RIVERA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
2015**

**ANÁLISIS DEL FLUJO DE CAJA DE LA CONSTRUCCIÓN DE UN PROYECTO
CON MODELOS BIM 5D Y DINÁMICA DE SISTEMAS**

OMAR GIOVANNY SÁNCHEZ RIVERA

Trabajo de grado para optar al título de Magister en Ingeniería Civil

**Director
HERNÁN PORRAS DÍAZ
Ingeniero Civil, M.SC. Ph.D**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
2015**

A mis padres, Isabel y Luis
A mi hermana, Yenifer
A mi novia y futura esposa, Karen
A mi mentor, Hernán

AGRADECIMIENTOS

Agradezco de gran manera a mi director de investigación el doctor Hernán Porras Díaz, quien me acompañó y orientó durante el desarrollo de la metodología de investigación, en los momentos cruciales estuvo disponible para la solución de dudas y la formulación de sugerencias, las cuales enriquecen el presente documento científico.

Aprecio el apoyo brindado por el Grupo de investigación Geomática, Gestión y Optimización de Sistemas, el cual me abrió las puertas para la utilización de sus instalaciones, información y recursos tecnológicos, recursos sin los cuales no me hubiera sido posible culminar el desarrollo de la metodología presentada.

Estimo y me siento agradecido con el apoyo brindado por la Universidad Industrial de Santander, la cual me brindo beca de matrícula académica para todos los periodos académicos del programa de Maestría en Ingeniería Civil, beca que resulto un gran apoyo para el éxito de la investigación, espero que en el futuro sigan existiendo estos incentivos para que los beneficiarios puedan construir y cumplir sus sueños.

Valoro significativamente el apoyo brindado por José Alberto Galvis Guerra, el cual comenzó siendo mi estudiante y en el transcurso del programa académico se convirtió en un gran investigador, colaborador y amigo, con su apoyo me fue posible desarrollar y poner en práctica el trabajo colaborativo y multidisciplinario en el desarrollo del modelo BIM, al igual que sucedió en el modelo del proceso constructivo BIM 5D. Nos fue posible publicar tres documentos científicos, en los cuales sus contribuciones fueron determinantes en la pertinencia de los documentos y la satisfacción de las expectativas de los árbitros.

Agradezco de gran manera el apoyo brindado por mis padres Luis Sanchez e Isabel Rivera, apoyo que resulto fundamental para llegar a cumplir mi sueño de estudiar un programa de posgrado, siempre me han apoyado desde el inicio de mi existencia y gracias a su educación, ejemplos y principios he logrado llegar a ser una persona de bien para la sociedad.

Valoro la dedicación y colaboración de mi novia y futura esposa Karen Castañeda quien estuvo en los momentos más difíciles de esta investigación, apoyándome y acompañándome en los días de arduo trabajo y las noches de desvelo en donde sus cenas de media noche y compañía me permitieron batallar contra el frio y el sueño para lograr el cumplimiento de los objetivos de investigación.

Agradezco a Dios por permitirme culminar la investigación, por proveerme de salud y sabiduría para la realización de las actividades necesarias para la culminación de este trabajo.

CONTENIDO

| | |
|---|----|
| 1. PLANTEAMIENTO Y JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA | 25 |
| 2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA | 31 |
| 2.1 FLUJO DE CAJA | 31 |
| 2.1.1 Definición | 31 |
| 2.1.2 Gestión del flujo de caja | 34 |
| 2.1.3 Planificación del flujo de caja | 37 |
| 2.1.4 Balance del flujo de caja | 38 |
| 2.1.5 Proyección del flujo de caja a partir de modelos matemáticos | 39 |
| 2.1.6 Curva S | 40 |
| 2.1.7 Flujo de caja como indicador del estado financiero de una compañía..... | 41 |
| 2.1.8 Toma de decisiones en los flujos de caja..... | 42 |
| 2.1.9 Costos directos e indirectos en el flujo de caja de un proyecto de construcción..... | 43 |
| 2.2 BUILDING INFORMATION MODELING (BIM) | 44 |
| 2.2.1 Definición | 44 |
| 2.2.2 Almacenamiento de la información de construcción en BIM | 48 |
| 2.2.3 Beneficios de BIM | 49 |
| 2.2.4 Adopción de BIM en la industria de la construcción | 52 |
| 2.2.5 BIM en la educación..... | 54 |
| 2.2.6 Seguimiento del proceso de construcción con BIM..... | 55 |
| 2.2.7 BIM en el trabajo colaborativo | 56 |

| | | |
|--------|--|----|
| 2.2.8 | BIM en la estimación de los presupuestos de construcción | 57 |
| 2.2.9 | BIM en la reducción de pérdidas en construcción | 59 |
| 2.2.10 | BIM en el mantenimiento de construcciones existentes | 60 |
| 2.2.11 | Visualización de elementos de construcción con BIM | 62 |
| 2.2.12 | Modelos BIM 4D y 5D | 62 |
| 2.2.13 | Integración tiempo costo en los flujos de caja..... | 63 |
| 2.3 | DINÁMICA DE SISTEMAS | 66 |
| 2.3.1 | Sistema | 66 |
| 2.3.2 | Flujo de caja con el enfoque de sistema | 68 |
| 2.3.3 | Estructura de retroalimentación de un sistema | 68 |
| 2.3.4 | Dinámica de sistemas | 70 |
| 2.3.5 | Modelo | 71 |
| 2.3.6 | Elaboración de modelos..... | 72 |
| 2.3.7 | Simulación de modelos | 74 |
| 2.3.8 | Estructuras de realimentación negativa | 74 |
| 2.3.9 | Estructuras de realimentación positiva..... | 77 |
| 2.3.10 | Retrasos en los sistemas | 80 |
| 2.3.11 | Conceptos de flujo y estado..... | 81 |
| 2.3.12 | Tipos de variables en el estudio de la dinámica de sistemas..... | 82 |
| 2.3.13 | Diagramas de Forrester | 83 |
| 2.3.14 | Toma de decisiones basadas en la simulación..... | 86 |
| 3. | METODOLOGÍA..... | 88 |
| 3.1 | TAREA 1: SELECCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO | 88 |
| 3.2 | TAREA 2: DESARROLLO DEL MODELO BIM..... | 89 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 3.2.1 | Depuración de los planos..... | 89 |
| 3.2.2 | Vinculación de los planos en el <i>software</i> BIM | 91 |
| 3.2.3 | Superficie topográfica..... | 92 |
| 3.2.4 | Movimientos de tierra: excavaciones y rellenos | 93 |
| 3.2.5 | Cimentación: zapatas, vigas y concreto de limpieza | 94 |
| 3.2.6 | Estructura: columnas, vigas aéreas, placas aéreas | 96 |
| 3.2.7 | Muros de contención en concreto reforzado | 97 |
| 3.2.8 | Acero de refuerzo..... | 98 |
| 3.3 | ELABORACIÓN DEL PRESUPUESTO DE CONSTRUCCIÓN..... | 100 |
| 3.3.1 | Estimación de rendimientos de la mano de obra | 100 |
| 3.3.2 | Definición de salario, prestaciones sociales, descanso remunerado, parafiscales y seguridad social | 101 |
| 3.3.3 | Calculo del valor de la mano de obra | 104 |
| 3.3.4 | Consulta y definición de precios unitarios de materiales y equipos.. | 107 |
| 3.3.5 | Elaboración de los análisis de precios unitarios (APU) | 108 |
| 3.3.6 | Cálculo de las cantidades de obra con el modelo BIM..... | 109 |
| 3.3.7 | Elaboración del presupuesto de construcción..... | 112 |
| 3.4 | ELABORACIÓN DEL PROGRAMA DE OBRA..... | 115 |
| 3.4.1 | Definición del horario de trabajo..... | 115 |
| 3.4.2 | Calculo de la duración de las actividades de obra | 115 |
| 3.4.3 | Asignación de fechas de inicio y de finalización..... | 116 |
| 3.4.4 | Asignación de recursos humanos | 117 |
| 3.5 | ELABORACIÓN DEL MODELO BIM 5D..... | 120 |
| 3.5.1 | Vinculación del modelo BIM y el programa de obra | 120 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 3.5.2 | Animación del proceso constructivo de los elementos | 120 |
| 3.6 | CÁLCULOS PARA LA ELABORACIÓN DEL FLUJO DE CAJA CON BASE EN LA INFORMACIÓN DEL MODELO BIM 5D | 128 |
| 3.6.1 | Evaluación de los flujos de efectivo por concepto de nómina de personal calificado..... | 128 |
| 3.6.2 | Evaluación de los flujos de efectivo por concepto de nómina de personal no calificado..... | 130 |
| 3.6.3 | Calculo del valor de las actas de obra (ingresos del constructor) | 133 |
| 3.6.4 | Calculo de los flujos de efectivo por concepto de pedidos de concreto..... | 137 |
| 3.6.5 | Calculo de los flujos de efectivo por concepto de pedidos de acero de refuerzo..... | 139 |
| 3.6.6 | Calculo de los flujos de efectivo por concepto de pedidos de algunos materiales e insumos..... | 140 |
| 3.6.7 | Calculo de los flujos de efectivo por concepto del pago de algunos servicios..... | 140 |
| 3.6.8 | Calculo de los flujos de efectivo por concepto alquiler de equipos y herramientas..... | 141 |
| 3.7 | ELABORACIÓN DEL MODELO DE DINÁMICA DE SISTEMAS | 142 |
| 3.7.1 | Configuración del software de dinámica de sistemas y nomenclatura..... | 142 |
| 3.7.2 | Ingresos del constructor (pago de actas) | 143 |
| 3.7.3 | Nómina del personal calificado | 147 |
| 3.7.4 | Nómina del personal no calificado (oficiales y ayudantes) | 153 |
| 3.7.5 | Pedidos de concreto..... | 157 |
| 3.7.6 | Pedidos de acero de refuerzo | 160 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 3.7.7 | Alquiler de maquinaria..... | 163 |
| 3.7.8 | Servicios y materiales | 167 |
| 4. | ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS | 177 |
| 4.1 | MODELO BIM..... | 177 |
| 4.1.1 | Trabajo colaborativo con BIM, para el mejoramiento de la toma de decisiones relacionadas con el flujo de caja | 177 |
| 4.1.2 | Beneficios de BIM en la estimación de los flujos de efectivo relacionados con la compra de acero de refuerzo | 179 |
| 4.1.3 | Precisión en el cálculo de cantidades de obra con BIM, para el aumento de la precisión en la planificación de los flujos de efectivo | 181 |
| 4.1.4 | Localización de elementos de construcción con BIM, para la proyección de los flujos de efectivo | 185 |
| 4.1.5 | Implementación de BIM en la fase de diseño de los proyectos..... | 186 |
| 4.1.6 | Eficiencia en la generación de informes a partir de un modelo BIM, para la evaluación de opciones en la toma de decisiones | 188 |
| 4.1.7 | Almacenamiento de la información de construcción en un modelo BIM..... | 191 |
| 4.1.8 | Control de calidad de los diseños de un proyecto de construcción a partir de un modelo BIM | 194 |
| 4.2 | PROGRAMA DE OBRA Y MODELO BIM 5D | 195 |
| 4.2.1 | Planificación del recurso humano en el programa de obra para mejorar la estimación de flujo de efectivo por concepto de pago de mano de obra .. | 195 |
| 4.2.2 | Comprobación de la coherencia del programa de obra con BIM 5D para la evaluación del flujo de caja | 196 |
| 4.2.3 | Gestión del espacio en obra con BIM 5D..... | 198 |
| 4.2.4 | Calculo de los ingresos del constructor a partir de BIM 5D..... | 200 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 4.2.5 | Cuantificación de materiales y momentos de compra con BIM 5D .. | 201 |
| 4.2.6 | Procesos de enseñanza y aprendizaje con BIM 5D..... | 203 |
| 4.3 | MODELO DE DINÁMICA DE SISTEMAS..... | 204 |
| 4.3.1 | Nivel de detalle del modelo de dinámica de sistemas..... | 204 |
| 4.3.2 | Interpretación de las relaciones del flujo de caja en el modelo de dinámica de sistemas | 204 |
| 4.3.3 | Identificación de eventos no deseados relacionados con el flujo de caja, a partir del modelo de dinámica de sistemas..... | 205 |
| 4.3.4 | Flexibilidad al cambio en los parámetros del flujo de caja con dinámica de sistemas y generación de alternativas para la toma decisiones | 207 |
| 4.3.5 | Seguimiento de los flujos de ingresos y egresos con dinámica de sistemas..... | 208 |
| 4.3.6 | Toma de decisiones, en la planificación y análisis del flujo de caja, sustentada en modelos de dinámica de sistemas y BIM 5D..... | 209 |
| 5. | CONCLUSIONES y FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO | 216 |
| 5.1 | CONCLUSIONES GENERALES | 216 |
| 5.2 | FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO..... | 223 |
| 5.2.1 | BIM 5D y dinámica de sistemas en el control del flujo de caja en la fase de construcción..... | 223 |
| 5.2.2 | BIM 5D y dinámica de sistemas en el análisis del flujo de caja durante el ciclo de vida del proyecto de construcción..... | 223 |
| 5.2.3 | Planificación de estructuras temporales con BIM 5D y dinámica de sistemas..... | 223 |
| 5.2.4 | Aplicación de BIM en la ejecución integrada de proyectos de construcción..... | 224 |
| | CITAS BIBLIOGRÁFICAS | 225 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1: Relación entre ingresos y egresos de un proyecto de construcción. | 32 |
| Figura 2: Modelo BIM de una estación de buses. | 45 |
| Figura 3: Representación gráfica de un sistema. | 66 |
| Figura 4: Llenado de un vaso con agua del grifo. | 69 |
| Figura 5: Descomposición del sistema de llenado de un vaso con agua del grifo. | 69 |
| Figura 6: Metodología para la construcción de un modelo. | 73 |
| Figura 7: Refrigerador como una estructura de retroalimentación negativa. | 75 |
| Figura 8: Relación entre el flujo F y el estado x para el caso de estructura de realimentación negativa. | 75 |
| Figura 9: Comportamiento en el tiempo de un sistema con realimentación negativa. | 77 |
| Figura 10: Esquema de una estructura de realimentación positiva. | 78 |
| Figura 11: Relación entre el flujo F y el estado x para el caso de estructura de retroalimentación negativa. | 79 |
| Figura 12: Comportamiento en el tiempo de una estructura de realimentación positiva. | 80 |
| Figura 13: Retrasos en una estructura de retroalimentación negativa. | 80 |
| Figura 14: Variables utilizadas en los diagramas de influencias. | 82 |
| Figura 15: Símil hidrodinámico para la representación de sistemas. | 83 |
| Figura 16: Preguntas previas a tomar una decisión. | 87 |
| Figura 17: Planta de cimentación del caso de estudio (dibujo en dos dimensiones 2D). | 90 |
| Figura 18: Perfil de cimentación del caso de estudio (dibujo en dos dimensiones 2D). | 90 |
| Figura 19: Planta de entepiso del caso de estudio (dibujo en dos dimensiones 2D). | 91 |

| | |
|---|-----|
| Figura 20: Planta de entepiso 2 del caso de estudio (dibujo en dos dimensiones 2D). | 91 |
| Figura 21: Modelo BIM de movimientos de tierra del caso de estudio. | 94 |
| Figura 22: Modelo BIM de elementos estructurales de cimentación del caso de estudio. | 95 |
| Figura 23: Modelo BIM de elementos estructurales del caso de estudio. | 96 |
| Figura 24: Modelo BIM del caso de estudio, estación de buses alimentadores perteneciente al sistema de transporte masivo METROLINEA..... | 99 |
| Figura 25: Acero de refuerzo del algunos elementos de construcción del caso de estudio. | 99 |
| Figura 26: Interfaz de usuario de la calculadora laboral del Ministerio de Trabajo de Colombia..... | 105 |
| Figura 27: Interfaz de usuario del software Autodesk Revit 2014 en el cálculo de cantidades de obra | 109 |
| Figura 28: Procedimiento para la obtención del presupuesto de construcción. ... | 113 |
| Figura 29: Programa de obra para las actividades de preliminares y movimientos de tierra..... | 116 |
| Figura 30: Programa de obra para las actividades de concretos y acero de refuerzo. | 117 |
| Figura 31: Gráfico de recursos para el oficial de construcción. 100% equivale a un oficial de construcción..... | 118 |
| Figura 32: Gráfico de recursos para el ayudante de construcción. 100% equivale a un ayudante de construcción. | 119 |
| Figura 33: Modelo del proceso constructivo BIM 5D, caso de estudio (día 5). ... | 122 |
| Figura 34: Modelo del proceso constructivo BIM 5D, caso de estudio (día 37). . | 123 |
| Figura 35: Modelo del proceso constructivo BIM 5D, caso de estudio (día 74). . | 124 |
| Figura 36: Modelo del proceso constructivo BIM 5D, caso de estudio (día 88). . | 125 |
| Figura 37: Modelo del proceso constructivo BIM 5D, caso de estudio (día 115). | 126 |
| Figura 38: Costo directo ejecutado para el caso de estudio, según modelo BIM 5D. | 127 |

| | |
|---|-----|
| Figura 39: Flujos de efectivo por concepto de los salarios de ayudantes. | 131 |
| Figura 40: Flujos de efectivo por concepto de los salarios de oficiales..... | 132 |
| Figura 41: Diagrama de flujo de nivel para los ingresos del constructor..... | 143 |
| Figura 42: Diagrama de flujo de nivel para la nómina del personal calificado. ... | 148 |
| Figura 43: Costo acumulado en pesos versus tiempo en días para la nómina del personal calificado. | 153 |
| Figura 44: Diagrama de flujo de nivel para la nómina del personal no calificado. | 154 |
| Figura 45: Costo acumulado en pesos versus tiempo en días para la nómina del personal no calificado. | 156 |
| Figura 46: Diagrama de flujo de nivel para los pedidos de concreto..... | 157 |
| Figura 47: Costo acumulado en pesos versus tiempo en días para los pedidos de concreto. | 159 |
| Figura 48: Diagrama de flujo de nivel para los pedidos de acero. | 160 |
| Figura 49: Costo acumulado en pesos versus tiempo en días para los pedidos de acero de refuerzo..... | 162 |
| Figura 50: Diagrama de flujo de nivel para el alquiler de maquinaria. | 163 |
| Figura 51: Costo acumulado en pesos versus tiempo en días para el alquiler de maquinaria. | 166 |
| Figura 52: Diagrama de flujo de nivel para el pago de servicios y materiales. ... | 167 |
| Figura 53: Costo acumulado en pesos versus tiempo en días para el pago de servicios y materiales..... | 173 |
| Figura 54: Diagrama de flujo nivel del modelo de dinámica de sistemas completo. | 174 |
| Figura 55: Costo acumulado en pesos colombianos versus tiempo en días para el balance general del flujo de caja durante la ejecución del caso de estudio. | 175 |
| Figura 56: Costo acumulado en pesos versus tiempo en días para las partes del sistema de flujo de caja modeladas en el software de dinámica de sistemas. | 176 |
| Figura 57: Modelo tradicional de ejecución de proyectos versus modelos integrado. | 178 |

| | |
|--|-----|
| Figura 58: Bosquejo del trabajo colaborativo con BIM en la nube. | 179 |
| Figura 59: Calculo de cantidades de obra con base en el modelo BIM, caso de estudio. | 184 |
| Figura 60: Localización de elementos de construcción con un modelo BIM, caso de estudio. | 186 |
| Figura 61: Proceso de recomendado para la obtención del modelo BIM como producto de la fase de diseño. | 187 |
| Figura 62: Actualización automática de todas las vistas comprometidas con un elemento a partir de la generación de un cambio en los diseños de un proyecto de construcción, caso de estudio. | 189 |
| Figura 63: Evaluación de opciones en un modelo BIM, para la toma de decisiones en la fase de diseño. | 190 |
| Figura 64: Proceso de evaluación de opciones con en base en el modelo BIM, con el uso de una pantalla de alta resolución. | 191 |
| Figura 65: Modelo BIM del caso de estudio. | 193 |
| Figura 66: Construcción de una estación de buses en el municipio de Floridablanca Santander, donde se observa la importancia de una adecuada gestión del espacio. | 199 |
| Figura 67: Gestión y planificación del espacio de obra y de las cantidades de ejecución del caso de estudio. | 202 |
| Figura 68: Identificación de eventos indeseados en la simulación del modelo de dinámica de sistemas. | 206 |
| Figura 69: Algoritmo para la toma de decisiones en el análisis y planificación del flujo de caja, parte 1 de 6. | 210 |
| Figura 70: Algoritmo para la toma de decisiones en el análisis y planificación del flujo de caja, parte 2 de 6. | 211 |
| Figura 71: Algoritmo para la toma de decisiones en el análisis y planificación del flujo de caja, parte 3 de 6. | 212 |
| Figura 72: Algoritmo para la toma de decisiones en el análisis y planificación del flujo de caja, parte 4 de 6. | 213 |

Figura 73: Algoritmo para la toma de decisiones en el análisis y planificación del flujo de caja, parte 5 de 6.....214

Figura 74: Algoritmo para la toma de decisiones en el análisis y planificación del flujo de caja, parte 6 de 6.....215

LISTA DE CUADROS

| | |
|--|-----|
| Cuadro 1: Iconos utilizados en los softwares de dinámica de sistemas para la modelación de diagramas de Forrester o diagrama de flujo nivel..... | 85 |
| Cuadro 2: Archivos de diseño del caso de estudio según formato digital. | 89 |
| Cuadro 3: Rendimientos de mano de obra y cuadrillas utilizadas para la elaboración del presupuesto de obra del caso de estudio. | 100 |
| Cuadro 4: Porcentaje del salario que un empleador debe pagar por concepto de ARP. | 103 |
| Cuadro 5: Costo económico de salario, prestaciones sociales, transporte, prestaciones sociales, descanso remunerado, parafiscales y aportes a la seguridad social para un oficial y un ayudante de construcción. | 106 |
| Cuadro 6: Precios unitarios de los principales materiales requeridos para la construcción del proyecto del caso de estudio..... | 107 |
| Cuadro 7: Precios unitarios de los principales equipos requeridos para la construcción del proyecto del caso de estudio..... | 108 |
| Cuadro 8: Cantidades y APU´s para actividades de obra del caso de estudio. ... | 110 |
| Cuadro 9: Valores subtotales del presupuesto de construcción. | 112 |
| Cuadro 10: Horario de trabajo en obra, asumido para el caso de estudio. | 115 |
| Cuadro 11: Personal calificado estimado para la construcción del caso de estudio. | 128 |
| Cuadro 12: Salario mensual del personal correspondiente a la mano de obra calificada del caso de estudio. (TC: Tiempo Completo, MT: Medio Tiempo). | 129 |
| Cuadro 13: Salarios de los ayudantes, para el caso de estudio. | 131 |
| Cuadro 14: Salarios de los oficiales, para el caso de estudio. | 132 |
| Cuadro 15: Valor y fechas de las actas de obra definidas para el caso de estudio | 133 |
| Cuadro 16: Datos tomados en cuenta para el cálculo de los ingresos del constructor. | 134 |
| Cuadro 17: Calculo total de los ingresos totales del constructor..... | 135 |

| | |
|--|-----|
| Cuadro 18: Fechas y cantidades de pedidos de concreto para el caso de estudio. | 138 |
| Cuadro 19: Flujos de efectivo por concepto del pago del pago de pedidos de concreto. | 138 |
| Cuadro 20: Fechas y cantidades de pedidos de acero para el caso de estudio. | 139 |
| Cuadro 21: Flujos de efectivo por pago de pedidos de acero de refuerzo..... | 139 |
| Cuadro 22: Materiales e insumos diferentes de concreto y acero requeridos para la ejecución del caso de estudio. | 140 |
| Cuadro 23: Subcontratos o servicios que afectan el flujo de caja del constructor durante la ejecución del proyecto. | 141 |
| Cuadro 24: Costo de alquiler equipos y fechas de pago de alquiler. | 142 |
| Cuadro 25: Nomenclatura utilizada en el modelo de dinámica de sistemas para los elementos relacionados con los ingresos del constructor. | 144 |
| Cuadro 26: Nomenclatura utilizada en el modelo de dinámica de sistemas para los elementos relacionados con la nómina del personal calificado. | 148 |
| Cuadro 27: Nomenclatura utilizada en el modelo de dinámica de sistemas para los elementos relacionados con la nómina del personal no calificado..... | 154 |
| Cuadro 28: Nomenclatura utilizada en el modelo de dinámica de sistemas para los elementos relacionados con los pedidos de concreto..... | 158 |
| Cuadro 29: Nomenclatura utilizada en el modelo de dinámica de sistemas para los elementos relacionados con los pedidos de acero. | 161 |
| Cuadro 30: Nomenclatura utilizada en el modelo de dinámica de sistemas para los elementos relacionados el alquiler de equipos. | 164 |
| Cuadro 31: Nomenclatura utilizada en el modelo de dinámica de sistemas para los elementos relacionados con el pago de servicios y materiales..... | 168 |
| Cuadro 32: Cantidades de obra obtenidas con el método tradicional 2D versus cantidades obtenidas con el modelo BIM 3D. | 181 |
| Cuadro 33: Clasificación archivos producidos en la fase de diseño del caso de estudio según formato digital. | 192 |

Cuadro 34: Interferencias e incoherencias en los diseños de la estructura en concreto reforzado de la estación de buses estudiada.194

RESUMEN

TÍTULO:

ANÁLISIS DEL FLUJO DE CAJA DE LA CONSTRUCCIÓN DE UN PROYECTO CON MODELOS BIM 5D Y DINÁMICA DE SISTEMAS*

AUTORES:

OMAR GIOVANNY SANCHEZ RIVERA**

PALABRAS CLAVES:

Flujo de caja, dinámica de sistemas, building information modeling, BIM 5D.

DESCRIPCIÓN:

El análisis y planificación del flujo de caja de un proyecto de construcción resulta una labor indispensable en la fase de diseño, labor que tiene como objetivo planificar y estudiar los flujos de efectivo que se clasifican en ingresos y egresos los cuales son generados por pagos de: materiales, equipos, herramientas, mano de obra, transportes, actas de obra, entre otros. La gran cantidad de elementos y el tamaño de los proyectos de construcción ocasionan que el estudio de los flujos resulte una labor compleja, en donde el insumo fundamental para garantizar precisión en las estimaciones es el nivel detalle de la información de construcción. Deficiencias en los ejercicios de planificación del flujo de caja pueden conllevar a eventos indeseados como detenciones de obra y en los casos más graves quiebras de compañías constructoras y abandono de obras. En el presente trabajo de investigación se presenta una metodología para el análisis y planificación del flujo de caja sustentada en la utilización de BIM (building information modeling) y la dinámica de sistemas, en donde el BIM es utilizado como plataforma de almacenamiento, integración, consulta y comunicación de la información, esto a partir de la elaboración del modelo digital con el cual se obtiene un modelo BIM 5D (ancho, alto, profundidad, tiempo y costo), la simulación del proceso constructivo en el modelo BIM 5D produce la información de entrada para el estudio de la dinámica de los flujos en un modelo de dinámica de sistemas, en donde es posible generar diferentes alternativas para el flujo de caja, lo cual resulta una herramienta ideal para la toma de decisiones en la fase de planificación, teniendo presente que es posible elegir las mejores alternativas basadas en la validación del proceso constructivo en el modelo BIM 5D y la disponibilidad de efectivo en el modelo de dinámica de sistemas.

* Trabajo de grado para optar al título de Magister en Ingeniería Civil

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Hernán Porras Díaz, Ingeniero Civil M.Sc. Ph.D.

ABSTRACT

TITLE:

CASH FLOW ANALYSIS OF A CONSTRUCTION PROJECT BIM 5D MODELS AND DYNAMIC SYSTEMS*

AUTHORS:

OMAR GIOVANNY SÁNCHEZ RIVERA**

KEYWORDS:

Cash flow, dynamic systems, building information modeling, BIM 5D.

DESCRIPTION:

Analysis and planning cash flow of a construction project is an indispensable work in the design phase, work that aims to plan and study the cash flows that are classified as income and expenses which are generated by payments: materials, equipment, tools, labor, transport, and minutes of work, among others. The large number of elements and the size of construction projects cause the resulting study of a complex work flows, where the key to ensuring accuracy in estimates input is the detail level of information construction. Shortcomings in planning exercises flow box can lead to unwanted events as arrests of work and in the most serious cases bankruptcies construction companies and abandonment of works. In this research a methodology for analysis and planning cash flow supported in the use of BIM (building information modeling) and system dynamics, where BIM is used as a storage platform, integration, query is submitted and communication of information from this digital model development with which a model BIM 5D (width, height, depth, time and cost) is obtained, construction process simulation model in BIM 5D produces input for the study of the dynamics of flows in a model system dynamics, where it is possible to generate different alternatives to cash flow, which is an ideal tool for decision making in the planning stage, bearing in mind that it is possible choose the best alternatives based on the validation of the model building process BIM 5D and the availability of cash in the system dynamics model.

* Graduate Project to obtain the degree of Master in Civil Engineering

** Department of Physical and Mechanical Engineering. Thesis advisor: Hernán Porrás Díaz, Ingeniero Civil M.Sc. Ph.D.

1. PLANTEAMIENTO Y JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

Los proyectos de construcción se caracterizan por requerir gran cantidad de recursos económicos, humanos, tecnológicos, entre otros, situación que conlleva a que la ejecución exitosa de los proyectos dependa de gran manera de la disponibilidad de recursos financieros para la realización de las actividades necesarias y por ende la satisfacción de las necesidades que dieron lugar a la formulación del proyecto [1-2-3-4]. Es por esto que para la ejecución de los proyectos, los clientes y constructores requieren una planificación precisa de los flujos de dinero con anterioridad al inicio de la ejecución de la obra [5-6-7].

La administración y planificación, de los flujos de dinero en la ejecución de un proyecto de construcción, resultan factores cruciales para asegurar el éxito de las actividades en obra [1-2-4-8-9-10-11]. Los flujos de dinero comprenden los ingresos y egresos que tiene el constructor por concepto de la ejecución del proyecto, en la literatura el conjunto de flujos de dinero es conocido como flujo de caja [12], la diversidad de las características e interacciones de un proyecto de construcción ocasionan que el análisis del flujo de caja presente numerosos desafíos [13]. Muchos proyectos poseen flujos de caja negativos durante una gran parte de su ejecución, hasta el día en el que se recibe el pago final [2-14-15], es por esto que en algunas ocasiones los constructores detienen la ejecución del proyecto o se ven obligados a solicitar créditos en las entidades bancarias, con restricciones como el límite de crédito o capacidad de endeudamiento [16], situaciones donde es posible observar la importancia del análisis y planificación del flujo de caja.

La mala gestión del flujo de caja se ve reflejada en los momentos en que se presentan valores negativos o excesivamente bajos, situación que genera una gran limitación para la ejecución de las actividades propias del programa de obra [15], en algunos de los proyectos la falta de recursos ocasiona retrasos en cronograma y cuantiosas pérdidas [2], factores que afectan de gran manera la competitividad de

las organizaciones. En la investigación *why do constructors fail?* [17], se determinó que uno de los principales factores por los que fracasan los constructores es que hay dificultad para predecir el flujo de caja, lo que afecta a otros factores y genera consecuencias de gran impacto para las firmas constructoras, deducción que es posible comprobarla a partir de los resultados de otras investigaciones [2].

A pesar que el flujo de caja, durante la construcción de un proyecto, es un factor de gran relevancia que permite garantizar y planificar los recursos para la ejecución de las actividades en obra, en la actualidad existen muy pocas herramientas informáticas que permiten su planificación y optimización [11-13-15-18]. Existen herramientas computacionales basadas en hojas de cálculo que requieren de un gran procedimiento para llegar al análisis del flujo de caja [15-10], lo que hace que la aplicación resulte tediosa y poco efectiva, teniendo presente el gran número de flujos de efectivo, condiciones y variables propias de la construcción de un proyecto.

De los modelos computacionales desarrollados, el modelo más detallado, en el análisis del flujo de caja de los proyectos de construcción, es el desarrollado por Navon [7] en la investigación *resource based model for automatic cash flow forecasting* [19], sin embargo en la investigación realizada por Chen (2002) se pudo evidenciar que el modelo propuesto por Navon posee notables limitaciones en cuanto a la idealización de los flujos entrantes y salientes cíclicos que se repiten en periodos de tiempo diferentes [7-20], además de una gran cantidad de operaciones para su aplicación.

Algunos investigadores han intentado proponer alternativas para el análisis del flujo de caja de la construcción de un proyecto [7], una de las más significativas es la investigación *portfolio cash assessment using fuzzy systems theory* [9], en donde se aplica la teoría de un sistema difuso para el análisis del flujo de caja de una empresa, sin embargo los modelos propuestos requieren extensos procesos manuales por parte del contratista [13-11]. Tradicionalmente, es posible observar que los

constructores pueden gastar semanas en las actividades necesarias para el análisis del flujo de caja y en el caso de presentarse cambios en el proyecto, la actualización del análisis requiere de la repetición de un gran volumen de cálculos y actividades [15], es por esto que la industria de la construcción requiere una herramienta, integrada y soportada en las nuevas tecnologías, que permita la elaboración y simulación del flujo de caja, bajo distintas condiciones en un tiempo reducido [13].

La elaboración de un modelo del flujo de caja es una prioridad para cumplir con los requisitos de precisión, eficiencia y flexibilidad [5-13-18], para el caso de los proyectos de construcción, la elaboración del modelo requiere de un gran número de actividades previas, algunas de las más importantes son: diseño de los elementos de construcción, cálculo de cantidades de obra, estimación de rendimientos, cálculo de precios unitarios (materiales, equipos, transportes y mano de obra), determinación de actividades de obra, elaboración del programa de obra, entre otras [5]. En investigaciones previas, se proponen algoritmos para el análisis del flujo de caja, en donde la gran mayoría de las tecnologías emergentes no son utilizadas [15], situación que conlleva a la no automatización de las metodologías y por ende la baja viabilidad de aplicación [11-13]. Una de las fortalezas, que debe poseer un modelo de flujo de caja, es el nivel de detalle [7] que se encuentra ligado a la información disponible [10-11-21], en un proyecto de construcción lograr un elevado nivel de detalle conlleva a la necesidad de la utilización de herramientas informáticas, teniendo en cuenta que la información de un proyecto de construcción es del tipo “Big Data”, que se refiere a que con los avances tecnológicos son más las fuentes de información y por tanto en la actualidad las organizaciones almacenan, procesan y analizan un gran volumen de información [22].

BIM es la sigla empleada para hablar de la tecnología *building information modeling*, definida por la AGC (Associated General Contractors of America) como: “*tecnología que permite la construcción virtual de estructuras a través del desarrollo y uso de software computacionales inteligentes que ayudan a simular la construcción*”. Con

el uso de BIM, el análisis del flujo de caja, de un proyecto de construcción, puede ser automatizado [15-22], esto con motivo a que es posible almacenar, gestionar y consultar la totalidad de la información del proyecto en una única base de datos digital [23], lo que resulta de gran beneficio, teniendo en cuenta que el insumo fundamental para los análisis de flujo de caja es la información [21], sin embargo se debe tener presente que la precisión de un modelo de flujo de caja depende de factores como: el programa de obra, el proceso constructivo, las fechas y montos de los pagos e ingresos, las actividades ejecutadas en obra, entre otros [14], es por esto que surge la necesidad de incluir las variables de tiempo y costo al modelo BIM, para el ejercicio del análisis del flujo de caja. En la actualidad, algunos investigadores y profesionales de la industria de la construcción han desarrollado e implementado los modelos del proceso constructivo BIM 5D [24-25-26], un modelo BIM 5D permite simular el proceso constructivo teniendo en cuenta cinco variables (dimensión en el eje x , dimensión en el eje y , dimensión en el eje z , tiempo y costo).

Un modelo del proceso constructivo resulta de gran utilidad para el análisis del flujo de caja, teniendo en cuenta que el éxito depende de gran manera de la información y el nivel de detalle del análisis [7-21], es posible inferir que el modelo del proceso constructivo BIM 5D requiere de las funcionalidades de una herramienta que permita modelar y simular los flujos de dinero entrantes y salientes, en donde la información obtenida del modelo BIM 5D se convierta en una fuente de datos confiable y detallada para la modelación y simulación del flujo de caja.

La naturaleza cambiante de los flujos de caja en el tiempo, conllevan a la necesidad de considerar un flujo de caja como un sistema dinámico [27-28-29-30], que en el caso de los proyectos de construcción, varía constantemente durante el tiempo de ejecución de la obra. La dinámica de sistemas permite estudiar el comportamiento de cualquier sistema respecto al tiempo [29-30-31-32], en el análisis del flujo de caja de los proyectos de construcción, permite explorar los diferentes resultados que se presentan por concepto de flujos de dinero entrantes y salientes relacionados con:

pagos, materiales, equipos, personal, entre otros, de esta manera se pueden plantear diferentes escenarios y realizar combinaciones de las distintas situaciones para finalmente analizar su comportamiento. Algunos investigadores han implementado la dinámica de sistemas en el modelado y simulación de flujos de dinero correspondientes a distintas actividades financieras [29-30-32-33-34], sin embargo en la biografía consultada no se reporta ninguna aplicación a los flujos de dinero de los proyectos de construcción. En las investigaciones realizadas es posible observar que la aplicación de dinámica de sistemas al modelamiento, análisis y simulación de flujos de dinero resulta de gran beneficio para planificación y gestión, ya que permite la generación de gran cantidad de escenarios con condiciones diferentes en un tiempo reducido, aspecto que es uno de los problemas existentes en el análisis de los flujos de caja de proyectos de construcción.

La vinculación, de información y beneficios de los modelos del proceso constructivo BIM 5D con las funcionalidades de la dinámica de sistemas, genera una herramienta tecnológica, que permite analizar el flujo de caja de un proyecto de construcción, con fortalezas como: la flexibilidad al cambio, el alto grado de detalle, la proyección y evaluación de diferentes escenarios en un tiempo reducido, la posibilidad de modelación y simulación de posibles decisiones, la integración con otras herramientas de la industria de la construcción, entre otras. Es por esto que resulta de gran importancia el estudio de la utilización de modelos BIM 5D y la dinámica de sistemas en el análisis del flujo de caja de los proyectos de construcción, teniendo en cuenta que en la actualidad no se utilizan ni se han utilizado estas tecnologías en los análisis de los flujos de caja de la industria de la construcción. De esta forma, resulta un importante aporte, al conocimiento y a la solución de problemas existentes, el estudio y desarrollo de la integración de los modelos BIM 5D y dinámica de sistemas en el análisis de flujos de caja.

Con base en lo expuesto, el problema que se desea abordar en la presente investigación es el reducido uso de las nuevas tecnologías, en los procesos de

análisis de los flujos de caja de proyectos de construcción, por tanto, la pregunta que se desea responder es: ¿cuál es la metodología para realizar el análisis del flujo de caja de la construcción de un proyecto con la utilización de modelos BIM 5D y dinámica de sistemas?

2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1 FLUJO DE CAJA

2.1.1 Definición

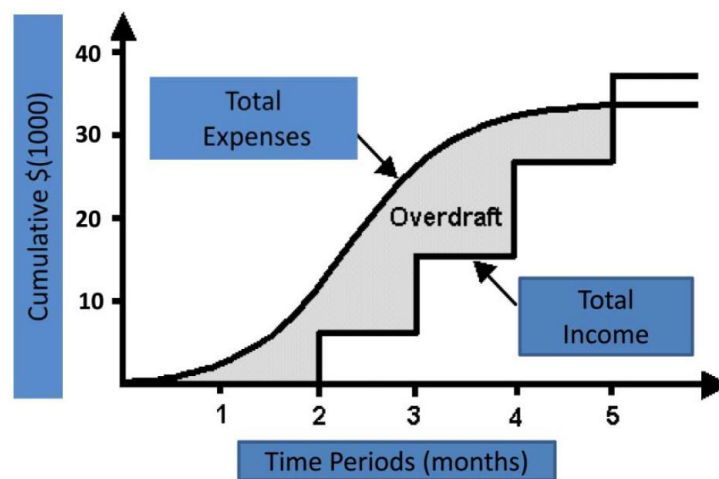
El flujo de caja es definido de dos formas, en la primera el flujo de caja se define como la recepción neta o el desembolso neto de dinero en efectivo como resultado de los ingresos y egresos que se producen en un periodo de tiempo, según esta definición el flujo de caja positivo indica un ingreso en un periodo de tiempo determinado y un flujo de caja negativo indica un desembolso [18]. Para el caso de los proyectos de construcción los ingresos se derivan principalmente de los fondos recibidos en forma de anticipos, pagos mensuales, liquidación de actas de obra, entre otros [11]. Los desembolsos se refieren a los fondos gastados en un contrato para pagar los salarios, materiales, transportes, equipos etc. [2-7]. El flujo de caja es una función del tiempo [12], los ingresos o egresos pueden darse al inicio, en el transcurso o al finalizar las actividades de obra, por tanto el tiempo de ocurrencia de los flujos puede ser diferente al tiempo de ejecución de las actividades. El tiempo de diferencia, entre la ejecución de las actividades y los flujos de efectivo relacionados, es conocido como lapso de tiempo, el cual puede ser positivo o negativo [11]. En esta definición, el flujo de caja es representado con la siguiente expresión:

$$\textit{Flujo de caja} = \textit{Ingresos} - \textit{Egresos} - \textit{Gastos generales}$$

Los ingresos del constructor se encuentran ligados al avance de las actividades de obra, ya que en la mayoría de los proyectos los pagos por parte de los dueños se realizan de acuerdo a las actividades ejecutadas en obra [35] por el constructor, la diferencia del tiempo entre la ejecución de las actividades y el desembolso del efectivo se conoce como periodo de facturación [11].

En la figura 1, es posible observar un esquema de la relación entre los ingresos y egresos, en donde la región sombreada en gris representa déficits financieros para el constructor. Muchos investigadores denominan la curva de egresos como la Curva S [2], esto con motivo a que su forma geométrica se asemeja a una “S” [10-12].

Figura 1: Relación entre ingresos y egresos de un proyecto de construcción.



Fuente: Al-Joburi, Al-Aomar, y Bahri [3]

En la segunda forma, el flujo de caja se define como el movimiento real o transferencia de dinero dentro o fuera de una empresa [2], según esta definición el dinero que es recibido por una compañía es denominado como flujo de caja positivo, mientras que el dinero pagado se denomina flujo de caja negativo. La diferencia entre los flujos de caja negativos y positivos se denomina flujo de caja neto [2-12]. Esta definición permite analizar el flujo de caja como la proyección de los costos del proyecto como una función del tiempo, donde los costos de las actividades se encuentran asociados a la duración de la actividad, tiempo que es tomado del programa de obra [11].

Los flujos se pueden categorizar como flujos periódicos y no periódicos,

Flujos periódicos: incluyen los intereses por financiamiento, salarios, retenciones, impuestos, entre otros, cuyos montos suelen ser diferentes en cada periodo [13], la frecuencia de actividad puede ser diaria, mensual o anual, entre otros [4].

Flujos no periódicos: incluyen los costos de permisos, transporte, costos de materiales, daños, compensaciones, entre otros [13].

El estudio, de los flujos de efectivo en un proyecto de construcción, resulta una labor compleja teniendo en cuenta el carácter único de todos los proyectos y el alto grado de incertidumbre presente en las distintas actividades [12].

La elaboración del flujo de caja de un proyecto de construcción incluye el costo de las actividades del proyecto, la duración y otras características, las características dependen del tipo de proyecto, el programa de obra, la compañía constructora, [4], condiciones de contratación, entre otros. El flujo de caja puede elaborarse a nivel de un proyecto específico o a nivel de una compañía constructora que se caracteriza por ejecutar más de un proyecto a la vez [4-11-12]

Al incluir un mayor número de detalles en el análisis de un flujo de caja es posible elaborar una herramienta de gestión del flujo de efectivo [10-19], herramienta que en la actualidad es una necesidad de las compañías constructoras, ya que algunas compañías han resultado en banca rota por concepto de la imposibilidad para predecir los flujos de caja de los proyectos con anterioridad a la ejecución [4-36]. La precisión de un análisis de flujo de caja se encuentra ligada al nivel de detalle de la información disponible, por lo tanto el número de detalles tomados en cuenta influyen en la precisión del flujo de caja [11], teniendo en cuenta que el sector de la construcción, es un sector cíclico y sensible que está sujeto a cambios en la

actividad económica, situación que afecta los flujo de efectivo a nivel de compañía [12].

La actividad de modelar el flujo de caja es considerada como una de las de mayor importancia en los proyectos de construcción, donde es posible observar un alto grado de complejidad, teniendo en cuenta el gran número de interacciones y variables que surgen en la ejecución de un proyecto de construcción [4], donde las interacciones y variables dependen del tiempo y los eventos que se presenten en obra.

En la actualidad un gran número de investigadores y profesionales de la industria de la construcción han enfocado sus esfuerzos a estudiar detalladamente la interacción compleja que se presenta entre los elementos que componen el flujo de caja [4], investigaciones en donde se ha evidenciado que algunos de los flujos entrantes y salientes presentan comportamientos lineales, exponenciales, sinodales, entre otros, situación que ha permitido desarrollar varias técnicas matemáticas que permiten realizar modelamientos y predicciones del comportamiento del flujo de caja [4-10], sin embargo, se observa que aplicar estas técnicas sin automatizar resulta un sistema no viable para los proyectos, teniendo en cuenta la inflexibilidad al cambio y el gran volumen de cálculos, es por esta razón que existe necesidad de desarrollar herramientas informáticas que permitan automatizar los procesos para el análisis del flujo de caja [11].

2.1.2 Gestión del flujo de caja

Para las compañías constructoras, la gestión de los flujos de efectivo resulta de gran importancia para la supervivencia [11], teniendo en cuenta el elevado costo económico que caracteriza a los proyectos de construcción.

La gestión del flujo de caja incluye los procesos de planificación y control, el proceso de gestión es de naturaleza dinámica en el cambiante entorno de los proyectos de construcción, entorno que se caracteriza por cambios en los costos de los proyectos o el inicio y terminación de las actividades [11].

Un sistema de gestión del flujo de caja de un proyecto de construcción resulta de gran importancia, teniendo en cuenta que un buen sistema puede convencer a los prestamistas de prestar el dinero para la ejecución de los proyectos, cuando un prestamista desembolsa el dinero desea saber que cualquier falta de liquidez es temporal y probable, lo cual puede ocurrir de forma inesperada en la fase de ejecución, en algunas ocasiones los constructores agotan el efectivo de forma inesperada y se ven obligados a solicitar créditos a entidades prestamistas, las cuales al analizar las falencias en la gestión del flujo de caja se presentan reacias al préstamo de efectivo [11].

De acuerdo con la investigación de Melik [21], una eficiente gestión del flujo de caja debería:

- Reducir el riesgo financiero del proyecto, disminuir la volatilidad y mantener la posición de la compañía proporcionando suficiente liquidez.
- Controlar los gastos del proyecto y prevenir posibles flujos de caja negativos.
- Optimizar los cobros y mejorar la capacidad de efectivo para hacer el proyecto más rentable.
- Planificar la capacidad total de crédito de la compañía con los bancos para suplir las necesidades de financiación previsibles.
- Encontrar los fondos necesarios con el más bajo costo posible.

- Mantener y mejorar la capacidad de crédito de la compañía.

La gestión estratégica financiera y los flujos de caja son dos ítems interrelacionados entre sí [21], teniendo en cuenta que el comportamiento de los flujos de caja depende de la gestión estratégica financiera del proyecto, es frecuente observar que en los proyectos de construcción no se cuenta con una estrategia formal para la gestión de los flujos de efectivo y por ende durante la ejecución de los proyectos se generan pérdidas económicas y flujos de caja negativos que comprometen la continuidad del proceso constructivo.

Es frecuente observar que los constructores se encuentren interesados en acelerar y maximizar los flujos de efectivo de entrada y controlar los flujos de efectivo de salida [21], a continuación se presentan algunas de las pautas propuestas por Melik [21].

- Negociar con el cliente para obtener condiciones de pago justas y lógicas y flujos que no pongan en riesgos la continuidad de la ejecución del proyecto.
- Presentar las actas de obra tan pronto como sea posible y no olvidar incluir los costos por concepto de administración.
- Controlar las actividades realizadas en obra y realizar los trámites de cobro tan pronto como sea posible.
- Acelerar la ejecución del proyecto para obtener los mayores flujos de efectivo entrantes y disminuir los costos por concepto de la administración del proyecto.

Todas las pautas resultan insuficientes si no se cuenta con una planeación estratégica y ejecución de los flujos de efectivo de entrada y salida, todo soportado en una herramienta tecnológica que permita consultar la información necesaria para la toma de decisiones.

2.1.3 Planificación del flujo de caja

La planificación del flujo de caja puede ser tan compleja como el usuario lo requiera, esto con motivo a que la complejidad de los modelos de proyección se encuentra estrechamente ligada al nivel de detalle de la información utilizada [10], de esta forma si se cuenta con información de un alto nivel de detalle la proyección del flujo de caja resulta una labor de gran complejidad que requiere una considerable cantidad de cálculos y procesamiento.

Uno de los mayores obstáculos en la planificación del flujo de caja es la utilización de la técnica más apropiada [10], investigadores y profesionales de la industria de la construcción han desarrollado diferentes técnicas para la proyección del flujo de caja, algunas de las más importantes son: regresión de polinomios [10], programación lineal [4], métodos de entropía [46], métodos fuzzy [9-46], redes neuronales [18], algoritmo genéticos [18-36], entre otros.

Elaborar la planificación del flujo de caja de un proyecto de construcción resulta una labor de gran importancia, teniendo en cuenta que un gran número de compañías constructoras alrededor del mundo se han visto en banca rota por concepto de la no planificación del flujo de caja de los proyectos [11-21]. Es por esto que las compañías constructoras tienen la necesidad de prestar especial atención a las actividades propias de planificación, gestión y ejecución de los flujos de efectivo.

La planificación del flujo de caja es posible realizarla en cualquier etapa del proceso constructivo o en la fase de diseño del proyecto de construcción, la planificación de

los flujos puede conllevar a la elección de proveedores en el momento en el que se realice el ejercicio de planificación [11]. Para los procesos de planificación, resulta indispensable la utilización de modelos [18] que permitan la realización de simulaciones con el objetivo de tener la posibilidad de contar con una herramienta que permita analizar posibles escenarios futuros a partir de diferentes parámetros de entrada.

La planificación del flujo de caja depende en gran manera de las actividades relacionadas con los presupuestos de construcción [37], esto debido a que al momento de la estimación de los precios unitarios de las distintas actividades de obra se involucran los precios unitarios de insumos como: materiales, equipos, mano de obra y transporte. Resulta indispensable contar con presupuestos de obra precisos ya que a partir de este documento se toman un gran número de decisiones [37], algunas relacionadas con el flujo de caja.

2.1.4 Balance del flujo de caja

Uno de los parámetros de mayor importancia en el estudio de los flujos de caja es el balance; el balance representa las diferencias entre las salidas y las entradas del flujo de efectivo [13], algunos autores denominan la diferencia entre ingresos y egresos como el sobregiro [16].

El gran número de flujos entrantes y salientes ocasionan que el análisis del balance de los flujos de caja sea una labor compleja, ya que modelar el comportamiento del balance resulta una labor de gran complejidad [4], calcular el balance en distintos puntos de ejecución del proyecto resulta vital para asegurar los recursos para la ejecución de las actividades.

Algunos investigadores y profesionales de la industria de la construcción sugieren que una empresa constructora puede colapsar debido a la falta de flujo de efectivo, incluso con un balance positivo [11-36].

2.1.5 Proyección del flujo de caja a partir de modelos matemáticos

En la planificación de flujos de caja de proyectos de construcción, los modelos matemáticos son utilizados cuando la información disponible es limitada, teniendo presente que los datos mínimos requeridos incluyen la duración del proyecto, el costo total y datos generales [11]. Otros métodos matemáticos se fundamentan en series históricas de datos de proyectos previos para realizar predicciones del flujo de caja [21].

Muchos de los modelos matemáticos fueron desarrollados para la planificación de los egresos únicamente dejando de lado flujos correspondientes a los ingresos, por tanto los matemáticos para la planificación del flujo de caja son basados en la planificación del flujo de los egresos, entre los más populares modelos matemáticos se encuentran los polinomios de grados 3, 4 y 5 [11].

Los modelos matemáticos carecen de precisión, teniendo en cuenta que generalmente se basan en datos genéricos, datos que no llegan al nivel de recursos [11].

Modelos basados en polinomios: Se ha observado que en algunos casos la relación, entre el costo de construcción acumulado y el tiempo, posee una forma de S, situación por la cual muchos investigadores han utilizado polinomios de diferentes grados para representar el fenómeno a partir del ajuste de curvas [12-21].

Modelos de regresión lineal: En las investigaciones de Kenley [5], se utiliza datos históricos y técnicas de regresión para simular los flujos de efectivo

correspondientes a los egresos, basado en: el costo del proyecto, la duración del proyecto y unas constantes determinadas con base en los modelos de regresión lineal [12].

2.1.6 Curva S

Los modelos de curva S son empleados históricamente para estudiar la relación entre el costo acumulado de un proyecto de construcción y el tiempo en que se genera el costo acumulado, el costo acumulado es posible convertirlo a flujos de efectivo y de esta forma es posible obtener el flujo de caja a partir de la curva S [12]. La curva S resulta una alternativa que permite realizar la planificación del flujo de efectivo en un tiempo reducido, sin embargo su precisión y flexibilidad requieren ser mejorados con la aplicación de herramientas informáticas [18].

La curva S se utiliza principalmente para estudiar el flujo de dinero de un proyecto en particular es poco frecuente que se utilice para el estudio del flujo de caja a nivel de compañía [11].

En la actualidad se han desarrollado modelos de curva S equipados con datos de proyectos de construcción y mecanismos de retroalimentación [12-14], sin embargo la utilización de los modelos resulta complicada teniendo en cuenta el carácter único e individual de los proyectos de construcción [12].

La curva S tuvo sus orígenes en los años sesentas. En el año 1968 Nazem [38] presento una metodología basada en información proporcionada por proyectos de construcción desarrollados, información que utilizaba para la proyección del comportamiento futuro de los flujos de caja a partir de las experiencias previas, Nazem concluyo que una curva de referencia podía ser adoptada para obtener el balance del flujo de caja, en donde la curva adoptada se obtenía a partir de datos de proyectos similares. Sin embargo el modelo de Nazem presenta la dificultad para

la obtención de una curva ideal [21]. Con base en el modelo de Nazem [38], Jepson [39] propuso que el modelo no resulta preciso teniendo presente que los resultados no correspondían con los valores proyectados, ya que el modelo se fundamenta en la información de otros proyectos. En el año 1969 Bromilow [40] presentó una expresión matemática que relaciona el costo y la duración del proyecto:

$$T = KC^B$$

Donde la variable K está asociada a la eficiencia, C es el valor total del proyecto, B es un factor de sensibilidad y T es la duración actual de la ejecución del proyecto. Una de las fallas del modelo de Bromilow es que no se tuvo en cuenta el retraso de los pagos [21].

2.1.7 Flujo de caja como indicador del estado financiero de una compañía

Es frecuente observar que los dueños de los proyectos de construcción posean dudas al seleccionar una compañía constructora para hacer realidad los proyectos. En los procesos de selección se estudian factores como: habilidad técnica, estabilidad financiera, habilidad y técnica de gestión, experiencia, trascendencia, recursos, seguridad, entre otros, sin embargo en la mayoría de los casos la gestión y ejecución de los flujos de caja no son tomados en cuenta como factores determinantes en la selección de un constructor, el comportamiento, de los flujos de caja de una compañía constructora, resulta un indicador de los estados financieros que permite apreciar de gran manera la estabilidad financiera de una compañía y evaluar los riesgos del crédito [36].

El estado financiero de una compañía constructora no revela únicamente la gestión estratégica también revela la competitividad de una compañía, y la competitividad revela la posibilidad que la compañía tiene de sobrevivir [12].

2.1.8 Toma de decisiones con los flujos de caja

La toma de decisiones financieras en los proyectos de construcción es un problema con significativos impactos que en la actualidad los constructores deben afrontar, un sistema de toma de decisiones apoyado por una labor eficiente de gestión puede conducir a optimizar el uso de los recursos en las compañías [18], de esta forma, es posible disminuir las pérdidas en los diferentes procesos y aumentar los dividendos.

Las decisiones relacionadas con el flujo de caja deben estar apoyadas por procesos de planificación y gestión de los flujos de efectivo, procesos que deben realizarse de forma previa a los movimientos financieros [18], esto con motivo de contar con la posibilidad de anticiparse a la acción y evitar afrontar decisiones críticas en la fase de construcción de los proyectos.

Algunos proyectos de construcción son terminados tal como se planificaron pero la mayoría no llegan a ejecutarse como se planificaron, los eventos que se presentan durante la ejecución ocasionan que los gerentes deban tomar decisiones críticas de forma rápida y con una gran incertidumbre, en donde seleccionar la alternativa más apropiada resulta una labor complicada [41].

El análisis de las decisiones críticas se realiza a partir de dos bases: la teoría de decisión y la resolución de conflictos políticos, en donde la teoría de la decisión se centra en tomar decisiones en un ambiente de incertidumbre donde es aplicado un proceso de toma de decisiones, este proceso sigue tres fases secuenciales: determinística, estocástica e informativa, en donde las tres fases se repiten hasta que se cuenta con suficiente información para la elección de la alternativa de mayor viabilidad; por desgracia la incertidumbre en la ejecución de proyectos de construcción ocasiona que el proceso carezca de información y por tanto no pueda realizarse a plenitud [41].

El proceso de toma de decisiones involucra la optimización de solución de conflictos con los enfoques cualitativo y cuantitativo, esto sustentado en información incierta [18-41], teniendo presente el gran número de variables que se presentan en la ejecución de un proyecto de construcción, resulta indispensable la automatización de los procesos de proyección del comportamiento de los flujos de efectivo, de esta forma, será posible realizar simulaciones del comportamiento del flujo de caja a partir de diferentes parámetros de entrada y analizar el impacto de las posibles decisiones, brindando la posibilidad de optimizar el proceso de toma de decisiones [18].

2.1.9 Costos directos e indirectos en el flujo de caja de un proyecto de construcción

La función total de costo de un proyecto de construcción está compuesta por dos componentes: el costo directo y el costo indirecto [42-43].

Costos directos: están basados en los materiales y mano de obra directa destinados a la producción de algún elemento del proyecto de construcción.

Costos indirectos: están representados por costos que no tienen relación directa con la ejecución de actividades de actividades, algunos ejemplos son: personal de supervisión, papelería, impuestos, pólizas de seguro, utilidad del constructor, entre otros.

Los costos indirectos aumentan linealmente con el incremento de la duración del proyecto [42-43], es por esto que una estrategia para la disminución de costos es la reducción del tiempo de ejecución del proyecto de construcción, teniendo presente la conservación o disminución de los costos directos del proyecto [21].

2.2 BUILDING INFORMATION MODELING (BIM)

2.2.1 Definición

BIM es la sigla empleada para hablar de la tecnología Building Information Modeling, definida por la AGC (Associated General Contractors of America) como: “tecnología que permite la construcción virtual de estructuras a través del desarrollo y uso de software computacionales inteligentes que ayudan a simular la construcción”, definición que permite pensar el modelo BIM como una representación digital: que posee información explícita y modificable de los diseños de un proyecto de construcción y que funciona como medio de comunicación de información de construcción entre los actores involucrados en el proyecto [44-45-46]. BIM es un modelo tecnológico utilizado para producir, comunicar y analizar la información de un proyecto de construcción [45], esto a partir de la integración de la información en un sistema de comunicación [47].

BIM también es definido como “una representación computarizada de las características físicas y funcionales de una instalación y su información del ciclo de vida, que utiliza estándares aprobados en la industria para informar la toma de decisiones enfocadas al aumento del valor de los proyectos” [48-49-50], BIM hace posible la creación y gestión de los proyectos de construcción e infraestructura de una forma más rápida y económica, ya que es un modelo digital paramétrico donde la información de los proyectos es almacenada en elementos digitales que representan los elementos de construcción del proyecto [37-49-51-52-53], los objetos pueden tener o no tener atributos geométricos con información funcional, semántica o topológica [49-51-62]. BIM resulta una herramienta emergente que en la actualidad está siendo implementada en las diferentes fases de los proyectos de construcción (diseño, construcción, operación, demolición, etc.) [45].

86-87-88], estimación de costos [54-66-77-37-49-51], mantenimiento y operación de construcciones existentes [46-49-51-54-72-80-81-89-90-91], localización de elementos de construcción [14-22-49-55-73-75], diseño y fabricación de elementos [46-47-49-51], simulación de la luz solar [92], entre otras.

Los modelos BIM cuentan con beneficios adicionales a los modelos tridimensionales 3D, ya que un modelo BIM se fundamenta en un modelo tridimensional en donde es posible almacenar, integrar, consultar y gestionar la información de un proyecto de construcción [37].

El desarrollo de los modelos en tres dimensiones (3D) inicio en las cercanías del año 1970 apoyado con los dibujos asistidos por computador (CAD) y los esfuerzos de algunas compañías [49], muchas compañías desarrollaron herramientas integradas de análisis, en donde comenzó a surgir el concepto básico de BIM, sin embargo el sector de la construcción se afianzo en el diseño tradicional en dos dimensiones [49-51]. Aproximadamente en el año 2000 BIM fue introducido a través de la aplicación en una cantidad reducida de proyectos piloto [49-93], en donde el BIM se utilizó como herramienta de soporte para el diseño de ingenieros y arquitectos [49], por esta razón la mayor de la investigación se enfocó en: el diseño, detección de interferencias, visualización, cuantificación y gestión de la información [49-51]. En la actualidad el uso de BIM tiende a concentrarse en la planificación previa del diseño, construcción y entrega del proyecto integrado de edificios e infraestructuras, desde poco tiempo atrás se ha convertido en tendencia la aplicación de BIM en conjunto con los principios de la filosofía de reducción de pérdidas *Lean Construction* (LC) [46-49-51-94-95].

BIM puede ser aplicado a diferentes tipos de proyectos como: hospitales, edificaciones multifamiliares, escuelas, residencias universitarias, estaciones de buses, oficinas médicas, laboratorios, hoteles, edificaciones residenciales [54], proyectos urbanísticos, infraestructura vial, acueductos, alcantarillados, entre otros.

La aplicación de BIM generalmente se realiza en el transcurso de las fases de diseño planeación y construcción de nuevas edificaciones [49-62-67-96-97-130], el uso en edificaciones existentes es un poco reducido con respecto al uso en edificaciones nuevas [49]. Para cada tipo de proyecto de construcción el nivel de detalle requerido es diferente y por lo tanto la aplicación de BIM se ve influenciada por esta situación [49]. Según encuestas recientes BIM resulta adecuado para edificios con un elevado nivel de complejidad, los encuestados coinciden en que BIM resulta adecuado para edificaciones de tipo comercial, residencial, educativo, salud y muchos otros tipos de edificaciones [49-95-98].

En la investigación de Becerik-Gerber y Kensek [99] se determinó que las tendencias de investigación de BIM se enfocaban a tres grandes áreas: BIM y el ciclo de vida de un proyecto, BIM y la práctica sostenible y por último la administración de proyectos de construcción con BIM [45-99]. En la investigación de Levitt [100] se plantean tres tendencias emergentes en la ingeniería de la construcción: nuevas estructuras de gobierno para que los proyectos puedan apoyar una industria de la construcción más global, el desarrollo de los proyectos de forma integrada y el aumento de la sostenibilidad a través de nuevos enfoques y tecnologías de la información [99-100].

De acuerdo a la investigación realizada por Becerik-Gerber et al. [46] el BIM está siendo utilizado en las fases de diseño y construcción, sin embargo en las fases de administración y operación el uso de BIM es reducido, situación que permite observar que se requiere de esfuerzos para la implementación y desarrollo del BIM en los procesos de operación y gestión de los proyectos de construcción. En una encuesta realizada por Becerik-Gerber et al. [46], fue posible deducir que las potenciales aplicaciones que puede tener BIM en la gestión de proyectos de construcción son: localización de elementos de construcción, facilidad de acceso en tiempo real a las bases de datos, visualización, mercadeo, revisión de mantenibilidad, creación de activos digitales, administración de espacios,

administración de emergencias, control y monitoreo de energía, entrenamiento de personal y desarrollo, entre otros.

2.2.2 Almacenamiento de la información de construcción en BIM

El almacenamiento de los datos es una de las amplias fortalezas de los modelos BIM, ya que los modelos pueden ser usados efectivamente por varios miembros, facilitando la comunicación, coordinación del diseño y construcción de los diferentes elementos de construcción [54], una parte de la información del proyecto es generada al mismo tiempo que el proyecto es elaborado [54], la información es compilada y almacenada en una base de datos digital [46], en la actualidad investigadores en distintas ubicaciones geográficas se encuentran desarrollando las herramientas informáticas BIM para lograr obtener compatibilidad con documentos relacionados con los distintos elementos de construcción [46].

En un modelo BIM la información es almacenada en objetos inteligentes [37], los elementos pueden tener *atributos funcionales* como duración de la instalación y costo, *atributos semánticos* como: conectividad, agregación, contención e intersección de la información, *atributos topológicos* como: ubicaciones, adyacencia, perpendicularidad, entre otros. BIM proporciona una plataforma para integrar la información a través de un modelo digital [37], de esta forma es posible reducir errores de diseño y de omisión de la misma forma es posible reducir los tiempos en la elaboración de los documentos de diseño. Un modelo BIM completo almacena toda la información y representaciones en un archivo singular, en el modelo elementos de construcción son usados para modelar y archivar en las librerías [45], lo que en el software Autodesk Revit se conoce como familias.

El almacenamiento de información en un modelo BIM puede ser tan ordenado como se desee, por tanto se debe tener presente apropiar metodologías para almacenar la información de forma ordenada durante la etapa de modelación, ya que

información ordenada conduce a un proyecto ordenado [101]. Existe la necesidad de almacenar una cantidad considerable de información en los modelos BIM, algunos ejemplos son: información general de construcción, datos detallados sobre los componentes, equipos de instalación necesarios, ubicación de los proveedores, proveedores, ubicaciones exactas, materiales, propiedades físicas, plan de mantenimiento, entre otros [46-49].

2.2.3 Beneficios de BIM

En la investigación de Sacks y Barack [56], se determinó que BIM ayuda a incrementar la productividad en un rango de 15% a 41% para la fase de diseño de estructuras en concreto reforzado [44], lo cual resulta de gran beneficio para las firmas diseñadoras teniendo en cuenta que la elaboración de un diseño es considerada como un servicio y no como un producto [56]. En la Universidad de Stanford, en el *Center for Integrated Facilities Engineering* (CIFE) se determinó que BIM contribuye con la eliminación del 40% de actividades de obra no tenidas en cuenta en la elaboración del presupuesto de obra, además de una reducción del 80% del tiempo empleado en la generación de estimados de costo de construcción, también se determinó que la implementación de BIM podría contribuir con la reducción del hasta el 7% de la duración de total de un proyecto [44].

Uno de los más significativos beneficios de BIM, se da en la fase de diseño de los proyectos de construcción, en donde es posible aumentar la productividad en la elaboración de documentos de diseño [37-56], ya que a partir de un modelo es posible generar rápidamente diferentes vistas tanto en planta como en altura bien sea del proyecto o de algún detalle específico, lo que resulta en un sistema dinámico flexible al cambio, en donde un eventual cambio se actualiza automáticamente en todas las vistas comprometidas con el objeto modificado [45], además en cuestión de memorias de cálculos de diseño, BIM resulta ideal teniendo en cuenta que son

generadas automáticamente al terminar los procesos de diseño [48], aumentando la productividad en la producción de documentos de diseño [45].

En BIM los elementos de construcción son modelados mientras que se dibujan, a diferencia del método tradicional en donde las actividades de modelar y dibujar son actividades independientes [48-56], el modelo puede ser ensamblado digitalmente y visualizado en tres dimensiones simultáneamente [54] lo que resulta de gran provecho para la detección de falencias, situación en donde es posible observar un indicador de eficiencia de la implementación de BIM en los procesos de diseño, es por esta razón que BIM es considerado como una herramienta de visualización que resulta ideal para la detección de errores e inconsistencias [37].

Teniendo presente que en un modelo BIM se encuentran la totalidad de los elementos de construcción ubicados espacialmente donde pertenecen, en el proceso de elaboración del modelo es posible detectar situaciones de incoherencia e inconsistencia entre los elementos [56], de esta forma, es posible ajustar tales falencias antes del inicio de obra, aumentando así la calidad de los diseños del proyecto. Se podría decir entonces que BIM resulta una herramienta ideal para la integración de la información producida por los diferentes profesionales involucrados en un proyecto de construcción, ya que es común que los conflictos se presenten entre elementos de diferentes disciplinas, por ejemplo: conflictos entre elementos de las redes hidrosanitarias y elementos estructurales.

Con BIM los actores del proyecto (dueños, diseñadores, constructores, proveedores, etc.) trabajan en conjunto desde etapas tempranas del proyecto [37-45-54-102], BIM puede ser usado como un vehículo de comunicación entre los actores [45]. Es por esto que la implementación efectiva de BIM puede requerir realizar modificaciones a los sistemas de contratación que son utilizados tradicionalmente, esta es una de las razones por las cuales, en los últimos años, se ha desarrollado e implementado el proceso *Integrated Project Delivery (IPD)*, el cual

se fundamenta en la integración de: personas, equipos, sistemas, estructuras de negocio, buenas prácticas, entre otros, en las etapas iniciales de un proyecto de construcción [54-102].

En la investigación realizada por Goucher y Thurairajah [78] se ilustran beneficios de BIM como: habilidad para el trabajo colaborativo, velocidad, cálculo de cantidades, visualización de los elementos de construcción y mejora de los servicios de asesoramiento y costo [37].

La relación entre el cliente y el diseñador se ha presentado como un fenómeno complejo pues en muchas ocasiones el diseñador de un proyecto no logra satisfacer las expectativas del cliente; uno de los principales factores por los que se presenta esta situación es que el diseñador no logra transmitir sus ideas para que sean evaluadas por el cliente, con modelo BIM esta situación es superada, teniendo en cuenta que es posible realizar una construcción virtual de las ideas del diseñador y de esta forma el cliente o dueño tiene la posibilidad de evaluar y proponer las modificaciones que este considere.

Kim [63] en su investigación propone que un listado de los beneficios de BIM incluye pero no se limita a:

- Precisión, eficiencia, y simulación 3D, comparado con los modelos tradicionales CAD 2D.
- Elementos que cuentan con un significado arquitectónico.
- Diseño tridimensional y visualización para entender de mejor forma las características de los proyectos de construcción.

- Notables destrezas para la visualización (animación, estudios de sombras de sol, renders y más).
- Análisis estructural, cálculos de energía, detección de interferencias y otros.
- Integración de documentos de diseño que permite reducir errores.
- Automatización, fechas y horarios de los elementos de construcción.
- Previsibilidad y planificación de cantidades de obra.

Clevenger y Khan [47] proponen que uno de los más significativos beneficios de BIM se da en el diseño y fabricación de elementos de construcción, donde los elementos son modelados y aprobados por un experto en el área a continuación es posible realizar guías de instalación y fabricación en un tiempo reducido, situación que difiere con el método tradicional en donde el fabricante se basa en dibujos en dos dimensiones que generalmente carecen de los detalles constructivos.

Una característica de BIM que beneficia a los proyectos de construcción es la detección de elementos de construcción, algunos de los cuales son difíciles de localizar en el proyecto, ya que se encuentran ocultos por otros elementos y suelen causar inconvenientes en momentos como el de la elaboración del presupuesto de construcción y la ejecución [46].

2.2.4 Adopción de BIM en la industria de la construcción

En la actualidad, el BIM es utilizado por diferentes profesionales de la industria de la construcción y centros de enseñanza como colegios y universidades, donde uno de los motivos de su uso se fundamenta en la capacidad de integrar la información de construcción en una única base de datos digital [48], superando las barreras de un simple modelo en tres dimensiones (3D) y de los dibujos en dos dimensiones

(2D), en donde es posible observar una evidente fragmentación entre las diferentes disciplinas de las que está compuesto un proyecto de construcción [44]. BIM está cambiando las prácticas tradicionales en términos de personas, procesos, cultura de trabajo, comunicación y modelos de negocio, sin embargo la adopción de BIM en la industria de la construcción depende de cómo la industria percibe los beneficios [44-48].

Uno de los mayores obstáculos en la adopción de BIM es el tema de los costos económicos que implica para una compañía adquirir los equipos, licencias y capacitación para implementar BIM [37-44]. En las organizaciones es frecuente observar iniciativas de implementación, sin embargo los mejores resultados solo pueden alcanzarse cuando el cambio se extiende más allá ámbito individual y se convierte en un cambio a nivel de compañía [48]. Los interesados en implementar BIM en las compañías constructoras se deben enfrentar a la difícil tarea de determinar la forma de integrar BIM a las metodologías existentes de trabajo [37]. Una barrera que afecta de forma significativa la adopción de BIM es la falta de personal con habilidades BIM [45-103], es por esto que la mayoría de compañías que han implementado BIM han tenido que realizar procesos de capacitación de personal [44-103]. Aunque la implementación de BIM implica cambios profundos para los actores de los proyectos, las utilidades que se pueden obtener hacen que resulte viable la implementación de BIM [49-51-67].

Se han definido varios parámetros y diferentes técnicas para la evaluación del grado de adopción de BIM en las compañías constructoras [55-101-104], algunas técnicas consisten en hojas de cálculo, procesos de *benchmarking* y otras son desarrolladas empíricamente, algunos de los parámetros que son utilizados son: abundancia de datos, ciclo de vida de las vistas en los modelos, roles o disciplinas, procesos de negocio, líneas de tiempo de respuesta, métodos de entrega, información gráfica, capacidad espacial, precisión de la información, cambios de gestión, interoperabilidad, entre otros [55-57-101]. A pesar de los inconvenientes en la

implementación de BIM, en la actualidad es posible observar un crecimiento en la adopción por parte de las compañías de la industria de la construcción alrededor del mundo, por tanto una de las principales barreras en la implementación de BIM es de la falta de conocimiento [37-55-104]. En la investigación de Yan y Damian [102], se determinó que las compañías norteamericanas están adoptando BIM en una mayor medida con respecto al resto del mundo [37]. Algunos proveedores del servicio de venta de licencias de paquetes BIM, han estudiado la adopción de BIM a partir de encuestas, los estudios más completos se han llevado a cabo en países como: Inglaterra, Francia, Alemania [104-105], Estados Unidos [105-106], Australia y Nueva Zelanda [104-107].

2.2.5 BIM en la educación

BIM es utilizado como un ambiente virtual en los centros de educación de arquitectura, ingeniería, construcción y operación se utiliza para la enseñanza y el aprendizaje de los futuros profesionales de la industria de la construcción [44-45]. BIM presenta la oportunidad para que los estudiantes adquieran las habilidades necesarias para casos de la vida real [44], esto a partir del uso de un ambiente virtual donde es posible poner a prueba diferentes escenarios con diferentes variables sin el riesgo de pérdidas económicas o humanas.

Algunos investigadores defienden la iniciativa de que en los currículos de los programas académicos se incluya temáticas relacionadas con el BIM que aporten a las competencias del futuro egresado [44-45]; con los cambios en los métodos de enseñanza, BIM ha empezado a ser incorporado en los programas académicos de algunos centros de educación [45]. Además de los programas profesionales BIM ha sido utilizado en formación de personal de campo, protocolo de salud y seguridad, funcionamiento de la maquinaria, planificación logística, análisis de constructibilidad, entre otros [44]. En la actualidad en algunos programas académicos se utiliza BIM, desafortunadamente los efectos de aprendizaje

aportados por BIM raramente son valorados y medidos. En algunos centros de educación se observa que los docentes del área de la ingeniería de la construcción y administración fomentan a sus estudiantes la adquisición de habilidades en el manejo herramientas BIM [45]. En la investigación Casey [108] se presentó un estudio de como unificar BIM en los currículos de los programas de ingeniería civil [45-108].

En la investigación de Berwald [109] se comparó una clase de estudiantes donde se utilizaron los paquetes BIM con una clase donde se utilizaron los tradicionales paquetes CAD de dibujos en dos dimensiones 2D, en el estudio fue posible observar las experiencias de cada uno los métodos con los que se evidencio que el uso BIM resulta de gran beneficio para los procesos de formación. Otro de los hallazgos de Berwald está relacionado con las áreas más estudiadas, relacionadas con la industria de la construcción, donde se determinaron las siguientes: educación en construcción (21.05%), trabajo colaborativo (21.05%), construcción (18.42%), arquitectura (10.53%), administración (10.53%), estructura (10.53%), redes hidrosanitarias (10.53%) y transporte (2.63%) [45-109].

2.2.6 Seguimiento del proceso de construcción con BIM

El seguimiento de obra es tradicionalmente mencionado con expresiones como “inspecciones visuales” y “reportes”, es por esto que inspectores son seleccionados y entrenados para desempeñarse de acuerdo a estas especificaciones. Realizar el seguimiento de un proyecto de construcción resulta una extensa operación manual que requiere de personal altamente calificado, situación que ocasiona que el servicio de inspección resulte costoso y poco automatizado. Con la aparición de las nuevas tecnologías surgió la necesidad de reinventar y automatizar los procesos de seguimiento de obras [85], diferentes investigadores y profesionales comenzaron a desarrollar e implementar diferentes tecnologías como: identificación por

frecuencias de radio, sistemas de posicionamiento global (GPS), fotogrametría, modelos tridimensionales, escáneres láseres, entre otros [85].

Gracias al desarrollo de BIM de los últimos años, ha sido posible implementar herramientas de tratamiento de nubes de puntos, en donde a partir de un conjunto de puntos se obtiene un modelo BIM, los puntos son tomados con un escáner laser en un día determinado de la obra y posteriormente con el apoyo del modelo BIM se desarrollan las labores de seguimiento [85], de esta forma se ha logrado una alta precisión y automatización en los procesos de seguimiento, sin embargo este enfoque en la actualidad no se ha implementado en las compañías constructoras, teniendo en cuenta su complejidad y los desarrollos faltantes, en los paquetes de software BIM comerciales, relacionados con el tratamiento de nubes de puntos.

2.2.7 BIM en el trabajo colaborativo

La entrega de proyectos de construcción generalmente resulta una tarea compleja tomando en cuenta los enfoques técnicos, organizacionales, logísticos y administrativos. En una parte significativa de las actividades de los proyectos el trabajo es realizado en un ambiente de no colaboración, en donde se ha procurado la separación entre las actividades del diseño y las de la construcción [37-102], situación que es causante de múltiples falencias en los procesos de construcción, una de las falencias de mayor importancia es la baja productividad del sector, en donde una gran proporción de las actividades que se realizan no se convierten en valor agregado para los proyectos, lo que finalmente se traduce como pérdidas [102].

Como resultado de la no integración de las fases de diseño y construcción está: la dificultad para generar, transmitir, reusar, coordinar y administrar la información lo que se traduce en una baja productividad y en consecuencia retrasos y sobrecostos [37]. En la actualidad existe la necesidad de integrar la totalidad de la información

producida durante las diferentes fases del proyecto, esto fundamentado en la necesidad de mejorar el trabajo colaborativo ya que cada profesional produce su propia información y generalmente se olvida de los demás profesionales, lo que deja como consecuencia que al momento de la integración se presenten inherencias, incompatibilidades e información faltante.

BIM resulta una herramienta ideal para el trabajo colaborativo ya que permite el almacenamiento e integración de la información de construcción de un proyecto en una única base de datos [37-45-54-102-110] los modelos pueden funcionar como vehículos de comunicación entre los actores [45] fomentando de esta forma la integración y el trabajo colaborativo, es por esto que BIM permite facilitar el trabajo por parte de múltiples profesionales. En algunas organizaciones se han adaptado modelos de trabajo colaborativo en la nube [37].

Teniendo presente que un modelo BIM colaborativo es un ambiente virtual en donde distintos profesionales de distintos saberes interactúan entre sí, es posible deducir que BIM resulta una herramienta ideal para integrar a dueños, diseñadores, constructores y proveedores desde etapas tempranas de los proyectos [102].

2.2.8 BIM en la estimación de los presupuestos de construcción

Es frecuente observar que los dueños de los proyectos y constructores se fundamenten en la estimación de costos realizada en la fase de diseño para la planificación financiera [46], esto es causante de consecuencias como la quiebra de los constructores, situación que se presenta por la incertidumbre que se presenta en la elaboración del presupuesto de construcción que generalmente es obtenido a partir de cálculos manuales de cantidades de obra basados en dibujos en dos dimensiones. En algunos países se ha implementado la tecnología BIM a los procesos de elaboración de presupuestos de construcción, en donde se ha

observado grandes beneficios como la reducción de la incertidumbre de los resultados obtenidos [77].

Uno de los principales factores que influyen en la precisión de un presupuesto de construcción es el cálculo de cantidades de obra, actividad que el método tradicional se fundamenta en la medición de cantidades en dibujos en dos dimensiones, lo que resulta propicio para que se presenten errores humanos [37-77], con el uso de BIM es posible automatizar el proceso de cálculo de cantidades, y de esta forma disminuir la posibilidad de errores humanos y aumentar la precisión de los resultados. Otro de los factores que influye en la precisión de los presupuestos de obra es el olvido de actividades de obra, este factor se puede observar de forma muy frecuente cuando los presupuestos de construcción son calculados a partir de dibujos en dos dimensiones (2D), un modelo en tres dimensiones (3D) resulta una herramienta ideal para la definición de actividades de obra ya que es posible visualizar y contabilizar la totalidad de los elementos de construcción.

Algunos de los errores que pueden cometerse en la elaboración de presupuestos de construcción surgen de las operaciones aritméticas básicas (sumas, restas, multiplicaciones y divisiones), otros errores surgen a partir de falencias en el traslado de información, es decir errores de copiado, otros a causa de omisión de actividades de obra, otros por errores en la conversión de unidades, entre otros, tales errores pueden ser evitados con la utilización de un modelo BIM [37].

En la estimación de los presupuestos de construcción, los profesionales encargados afrontan una labor de un alto grado de complejidad, teniendo en cuenta la gran cantidad de información de los proyectos que deben procesar para las estimaciones de los costos de construcción, cuando existe una pobre comunicación de la información es frecuente observar presupuestos con alta incertidumbre e inexactitud [37], teniendo en cuenta que el profesional del presupuesto se enfrenta a un proceso de adivinación de actividades de obra y materiales de construcción.

En la actualidad, es posible observar que la mayoría de las compañías de la industria de la construcción no utilizan herramientas computarizadas en el proceso de cálculos de cantidades; en la investigación realizada por Aibinu y Venkatesh [37], se realizó una encuesta entre 180 firmas de Australia involucradas en las actividades de estimación y planificación de costos de construcción, en los resultados que se obtuvieron fue posible observar que el 35% de las firmas encuestadas utilizan únicamente herramientas computarizadas en sus procesos de estimación y planificación de costos, el 50% emplean métodos computarizados y manuales, y alrededor del 15% emplean métodos manuales.

2.2.9 BIM en la reducción de pérdidas en construcción

En el año 2004 el *Construction Industry Institute U.S.* estimó que en Estados Unidos el 57% de todo el esfuerzo invertido en la construcción fue añadido sin valor y por lo tanto convertido en pérdida [102], lo que denota una baja productividad del sector y la necesidad del desarrollo e implementación de nuevas tecnologías y metodologías que permitan mejorar la productividad en las actividades de construcción. Esta es una de las razones por las cuales la industria de la construcción se está moviendo hacia soluciones automatizadas [45]. Algunos consideran a la industria de la arquitectura, ingeniería y construcción como una industria no tecnológica y poco eficiente, se ha procurado desarrollar e implementar nuevas tecnologías y por tanto en la actualidad se observa una continua transformación del sector, uno de los impulsores de la transformación es el uso de tecnologías de la información y aplicación de prácticas sostenibles [99].

En la actualidad es posible observar un número significativo de profesionales e investigadores que intentan implementar BIM en la reducción de pérdidas relacionadas con los proyectos de construcción [49-89], esto es posible observarlo en los documentos donde se vincula las herramientas BIM con los principios de la

filosofía de reducción de pérdidas *Lean Construction* en la etapas de mantenimiento, renovación, demolición, entre otros [49].

2.2.10 BIM en el mantenimiento de construcciones existentes

En la actualidad se observa un crecimiento notable en el interés por la gestión y planificación del mantenimiento de las construcciones existentes [46], ya que afecta el flujo de caja de un inversionista que debe realizar un préstamo para la compra del bien inmueble; las actividades de mantenimiento generalmente se presentan como imprevistos y en los peores casos afectan de forma negativa los pagos que se realizan a las entidades bancarias. Es posible observar que en muchos casos las actividades de mantenimiento no son realizadas y por tanto con el paso del tiempo las construcciones se deterioran notablemente, disminuyendo así su valor comercial y por ende se ocasionan pérdidas económicas y disminución de la vida útil.

Las actividades de mantenimiento de un proyecto de construcción involucran personal con distintos conocimientos y materiales de diferentes características [89]; teniendo en cuenta el número significativo de elementos de un proyecto de construcción es posible identificar la necesidad de una herramienta para el almacenamiento y gestión de la información, es por esta razón que la actualidad BIM está siendo implementado en el mantenimiento de proyectos existentes [89]. Una de las razones por la que se vincula BIM a los procesos de mantenimiento es la facilidad de gestionar los elementos de construcción involucrados en los mantenimientos.

En algunos proyectos se ha utilizado BIM en las fases de diseño y construcción, sin embargo al finalizar la ejecución del proyecto el modelo en algunos casos es almacenado y olvidado por completo. En la fase de operación algunos elementos de las edificaciones requieren ser localizados, caracterizados y reparados, en este proceso se presentan varios inconvenientes teniendo en cuenta que el reparador

generalmente no es el constructor; desde este punto de vista un modelo BIM resulta de gran beneficio para la reparación de edificaciones ya que permite la localización y caracterización precisa de los elementos de construcción a sustituir [46-49-51-111-112], permitiendo así disminuir los costos asociados y mejorar los procesos de rehabilitación de construcciones existentes. Es posible planificar de mejor forma los materiales, equipos, personal y flujo de caja necesario para las actividades de rehabilitación, de esta forma el tiempo dedicado a las reparaciones puede disminuir, lo cual resulta de agrado para los dueños, teniendo presente que las reparaciones a las construcciones suelen ser causantes de gran incomodidad [46]. En los casos en que el método tradicional es utilizado, suele observarse que al finalizar la ejecución del proyecto la información de construcción queda dispersa en distintos documentos, lo que conlleva a que gran parte de la información se convierta en obsoleta [46-49-51-79].

Con BIM es posible mejorar la toma de decisiones en la rehabilitación de los proyectos [46], ya que es posible consultar y analizar con expertos las posibles modificaciones y de esta forma procurar optar por la mejor opción contemplada.

En la actualidad algunos investigadores utilizan el término de mantenibilidad de los proyectos de construcción [46], término que se refiere a la facilidad con la que puede realizarse el mantenimiento de las construcciones que de acuerdo a Becerik-Gerber et al. [46], puede abordarse a partir de tres ramas: accesibilidad, sostenibilidad de los materiales y mantenimiento preventivo. La accesibilidad se refiere a la comprobación del acceso temporal a los diferentes elementos de construcción además de la identificación visual clara y rápida de las piezas a cambiar. La sostenibilidad de los materiales se refiere a la durabilidad y la facilidad de limpieza de los materiales. El Mantenimiento preventivo se refiere a la selección los componentes a reparar y el tiempo de reparación [46]. BIM resulta transversal a las tres ramas proporcionando una amplia gama de beneficios de apoyo a la ejecución de las actividades de mantenimiento. Con BIM y la definición de un plan de

mantenimiento es posible elaborar la planificación del flujo de caja del dueño por concepto del mantenimiento de las construcciones.

2.2.11 Visualización de elementos de construcción con BIM

Un modelo BIM permite integrar las texturas de los elementos de construcción de los proyectos, a partir de modelo en tres dimensiones, lo que permite obtener una visualización realista de los proyectos antes de iniciar la ejecución; también puede ser utilizado para construcciones existentes que se planean rehabilitar y de esta forma configurar la combinación de materiales y formas que satisfagan las necesidades y gustos de los clientes. En el caso de los procesos constructivos BIM puede utilizarse para obtener una visualización realista del proceso constructivo planificado, resultando de gran beneficio para la detección de falencias e inconsistencias [46].

Las ventajas de visualización de un modelo BIM también suelen ser utilizadas para el entrenamiento de personal de obra y residentes, planes de emergencia en caso de evacuación pueden ser explicados con la utilización de un modelo. En el ámbito del mercadeo, las opciones de los modelos BIM para la generación de imágenes y animaciones resultan de gran apoyo para los procesos de venta de edificaciones no construidas, ya que es posible mostrar con gran detalle a posibles inversores las futuras construcciones; de esta forma los inversores tienen la posibilidad de solicitar acabados y elementos de acuerdo a sus gustos, actividad que no resulta sencilla con la utilización de dibujos en dos dimensiones 2D [46-110].

2.2.12 Modelos BIM 4D y 5D

Investigadores y consultores de la industria de la construcción han desarrollado modelos del proceso constructivo con cuatro dimensiones (4D), (dimensión en el eje x, dimensión en el eje y, dimensión en el eje z y tiempo) [37-45-113-114-115],

posible en gran parte por las ventajas y las facilidades de las tecnologías BIM (Building Information Modeling).

Elaborar un modelo del proceso constructivo de un proyecto de construcción tiene varias ventajas; entre las más significativas: almacenamiento y gestión de la información de construcción, reducción de los costos en las fases de diseño y construcción de un proyecto, posibilidad para el trabajo con profesionales en distintas partes del mundo [116], cálculo de las cantidades de construcción [113-116-117], detección de problemas de seguridad en la obra [113-116], detección de inconsistencias en los diseños del proyecto [116], optimización del espacio en la obra [113-118] y planificación de los recursos que han de utilizarse [113-116-119], entre otros.

Los modelos BIM 5D se obtienen de agregar la variable del costo económico al modelo BIM 4D [37-45-49-51-97], lo que resulta en una herramienta eficaz para la simulación de dinero que se debe invertir durante la construcción de un proyecto. A partir de la información almacenada en los modelos BIM es posible realizar simulaciones teniendo en cuenta un gran número de variables [37]. Compañías de la industria de la construcción ha implementado una nueva forma de trabajo, basada en la colaboración y comunicación fundamentada en modelos BIM (3D, 4D y 5D) [45]. Elaborar un modelo del proceso constructivo BIM 5D permite mejorar el proceso de toma de decisiones relacionadas con el proceso de construcción, ya que es posible realizar simulaciones del proceso constructivo, en donde los expertos involucrados en la planificación pueden aportar sus observaciones y sugerencias para el mejoramiento del proceso constructivo.

2.2.13 Integración tiempo costo en los flujos de caja

La integración entre el tiempo y el costo ha sido causante de una discusión extensa por parte de investigadores y profesionales de la industria de la construcción [11],

dichas discusiones han surgido a partir de problemáticas existentes en las diferentes fases de un proyecto de construcción (diseño, construcción, operación, etc.). El tiempo y el costo han sido identificados como los principales factores en la toma de ediciones [42-43].

Métodos de integración han sido desarrollados a partir de bases de datos detalladas con información de construcción como: cantidades de obra, costos de recursos y materiales, elementos de construcción, sobrecostos, programas de obra detallados, subcontratos, duración de actividades, listados de recursos asociados a cada una de las actividades, entre otros [11].

El mayor problema de los métodos de integración desarrollados es el extenso tiempo requerido para la integración de los recursos y la duración de las actividades, situación que se presenta porque el costo de las actividades se encuentra ligado a más de un elemento de construcción mientras que el tiempo es ligado a un única actividad. De esta forma, la relación entre el tiempo y costo es de gran complejidad ya que el costo de una actividad está relacionado a un gran número de subprocesos y materiales, mientras que el tiempo es el requerido para ejecutar la actividad [11].

Se han desarrollado e implementado diferentes métodos para la integración del tiempo y el costo [12]; los más usados son:

Integración manual: Este método es realizado de varias formas; en esencia consiste en la integración manual de los recursos con cada una de las actividades, los resultados que se obtienen son precisos, sin embargo requiere de extensos procesos manuales para ser aplicado, no es recomendado para los flujos de efectivo entrantes (ingresos) [11].

Modelos aproximados: En la integración el costo de cada actividad es dividido proporcionalmente entre las actividades que está asociado; este método es menos aproximado que el de integración manual pero requiere un menor trabajo [11].

Modelos de Integración automática: Incluye una base datos que permite vincular automáticamente cada uno de los costos con la correspondiente actividad y duración [11]; este método es el que se pretende introducir en la presente investigación, donde la base de datos está representada por modelo BIM y la asociación del tiempo con el costo de construcción se realiza en la simulación del procesos constructivo en el modelo BIM 5D.

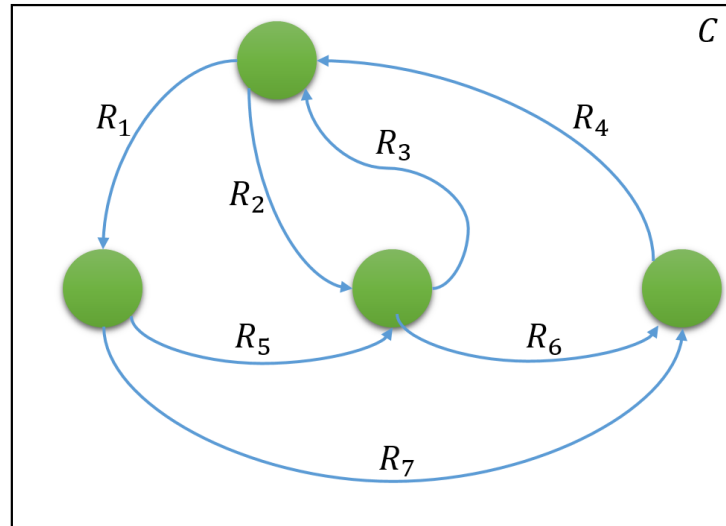
Los modelos de integración costo – tiempo pueden representar los flujos de efectivo como una función continua que represente la suma de los costos de las actividades programadas, o en modelos más refinados, una función periódica de las actividades realizadas [12]. Las curvas de integración tiempo costo han permitido resolver dos problemas clásicos: (1) determinar la duración más corta de ejecución del proyecto sin exceder el presupuesto de construcción y (2) minimizar el costo total teniendo presente una fecha de entrega determinada [42].

2.3 DINÁMICA DE SISTEMAS

2.3.1 Sistema

Un sistema puede ser descrito como un conjunto C que contiene partes que interactúan mediante relaciones R_i , por tanto los elementos básicos son (C, R_i) [120-121] que pueden ser representados gráficamente como se observa en la siguiente figura:

Figura 3: Representación gráfica de un sistema.



Fuente: Elaboración propia basado en [120].

Un sistema se encuentra compuesto por un conjunto de relaciones R_i que se presentan en distintas partes del sistema; de forma similar en el sistema se presentan diferentes atributos propios de las variables implicadas en el sistema, los atributos son denominados como X_i y no son independientes entre sí, lo cual se encuentra ligado a la relaciones que ocurren entre las partes del sistema [120]. Las influencias entre los atributos X_i de un sistema se pueden representar como se observa a continuación.

$$X_k \rightarrow X_j$$

Lo que se lee como “el atributo X_k influye sobre el atributo X_j ”, lo que recibe la denominación de relaciones de influencia entre atributos; las relaciones de influencia son un concepto básico que apunta al establecimiento de la estructura de un sistema [120]. Otra forma de definir la influencia entre los atributos es X_k como la causa y X_j como el efecto. En el estudio de sistemas no se admiten partes del sistema sin atributos ya que si una parte no contiene atributos no es posible describirla, un ejemplo es una parte A con un atributo X_1 y la parte B con un atributo X_2 , si se sabe que $X_1 \rightarrow X_2$ entonces se infiere que A influye sobre B , por lo tanto se concluye que la articulación entre las partes y la influencia entre los atributos son sinónimos [120].

Las relaciones entre atributos cuando se producen incrementos o decrementos se representa como se muestran a continuación:

$$X_k \rightarrow^+ X_j$$
$$X_k \rightarrow^- X_j$$

Donde $X_k \rightarrow^+ X_j$ se entiende que un incremento en X_k produce un incremento en X_j , en el caso de un decremento en X_k se produce un decremento en X_j . En el caso $X_k \rightarrow^- X_j$ un incremento en X_k produce un decremento en X_j , en el caso de un decremento en X_k se produce incremento en X_j [120].

En el estudio de un sistema se debe procurar entender el comportamiento de las partes al igual que el del sistema, en algunos casos se puede llegar entender el comportamiento de cada una de las partes pero sin llegar a entender el comportamiento del todo (sistema) [120]. Las partes de un sistema no presentan un comportamiento autóctono e independiente unas de otras; las relaciones presentes entre las diferentes partes ocasionan que los comportamientos de cada una de las partes presenten formas de dependencia o correlación con los de las otras [120].

2.3.2 Flujo de caja con el enfoque de sistema

El flujo de caja de un proyecto de construcción puede ser estudiado como un sistema. Un sistema se define como un todo formado por un conjunto de partes entre las que se establece alguna forma de relación que las integra en el todo que forma al sistema; las relaciones entre las partes ocasionan que el sistema posea una identidad que hace posible que exista interacción con el entorno, la identidad permanece con el tiempo y bajo entornos cambiantes [120]. Si se analiza el flujo de caja como un sistema las partes que lo componen son: los ingresos y egresos que son causados por: flujos de efectivo entrantes y salientes que guardan estrecha relación con el entorno.

2.3.3 Estructura de retroalimentación de un sistema

Para ilustrar la estructura de retroalimentación de un sistema, Aracil y Gordillo [120] utilizan el ejemplo en donde un individuo coloca un vaso bajo un grifo, para ser llenado con agua. El proceso comienza cuando se coloca el vaso bajo el grifo; a continuación se abre el grifo y el individuo inicia la comparación (discrepancia) del nivel de agua deseado con el existente en el vaso, de tal manera que cuando el nivel existente alcance el nivel deseado el individuo tenga oportunidad de cerrar el grifo; una ilustración del proceso descrito puede observarse en la siguiente imagen:

El ejemplo de llenar un vaso con agua en el grifo constituye una muestra de cómo se puede analizar un sistema, donde se inicia por descomponer el sistema en sus elementos esenciales y a continuación relacionar los elementos mediante un bosquejo como se muestra en la figura 5, donde es posible observar que se produce una transmisión de información circular de forma continua, situación que se conoce como bucle de realimentación. Los bucles de realimentación resultan de gran

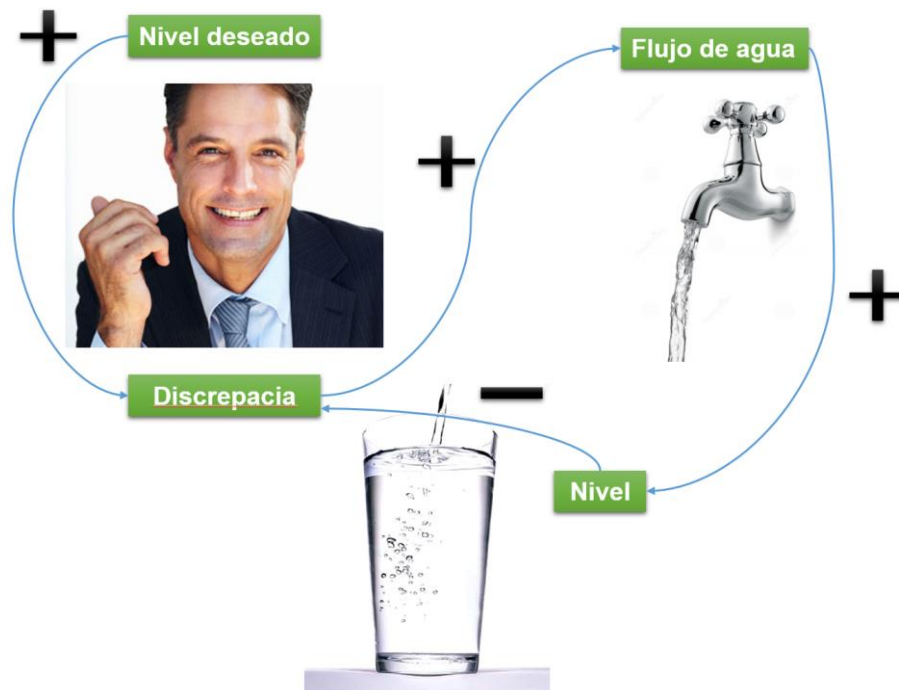
importancia ya que es frecuente observarlos en problemas de gran complejidad [120].

Figura 4: Llenado de un vaso con agua del grifo.



Fuente: <http://cdn.ecoportail.net/var/>

Figura 5: Descomposición del sistema de llenado de un vaso con agua del grifo.



Fuente: <http://thumbs.dreamstime.com/z/grifo-de-agua-15247816.jpg>;
<https://cuartoaxioma.files.wordpress.com/2011/02/vaso-con-agua.jpg>;

2.3.4 Dinámica de sistemas

Podría hablarse de un sistema entre sus múltiples significados como una manera de realizar una actividad o llegar a un objetivo, o de forma más apropiada como una unidad cuyos elementos interactúan juntos, donde sus partes están conectadas unas con otras [120].

El término dinámica es utilizado como el opuesto a la estática, y se utiliza para expresar algún tipo de variable o variables cambiantes, generalmente con respecto al tiempo [120]. La mayoría de los sistemas se caracterizan por cambiar con respecto al tiempo, y por lo tanto es común que nos encontremos interesados en estudiar los comportamientos de los sistemas dinámicos. Se puede definir un sistema dinámico como un objeto matemático formado por un espacio de estados X y una regla que describe como varían tales estados en el tiempo, por tanto las ecuaciones diferenciales resultan de gran utilidad en el estudio del comportamiento de los sistemas dinámicos, teniendo en cuenta que una función $f(x)$ expresa la regla que rige el cambio que se produce en un estado $x \in X$ [120].

$$\frac{dx}{dt} = f(x)$$

El concepto de sistema dinámico se origina en la mecánica clásica donde se utilizó para describir como se produce la variación de la posición y de la velocidad de partículas como función de las fuerzas que actúan entre ellas. La dinámica de sistemas se fundamenta en el concepto de sistema dinámico; en reemplazo de las partículas utilizan las partes que componen a un sistema y las fuerzas son reemplazadas por las relaciones existentes entre las partes del sistema [120]. La dinámica de sistemas suministra un lenguaje que posibilita expresar las relaciones que existen en el interior de un sistema, y explicar cómo es el funcionamiento.

La dinámica de sistemas permite estudiar el comportamiento de cualquier sistema respecto al tiempo, explora los diferentes resultados que se presentan suponiendo demoras o faltantes en una actividad, procedimiento, u organización, como: materiales, equipos, personal, de esta manera se pueden plantear diferentes escenarios y realizar combinaciones de las distintas situaciones para finalmente analizar su comportamiento [29-30-31-32]. La dinámica de sistemas proporciona un lenguaje que permite expresar las relaciones existentes que se producen entre las parte de un determinado sistemas [120].

La herramienta de dinámica de sistemas ejecuta simulaciones donde los comportamientos, productos de las diferentes simulaciones, tienen repercusiones a largo, mediano o corto plazo; esta aplicación está conformada por bucles o ciclos de retroalimentación los cuales facilitan realizar el estudio de los diferentes escenarios [31].

Los modelos de dinámica de sistemas, vinculados con el método de solución de problemas, brindan una herramienta que unifica el análisis cuantitativo y cualitativo, en donde las dos partes se complementan y dan soporte entre sí. De esta forma, es posible analizar la microestructura interna de un sistema y sus relaciones, además el comportamiento dinámico en función del tiempo del sistema y sus partes, mediante el uso de simulación por ordenador [32].

2.3.5 Modelo

El término modelo puede ser expresado en dos formas: en la primera, es posible realizar una analogía se dice que es el modelo el personaje que posa para una foto o para una pintura, en este caso se entiende que el modelo es el referente de lo representado. En la segunda, se habla de modelo cuando se refiere a una maqueta

que pretende reproducir un determinado aspecto de la realidad, por lo que se habla de modelo como una representación [120-121-122].

En el estudio de la dinámica de sistemas el modelo se define como un objeto que representa a otro [121]. Para Aracil y Gordillo [120] el término modelo se fundamenta en que para un observador O un objeto M es un modelo de un objeto S (un sistema), si O se puede servir de M para responder a cuestiones que importan con relación a S . Por lo tanto, se puede afirmar que un modelo es una herramienta que ayuda a un observador a responder preguntas acerca del comportamiento de un determinado sistema. El modelo, no es una copia del sistema estudiado, es una representación del sistema en el lenguaje de elaboración del modelo [120-121-122].

2.3.6 Elaboración de modelos

El proceso de elaborar modelos se conoce como proceso de modelado, según Aracil y Godillo [120] en los procesos de modelado es posible identificar por lo menos tres aspectos:

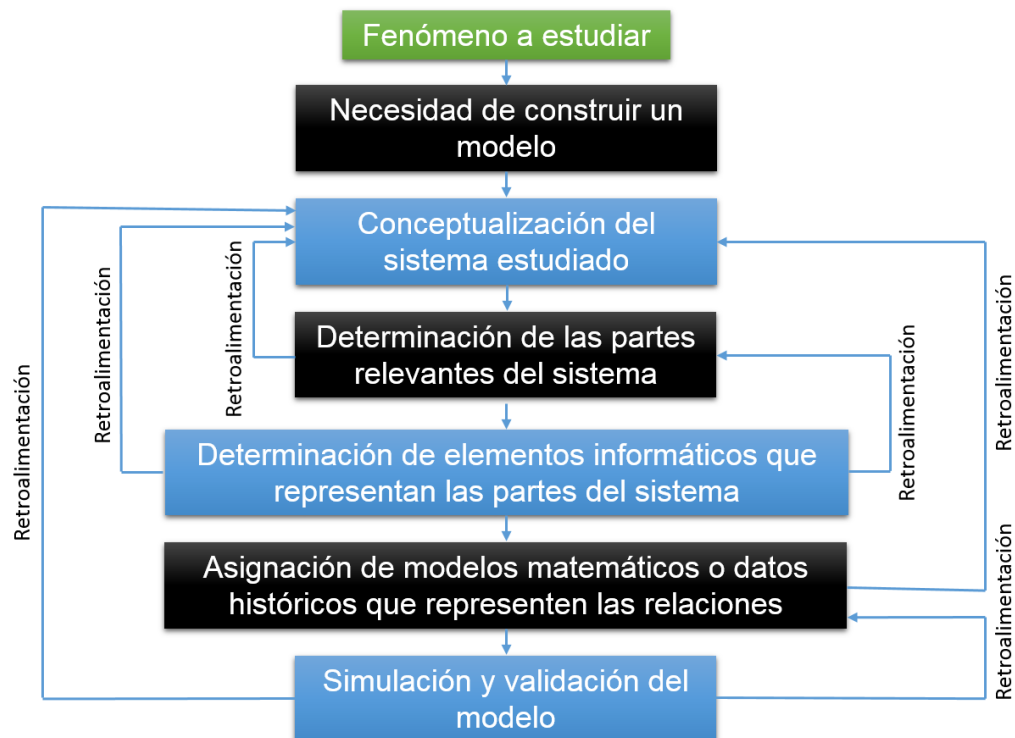
Aspecto 1: Definición de un comportamiento o problemática concreta con relación a S , en donde se debe tener en cuenta que un modelo es una representación de un sistema y no una copia.

Aspecto 2: Experiencias vividas relacionadas con otros modelos elaborados del sistema estudiado, las experiencias pueden ser propias o ajenas, en todo caso se trata de la información que se dispone del sistema estudiando.

Aspecto 3: Un lenguaje de expresión (lenguaje de modelado) que permita a un observador realizar una representación del sistema (modelo). El lenguaje de modelado suministra los conceptos y símbolos a partir de los cuales se construye el modelo.

La construcción de un modelo utilizado para simulación con herramientas informáticas requiere del análisis del sistema de interés a modelar; la primera tarea consiste en determinar cuáles son las partes de mayor relevancia con el objetivo de realizar una descripción significativa; la segunda tarea consiste en determinar la interrelación entre las partes, por tanto se determinan la forma como se integran las partes para formar el sistema [120-121]; la tercera tarea consiste en determinar los elementos de la herramienta informática que mejor representan el comportamiento de las partes; la cuarta tarea consiste en la asignación de modelos matemáticos o datos históricos que representen la relación entre las partes; la quinta tarea consiste en el proceso de simulación y validación del sistema. El proceso se resume en la siguiente figura:

Figura 6: Metodología para la construcción de un modelo.



Fuente: Elaboración propia.

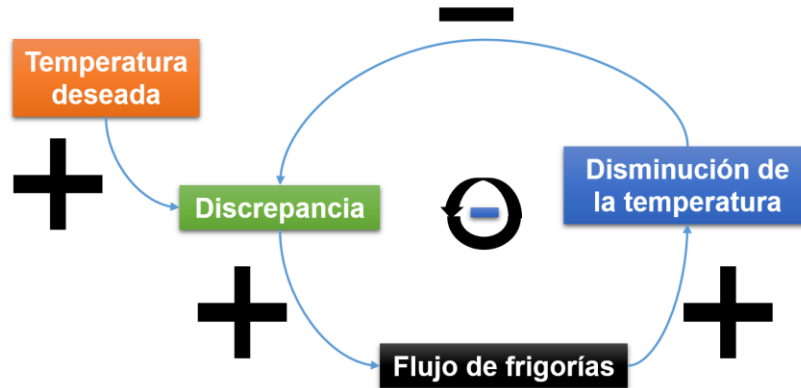
2.3.7 Simulación de modelos

En la representación de un sistema se tienen en cuenta las trayectorias de las diferentes magnitudes; la simulación consiste en replicar el comportamiento del sistema a partir de la utilización del modelo; el computador resulta una herramienta ideal para la simulación de modelos que representan sistemas complejos, teniendo en cuenta que un computador puede realizar múltiples operaciones en un tiempo reducido [120]. De esta forma, el computador permite obtener una réplica del comportamiento de un sistema, resultando la simulación como una técnica ideal para el estudio del funcionamiento bajo la acción de distintas variables con valores diferentes. La precisión de los resultados obtenidos en los procesos de simulación se encuentra estrechamente relacionada con el grado en que el modelo tenga posibilidad de representar el sistema de interés.

2.3.8 Estructuras de realimentación negativa

Aracil y Gordillo [120] utilizan el ejemplo de regulación de temperatura para la explicación de la estructura de realimentación negativa, en un sistema de refrigeración; si la temperatura se separa del valor deseado surge un margen o error entre los valores de temperatura real y el deseado lo que activa el funcionamiento de un refrigerador, el cual mediante la inyección de frigorías conduce la temperatura al valor deseado, por lo tanto se presenta una corrección de la temperatura en la que se procura que el valor se mantenga en un valor deseado; un bucle de retroalimentación negativa puede representarse como se muestra en la siguiente figura.

Figura 7: Refrigerador como una estructura de retroalimentación negativa.



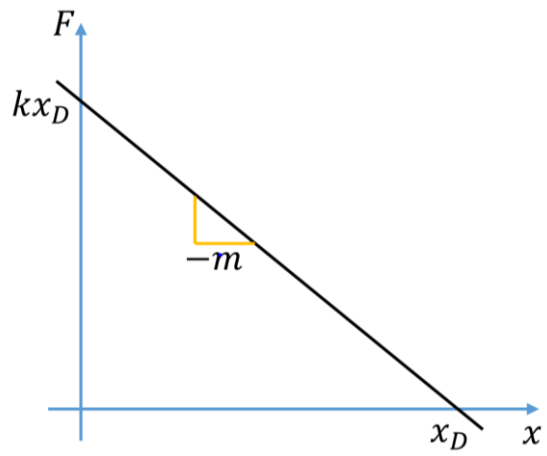
Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en el ejemplo del refrigerador una estructura de realimentación negativa induce a una autorregulación producto de la circulación de información por el sistema; se conoce como negativa por que el flujo de la información produce una autorregulación que conlleva a una influencia negativa [59], por tanto siempre que se tenga un efecto auto-regulador se tendrá una estructura de realimentación negativa.

Las estructuras de realimentación negativa suelen ser difíciles de determinar en los sistemas, por lo tanto tales estructuras pueden generar sorpresas y comportamientos problemáticos si no se detectan, Aracil y Gordillo [120] proponen que hasta que no se haga explícita tal estructura los intentos por explicar el comportamiento del sistema están condenados al fracaso.

La formulación matemática de la estructura de realimentación negativa es posible definirla a partir de las siguientes variables: x el estado del sistema, F la acción o flujo, D la discrepancia, x_D la meta o estado deseado.

Figura 8: Relación entre el flujo F y el estado x para el caso de estructura de realimentación negativa.



Fuente: Elaboración propia basada en [120].

Para la introducción de un carácter dinámico del sistema se asume la siguiente ecuación diferencial, la cual es consistente con la hipótesis basada en que el estado representa la acumulación de acciones pasadas.

$$\frac{dx}{dt} = F$$

De la ecuación de obtiene que:

$$x = \int_0^t F dt$$

Las siguientes expresiones se obtienen de las características del bucle.

$$F = mD$$

$$D = x_D - x$$

De donde se obtiene que:

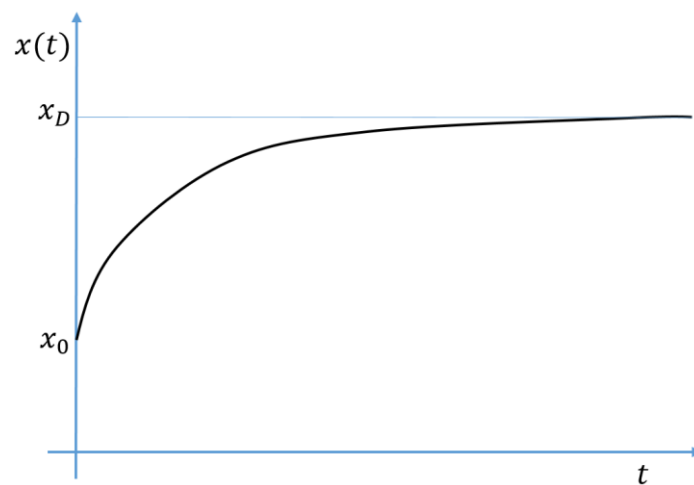
$$F = k(x_D - x)$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones para la función $x(t)$, se obtiene:

$$x(t) = x_D + [x(0) - x_D]e^{-mt}$$

En la siguiente figura es posible observar el comportamiento, en función del tiempo, de la variable x que denota el estado del sistema.

Figura 9: Comportamiento en el tiempo de un sistema con realimentación negativa.



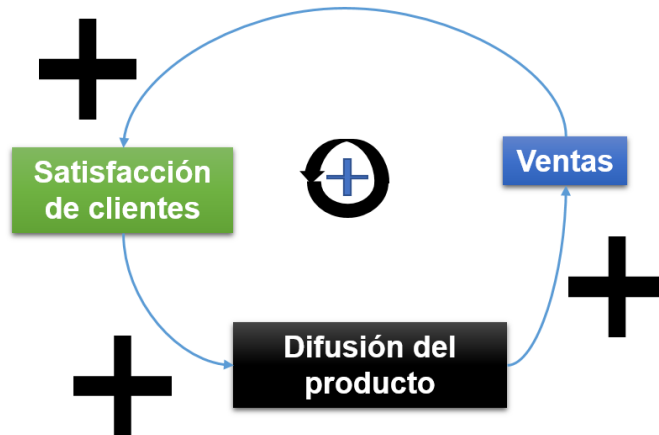
Fuente: Elaboración propia basada en [120].

2.3.9 Estructuras de realimentación positiva

Las estructuras de realimentación positiva se caracterizan por que la perturbación de cualquier elemento tiende a reforzarse a lo largo de la cadena, por lo que una variación en una de las partes del sistema tiende a aumentarse en la medida en que se avanza en la cadena de relaciones [120]. En la siguiente figura se observa el ejemplo del efecto del aumento de las ventas que resulta en una estructura

realimentación positiva, ya que un aumento en de las ventas genera una mayor difusión del producto.

Figura 10: Esquema de una estructura de realimentación positiva.



Fuente: Elaboración propia basada en [120].

Las estructuras de realimentación positiva se diferencian de las negativas en que las positivas poseen un carácter fuertemente in-estabilizador al contrario de lo que sucede con la realimentación negativa en donde el sistema se tiende a estabilizar en un determinado valor.

La descripción matemática para el bucle de realimentación positiva se realiza de forma similar a la de la negativa.

$$\frac{dx}{dt} = F$$

De la ecuación de obtiene que:

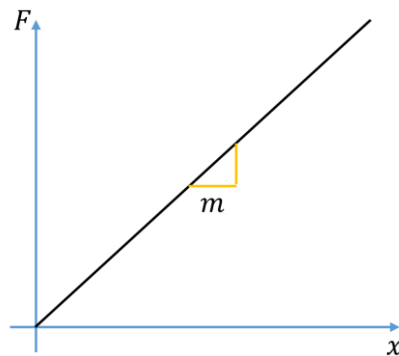
$$x = \int_0^t F dt$$

Teniendo en cuenta que la acción es proporcional al estado se tiene que:

$$F = mx$$

La relación entre el flujo F y el estado x se observa en la siguiente gráfica:

Figura 11: Relación entre el flujo F y el estado x para el caso de estructura de retroalimentación negativa.



Fuente: Elaboración propia.

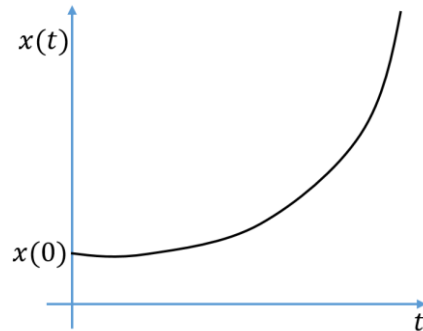
Por tanto la ecuación que gobierna la evolución del estado del sistema es:

$$\frac{dx}{dt} = mx$$

Con la aplicación de la integral se obtiene que:

$$x(t) = x(0)e^{mt}$$

Figura 12: Comportamiento en el tiempo de una estructura de realimentación positiva.

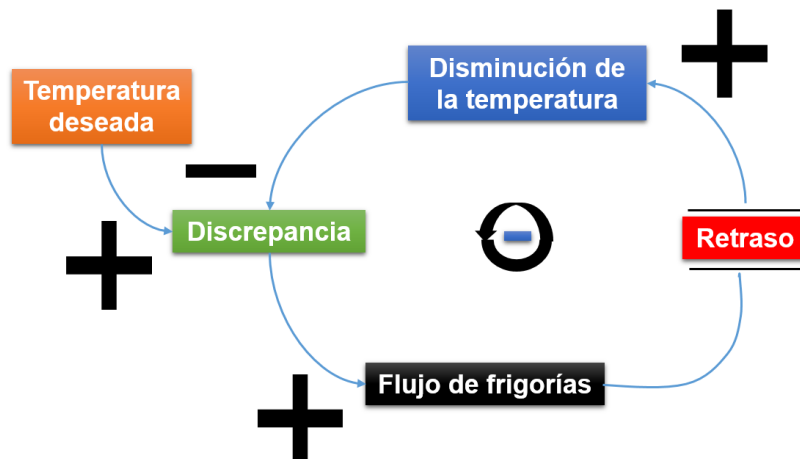


Fuente: Elaboración propia.

2.3.10 Retrasos en los sistemas

En la totalidad de los sistemas existe un tiempo entre la acción y el efecto que se conoce como retraso, en todos los procesos de realimentación positiva y negativa se produce de alguna forma el retraso [120]. En el siguiente gráfico es posible observar el ejemplo del refrigerador utilizado en la definición del concepto de la realimentación negativa.

Figura 13: Retrasos en una estructura de retroalimentación negativa.



Fuente: Elaboración propia.

Los retrasos pueden producir inestabilidad en un sistema con realimentación negativa [120]; un ejemplo podría darse en la calibración de la temperatura de un sistema de aire acondicionado; en el caso de introducir un cambio significativo en la temperatura, el enfriamiento no se dará al instante y tomara un tiempo que sería el denominado como retraso, este fenómeno ocasionaría que al momento de llegar a la temperatura elegida no resulte ser la de confort para el usuario, generando la necesidad de modificar nuevamente la temperatura para buscar la temperatura deseada.

2.3.11 Conceptos de flujo y estado

Al momento de estudiar un sistema es posible identificar nodos que pueden representar magnitudes o variaciones con respecto al tiempo, lo que en el estudio de la dinámica de sistemas se conoce como *flujos* y *estados* [120], esta situación es posible expresarla de la siguiente forma:

$$\textit{Flujo} \rightarrow \textit{Estado}$$

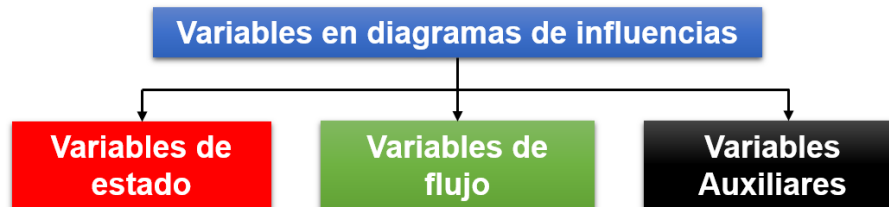
$$\frac{dE}{dt} \rightarrow E$$

En donde la derivada $\frac{dE}{dt}$ denota la variación con respecto al tiempo del estado E , por lo tanto en la modelación de un sistema se debe tener presente que los flujos son los encargados de que se presenten variaciones de los estados E_i en el tiempo. Se debe tener en cuenta que si existe un flujo $\frac{dE}{dt}$, la variable E representa la acumulación del cambio explícito del estado en el tiempo.

2.3.12 Tipos de variables en el estudio de la dinámica de sistemas

Forrester definió las variables que se muestran en la siguiente figura:

Figura 14: Variables utilizadas en los diagramas de influencias.



Fuente: Elaboración propia.

Las variables de estados suelen ser las de mayor importancia y representan las variables cuya evolución en el tiempo es significativa; cada variables de estado tiene asociadas una o varias variables de flujo que determinan el comportamiento de la variable de estado a lo largo del tiempo. Las variables auxiliares representan los pasos intermedios para la determinación de las variables de flujo a partir de las variables de estado [120].

La determinación de las variables de estado y variables auxiliares no siempre es clara, y en varias ocasiones es difícil definir a cual variable pertenece un determinado parámetro.

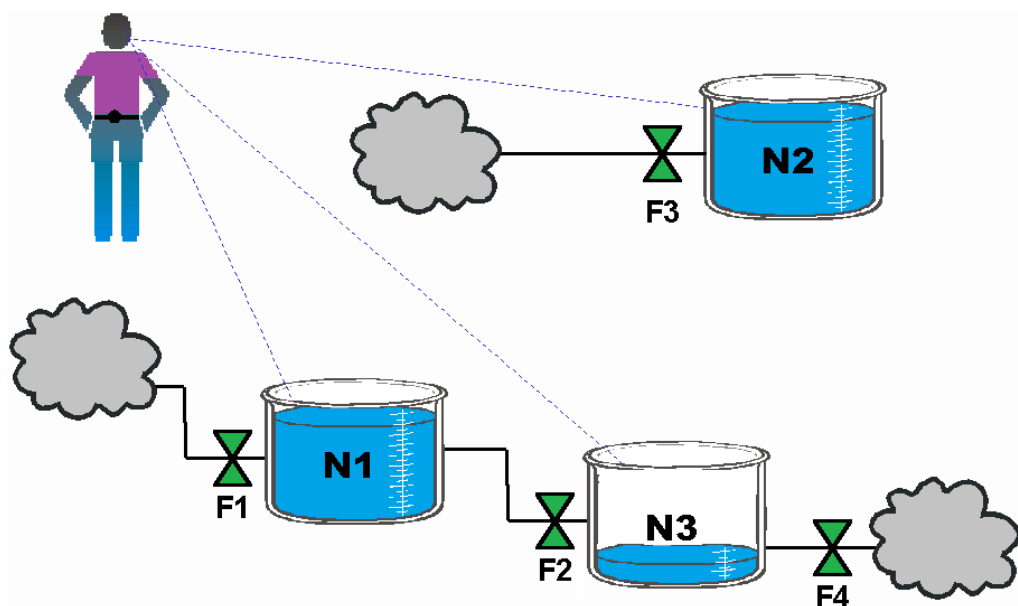
En el caso de las variables de estado se caracterizan por variar lentamente y su variación produce acumulaciones en los flujos mientras que las variables auxiliares varían instantáneamente en respuesta a los valores que tienen las variables de estado en el sistema.

2.3.13 Diagramas de Forrester

Los diagramas de Forrester o también conocidos como diagramas de flujos y niveles [121] se fundamentan en los conceptos: variables de estado, variables de flujo, variables auxiliares y diagramas de influencia [120], se definen como la modelación de forma pictórica de las relaciones existentes entre los tres tipos de variables en los que se fundamenta, con la finalidad de establecer de establecer una interfaz para que el modelador tenga la oportunidad de realizar simulaciones en una herramienta computarizada [121]. En estos diagramas es posible representar los distintos elementos de un sistema estudiado tales como: una acumulación, una razón de cambio o un cálculo intermedio [121].

Los iconos que suelen ser usados para la representación de las variables provienen del símil hidrodinámico que fue usado en los inicios de la dinámica de sistemas para la representación de los sistemas dinámicos [120-121]. Esta situación es posible observarla en la siguiente figura:

Figura 15: Símil hidrodinámico para la representación de sistemas



Fuente: Tomado de [121].

El significado de la imagen del Símil hidrodinámico se fundamenta en que el observador debe controlar los niveles del líquido N1, N2 y N3 en los tanques mostrados en la figura, para lo cual tiene a posibilidad de abrir y cerrar las válvulas N1, N2 y N3. En la figura se puede observar que el nivel N1 varía de acuerdo a la válvula F1 y a la válvula F2.

Los elementos que se utilizan en los diagramas de Forrester, se describen a continuación:

Nivel: Representan las variables de estado, estos muestran en cada instante la situación del modelo, la variación está determinada por los flujos, en los paquetes informáticos se suelen representar por un rectángulo. En el símil hidrodinámico estos elementos representan los niveles N1, N2 y N3. La elección de las variables que se pueden representar como elementos tipo nivel depende del tipo de problema estudiado. Una característica común de los niveles es que cambian de forma lenta o rápida en respuesta a variaciones en otras variables [120-121].

Canales de información: Transmiten información entre los elementos del sistema, información que por su naturaleza dinámica no se conserva. Las magnitudes físicas entre flujos y niveles se transmiten por medio de los *canales de material* [121].

Nube: Este elemento representa una fuente de recursos inagotables, este elemento no suele ser importante para el modelador [121].

Constantes: Suelen ser utilizadas para representar aquellos valores que no cambian a través del tiempo. Es frecuente observar que las constantes son utilizadas para el cálculo de los flujos [121].

Retardos: Representan el tiempo de trasmisión de los materiales o informaciones entre los elementos; en la totalidad de sistemas suelen presentarse retrasos los cuales afectan las variables comprometidas [121].













Variables exógenas: Se definen como las influencias que afectan el sistema con la característica de que lo que sucede en el sistema no causa afectación [121].



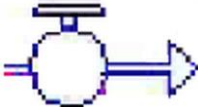
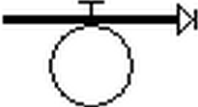









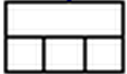









Variables auxiliares: Representan los cálculos intermedios y los valores fijos, los cuales aportan una mejor visualización de las variables que afectan los flujos [121].

Tablas: Suelen ser utilizadas para la representación de las relaciones entre variables que resultan no lineales; otro uso es para la representación de multiplicadores de las relaciones entre las variables que no permanecen constantes a través del tiempo.

En el siguiente cuadro se observa los iconos, utilizados en los softwares: Vensim, Dynamo, Stella (I'Think) y Evolución, de los elementos del diagrama de Forrester.

Cuadro 1: Iconos utilizados en los softwares de dinámica de sistemas para la modelación de diagramas de Forrester o diagrama de flujo nivel.

| Nombre | Vensim | Dynamo | Stella, I'Think | EVOLUCION |
|----------------------|---|---|---|---|
| Nivel |  |  |  |  |
| Relación información |  |  |  |  |
| Relación de material |  |  |  |  |

| | | | | |
|-------------------|--|---|---|--|
| Flujo |  |  |  |  |
| Nube |  |  |  |  |
| Parámetro | No definido |  | No definido |  |
| Retardo |  |  |  |  |
| Exógena |  |  | No definido |  |
| Variable auxiliar |  |  |  |  |
| Tabla |  | No definido | No definido |  |

Fuente: Elaboración propia basada en [120-121].

2.3.14 Toma de decisiones basadas en la simulación

Se podría definir una decisión como una elección racional y consiente que busca conseguir un objetivo; la elección se realiza entre un determinado o indeterminado de opciones o escenarios de futuro [121]. Con el uso de la dinámica de sistemas es posible realizar la elección en función de las consecuencias previsibles para cada alternativa, consecuencias que pueden ser estudiadas a partir de la simulación. Se podría decir que los elementos que constituyen la estructura de decisión son:

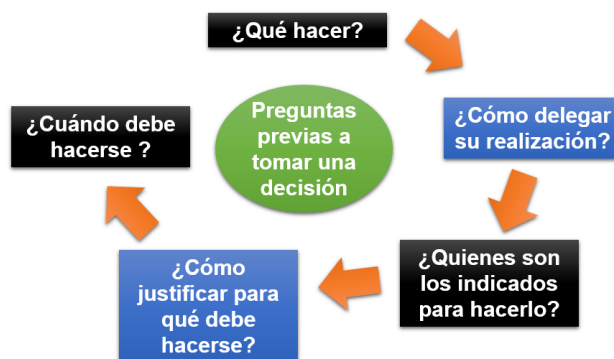
- Los objetivos de quien decide (modelado y simulación).

- Las restricciones para el cumplimiento de los objetivos (modelado y simulación).
- Las alternativas posibles y potenciales (escenarios de simulación y análisis de sensibilidad).
- Las consecuencias de cada alternativa (los resultados de simular los escenarios).
- El escenario en el que se toma la decisión y las preferencias de quien decide.

En el proceso de toma de decisiones es importante tener presente: que las decisiones son tomadas en todos los niveles de una organización o sociedad, algunas decisiones poseen un mayor impacto que otras y las decisiones conllevan a un determinado fin u objetivo propuesto.

Una decisión es tomada de acuerdo a la factibilidad, que esta posea, de llegar al objetivo propuesto [122-123]. Es frecuente observar que la acción de tomar decisiones se encuentre inmersa en incertidumbre, teniendo en cuenta, que nada garantiza que las condiciones en que se toma la decisión no varíen en un entorno de constante cambio [121], es por esto que previo al proceso de toma de decisiones se debe formular un conjunto de preguntas.

Figura 16: Preguntas previas a tomar una decisión.



Fuente: Elaboración propia.

3. METODOLOGÍA

La metodología llevada a cabo para el desarrollo de la investigación se divide en las tareas que se listan a continuación:

3.1 TAREA 1: SELECCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO

La selección del caso de estudio se realizó a partir del banco de proyectos diseñados por el grupo de Investigación Geomática, Gestión y Optimización de Sistemas, de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander.

Los criterios de mayor relevancia que se tuvieron en cuenta para la selección del caso de estudio fueron: disponibilidad de la información en formato drawing (.dwg), proyecto de construcción del tipo edificación, disponibilidad de la totalidad de la información de diseño, sistema estructural de pórtico en concreto reforzado, ubicación en área urbana, proyecto del sector público, entre otros.

El caso de estudio seleccionado fue la construcción de la estructura en concreto reforzado de la estación de buses alimentadores, del Portal Girón del sistema de transporte público Metrolínea, la cual cuenta con un área aproximada de construcción de 1450 metros cuadrados y el sistema estructural cuenta con elementos como: muros de contención, zapatas, vigas de cimentación, columnas, vigas, placas aéreas, entre otros.

Los documentos correspondientes al diseño estructural del caso de estudio seleccionado se muestran en la siguiente tabla:

Cuadro 2: Archivos de diseño del caso de estudio según formato digital.

| Formato digital | Cantidad de archivos |
|--------------------------------|-----------------------------|
| Drawing (.dwg) | 23 |
| Drawing Exchange Format (.dxf) | 2 |
| Autocad color dependent (.ctb) | 2 |
| Imagen (.jpg) | 17 |
| Microsoft Word (.doc) | 4 |
| Microsoft Excel (.xlsx) | 12 |
| Microsoft Project (.mpp) | 1 |
| Documento de lectura (.pdf) | 8 |
| Archivo de texto (.txt) | 2 |
| Total | 71 |

Fuente: Elaboración propia.

3.2 TAREA 2: DESARROLLO DEL MODELO BIM

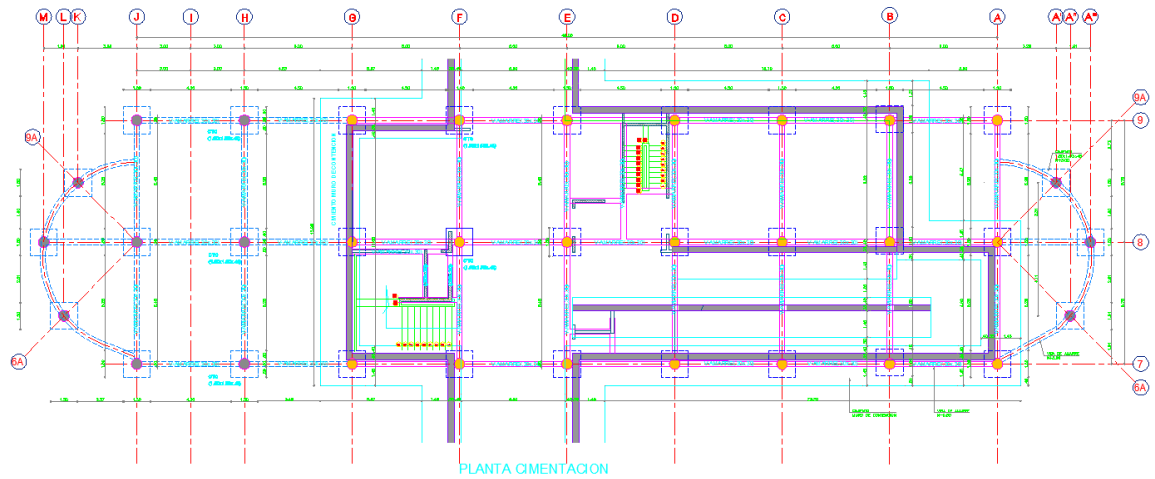
3.2.1 Depuración de los planos

El desarrollo del modelo BIM inicio con la depuración de los dibujos en dos dimensiones correspondientes al diseño estructural de los elementos de construcción del caso de estudio; dichos dibujos se utilizaron en formato drawing (.dwg) compatibles con el software Autocad Civil 3D 2014.

El proceso de depuración de los planos consistió en la definición de un punto de origen en el proyecto y la ubicación espacial, de los dibujos necesarios para la elaboración del modelo BIM, según la ubicación del punto seleccionado. Algunos de los dibujos utilizados tenían elementos en tres dimensiones, situación que fue ajustada en el proceso de depuración, esto con la finalidad de disminuir la posibilidad de confusión al momento de la modelación en el software Autodesk Revit 2014.

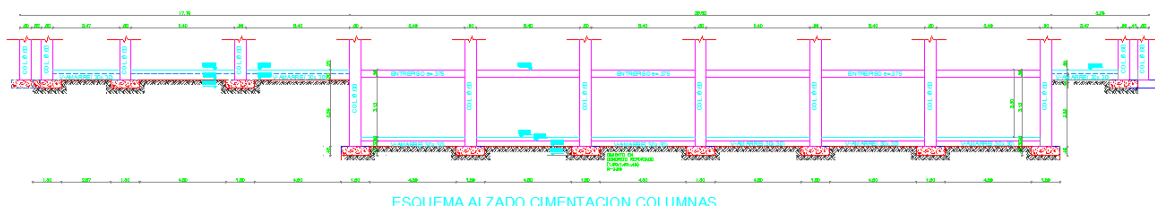
En las siguientes imágenes es posible observar los dibujos en dos dimensiones del caso de estudio, utilizados para la elaboración del modelo BIM.

Figura 17: Planta de cimentación del caso de estudio (dibujo en dos dimensiones 2D).



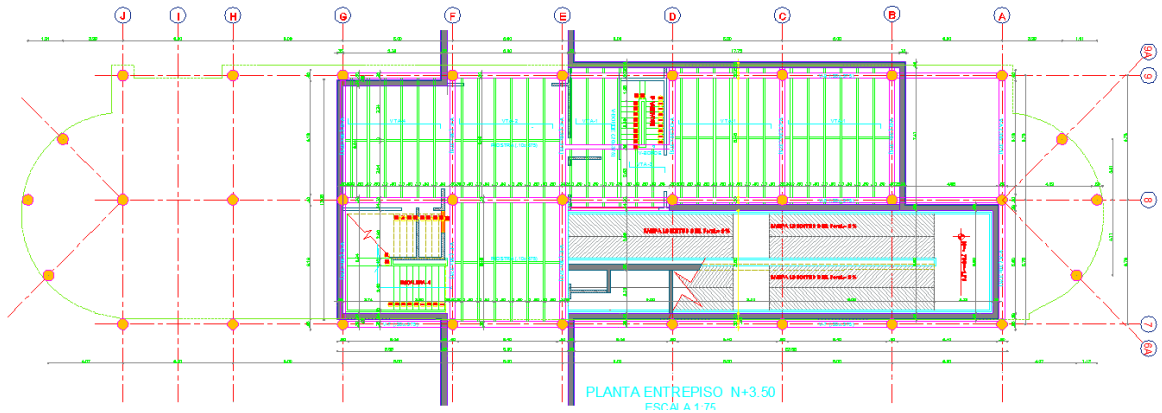
Fuente: Grupo de investigación Geomática, Gestión y Optimización de Sistemas.

Figura 18: Perfil de cimentación del caso de estudio (dibujo en dos dimensiones 2D).



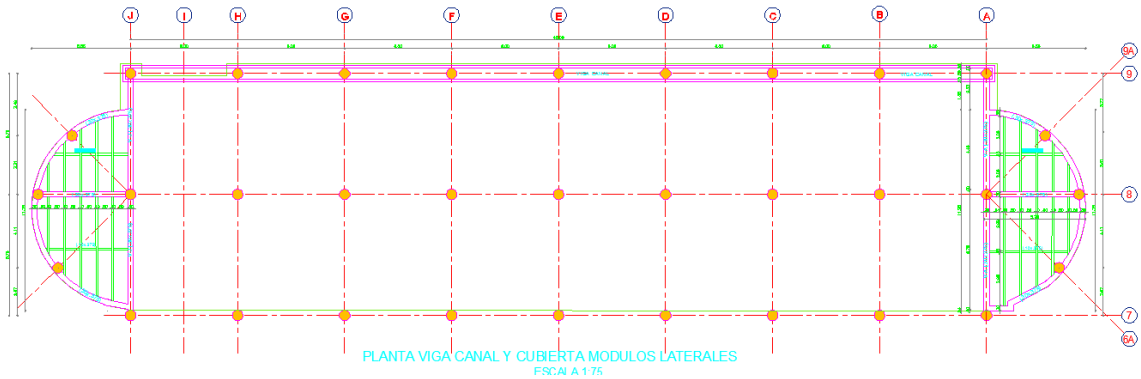
Fuente: Grupo de investigación Geomática, Gestión y Optimización de Sistemas.

Figura 19: Planta de entrepiso del caso de estudio (dibujo en dos dimensiones 2D).



Fuente: Grupo de investigación Geomática, Gestión y Optimización de Sistemas.

Figura 20: Planta de entrepiso 2 del caso de estudio (dibujo en dos dimensiones 2D).



Fuente: Grupo de investigación Geomática, Gestión y Optimización de Sistemas.

3.2.2 Vinculación de los planos en el software BIM

Los dibujos en dos dimensiones (planos) depurados, donde se almacena la información de construcción del proyecto, se utilizaron como *links* en el *software* Autodesk Revit 2014. Para la ubicación de los planos en el *software* se crearon los niveles y los ejes del proyecto, de esta forma, cada uno de los planos fue ubicado en el nivel y eje correspondiente.

El plano topográfico se utilizó como un link, teniendo presente el sistema de coordenadas globales del modelo y no un nivel en particular como en el caso de los otros planos.

Los planos con información de acero de refuerzo se utilizaron como *link* y se ubicaron en los cortes transversales de los elementos de concreto que requieren refuerzo de acero.

3.2.3 Superficie topográfica

La elaboración del modelo, de la superficie topográfica, se realizó con base en el plano de curvas de nivel, el cual se obtuvo como producto en el proceso de diseño a partir del levantamiento topográfico de terreno en el que se construirá el proyecto. En el plano de curvas de nivel, cada uno de los contornos debe encontrarse a la elevación que corresponde a la curva de nivel que representa.

El plano de topografía fue exportado como un archivo CAD en formato *link* al software Autodesk Revit 2014, la modelación de la superficie topográfica consistió en la interpolación de las curvas de nivel; de esta forma fue posible obtener un terreno virtual que resulta un modelo de gran similitud de las características propias del terreno en el que se realizara la construcción del proyecto.

La superficie topográfica debe ser modelada teniendo en cuenta las coordenadas del terreno de interés, esto para georreferenciar la totalidad de los elementos de construcción del proyecto y así facilitar la integración con otra información que se encuentre georreferenciada.

3.2.4 Movimientos de tierra: excavaciones y rellenos

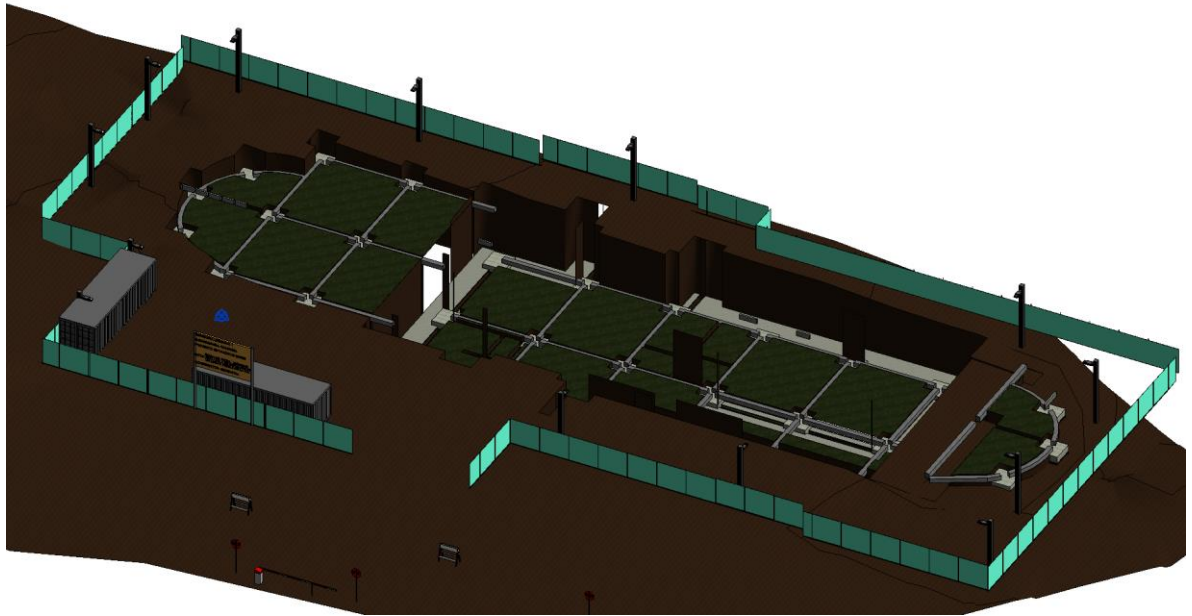
Con base en los planos de diseño de los elementos estructurales de la cimentación del proyecto estudiado, fue posible obtener las cotas requeridas para la modelación de los movimientos de tierra; en el proyecto del caso de estudio se presentaron excavaciones y rellenos.

Para la cuantificación de los volúmenes de movimientos de tierra se elaboraron dos superficies topográficas, en una de las superficies se modelaron las excavaciones y en la otra no se realizaron modificaciones, de esta forma al terminar de modelar la excavaciones fue posible comparar las superficies inicial y modificada, resultando las cantidades de obra correspondientes a los volúmenes de excavación; la comparación de las superficies se realizó en el software Autodesk Revit 2014.

Para el caso de los rellenos, se modelaron como elementos individuales, de esta forma, el volumen total de relleno se obtuvo de la sumatoria de los volúmenes de los elementos que representaban los diferentes rellenos necesarios para la construcción del proyecto.

Teniendo presente el gran número de elementos del modelo del proyecto, en el proceso de modelado de los rellenos se tuvo presente la creación y asignación de un material que representara los rellenos, esto con motivo a facilitar el cálculo de los volúmenes de rellenos dentro de un gran número elementos.

Figura 21: Modelo BIM de movimientos de tierra del caso de estudio.



Fuente: Elaboración propia en el software Autodesk Revit 2014.

3.2.5 Cimentación: zapatas, vigas y concreto de limpieza

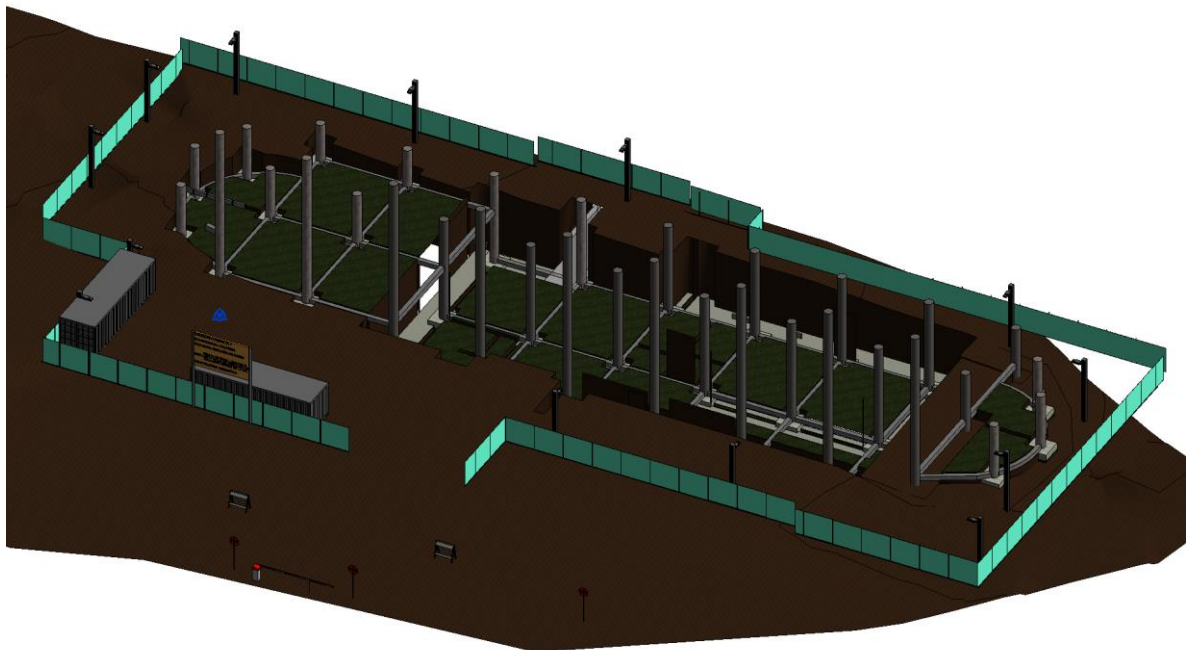
Para la elaboración de los modelos de los elementos de construcción de las zapatas, vigas y concreto de limpieza, se vinculó, al modelo de la superficie topográfica, el plano correspondiente a la planta de diseño de la cimentación; el perfil no se vinculó pero se utilizó como información para la definición de las profundidades de los distintos elementos de construcción de la cimentación del caso de estudio [48].

En el software Autodesk Revit 2014 se definieron los ejes de mayor conveniencia para la modelación; una vez definidos los ejes se procedió a la creación de las secciones transversales de vigas de cimentación y zapatas de acuerdo a los planos de diseño estructural del proyecto seleccionado; en este proceso se tuvo presente la asignación de nombres a las secciones transversales de acuerdo a las dimensiones.

Para cada tipo de elemento se crearon los materiales correspondientes; en la asignación de los nombres a los materiales se tuvo en cuenta el tipo de elemento y el material, por ejemplo, para las vigas de cimentación el material requerido es concreto de 3000 (Psi), por tanto el nombre asignado al material en el modelo fue Concreto_Vigas_Cimentación_3000_Psi, esto con el objetivo de facilitar la determinación de las cantidades de construcción ya que al finalizar la elaboración del modelo existirán una gran cantidad de elementos.

Los elementos fueron trazados teniendo en cuenta los ejes definidos y el plano de la planta de cimentación al igual que las cotas de cada uno de los elementos, de esta forma se obtiene el modelo BIM de la cimentación del caso de estudio.

Figura 22: Modelo BIM de elementos estructurales de cimentación del caso de estudio.



Fuente: Elaboración propia en el software Autodesk Revit 2014.

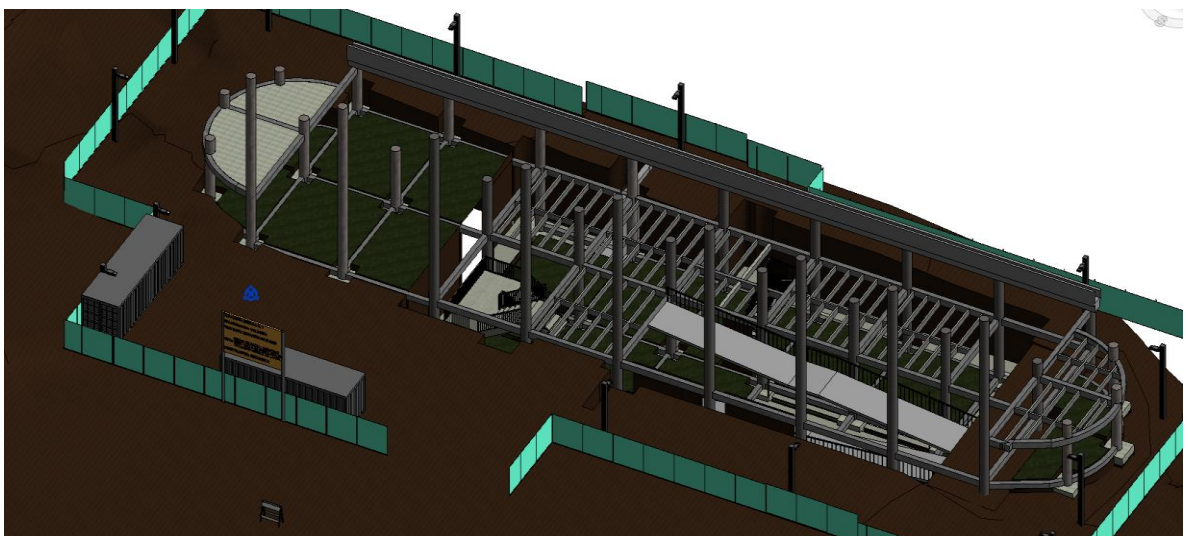
3.2.6 Estructura: columnas, vigas aéreas, placas aéreas

Con base en el modelo BIM de la superficie topográfica y la cimentación del caso de estudio, se procedió al modelamiento de las columnas, vigas aéreas y placas aéreas; para iniciar se vincularon las plantas correspondientes al diseño estructural de los elementos mencionados [48].

Como en el caso de los elementos de la cimentación, se crearon las secciones transversales y los materiales de construcción, teniendo presente procurar almacenar la información de forma ordenada, esto con el objetivo de facilitar el proceso de consulta en el momento de elaborar el presupuesto de obra y el programa de obra.

El proceso inicio con las columnas y continuo con vigas, viguetas y placas aéreas; en la elaboración del modelo de las columnas, inicialmente se tuvieron presentes las del primer nivel, a continuación se modelaron los elementos de la placa de entepiso y enseguida las columnas del segundo nivel.

Figura 23: Modelo BIM de elementos estructurales del caso de estudio.



Fuente: Elaboración propia en el software Autodesk Revit 2014.

3.2.7 Muros de contención en concreto reforzado

El caso de estudio seleccionado está compuesto por un paso sótano que se encuentra a desnivel, situación que hace necesaria la utilización de muros en concreto reforzado, los cuales fueron diseñados en la etapa de diseño estructural a partir de parámetros como el tipo de suelo, el nivel freático, altura del talud a estabilizar, los requerimientos arquitectónicos, entre otros. En la fase diseño se definió un muro compuesto por zarpa y fuste, situación que generó la necesidad de elaborar una familia para el tipo de sección requerida, teniendo en cuenta que la sección transversal no se encuentra en el conjunto de secciones transversales que vienen por defecto en el software Autodesk Revit 2014.

En la elaboración de la familia mencionada se utilizó una plantilla estructural, teniendo en cuenta que el elemento a modelar pertenecía al grupo de los elementos estructurales; para iniciar se crearon parámetros que representan las diferentes dimensiones de las geometrías a modelar, se realizó un trazado con líneas rectas de la sección transversal a representar y se acotaron las distancias correspondientes a los parámetros creados; a continuación se vincularon los parámetros con las dimensiones a las que representaban y se proyectó la sección transversal dibujada para convertirla en un sólido que representara el elemento a modelar.

Con la familia creada, esta fue vinculada al modelo donde se encontraba modelada la superficie topográfica, los elementos de cimentación y estructura; al igual se vinculó un plano en planta de la ubicación del muro de contención, se creó el material del muro de contención y se procedió a realizar el modelamiento.

Al finalizar el modelamiento fue posible observar la necesidad de la ampliación del límite de la excavación modelado, con motivo a la ubicación a la construcción de la

zarpa del muro, al igual que modelar los rellenos generados por la construcción del muro, esto con el objetivo de cuantificar estos movimientos de tierra en el cálculo de cantidades de obra.

3.2.8 Acero de refuerzo

El modelamiento del acero de refuerzo se realizó a partir de los planos de despieces obtenidos en la etapa de diseño y el modelo BIM de los diferentes elementos estructurales; teniendo presente que el conjunto de los elementos de acero de refuerzo es muy numeroso, en el proceso de modelación fue necesario configurar el software Autodesk Revit 2014 para la disminución de la calidad de visualización de los elementos, esto con el objetivo de optimizar el rendimiento del computador utilizado para la elaboración del modelo; al finalizar la modelación se modificó nuevamente la configuración para obtener la mayor calidad de visualización posible.

En el proceso modelación del acero de refuerzo se crearon y asignaron los materiales a los diferentes elementos del acero de refuerzo, con base al elemento perteneciente; de esta forma se facilita calcular la cantidad de kilogramos de acero de refuerzo para cada uno de los elementos estructurales.

En la siguiente figura es posible observar el modelo BIM obtenido para el caso de estudio.

Figura 24: Modelo BIM del caso de estudio, estación de buses alimentadores perteneciente al sistema de transporte masivo METROLINEA.



Fuente: Elaboración propia en el software Autodesk Revit 2014.

El software Autodesk Revit brinda la posibilidad de elaborar *renders* de los modelos BIM; en la siguiente imagen se puede observar el acero de refuerzo.

Figura 25: Acero de refuerzo del algunos elementos de construcción del caso de estudio.



Fuente: Elaboración propia en el software Autodesk Revit 2014.

3.3 ELABORACIÓN DEL PRESUPUESTO DE CONSTRUCCIÓN

3.3.1 Estimación de rendimientos de la mano de obra

Cuantificar el rendimiento consiste en determinar la productividad de la mano de obra. El rendimiento es definido como una evaluación del desempeño en el proceso constructivo con respecto a la unidad del tiempo [66-124].

Para la estimación de los rendimientos de mano de obra requeridos, se realizó un listado preliminar de las principales actividades necesarias para la ejecución del proyecto; a continuación se realizó una búsqueda bibliográfica de rendimientos de construcción en la ciudad de Bucaramanga; como resultado de la búsqueda se obtuvo el estudio “Análisis de rendimientos de mano de obra para actividades de construcción” [125]; en el estudio se realizó una medición de rendimientos de mano de obra en la construcción del edificio J de la Universidad Pontificia Bolivariana sede de Bucaramanga; teniendo en cuenta las similitudes de este proyecto con el caso de estudio de la presente investigación, se decidió utilizar los rendimientos obtenidos en el estudio mencionado. Los valores de rendimientos y cuadrillas utilizadas para la elaboración del presupuesto de construcción se muestran en el siguiente cuadro.

Cuadro 3: Rendimientos de mano de obra y cuadrillas utilizadas para la elaboración del presupuesto de obra del caso de estudio.

| Actividad | Cuadrilla | R | Unidad |
|---|------------------------|------|-------------------------------|
| Acero de refuerzo de 63000 Psi | 1 oficial + 1 ayudante | 0.03 | $\left[\frac{hr}{kg}\right]$ |
| Concreto ciclópeo (2000 psi) | 1 oficial + 1 ayudante | 2.50 | $\left[\frac{hr}{m^3}\right]$ |
| Concreto para zapatas (3000 psi) | 1 oficial + 1 ayudante | 9.90 | $\left[\frac{hr}{m^3}\right]$ |
| Concreto para muro de contención (3000 psi) | 1 oficial + 1 ayudante | 7.15 | $\left[\frac{hr}{m^3}\right]$ |

| | | | |
|---|------------------------|-------|-------------------------------|
| Concreto para vigas de cimentación (3000 psi) | 1 oficial + 1 ayudante | 5.77 | $\left[\frac{hr}{m^3}\right]$ |
| Concreto para columnas (3000 psi) | 1 oficial + 1 ayudante | 10.14 | $\left[\frac{hr}{m^3}\right]$ |
| Concreto para vigas aéreas (3000 psi) | 1 oficial + 1 ayudante | 11.14 | $\left[\frac{hr}{m^3}\right]$ |
| Concreto para viguetas (3000 psi) | 1 oficial + 1 ayudante | 11.20 | $\left[\frac{hr}{m^3}\right]$ |
| Concreto para placa (3000 psi) | 1 oficial + 1 ayudante | 9.30 | $\left[\frac{hr}{m^3}\right]$ |
| Concreto para viga canal (3000 psi) | 1 oficial + 1 ayudante | 11.14 | $\left[\frac{hr}{m^3}\right]$ |

Fuente: Análisis de rendimientos de mano de obra para actividades de construcción [56].

3.3.2 Definición de salario, prestaciones sociales, descanso remunerado, parafiscales y seguridad social

Para el cálculo del costo económico de una hora de trabajo de los recursos humanos requeridos para la ejecución del proyecto, se tuvieron presentes las reglamentaciones del Ministerio de Trabajo de Colombia; por tal razón se tomaron en consideración las siguientes definiciones del ministerio del trabajo.

Salario: Según el Ministerio de Trabajo de Colombia “Contraprestación económica que recibe el trabajador en compensación por los servicios prestados para un empleador. Según lo establecido por el artículo 127 del Código Sustantivo del Trabajo, constituye salario no solo la remuneración ordinaria que recibe el trabajador sino todo lo que recibe el trabajador en dinero o en especie como contraprestación directa al servicio, cualquiera sea la forma o denominación que se adopte: primas sobresueldos, bonificaciones habituales, valor del trabajo suplementario o de las horas extras, valor del trabajo en días de descanso obligatorio, porcentaje sobre ventas y comisiones. No constituye salario las sumas de dinero ocasionales, las utilidades de las empresas, ni las prestaciones sociales” [126].

Auxilio de transporte: Según el Ministerio de Trabajo de Colombia “Es la suma que recibe el trabajador que devenga hasta dos salarios máximos legales vigentes, para colaborar con los gastos de desplazamiento de su vivienda a su lugar de trabajo, y viceversa. El auxilio de transporte de una suma fija fijada anualmente por el Gobierno Nacional” [126].

Cesantías: Según el Ministerio de Trabajo de Colombia “Corresponden al mes de salario por cada año de servicio o proporcional al tiempo laborado, que el empleador está obligado a pagarle al trabajador al terminar el contrato laboral” [126].

Prima: Según el Ministerio de Trabajo de Colombia “la prima de servicios es el derecho que tiene el trabajador a que se le cancele un mes de salario por cada año trabajado. Dicho valor será distribuido en dos pagos, uno antes del 30 de junio del año y otro en la primera quincena del mes de diciembre. Si se trabaja menos de un año, el trabajador tiene derecho a recibir el pago proporcional de la prima por el tiempo laborado. Según lo establecido por el Código Sustantivo del Trabajo, los trabajadores del servicio doméstico y conductores de servicio familiar no tienen derecho a la prima de servicios” [126].

Vacaciones: Según el Ministerio de Trabajo de Colombia “Son un descanso remunerado equivalente a 15 días hábiles de salario, por cada año laborado. Se pueden acumular por hasta tres años. De igual manera, se deben pagar proporcional al tiempo laboral si el contrato finaliza sin que se complete el año” [126].

Pensiones (AFP): Según el Ministerio de Trabajo de Colombia “Los aportes a pensiones representan el 16% del valor del salario del trabajador, de los cual el trabajador aporta el equivalente del 4% de su salario o de sus ingresos y el empleador el 12% del salario del trabajador” [126].

Salud (EPS): Según el Ministerio de Trabajo de Colombia “los aportes a salud representan el 12.5% del valor del salario del trabajador, de lo cual el trabajador aporta el equivalente del 4% de su salario o de sus ingresos y el empleador el 8.5% del salario del trabajador” [126].

Afiliación a riesgos profesionales (ARP): Según el Ministerio de Trabajo de Colombia “Los riesgos laborales están a cargo del empleador” [126], los valores establecidos se encuentran en el siguiente cuadro.

Cuadro 4: Porcentaje del salario que un empleador debe pagar por concepto de ARP.

| Clases de riesgos | Valor |
|--------------------------|--------------|
| I | 0.522% |
| II | 1.044% |
| III | 2.436% |
| IV | 4.350% |
| V | 6.960% |

Fuente: Ministerio de trabajo de Colombia [126].

Las actividades de construcción se caracterizan por ser riesgosas para el personal, por esta razón para los calculos se asumió una clase de riesgo V y por tanto un valor de 6.960% sobre el salario de los empleados.

Parafiscales: Según el Ministerio de Trabajo de Colombia “los aportes parafiscales se distribuyen y se pagan por el empleador. El equivalente del 3% del salario del trabajador va dirigido al ICBF (Instituto Colombiano de Bienestar Familiar); el equivalente del 4% del salario va dirigido a la caja de compensación. Las disposiciones previstas por la reforma tributaria en materia de exoneración de pago de parafiscales aplican a partir de 1 de julio de 2014 de acuerdo a lo establecido en la ley 1607 del 2012” [126].

En el caso de estudio se asumió que no se presentaba exoneración alguna del pago de parafiscales.

3.3.3 Cálculo del valor de la mano de obra

Para el cálculo del valor de la mano de obra se tuvo en cuenta el salario mínimo legal vigente en Colombia para el año 2015, el cual se muestra a continuación en pesos colombianos.

$$\text{Salario}_{MLV2015} = \$ 644,350$$

En Colombia, los trabajadores de la construcción se encuentran clasificados como oficiales de construcción y ayudantes de construcción; los oficiales se caracterizan por tener un mayor grado de experiencia y conocimiento para la ejecución de diferentes tareas; los ayudantes por su parte son constructores que se encuentran iniciando en la industria y por tanto no poseen gran experiencia; esta situación ocasiona que los salarios sean diferentes para oficiales y ayudantes, por tanto es un aspecto a tener presente en la elaboración de un presupuesto de obra.

Salario del oficial de construcción: Teniendo en cuenta consultas realizadas en el sector de la construcción colombiano, se definió el salario del oficial de construcción para el caso de estudio como 1.5 veces el salario mínimo legal vigente, es decir:

$$\text{Salario}_{\text{oficial}} = (1.5)(\$ 644,350) = \$ 966,525$$

Salario del ayudante de construcción: Teniendo en cuenta consultas realizadas en el sector de la construcción colombiano, se definió el salario del ayudante de construcción para el caso de estudio como 1.2 veces el salario mínimo legal vigente, es decir:

$$\text{Salario}_{\text{Ayudante}} = (1.2)(\$ 644,350) = \$ 773,220$$

Para calcular cuánto le cuesta, a un constructor por cada mes de trabajo, un oficial y un ayudante se utilizó la calculadora laboral del Ministerio del Trabajo de Colombia, la cual es una aplicación web que cuenta con una interfaz gráfica como la que se muestra a continuación:

Figura 26: Interfaz de usuario de la calculadora laboral del Ministerio de Trabajo de Colombia.

MinTrabajo
República de Colombia

PROSPERIDAD PARA TODOS

CALCULADORA LABORAL

La calculadora del trabajador Colombiano

- FECHA DE INICIO DEL PERIODO A LIQUIDAR: 2015-01-01
- FECHA FINAL DEL PERIODO A LIQUIDAR: 2015-01-01
- INGRESE SU SALARIO MENSUAL: 966.425
(Por defecto esta cifra corresponde al SMLV para el año ingresado)
- ¿TIENE DERECHO A UN AUXILIO DE TRANSPORTE?: SI NO
74.000
(Por defecto esta cifra corresponde al subsidio de transporte para el año ingresado)

▶ La Calculadora del Empleador

Fuente: Ministerio de Trabajo de Colombia [126].

Los resultados obtenidos para el costo económico de un oficial y un ayudante, se muestran en el siguiente cuadro:

Cuadro 5: Costo económico de salario, prestaciones sociales, transporte, prestaciones sociales, descanso remunerado, parafiscales y aportes a la seguridad social para un oficial y un ayudante de construcción.

| Concepto | Oficial | Ayudante |
|---------------------------|---------------------|---------------------|
| Salario | \$ 966,425 | \$ 773,220 |
| Auxilio de transporte | \$ 74,000 | \$ 74,000 |
| Cesantías | \$ 86,702 | \$ 70,602 |
| Primas | \$ 86,702 | \$ 70,602 |
| Intereses sobre cesantías | \$ 10,404 | \$ 8,472 |
| Vacaciones | \$ 40,268 | \$ 32,218 |
| Pensiones (AFP) | \$ 115,971 | \$ 92,786 |
| Salud (EPS) | \$ 82,146 | \$ 65,724 |
| Riesgos laborales (ARL) | \$ 67,263 | \$ 53,816 |
| Parafiscales | \$ 38,657 | \$ 69,590 |
| Total | \$ 1,568,538 | \$ 1,311,030 |

Fuente: Elaboración propia en la calculadora laboral del Ministerio de Trabajo de Colombia [126].

Teniendo presente que un trabajo de tiempo completo en Colombia consta de 48 horas semanales, se deduce que el número de horas que se laboran durante un mes de trabajo es de 192 horas. Por lo tanto el costo de una hora laboral para el oficial y el ayudante es:

$$Valor_{oficial} = \frac{\$ 1,568,538}{192 [hora]} = 8,169 \left[\frac{\$}{hora} \right]$$

$$Valor_{Ayudante} = \frac{\$ 1,311,030}{192 [hora]} = 6,828 \left[\frac{\$}{hora} \right]$$

3.3.4 Consulta y definición de precios unitarios de materiales y equipos

Para la definición de los precios unitarios de los materiales y equipos requeridos para la construcción del proyecto de caso de estudio, se definió una lista preliminar de los principales materiales y equipos requeridos a partir de la consulta del modelo BIM; con la lista se realizaron consultas en almacenes del mercado local, en el portal de contratación colombiano y en la base de datos de CONSTRUDATA, como resultado se obtuvieron precios con una alta variabilidad, situación por la cual se decidió asumir el costo promedio de los datos consultados.

En los siguientes cuadros es posible observar los precios unitarios asumidos de los principales materiales y equipos requeridos para la construcción del proyecto estudiado.

Cuadro 6: Precios unitarios de los principales materiales requeridos para la construcción del proyecto del caso de estudio.

| Id | Material | Unidad | Precio Unitario |
|-----------|--|-----------------------|------------------------|
| 1 | Concreto grava común 2000 psi, preparado en planta | <i>m</i> ³ | \$ 334,080 |
| 2 | Concreto grava común 3000 psi, preparado en planta | <i>m</i> ³ | \$ 359,600 |
| 3 | Geotextil NT 1600 | <i>m</i> ³ | \$ 3,195 |
| 4 | Acero de refuerzo de 60000 psi | <i>kg</i> | \$ 2,432 |

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 7: Precios unitarios de los principales equipos requeridos para la construcción del proyecto del caso de estudio.

| Id | Equipo | Unidad | Precio Unitario |
|-----------|---------------------------------------|----------------------|------------------------|
| 1 | Bombeo de concreto | <i>m³</i> | \$ 334,080 |
| 2 | Vibrador a gasolina | <i>hr</i> | \$ 5,500 |
| 3 | Formaleta metálica | <i>hr</i> | \$ 409 |
| 4 | Retroexcavadora 428 doble transmisión | <i>hr</i> | \$ 90,000 |
| 5 | Volqueta 6 m3 | <i>hr</i> | \$ 57,330 |
| 6 | Pluma grúa con motor eléctrico | <i>hr</i> | \$ 2,300 |

Fuente: Elaboración propia

3.3.5 Elaboración de los análisis de precios unitarios (APU)

Un análisis de precios unitarios APU se define como el análisis del costo de materiales, equipos, mano de obra y transportes, los cuales son requeridos para la ejecución de una unidad de una actividad de obra [66]; por ejemplo un metro cúbico de concreto para las zapatas.

Para la determinación de los APU requeridos, se elaboró un listado preliminar de las actividades necesarias para la construcción del proyecto con base en el modelo BIM desarrollado.

Para la elaboración de los APU del caso de estudio, se tuvieron en cuenta los rendimientos de la mano de obra, los precios unitarios de materiales y equipos, y el costo económico de la mano de obra, definidos anteriormente. El proceso se realizó en una hoja de cálculo del software Microsoft Excel 2013 y consistió en agrupar los recursos en materiales, equipos, transporte y mano de obra, requeridos para cada una de las actividades, se realizó la multiplicación de los precios unitarios por su respectivo rendimiento obteniendo así el costo unitario para cada una de las actividades de obra, los cuales se muestran en el cuadro 8.

Los resultados obtenidos en el proceso cálculo de análisis de precios unitarios se vincularon al modelo BIM desarrollado; el proceso consistió en seleccionar cada uno de los elementos en el modelo e ingresar el precio unitario calculado.

3.3.6 Cálculo de las cantidades de obra con el modelo BIM

Con base en el listado preliminar de actividades de obra se calcularon las cantidades a partir del modelo BIM desarrollado; el proceso consistió en generar reportes, en el software Autodesk Revit 2014, de los elementos de construcción presentes en el modelo; los reportes fueron filtrados a partir del material definido en el momento de la modelación de los diferentes elementos; los resultados se muestran en el cuadro 8, y la interfaz del software Autodesk Revit 2014 en el momento del cálculo de cantidades es posible observarla en la siguiente figura.

Figura 27: Interfaz de usuario del software Autodesk Revit 2014 en el cálculo de cantidades de obra



Fuente: Elaboración propia en el software Autodesk Revit 2014.

Cuadro 8: Cantidades y APU's para actividades de obra del caso de estudio.

| Preliminares | | | |
|---|----------------|----------------------|--------------|
| Actividad | Unidad | Cantida d | APU |
| Localización replanteo y medición permanente | Mes | 4.0 | \$ 2,526,798 |
| Vallas de información (6x4) - Manual de señalización - Ministerio de Transporte 2007 - Suministro e instalación | UN | 1.0 | \$ 3,644,278 |
| Alumbrado provisional durante obra | UN | 1.0 | \$ 5,832,698 |
| Campamento | UN | 20.0 | \$ 191,543 |
| Malla de cerramiento (tela aditiva; h=2,1 m) y madera rolliza cada 3 metros | ML | 326.8 | \$ 16,505 |
| Señalización provisional durante la obra | Mes | 4.0 | \$ 1,662,100 |
| Movimientos de tierra | | | |
| Actividad | Unidad | Cantida d | APU |
| Excavación manual en roca | M ³ | 70.2 | \$ 48,233 |
| Excavación a mano en material común en seco | M ³ | 280.9 | \$ 26,696 |
| Excavación a máquina en material común en seco | M ³ | 1989.9 | \$ 7,006 |
| Relleno seleccionado con material de sitio (Manual) (Extendido, nivelación y compactación) | M ³ | 13.7 | \$ 14,654 |
| Cargue y transporte a escombrera (Incluye disposición final) | M ³ | 2327.3 | \$ 14,080 |
| Concretos | | | |
| Actividad | Unidad | Cantida d | APU |
| Concreto pobre (2000 psi) | M ³ | 51.3 | \$ 428,528 |
| Concreto para zapatas (3000 Psi) | M ³ | 33.4 | \$ 600,809 |
| Concreto para vigas de amarre (3000 Psi) | M ³ | 53.6 | \$ 626,744 |
| Concreto para columnas (3000 Psi) | M ³ | 53.4 | \$ 767,397 |
| Concreto vigas aéreas (3000 Psi) | M ³ | 26.0 | \$ 620,385 |
| Concreto para viguetas (3000 Psi) | M ³ | 35.6 | \$ 672,873 |
| Concreto para placa de contra - piso (3000 Psi) | M ³ | 22.1 | \$ 660,391 |

| | | | |
|---|----------------|----------------------|------------|
| Concreto para muros de contención (3000 Psi) | M ³ | 305.9 | \$ 620,270 |
| Concreto para viga canal (3000 Psi) | M ³ | 27.7 | \$ 656,274 |
| Acero de refuerzo | | | |
| Actividad | Unidad | Cantida d | APU |
| Acero de 60000 (Psi) (Para Zapatas) | Kg | 1148.5 | \$ 3,002 |
| Acero de 6000 (Psi) (Para vigas de amarre) | Kg | 3783.3 | \$ 3,002 |
| Acero de 6000 (Psi) (Para columnas) | Kg | 9250.6 | \$ 3,002 |
| Acero de 6000 (Psi) (Para vigas aéreas) | Kg | 2623.3 | \$ 3,002 |
| Acero de 6000 (Psi) (Para viguetas) | Kg | 777.4 | \$ 3,002 |
| Acero de 6000 (Psi)_B (Para placa de contra - piso) | Kg | 723.8 | \$ 3,477 |
| Acero de 6000 (Psi)_B (para muros de contención) | Kg | 20635.8 | \$ 3,002 |
| Acero de 6000 (Psi)_B (para viga canal) | Kg | 1887.7 | \$ 3,002 |

Fuente: Elaboración propia.

3.3.7 Elaboración del presupuesto de construcción

Con las cantidades de obra Q_i , obtenidas del modelo BIM y los precios unitarios de las actividades P_i , obtenidos a partir de los análisis de precios unitarios (APU), se realiza la multiplicación y se obtiene el costo directo total C_i de cada una de las actividades de obra, lo que se resume en la siguiente expresión:

$$C_i = Q_i P_i$$

Los resultados obtenidos se muestran en el siguiente cuadro:

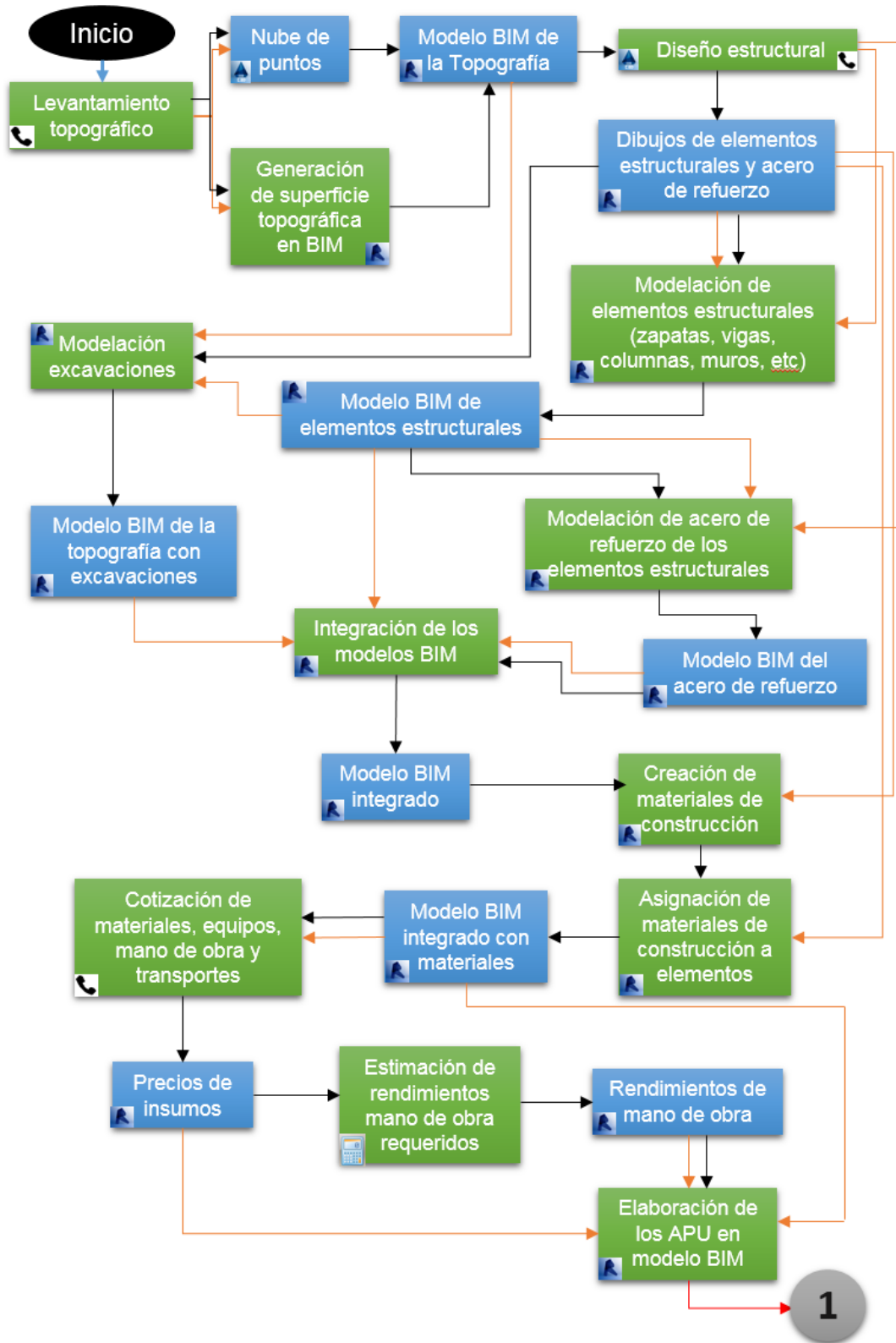
Cuadro 9: Valores subtotales del presupuesto de construcción.

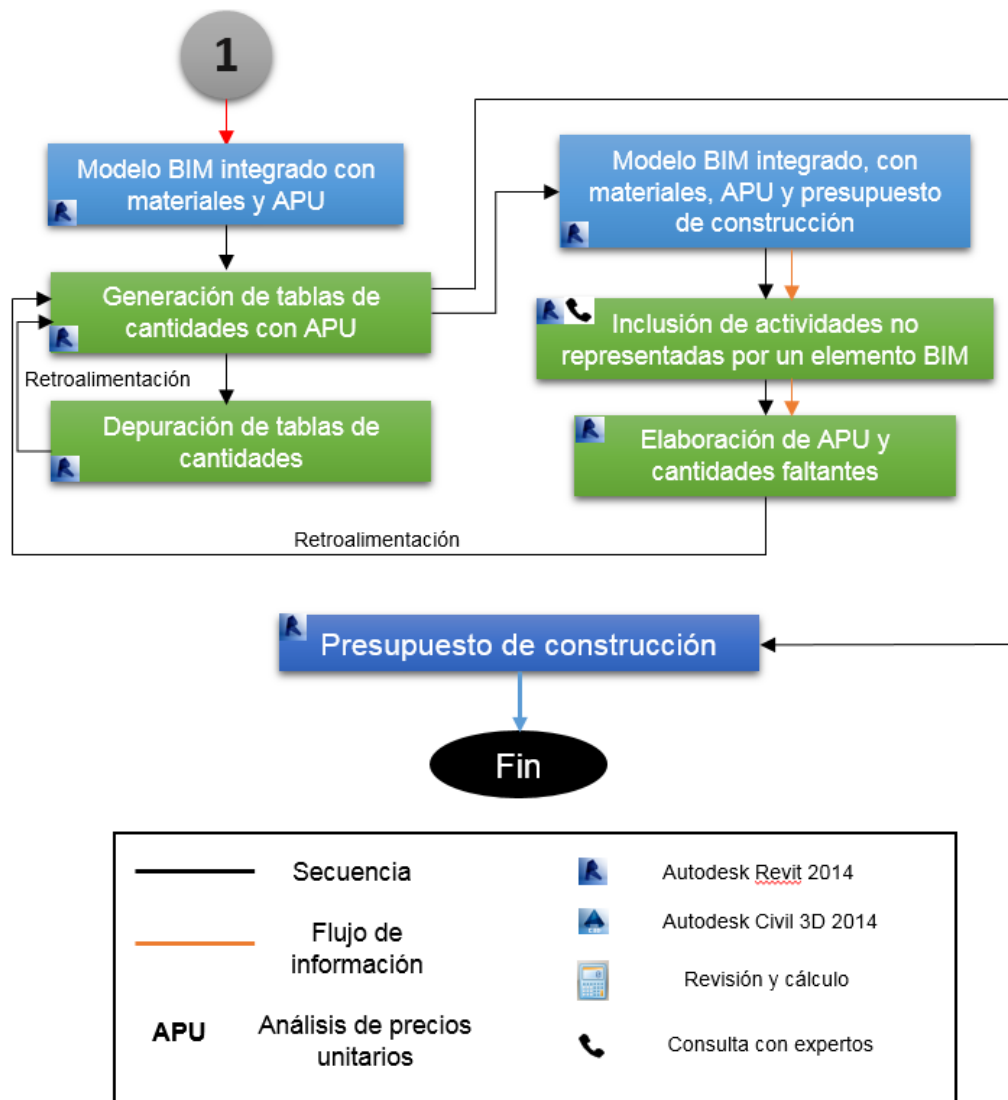
| Capitulo | Subtotal |
|----------------------------|-----------------------|
| Preliminares | \$ 35,457,427 |
| Movimientos de tierra | \$ 57,795,262 |
| Concretos | \$ 379,250,419 |
| Acero de refuerzo | \$ 122,911,034 |
| Costo directo total | \$ 595,414,142 |

Fuente: Elaboración propia.

En el siguiente gráfico se resume el procedimiento realizado para la obtención del presupuesto de construcción.

Figura 28: Procedimiento para la obtención del presupuesto de construcción.





Fuente: Elaboración propia [77].

3.4 ELABORACIÓN DEL PROGRAMA DE OBRA

3.4.1 Definición del horario de trabajo

Como se enuncio anteriormente, de acuerdo a consultas realizadas en el mercado local se definió que para el caso de aplicación, un tiempo completo corresponde a 48 horas de trabajo semanal, las cuales se distribuyen como se muestra en el siguiente cuadro:

Cuadro 10: Horario de trabajo en obra, asumido para el caso de estudio.

| Día | Horarios | Horas |
|------------|---|--------------|
| Lunes | 7:00 - 12:00 - Almuerzo - 13:00 - 17:00 | 9 |
| Martes | 7:00 - 12:00 - Almuerzo - 13:00 - 17:00 | 9 |
| Miércoles | 7:00 - 12:00 - Almuerzo - 13:00 - 17:00 | 9 |
| Jueves | 7:00 - 12:00 - Almuerzo - 13:00 - 17:00 | 9 |
| Viernes | 7:00 - 12:00 - Almuerzo - 13:00 - 17:00 | 9 |
| Sábado | 8:00 - 11:00 | 3 |
| Domingo | Día no laborable | 0 |
| | Total Horas | 48 |

Fuente: Elaboración propia.

3.4.2 Calculo de la duración de las actividades de obra

La duración de las actividades de obra D_i es posible obtenerla a partir de la multiplicación de la cantidad de la actividad Q_i (obtenida del modelo BIM), y el redimiendo de la mano de obra R_i (obtenido del APU). Lo anterior se resume en la siguiente expresión [66]:

$$D_i = Q_i R_i$$

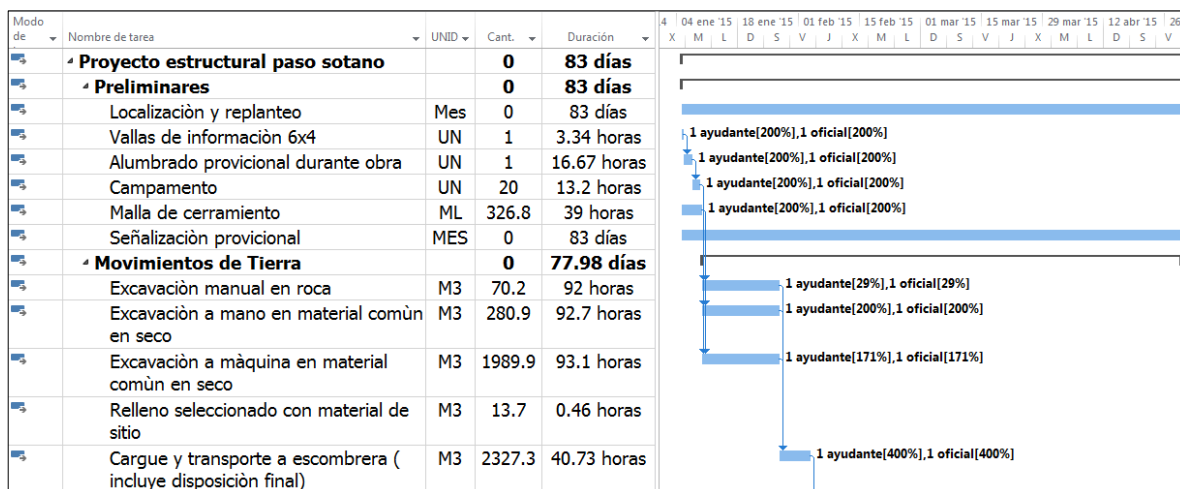
Para el caso de estudio, las duraciones de las actividades fueron calculadas en el software Microsoft Project 2013, el procedimiento en el software para esta tarea consistió en la creación de tres columnas, la primera para las cantidades de obra, la segunda para los rendimientos y la tercera para el resultado de la multiplicación. Las duraciones fueron calculadas en unidades de horas.

3.4.3 Asignación de fechas de inicio y de finalización

Con base en el documento de Microsoft Project creado para el cálculo de las duraciones de las actividades de obra, se definió como fecha de inicio del proyecto el día lunes 5 de enero de 2015, a partir de esta fecha se programaron las actividades que se consideraron deberían realizarse en el inicio de la obra y a continuación se definieron las actividades condicionadas a la terminación o avance de otras actividades.

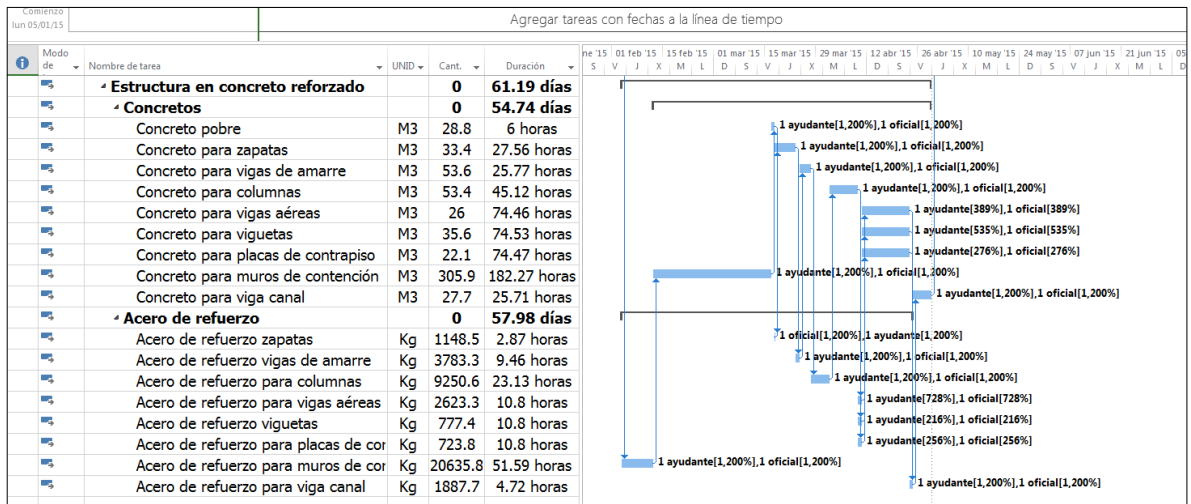
El programa de obra que se obtuvo para el caso de estudio en el software Microsoft Project es el que se muestra en las siguientes imágenes:

Figura 29: Programa de obra para las actividades de preliminares y movimientos de tierra.



Fuente: Elaboración propia en el software Microsoft Project 2013.

Figura 30: Programa de obra para las actividades de concretos y acero de refuerzo.



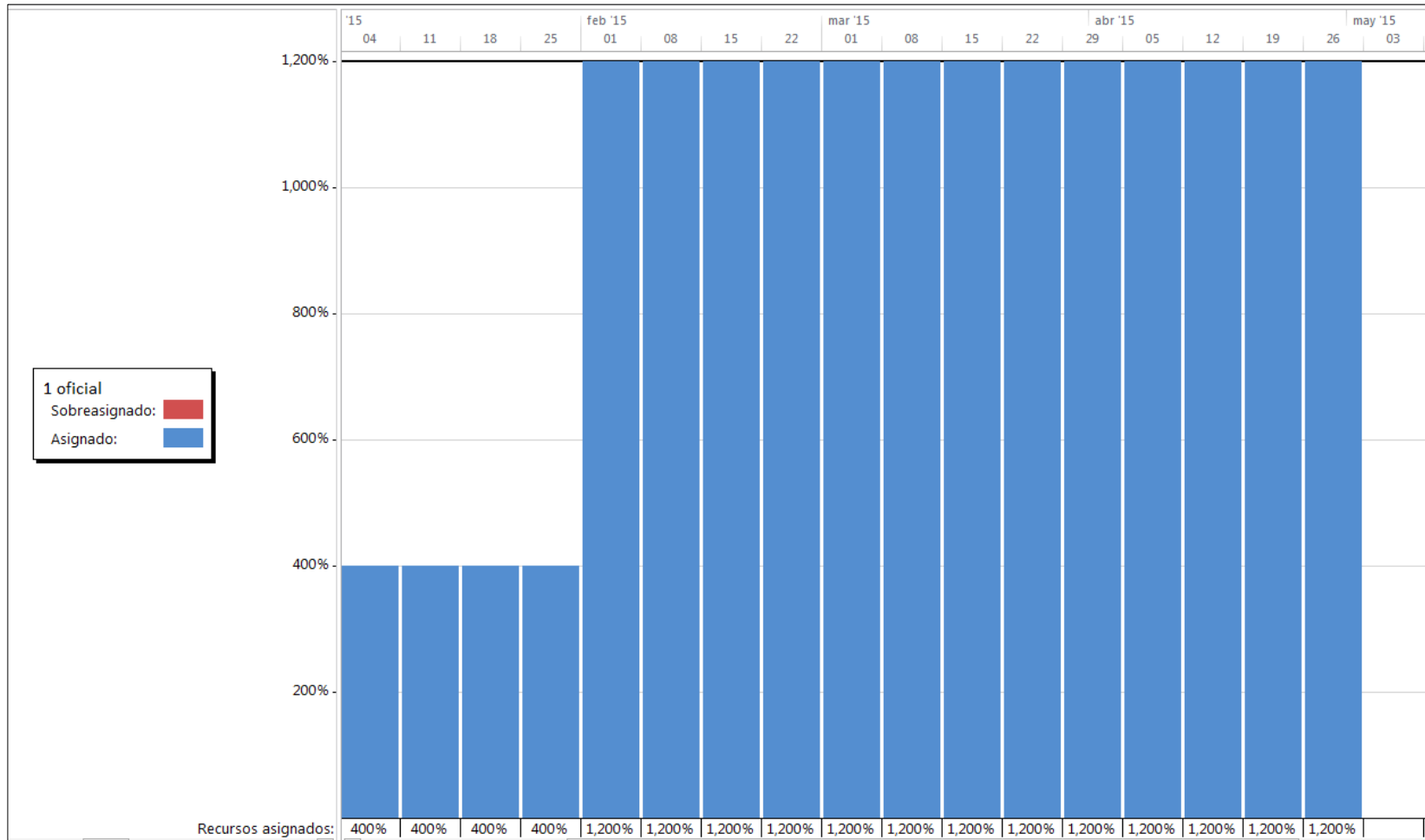
Fuente: Elaboración propia en el software Microsoft Project 2013.

3.4.4 Asignación de recursos humanos

En el proceso de programación de las diferentes actividades se tuvo presente la asignación de los recursos humanos requeridos para la ejecución de las diferentes actividades; en la asignación se tuvo presente las características de contratación de una obra, en donde los trabajadores deben ser contratados por periodos de tiempo uniformes de mínimo quince días.

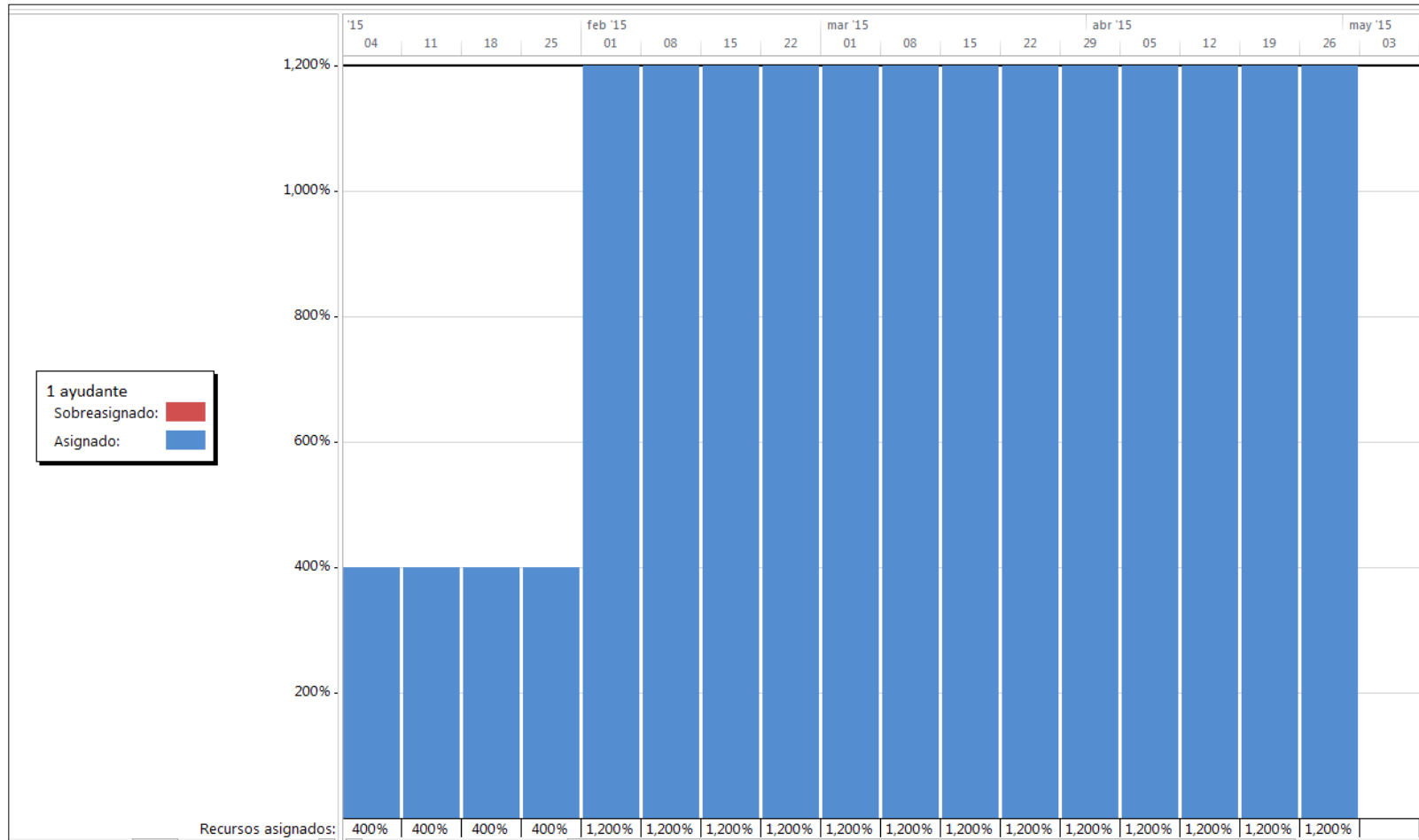
Los gráficos de recursos obtenidos en el software Microsoft Project 2013 se observan en las siguientes imágenes:

Figura 31: Gráfico de recursos para el oficial de construcción. 100% equivale a un oficial de construcción.



Fuente: Elaboración propia en el software Microsoft Project 2013.

Figura 32: Gráfico de recursos para el ayudante de construcción. 100% equivale a un ayudante de construcción.



Fuente: Elaboración propia en el software Microsoft Project 2013.

3.5 ELABORACIÓN DEL MODELO BIM 5D

3.5.1 Vinculación del modelo BIM y el programa de obra

Para la elaboración del modelo BIM 5D se utilizó el software Autodesk Navisworks 2014; el proceso en el software consistió en importar el modelo BIM (realizado en el software Autodesk Revit 2014) y el programa de obra (realizado en el software Microsoft Project 2013); en el proceso de importar se tuvo presente la generación de un vínculo dinámico, que funcionara de tal manera que en cualquier cambio que se presentara en el modelo BIM o en el programa de obra fuera posible alimentar el modelo BIM 5D con las modificaciones sin afectar los avances en el modelo del proceso constructivo.

3.5.2 Animación del proceso constructivo de los elementos

El proceso en el software Autodesk Navisworks 2014 consistió en realizar animaciones del proceso de construcción de cada uno de los elementos importados del modelo BIM; con motivo a la gran cantidad de elementos se crearon agrupaciones para evitar posibles errores. Las animaciones fueron almacenadas en subgrupos, de acuerdo a los elementos de construcción, por ejemplo para los elementos correspondientes a las zapatas se creó un grupo con el nombre de los elementos y la totalidad de las animaciones fueron almacenadas como integrantes del grupo. Para la elaboración de las animaciones se tuvo en cuenta el proceso de construcción de los elementos, un ejemplo es de las columnas que se construyen de su parte inferior a su parte superior, situación por la cual la animación de los elementos se realizó para que fuera aumentando en longitud desde su parte inferior a su parte superior.

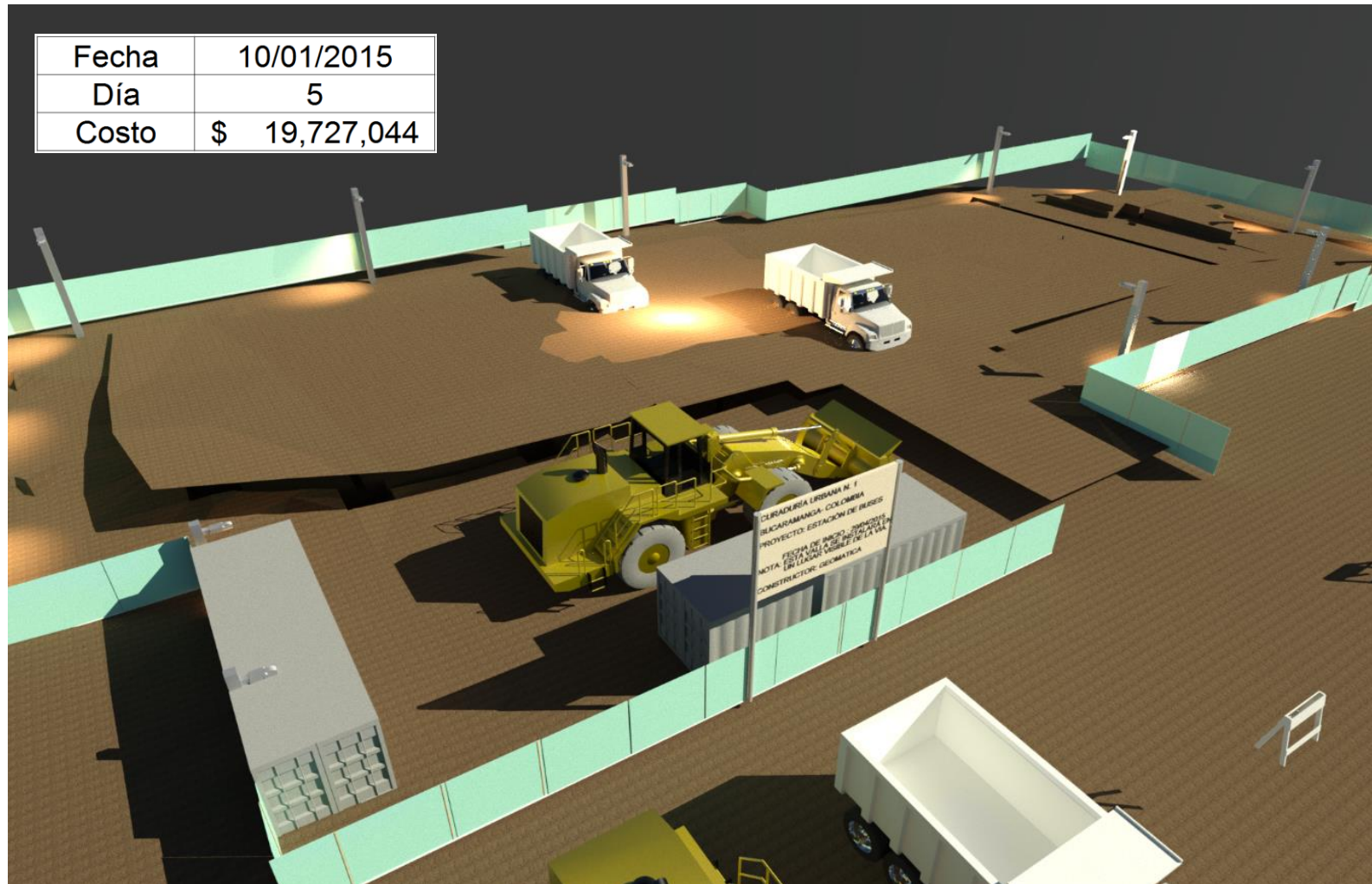
Una vez creadas las animaciones se procedió con la creación de escenas, donde se tuvo presente que cada una de las escenas representara una actividad del

programa de obra; para la creación de las escenas se asignaron las animaciones comprometidas a la actividad; fue necesario establecer el orden de reproducción de las animaciones teniendo en cuenta un proceso constructivo organizado y coherente con la realidad.

Con base el programa de obra importado del software Microsoft Project 2013, se asignaron las escenas a cada una de las actividades en la herramienta *timeliner* del software Autodesk Navisworks 2014; dicha herramienta permite reproducir las animaciones de los elementos de construcción de acuerdo al orden de las actividades del programa de obra; de esta forma cuando se reprodujo la totalidad de las animaciones se obtuvo la animación del proceso constructivo del caso de estudio, lo que se conoce como el modelo BIM 4D.

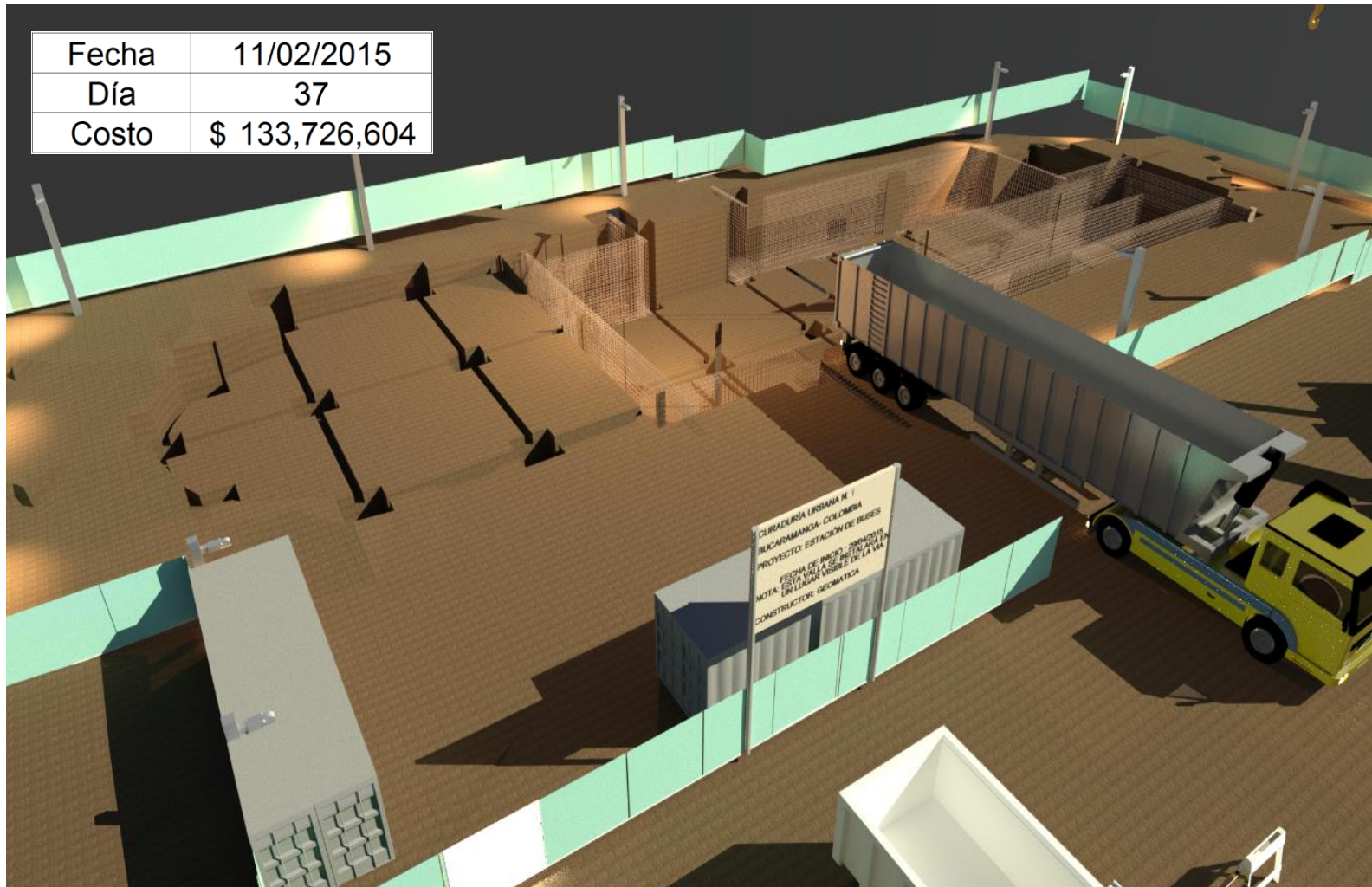
Para incluir la quinta dimensión al modelo, se vincularon los precios unitarios (provenientes de los APU) de las actividades contempladas en el programa de obra; de esta forma fue posible obtener el modelo BIM 5D en donde se incluyen las variables: dimensión en el eje x , dimensión en el eje y , dimensión en el eje z , tiempo y costo.

Figura 33: Modelo del proceso constructivo BIM 5D, caso de estudio (día 5).



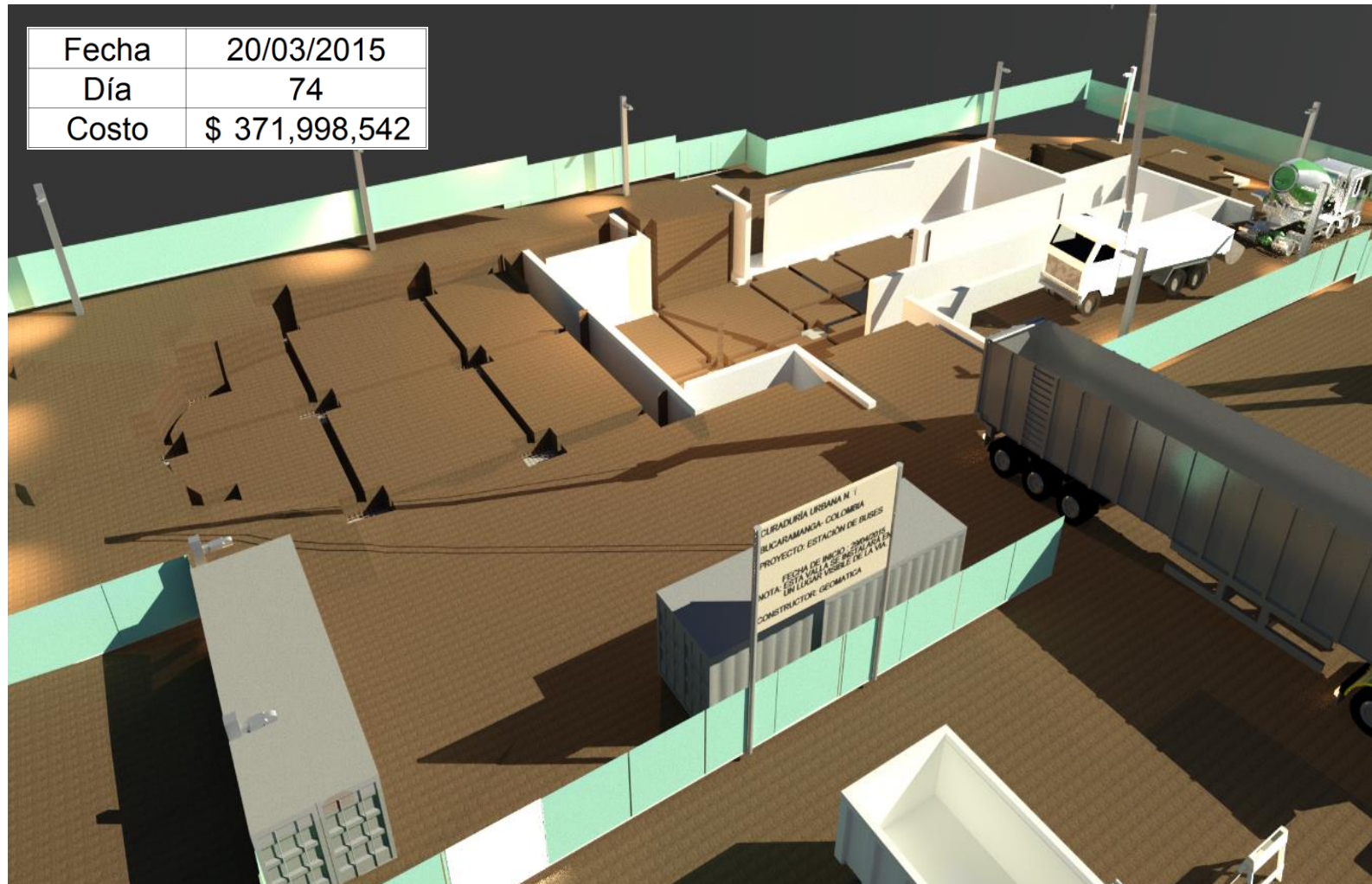
Fuente: Elaboración propia en el software Autodesk Navisworks 2014.

Figura 34: Modelo del proceso constructivo BIM 5D, caso de estudio (día 37).



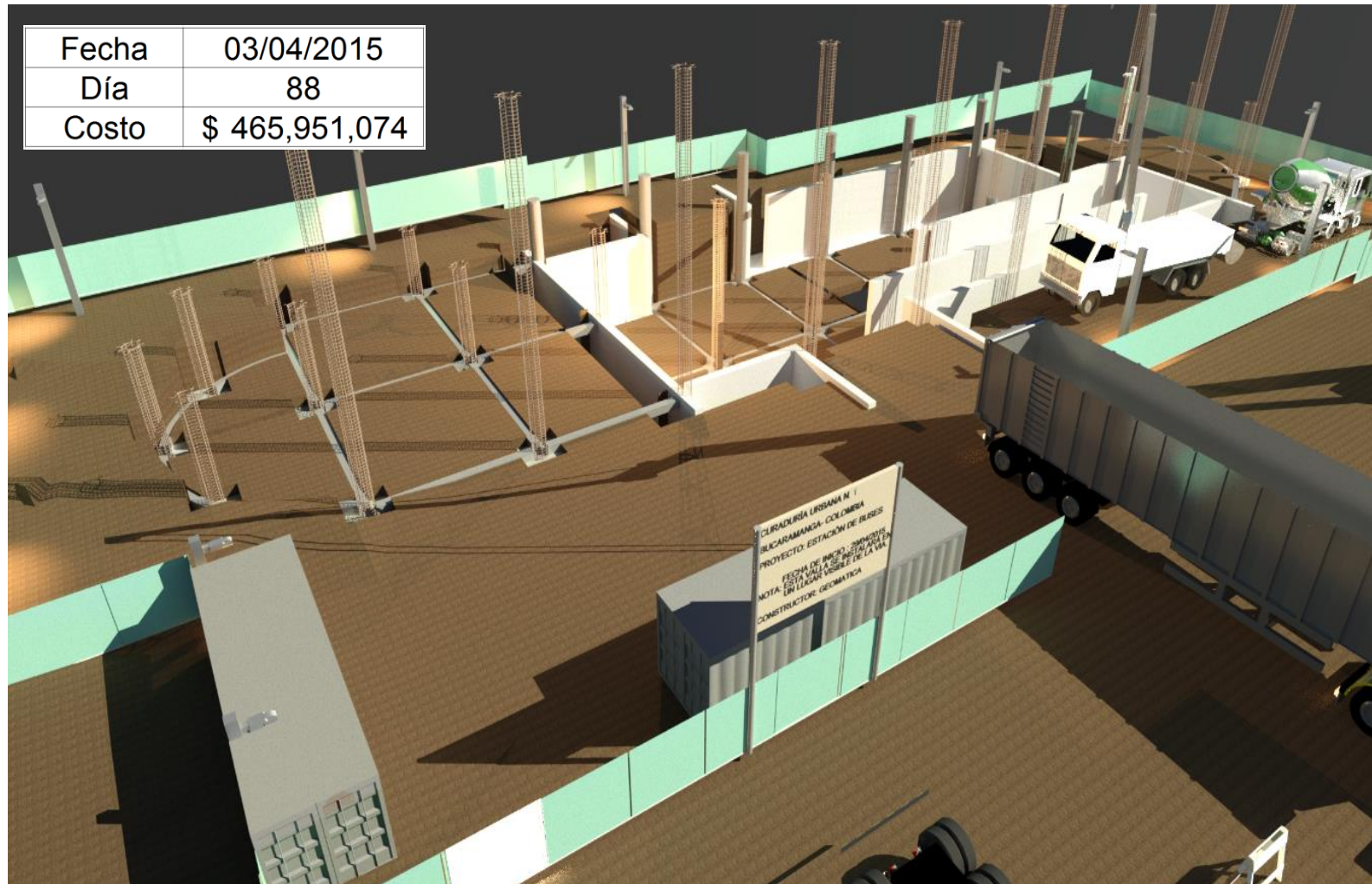
Fuente: Elaboración propia en el software Autodesk Navisworks 2014.

Figura 35: Modelo del proceso constructivo BIM 5D, caso de estudio (día 74).



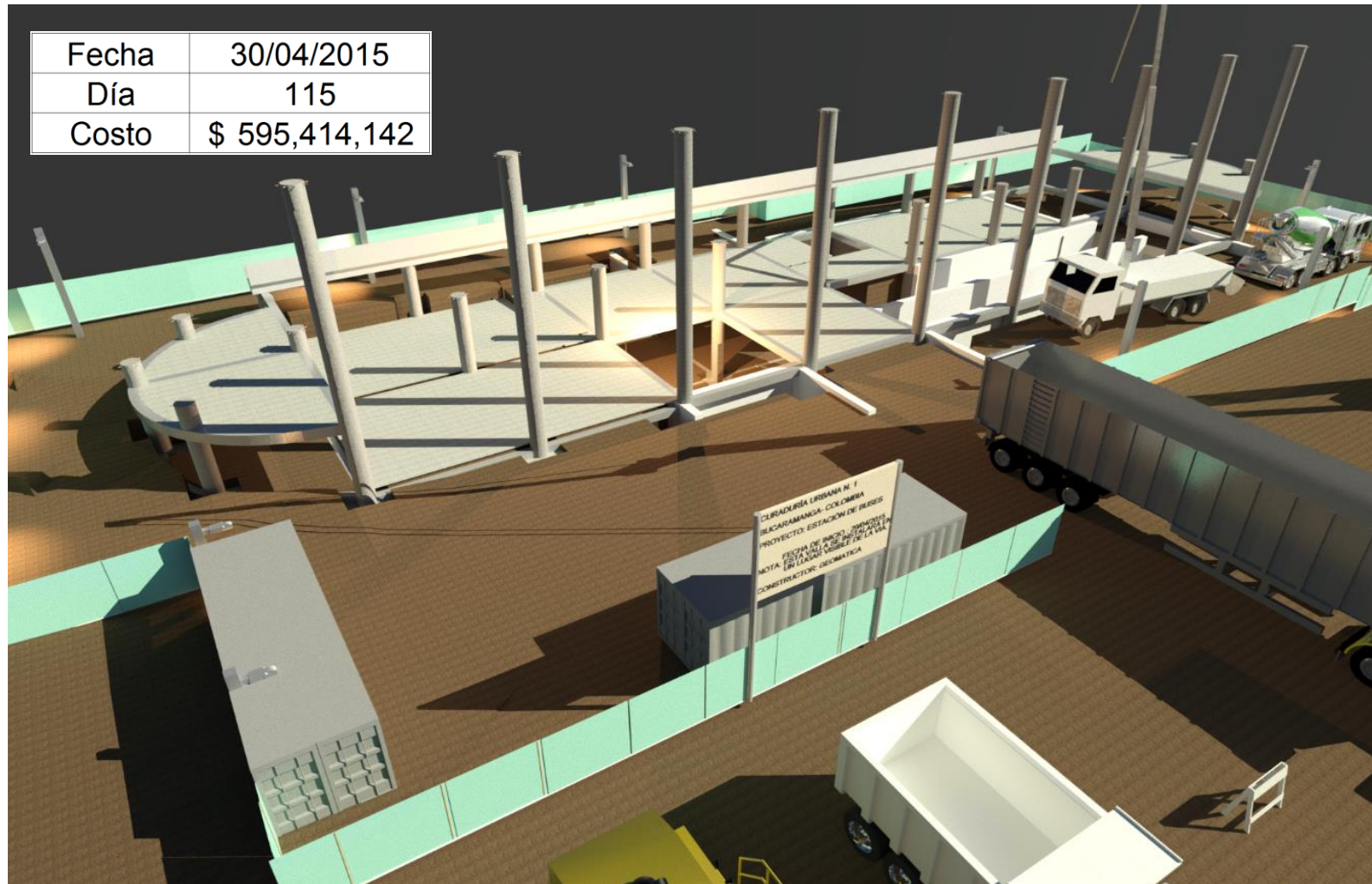
Fuente: Elaboración propia en el software Autodesk Navisworks 2014.

Figura 36: Modelo del proceso constructivo BIM 5D, caso de estudio (día 88).



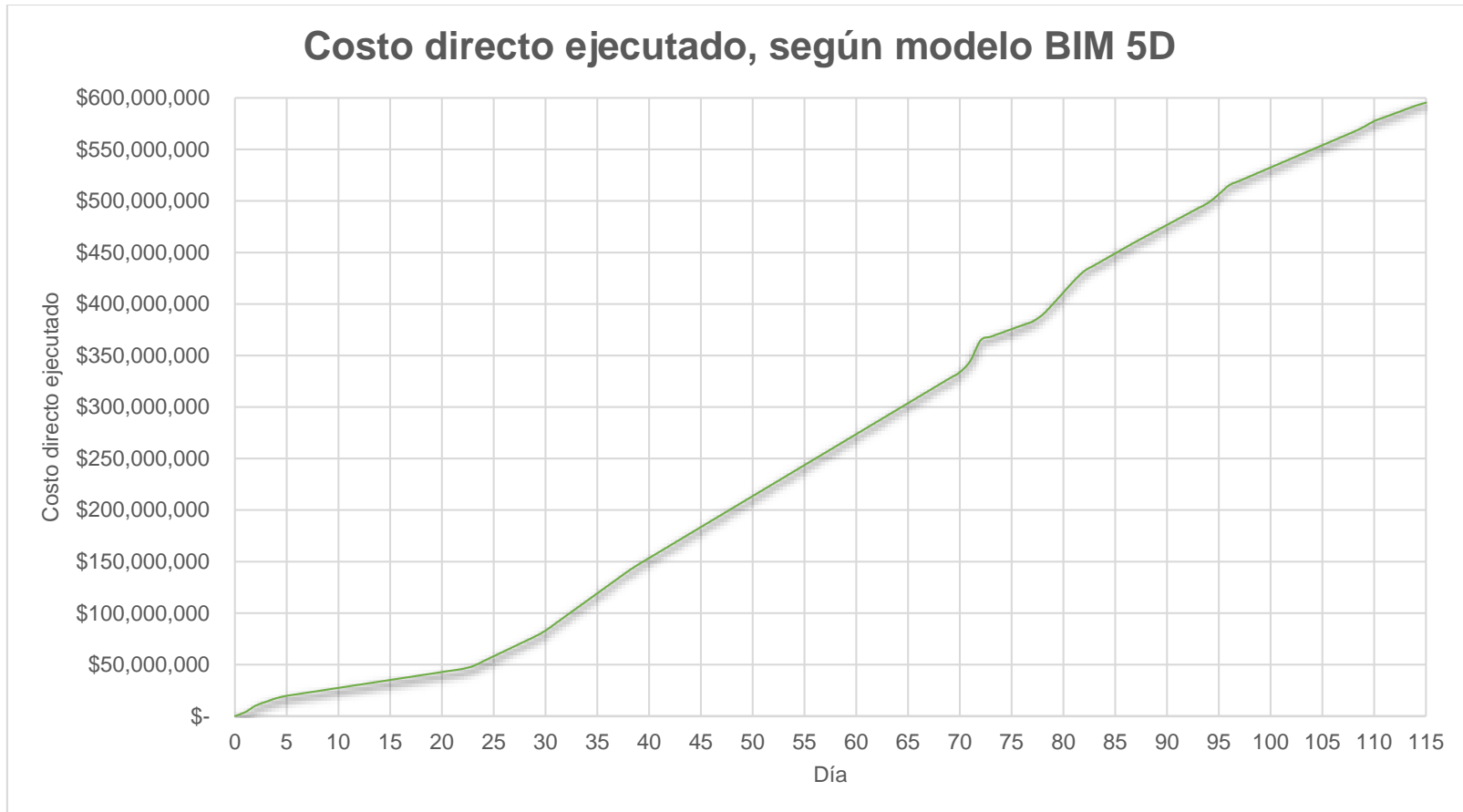
Fuente: Elaboración propia en el software Autodesk Navisworks 2014.

Figura 37: Modelo del proceso constructivo BIM 5D, caso de estudio (día 115).



Fuente: Elaboración propia en el software Autodesk Navisworks 2014.

Figura 38: Costo directo ejecutado para el caso de estudio, según modelo BIM 5D.



Fuente: Elaboración propia.

3.6 CÁLCULOS PARA LA ELABORACIÓN DEL FLUJO DE CAJA CON BASE EN LA INFORMACIÓN DEL MODELO BIM 5D

3.6.1 Evaluación de los flujos de efectivo por concepto de nómina de personal calificado

Para la evaluación de los flujos de efectivo por concepto del pago de nóminas de personal calificado se tuvo en cuenta el personal mostrado en el cuadro 11, personal definido de acuerdo a las características del proyecto del caso de estudio.

Cuadro 11: Personal calificado estimado para la construcción del caso de estudio.

| Personal | Cantidad | Dedicación |
|----------------------------------|-----------------|-------------------|
| Ingeniero Residente de Obra | 1 | Tiempo completo |
| Director de Obra | 1 | Medio tiempo |
| Topógrafo | 1 | Tiempo completo |
| Ingeniero Ambiental | 1 | Medio tiempo |
| Mensajero | 1 | Tiempo completo |
| Profesional en salud ocupacional | 1 | Tiempo completo |
| Almacenista | 1 | Tiempo completo |
| Secretaria/asistente | 1 | Tiempo completo |

Fuente: Elaboración propia.

La definición de los salarios, del personal mostrado en el cuadro 11, se realizó de acuerdo a una investigación de mercado en diferentes bolsas de empleo, en donde debido a la variabilidad de los datos obtenidos se consideró un valor medio. Una de las fuentes consultadas fue la calculadora de salarios por profesión de la Revista Dinero [127].

Para el cálculo del costo total de los salarios del personal requerido se utilizó la calculadora de Ministerio de Trabajo de Colombia [126].

Cuadro 12: Salario mensual del personal correspondiente a la mano de obra calificada del caso de estudio. (TC: Tiempo Completo, MT: Medio Tiempo).

| Id | Personal | D | Salario | Auxilio de transporte | Prestaciones Sociales + Descanso Remunerado + Seguridad Social + Parafiscales | Gasto de nómina total mensual |
|-----------|----------------------------------|----------|----------------|------------------------------|--|--------------------------------------|
| 1 | Ingeniero Residente de Obra | TC | \$ 2,100,000 | N. A. | \$ 1,224,160 | \$ 3,324,160 |
| 2 | Director de Obra | MT | \$ 1,900,000 | N. A. | \$ 1,107,573 | \$ 3,007,573 |
| 3 | Topógrafo | TC | \$ 2,050,000 | N. A. | \$ 1,195,013 | \$ 3,245,013 |
| 4 | Ingeniero Ambiental | MT | \$ 1,400,000 | N. A. | \$ 627,107 | \$ 2,027,107 |
| 5 | Mensajero | TC | \$ 800,000 | \$ 74,000 | \$ 479,420 | \$ 1,353,420 |
| 6 | Profesional en salud ocupacional | TC | \$ 1,800,000 | N. A. | \$ 1,049,280 | \$ 2,849,280 |
| 7 | Almacenista | TC | \$ 1,000,000 | \$ 74,000 | \$ 596,007 | \$ 1,670,007 |
| 8 | Secretaria/asistente | TC | \$ 800,000 | \$ 74,000 | \$ 479,420 | \$ 1,353,420 |
| | | | | | Total | \$ 18,829,980 |

Fuente: Elaboración propia, con base en los resultados obtenidos de la calculadora laboral del Ministerio de Trabajo [126].

3.6.2 Evaluación de los flujos de efectivo por concepto de nómina de personal no calificado

Para la evaluación de los flujos de efectivo correspondientes a los salarios de oficiales y ayudantes se tuvo en cuenta el programa de obra elaborado en el software Microsoft Project 2013, en donde se asignaron las cuadrillas destinadas a la ejecución de cada una de las tareas; en las gráficas 31 y 32 es posible observar las asignación del oficial y ayudante.

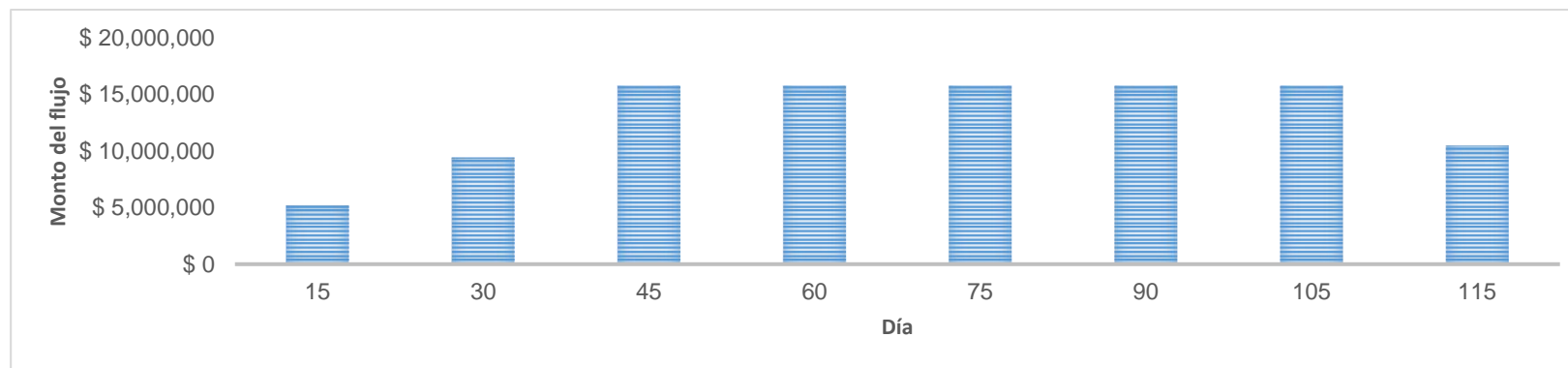
Para la determinación de la magnitud de los flujos se consideró un periodo de pago de nóminas de quincenales, esto basado en las características del pago de salarios del mercado local colombiano en donde las nóminas al personal de obra no calificado son pagadas en periodos de quincenales, lo que se define como quincena. En el cálculo de los montos de dinero se tuvieron en cuenta los montos mostrados en el cuadro 12.

En los figuras 39 y 40 y en los cuadros 13 y 14 se muestran los montos de efectivo correspondientes a los salarios de oficiales y ayudantes del caso de estudio. El cálculo fue realizado teniendo en cuenta los salarios calculados y la cantidad del personal en obra; según el programa de obra elaborado para el caso de estudio, algunas quincenas no se trabajan completas por parte de algunos oficiales y ayudantes, lo cual fue tenido en cuenta calculando el valor por día trabajado y multiplicando por el número de días trabajados.

Cuadro 13: Salarios de los ayudantes, para el caso de estudio.

| Flujos de efectivo por concepto de los salarios de los ayudantes | | | | | |
|--|-----|---------------------|--------------|--|-----------------------|
| Fecha | Día | Numero de Ayudantes | Salarios | Prestaciones + descansos + seguridad social + parafiscales | Total flujo |
| 20/01/2015 | 15 | 4 | \$ 3,092,880 | \$ 2,151,240 | \$ 5,244,120 |
| 04/02/2015 | 30 | 4 + 12 (x6 días) | \$ 5,567,184 | \$ 3,872,232 | \$ 9,439,416 |
| 19/02/2015 | 45 | 12 | \$ 9,278,640 | \$ 6,453,720 | \$ 15,732,360 |
| 06/03/2015 | 60 | 12 | \$ 9,278,640 | \$ 6,453,720 | \$ 15,732,360 |
| 21/03/2015 | 75 | 12 | \$ 9,278,640 | \$ 6,453,720 | \$ 15,732,360 |
| 05/04/2015 | 90 | 12 | \$ 9,278,640 | \$ 6,453,720 | \$ 15,732,360 |
| 20/04/2015 | 105 | 12 | \$ 9,278,640 | \$ 6,453,720 | \$ 15,732,360 |
| 30/04/2015 | 115 | 12 (x10 días) | \$ 6,185,760 | \$ 4,302,480 | \$ 10,488,240 |
| Total | | | | | \$ 103,833,576 |

Figura 39: Flujos de efectivo por concepto de los salarios de ayudantes.

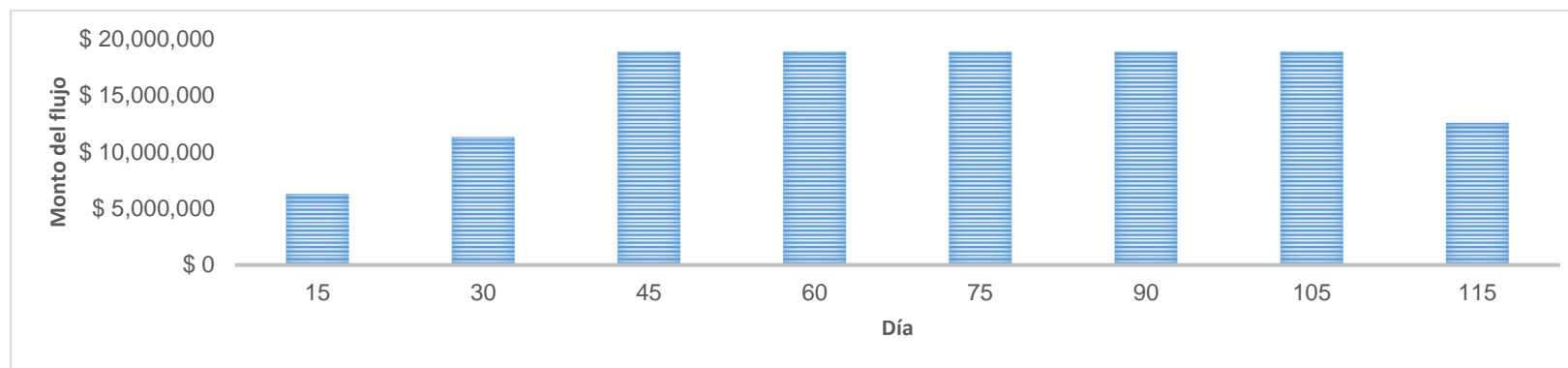


Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 14: Salarios de los oficiales, para el caso de estudio.

| Fecha | Día | Numero de Oficiales | Salarios | Prestaciones + descansos + seguridad social + parafiscales | Total flujo |
|------------|-----|---------------------|---------------|--|-----------------------|
| 20/01/2015 | 15 | 4 | \$ 3,865,700 | \$ 2,408,452 | \$ 6,274,152 |
| 04/02/2015 | 30 | 4 + 12 (x6 días) | \$ 6,958,260 | \$ 4,335,214 | \$ 11,293,474 |
| 19/02/2015 | 45 | 12 | \$ 11,597,100 | \$ 7,225,356 | \$ 18,822,456 |
| 06/03/2015 | 60 | 12 | \$ 11,597,100 | \$ 7,225,356 | \$ 18,822,456 |
| 21/03/2015 | 75 | 12 | \$ 11,597,100 | \$ 7,225,356 | \$ 18,822,456 |
| 05/04/2015 | 90 | 12 | \$ 11,597,100 | \$ 7,225,356 | \$ 18,822,456 |
| 20/04/2015 | 105 | 12 | \$ 11,597,100 | \$ 7,225,356 | \$ 18,822,456 |
| 30/04/2015 | 115 | 12 (x10 días) | \$ 7,731,400 | \$ 4,816,904 | \$ 12,548,304 |
| | | | | Total | \$ 124,228,210 |

Figura 40: Flujos de efectivo por concepto de los salarios de oficiales.



Fuente: Elaboración propia.

3.6.3 Cálculo del valor de las actas de obra (ingresos del constructor)

De acuerdo a la revisión bibliográfica y consultas del mercado local, los flujos de dinero del dueño de un proyecto de construcción al constructor se realizan en forma de un anticipo entre el 20 y 40 por ciento del costo total del proyecto en el momento de iniciar la obra; el valor restante es cancelado al constructor en forma de actas que tienen una frecuencia que es pactada en el inicio de la obra. Para el caso de estudio las frecuencia de las actas de obra se asumió como 10 días, teniendo en cuenta las características del entorno local.

Para la definición del valor de las actas de obra del caso de estudio, se utilizó el valor total ejecutado en obra en las fechas definidas para las actas; el valor ejecutado fue obtenido a partir de la simulación del modelo BIM 5D; en el siguiente cuadro se muestran las fechas proyectadas para las actas y el valor ejecutado en obra a la fecha del acta, obtenido del modelo BIM 5D:

Cuadro 15: Valor y fechas de las actas de obra definidas para el caso de estudio

| Acta de obra o corte | Fecha | Día | Valor total ejecutado a la fecha del acta, según modelo BIM 5D |
|----------------------|------------|-----|--|
| 1 | 15/01/2015 | 10 | \$ 27,420,719 |
| 2 | 25/01/2015 | 20 | \$ 42,808,069 |
| 3 | 04/02/2015 | 30 | \$ 83,050,597 |
| 4 | 14/02/2015 | 40 | \$ 153,473,024 |
| 5 | 24/02/2015 | 50 | \$ 213,602,227 |
| 6 | 06/03/2015 | 60 | \$ 273,731,430 |
| 7 | 16/03/2015 | 70 | \$ 333,860,633 |
| 8 | 26/03/2015 | 80 | \$ 411,276,613 |
| 9 | 05/04/2015 | 90 | \$ 476,763,577 |
| 10 | 15/04/2015 | 100 | \$ 532,532,932 |
| 11 | 25/04/2015 | 110 | \$ 577,551,200 |
| 12 | 30/04/2015 | 115 | \$ 595,373,977 |

Fuente: Elaboración propia.

Para el cálculo de los ingresos del constructor se tuvieron en cuenta los siguientes datos:

Cuadro 16: Datos tomados en cuenta para el cálculo de los ingresos del constructor.

| Concepto | Valor asumido |
|--------------------------------------|------------------------------|
| Administración, P_{Adm} | 10% (sobre el costo directo) |
| Utilidad del constructor, U_{Cons} | 8% (sobre el costo directo) |
| Anticipo al constructor, A | 30% (sobre el costo directo) |

Fuente: Elaboración propia.

En la siguiente expresión se puede observar el cálculo del anticipo al constructor, el cual se asumió que se efectúa un día antes del inicio de la obra, es decir el día cero.

$$Anticipo = (Porcentaje)(Costo\ directo\ total)$$

$$Anticipo = \left(\frac{30\%}{100\%}\right) (\$ 595,373,977) = \$ 178,612,193$$

Para el cálculo de los ingresos del constructor se tuvieron en cuenta las fechas de las actas, mostradas en el cuadro 15, el valor total ejecutado en obra a la fecha del acta (según modelo BIM 5D), la utilidad del constructor y costo de la administración (según valores del cuadro 16). En cuadro 17 es posible observar los ingresos del constructor y los montos calculados para cada uno de los conceptos enunciados anteriormente.

Cuadro 17: Calculo total de los ingresos totales del constructor

| Acta a_i | Fecha | Día | Trabajo realizado en el periodo del acta (costo directo) VTR_i | Anticipo A | Administración (10% del costo directo) CAa_i | Utilidad (8% del costo directo) | Ingreso total del constructor I_i |
|---------------|------------|-----|---|-----------------|---|------------------------------------|--|
| 0 | 05/01/2015 | 0 | \$ 0 | \$ 178,612,193 | \$ 17,861,219 | \$ 14,288,975 | \$ 210,762,388 |
| 1 | 15/01/2015 | 10 | \$ 27,420,719 | \$ 0 | \$ 1,919,450 | \$ 1,535,560 | \$ 22,649,514 |
| 2 | 25/01/2015 | 20 | \$ 15,387,350 | \$ 0 | \$ 1,077,115 | \$ 861,692 | \$ 12,709,951 |
| 3 | 04/02/2015 | 30 | \$ 40,242,528 | \$ 0 | \$ 2,816,977 | \$ 2,253,582 | \$ 33,240,328 |
| 4 | 14/02/2015 | 40 | \$ 70,422,427 | \$ 0 | \$ 4,929,570 | \$ 3,943,656 | \$ 58,168,925 |
| 5 | 24/02/2015 | 50 | \$ 60,129,203 | \$ 0 | \$ 4,209,044 | \$ 3,367,235 | \$ 49,666,722 |
| 6 | 06/03/2015 | 60 | \$ 60,129,203 | \$ 0 | \$ 4,209,044 | \$ 3,367,235 | \$ 49,666,722 |
| 7 | 16/03/2015 | 70 | \$ 60,129,203 | \$ 0 | \$ 4,209,044 | \$ 3,367,235 | \$ 49,666,722 |
| 8 | 26/03/2015 | 80 | \$ 77,415,980 | \$ 0 | \$ 5,419,119 | \$ 4,335,295 | \$ 63,945,599 |
| 9 | 05/04/2015 | 90 | \$ 65,486,964 | \$ 0 | \$ 4,584,087 | \$ 3,667,270 | \$ 54,092,232 |
| 10 | 15/04/2015 | 100 | \$ 55,769,355 | \$ 0 | \$ 3,903,855 | \$ 3,123,084 | \$ 46,065,487 |
| 11 | 25/04/2015 | 110 | \$ 45,018,268 | \$ 0 | \$ 3,151,279 | \$ 2,521,023 | \$ 37,185,089 |
| 12 | 30/04/2015 | 115 | \$ 17,822,777 | \$ 0 | \$ 1,247,594 | \$ 998,076 | \$ 14,721,614 |
| Total | | | \$ 595,373,977 | | | Total | \$ 702,541,293 |

Fuente: Elaboración propia.

Para el cálculo de los valores obtenidos en el cuadro 17, se ilustra a continuación el procedimiento de obtención de los montos correspondientes al acta 5. En el cálculo del valor del trabajo VTR realizado desde la terminación del acta 4 hasta la terminación del acta 5, se tuvieron en cuenta los valores acumulados de ejecución de las dos actas VA_4 y VA_5 , según los resultados de la simulación de modelo del proceso constructivo BIM 5D, mostrados en la cuadro 17.

$$VTR_i = VA_i - VA_{i-1}$$

$$VTR_5 = VA_5 - VA_4 = (\$ 213,602,227) - (\$ 153,473,024) = \$ 60,129,203$$

Dado que se tuvo en cuenta que al inicio de la obra el dueño del proyecto desembolsa un anticipo al constructor de acuerdo a un porcentaje del costo directo de la totalidad del proyecto P_A (mostrado en el cuadro 16), el valor de VTR_5 no debe ser cancelado en su totalidad al momento de la elaboración del acta de obra, ya que se debe descontar lo correspondiente al anticipo pagado al constructor un día antes del inicio de la obra A_i , por tanto el costo ejecutado a pagar al constructor en el momento de elaboración del acta $CEAPC_i$ puede obtenerse de la siguiente expresión:

$$CEAPC_i = VTR_i - P_A VTR_i$$

$$CEAPC_5 = VTR_5 - P_A VTR_5 = (\$ 60,129,203) - \left(\frac{30\%}{100\%}\right) (\$ 60,129,203)$$

$$CEAPC_5 = \$ 42,090,442$$

Con base en el costo ejecutado a pagar al constructor $CEAPC_i$ se calculó el costo de administración del acta CAa_i , el cual se encuentra condicionado al porcentaje establecido de administración P_{Adm} , mostrado en el cuadro 16.

$$CAa_i = (CEAPC_i)(P_{Adm})$$

$$CAa_5 = (CEAPC_5)(P_{Adm}) = (\$ 42,090,442) \left(\frac{10\%}{100\%} \right) = \$ 4,209,044$$

Con base en el costo ejecutado a pagar al constructor $CEAPC_i$ se calculó el costo de utilidad del constructor del acta CUa_i , el cual se encuentra condicionado al porcentaje establecido de utilidad U_{Cons} , mostrado en el cuadro 16.

$$CUa_i = (CEAPC_i)(U_{Cons})$$

$$CUa_5 = (CEAPC_5)(U_{Cons}) = (\$ 42,090,442) \left(\frac{8\%}{100\%} \right) = \$ 3,367,234$$

Para el cálculo del ingreso total del constructor I_i se tuvo en cuenta el costo ejecutado a pagar al constructor $CEAPC_i$, el costo de la administración del acta CAa_i y el costo de la utilidad del acta CUa_i .

$$I_i = CEAPC_i + CAa_i + CUa_i$$

$$I_5 = CEAPC_5 + CAa_5 + CUa_5 = (\$ 42,090,442) + (\$ 4,209,044) + (\$ 3,367,234)$$

$$I_5 = \$ 49,666,720$$

3.6.4 Cálculo de los flujos de efectivo por concepto de pedidos de concreto

Con base en la simulación del modelo del proceso constructivo BIM 5D se definieron las fechas de los pedidos y la cantidad de concreto correspondiente a cada uno de los pedidos; en la siguiente tabla se muestran: los pedidos planificados, las fechas de los pedidos y las cantidades de los pedidos.

Cuadro 18: Fechas y cantidades de pedidos de concreto para el caso de estudio.

| Pedido | Material | U.M. | Cantidad | Día | Fecha de pedido |
|--------|---------------------|------|----------|-----|-----------------|
| 1 | Concreto Pobre | M3 | 28.8 | 68 | 14/03/2015 |
| 2 | Concreto 3000 (Psi) | M3 | 305.9 | 36 | 10/02/2015 |
| 3 | Concreto 3000 (Psi) | M3 | 33.4 | 61 | 07/03/2015 |
| 4 | Concreto 3000 (Psi) | M3 | 53.6 | 67 | 13/03/2015 |
| 5 | Concreto 3000 (Psi) | M3 | 53.4 | 70 | 16/03/2015 |
| 6 | Concreto 3000 (Psi) | M3 | 83.7 | 80 | 26/03/2015 |
| 7 | Concreto 3000 (Psi) | M3 | 27.7 | 94 | 09/04/2015 |

Fuente: Elaboración propia.

Para el caso de estudio se asumió concretos elaborados en planta. El cálculo de los flujos de efectivo por concepto de la compra de concretos se realizó teniendo en cuenta los precios unitarios utilizados en la elaboración de los análisis de precios unitarios APU. En el siguiente cuadro se muestran los flujos de efectivo por concepto del pago de los pedidos de concreto.

Cuadro 19: Flujos de efectivo por concepto del pago del pago de pedidos de concreto.

| Pedido | Material | U.M. | Cant. | P. Unitario | Subtotal | Día |
|--------------|---------------------|------|-------|-------------|-----------------------|-----|
| 1 | Concreto Pobre | M3 | 28.8 | \$ 334,080 | \$ 9,621,504 | 68 |
| 2 | Concreto 3000 (Psi) | M3 | 305.9 | \$ 359,600 | \$ 110,001,640 | 36 |
| 3 | Concreto 3000 (Psi) | M3 | 33.4 | \$ 359,600 | \$ 12,010,640 | 61 |
| 4 | Concreto 3000 (Psi) | M3 | 53.6 | \$ 359,600 | \$ 19,274,560 | 67 |
| 5 | Concreto 3000 (Psi) | M3 | 53.4 | \$ 359,600 | \$ 19,202,640 | 70 |
| 6 | Concreto 3000 (Psi) | M3 | 83.7 | \$ 359,600 | \$ 30,098,520 | 80 |
| 7 | Concreto 3000 (Psi) | M3 | 27.7 | \$ 359,600 | \$ 9,960,920 | 94 |
| Total | | | | | \$ 210,170,424 | |

Fuente: Elaboración propia.

3.6.5 Cálculo de los flujos de efectivo por concepto de pedidos de acero de refuerzo

Con base en la simulación del modelo del proceso constructivo BIM 5D se definieron las fechas de los pedidos y la cantidad de acero correspondiente a cada uno de los pedidos; en la siguiente tabla se muestran: los pedidos planificados, las fechas de los pedidos y la cantidad de los pedidos.

Cuadro 20: Fechas y cantidades de pedidos de acero para el caso de estudio.

| Pedido | Material | U.M. | Cantidad | Día | Fecha de pedido |
|--------|-----------------|------|----------|-----|-----------------|
| 1 | Acero 60000 Psi | Kg | 20635.8 | 28 | 02/02/2015 |
| 2 | Acero 60000 Psi | Kg | 1148.5 | 59 | 05/03/2015 |
| 3 | Acero 60000 Psi | Kg | 3783.3 | 61 | 07/03/2015 |
| 4 | Acero 60000 Psi | Kg | 9250.6 | 66 | 12/03/2015 |
| 5 | Acero 60000 Psi | Kg | 4124.5 | 77 | 23/09/2015 |
| 6 | Acero 60000 Psi | Kg | 1887.7 | 95 | 10/04/2015 |

Fuente: Elaboración propia.

Para el caso de estudio se asumió acero figurado en planta. El cálculo de los flujos de efectivo por concepto de la compra de acero se realizó teniendo en cuenta los precios unitarios utilizados en la elaboración de los análisis de precios unitarios APU.

Cuadro 21: Flujos de efectivo por pago de pedidos de acero de refuerzo.

| Pedido | Material | U.M. | Cant. | P. Unitario | Subtotal | Día |
|--------------|-----------------|------|---------|-------------|----------------------|-----|
| 1 | Acero 60000 Psi | Kg | 20635.8 | \$ 2,432 | \$ 50,186,265 | 28 |
| 2 | Acero 60000 Psi | Kg | 1148.5 | \$ 2,432 | \$ 2,793,152 | 59 |
| 3 | Acero 60000 Psi | Kg | 3783.3 | \$ 2,432 | \$ 9,200,985 | 61 |
| 4 | Acero 60000 Psi | Kg | 9250.6 | \$ 2,432 | \$ 22,497,459 | 66 |
| 5 | Acero 60000 Psi | Kg | 4124.5 | \$ 2,432 | \$ 10,030,784 | 77 |
| 6 | Acero 60000 Psi | Kg | 1887.7 | \$ 2,432 | \$ 4,590,886 | 95 |
| Total | | | | | \$ 99,299,533 | |

Fuente: Elaboración propia.

3.6.6 Calculo de los flujos de efectivo por concepto de pedidos de algunos materiales e insumos

Con base en los análisis de precios unitarios APU, se dedujeron los materiales e insumos que se muestran en la siguiente tabla, en donde a partir de la simulación del modelo BIM 5D fue posible deducir la fecha en la que se deben comprar.

Cuadro 22: Materiales e insumos diferentes de concreto y acero requeridos para la ejecución del caso de estudio.

| Material/Insumo | U.M. | Cantidad | Precio Unitario | Subtotal | Día de compra |
|---|------|----------|-----------------|----------------------|---------------|
| Overoles de dotación | UN | 48 | \$ 120,000 | \$ 5,760,000 | 1 |
| Kit de elementos de protección personal | UN | 48 | \$ 150,000 | \$ 7,200,000 | 1 |
| Estaca de madera | UN | 120 | \$ 1,350 | \$ 162,000 | 1 |
| Cinta de señalización (Rollo 500 m) | UN | 2 | \$ 41,760 | \$ 83,520 | 1 |
| Puntillas | Lb | 8 | \$ 2,542 | \$ 20,336 | 1 |
| Pintura acrílica | Gln | 2 | \$ 58,000 | \$ 116,000 | 1 |
| Alquiler de formaleta | M2 | 250 | \$ 22,500 | \$ 5,625,000 | 28 |
| Geotextil NT 1600 | M2 | 306 | \$ 5,235 | \$ 1,601,910 | 28 |
| Material granular filtrante | M3 | 36 | \$ 95,000 | \$ 3,420,000 | 105 |
| Madera rolliza D=3" | ML | 310 | \$ 8,500 | \$ 2,635,000 | 1 |
| Tela de cerramiento | M2 | 687 | \$ 1,800 | \$ 1,236,600 | 1 |
| Total | | | | \$ 27,860,366 | |

Fuente: Elaboración propia.

3.6.7 Calculo de los flujos de efectivo por concepto del pago de algunos servicios

Con base en la revisión del presupuesto de construcción y la simulación del modelo BIM 5D fue posible determinar los subcontratos y servicios que se muestran en el

siguiente cuadro, los cuales afectan el flujo de caja del constructor del proyecto, ya que resultan indispensables para la ejecución exitosa de algunas de las actividades del programa de obra.

Cuadro 23: Subcontratos o servicios que afectan el flujo de caja del constructor durante la ejecución del proyecto.

| Subcontratos/ Servicios | U.M. | Cantidad | Precio Unitario | Subtotal |
|--|-------------|-----------------|------------------------|-----------------|
| Subcontrato fabricación de valla de información | UN | 1 | \$ 1,800,000 | \$ 1,800,000 |
| Pago del servicio de energía eléctrica | Mes | 4 | \$ 120,000 | \$ 480,000 |
| Pago del servicio de acueducto y alcantarillado | Mes | 4 | \$ 110,000 | \$ 440,000 |
| Alquiler de baños portables | Mes | 4 | \$ 150,000 | \$ 600,000 |
| Alquiler de campamento provisional | Mes | 4 | \$ 600,000 | \$ 2,400,000 |
| Alquiler de luminarias y equipos para el alumbrado de obra | Mes | 4 | \$ 2,200,000 | \$ 8,800,000 |
| Alquiler de elementos de la señalización provisional | Mes | 4 | \$ 550,000 | \$ 2,200,000 |

Fuente: Elaboración propia.

3.6.8 Calculo de los flujos de efectivo por concepto alquiler de equipos y herramientas

Teniendo en cuenta las características del mercado local de construcción, para el caso de estudio se asumió que los equipos requeridos para la ejecución del proyecto se obtienen por medio del alquiler. Los flujos de efectivo por concepto de alquiler fueron determinados de acuerdo a los precios unitarios del mercado local, utilizados en la elaboración del presupuesto de construcción; la fecha de pago del alquiler se asumió como el primer día en que se empieza a utilizar en la obra; la determinación

de las fechas de utilización de los equipos se realizó con base a la simulación del proceso constructivo en el modelo BIM 5D.

Cuadro 24: Costo de alquiler equipos y fechas de pago de alquiler.

| Equipo Pesado | Unidad | Inicio | Días de Uso | Valor por día de uso | Valor Total |
|----------------------|---------------|---------------|--------------------|-----------------------------|----------------------|
| Retroexcavadora | 2 | 09/01/2015 | 26 | \$ 103,292 | \$ 2,685,592 |
| Martillo Neumático | 1 | 09/01/2015 | 19 | \$ 85,600 | \$ 1,626,400 |
| Volquetas DT | 3 | 27/01/2015 | 8 | \$ 315,000 | \$ 7,560,000 |
| Rana | 1 | 29/04/2015 | 1 | \$ 63,937 | \$ 63,937 |
| Bomba de concreto | 1 | 12/02/2015 | 78 | \$ 32,125 | \$ 2,505,750 |
| Vibrador de concreto | 1 | 12/02/2015 | 78 | \$ 27,840 | \$ 2,171,520 |
| Equipo de topografía | 1 | 05/01/2015 | 115 | \$ 18,425 | \$ 2,118,875 |
| | | | | Total | \$ 18,732,074 |

Fuente: Elaboración propia.

3.7 ELABORACIÓN DEL MODELO DE DINÁMICA DE SISTEMAS

3.7.1 Configuración del software de dinámica de sistemas y nomenclatura

Para el desarrollo del modelo de dinámica de sistemas se utilizó el software *Evaluación 4.5*, el cual fue desarrollado por el grupo de investigación SIMON de la Escuela de Ingeniería de Sistemas de la Universidad Industrial de Santander; en la elaboración del modelo fue necesario asignar abreviaturas a cada una de las variables contempladas para la representación del flujo de caja del caso de estudio.

La modelación en el software consistió en agrupar los diferentes flujos de efectivo que se dan en la ejecución de un proyecto; para el caso de estudio se utilizaron los grupos: pago de actas (ingresos), nómina del personal calificado, nómina del personal no calificado, pedidos de acero de refuerzo, pedidos de concreto, alquiler

proveniente del modelo BIM 5D. En el siguiente cuadro se observa la abreviatura, el nombre, el tiempo de elemento y la definición de cada uno de los elementos empleados en el diagrama del flujo de nivel de los ingresos del constructor.

Cuadro 25: Nomenclatura utilizada en el modelo de dinámica de sistemas para los elementos relacionados con los ingresos del constructor.

| Abreviatura | Nombre | Tipo de elemento | Definición |
|-------------|-------------------|------------------|---|
| Banco | Banco | Nivel | Es el dinero que tiene disponible el constructor en un tiempo t , puede interpretarse como el balance del flujo de caja, el cual se obtiene de la resta de ingresos menos egresos, el valor inicial coincide con el anticipo que recibe el constructor. La unidad de medida es en pesos colombianos (\$). |
| F_Ingresos | Flujo de ingresos | Flujo | Es el flujo de los ingresos que tiene el constructor por concepto de la ejecución del proyecto, el cual depende de las actas de obra definidas a partir del modelos BIM 5D. Los ingresos son pagados del por parte del dueño del proyecto y por tanto se denominan como flujos de efectivo entrantes. La unidad de medida es en pesos colombianos por día (\$/día). |
| F_Egresos | Flujo de egresos | Flujo | Es el flujo de los egresos del constructor, los cuales se deben |

| | | | |
|----------|------------------------------|-------------------|---|
| | | | principalmente al pago de nóminas, compra de materiales, alquiler de equipos, entre otros. Los egresos dependen de un número considerable de variables. La unidad de medida es en pesos colombianos por día (\$/día). |
| Anticipo | Anticipo | Parámetro | Es el valor del anticipo que el constructor recibe en $t = 0$ para el inicio de la ejecución del proyecto. La unidad de medida es en pesos colombianos (\$). |
| T_Acta | Tiempo entre actas | Retraso | Representa el tiempo que se asume entre dos actas, que para el caso de estudio fue de 10 días. La unidad de medida se encuentra en días (día). |
| Vr_Pagar | Valor a pagar al constructor | Variable Auxiliar | Es el valor a pagar al constructor por concepto de las actividades ejecutadas para las distintas actas. En los cálculos realizados se denomina ingreso total del constructor (I_i). La unidad de medida es en pesos colombianos (\$). |
| Tr_Pagar | Trabajo a pagar | Variable Auxiliar | Representa Trabajo realizado en el periodo del acta (costo directo), denominado en la memoria de cálculos VTR_i , el cual es calculado a partir de la simulación del proceso |

| | | | |
|-----------|------------------------------|-------------------|--|
| | | | constructivo en el modelo BIM 5D. La unidad de medida es en pesos colombianos (\$). |
| Adm_Pagar | Administración a pagar | Variable Auxiliar | Representa el costo de la administración correspondiente a las actividades ejecutas en el periodo de validez del acta de obra a_i , el porcentaje de administración asumido para el caso de estudio fue 10% del costo directo del valor del acta correspondiente. La unidad de medida es en pesos colombianos (\$). |
| Uti_Pagar | Utilidad a pagar | Variable Auxiliar | Representa el costo de la utilidad del constructor correspondiente a las actividades ejecutas en el periodo de validez del acta de obra a_i , el porcentaje asumido para la utilidad del constructor en el caso de estudio fue el 8% del costo directo del valor del acta correspondiente. La unidad de medida es en pesos colombianos (\$). |
| Por_Adm | Porcentaje de administración | Variable Auxiliar | Representa el porcentaje del costo directo del valor de las actas que el dueño del proyecto paga al constructor por concepto de la administración. En el caso de estudio se asumió 10%, porcentaje |

| | | | |
|---------|------------------------|-----------|---|
| | | | que fue multiplicado por el costo directo de las diferentes actas VTR_i . La unidad de medida es en porcentaje (%), en el modelo de dinámica de sistemas se ingresó en decimales. |
| Por_Uti | Porcentaje de utilidad | Parámetro | Representa el porcentaje del costo directo del valor de las actas que el dueño del proyecto paga al constructor por concepto de la utilidad. En el caso de estudio se asumió 8%, porcentaje que fue multiplicado por el costo directo de las diferentes actas VTR_i . La unidad de medida es en porcentaje (%), en el modelo de dinámica de sistemas se ingresó en decimales. |

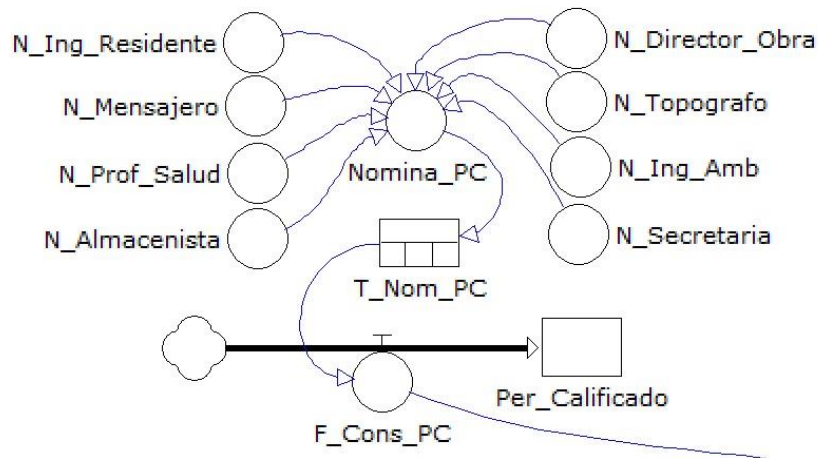
Fuente: Elaboración propia.

3.7.3 Nómina del personal calificado

La nómina del personal calificado produce flujos de efectivo periódicos durante la ejecución del proyecto; de acuerdo al mercado local los pagos al personal calificado se realizan cada mes, por lo tanto en el modelo de dinámica de sistemas se utilizó una periodicidad de 30 días y la magnitud de los flujos se asumió de acuerdo a los cálculos realizados en el numeral 3.6.1; en la magnitud incluida en el modelo se tuvo en cuenta el salario, prestaciones sociales, descanso remunerado, aportes a la seguridad social y parafiscales, para cada uno de los profesionales definidos para la ejecución de la obra.

En la siguiente figura es posible observar el diagrama de flujo de nivel obtenido en el software Evolución 4.5.

Figura 42: Diagrama de flujo de nivel para la nómina del personal calificado.



Fuente: Elaboración propia en el software Evolución 4.5.

En el siguiente cuadro se observa la abreviatura, el nombre, el tipo de elemento y la definición de cada uno de los elementos empleados en el diagrama del flujo de nivel de las nóminas del personal calificado.

Cuadro 26: Nomenclatura utilizada en el modelo de dinámica de sistemas para los elementos relacionados con la nómina del personal calificado.

| Abreviatura | Nombre | Tipo de elemento | Definición |
|-----------------|--------------------------------|-------------------|--|
| N_Ing_Residente | Nómina del ingeniero residente | Variable Auxiliar | Representa el salario, cesantías, primas, intereses sobre cesantías, vacaciones, pensiones, salud, riegos laborales y parafiscales que se generan por concepto del |

| | | | |
|-------------------|---|-------------------|--|
| | | | servicio prestado de un profesional en el cargo de ingeniero residente. La unidad de medida es en pesos colombianos (\$). |
| N_Mensaje ro | Nómina del Mensajero | Variable Auxiliar | Representa el salario, auxilio de transporte, cesantías, primas, intereses sobre cesantías, vacaciones, pensiones, salud, riesgos laborales y parafiscales que se generan por concepto del servicio prestado de un técnico o tecnólogo en el cargo de mensajero. La unidad de medida es en pesos colombianos (\$). |
| N_Prof_Sa lud | Nómina del profesional de salud ocupacional | Variable Auxiliar | Representa el salario, cesantías, primas, intereses sobre cesantías, vacaciones, pensiones, salud, riesgos laborales y parafiscales que se generan por concepto del servicio prestado de un profesional en el cargo de profesional de salud ocupacional. La unidad de medida es en pesos colombianos (\$). |
| N_Almac enista | Nómina del almacenista | Variable Auxiliar | Representa el salario, auxilio de transporte, cesantías, primas, intereses sobre cesantías, vacaciones, pensiones, salud, riesgos laborales y parafiscales que se generan por concepto del |

| | | | |
|-----------------------|--------------------------------|-------------------|--|
| | | | servicio prestado de un técnico o tecnólogo en el cargo de almacenista. La unidad de medida es en pesos colombianos (\$). |
| N_Director_Obra | Nómina del director de obra | Variable Auxiliar | Representa el salario, cesantías, primas, intereses sobre cesantías, vacaciones, pensiones, salud, riesgos laborales y parafiscales que se generan por concepto del servicio prestado de un profesional en el cargo de ingeniero director de obra. La unidad de medida es en pesos colombianos (\$). |
| N_Topografo | Nómina del topógrafo | Variable Auxiliar | Representa el salario, cesantías, primas, intereses sobre cesantías, vacaciones, pensiones, salud, riesgos laborales y parafiscales que se generan por concepto del servicio prestado de un profesional en el cargo de topógrafo. La unidad de medida es en pesos colombianos (\$). |
| N_Ingeniero_Ambiental | Nómina del ingeniero ambiental | Variable Auxiliar | Representa el salario, cesantías, primas, intereses sobre cesantías, vacaciones, pensiones, salud, riesgos laborales y parafiscales que se generan por concepto del servicio prestado de un profesional en el cargo de ingeniero ambiental. |

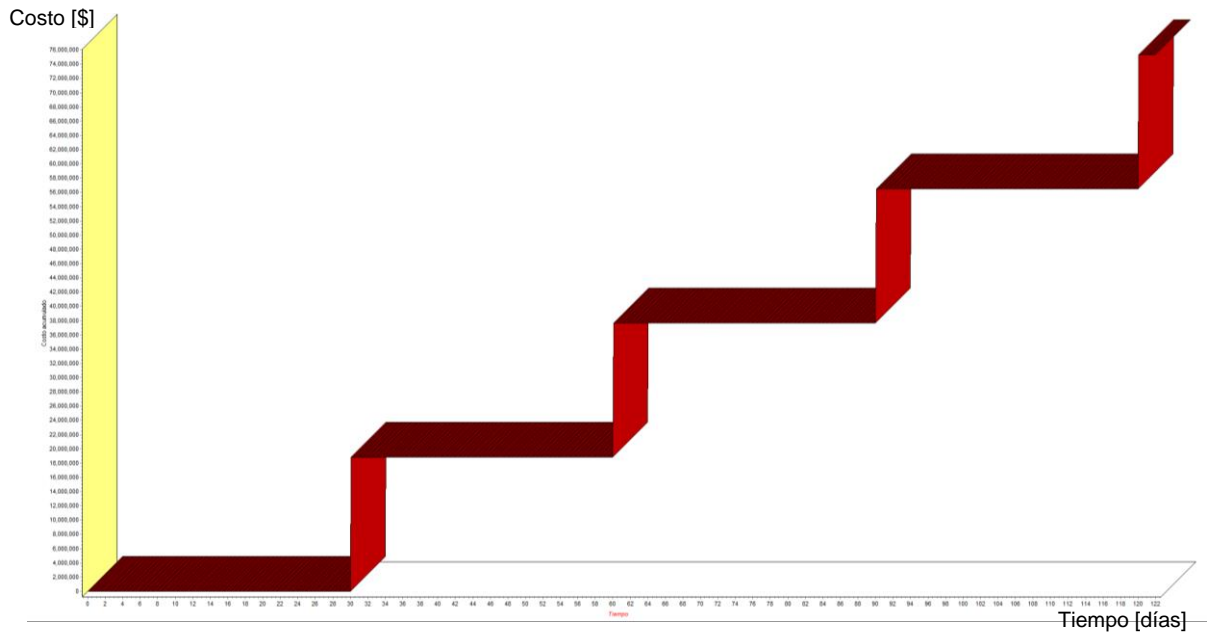
| | | | |
|--------------|--|-------------------|---|
| | | | La unidad de medida es en pesos colombianos (\$). |
| N_Secretaria | Nómina de la secretaria | Variable Auxiliar | Representa el salario, auxilio de transporte, cesantías, primas, intereses sobre cesantías, vacaciones, pensiones, salud, riesgos laborales y parafiscales que se generan por concepto del servicio prestado de un técnico o tecnólogo en el cargo de secretaria. La unidad de medida es en pesos colombianos (\$). |
| Nomina_PC | Nómina del personal calificado | Variable Auxiliar | Representa el flujo acumulado por concepto de la nómina de los cargos: ingeniero residente, mensajero, profesional de salud ocupacional, almacenista, ingeniero director de obra, topógrafo, ingeniero ambiental y secretaria. La unidad de medida es en pesos colombianos (\$). |
| T_Nom_PC | Tempo de frecuencia de la nómina del personal calificado | Retardo | Representa el tiempo de periodicidad de los salarios personal calificado, el cual se asumió como 30 días para el caso de estudio, teniendo en cuenta las características del sector de la construcción colombiano. La unidad |

| | | | |
|--------------------|---|-------|--|
| | | | de medida se encuentra en días (día). |
| F_Const_ PC | Flujo de la nómina del personal calificado | Flujo | Es el flujo correspondiente a la nómina del personal calificado: ingeniero residente, mensajero, profesional de salud ocupacional, almacenista, ingeniero director de obra, topógrafo, ingeniero ambiental y secretaria. La unidad de medida es en pesos colombianos por día (\$/día). |
| Per_Califica do | Nómina del personal calificado | Nivel | Es el dinero que gasta el constructor por concepto del pago de nóminas del personal calificado, su principal característica es que acumula el valor en el transcurso del tiempo de simulación. La unidad de medida es en pesos colombianos (\$). |

Fuente: Elaboración propia.

Al realizar la simulación del diagrama de flujo de nivel para la nómina del personal calificado, en el software Evolución 4.5, se obtiene la figura que se muestra a continuación, donde se observa el comportamiento de los flujos de efectivo por concepto del pago de personal calificado en el transcurso de la construcción del caso de estudio.

Figura 43: Costo acumulado en pesos versus tiempo en días para la nómina del personal calificado.



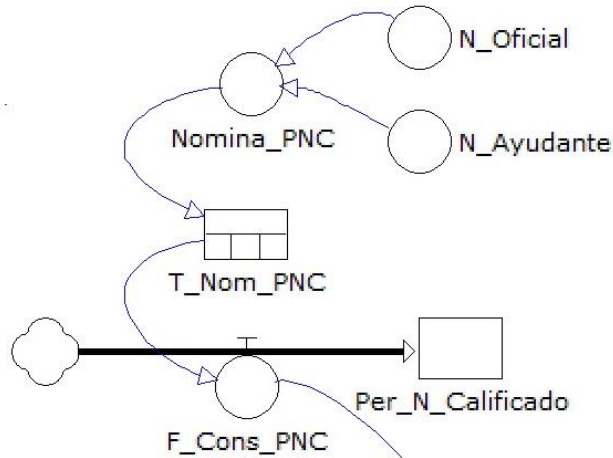
Fuente: Elaboración propia en el software Evolución 4.5.

3.7.4 Nómina del personal no calificado (oficiales y ayudantes)

La nómina del personal no calificado produce flujos de efectivo periódicos durante la ejecución del proyecto; de acuerdo al mercado local los pagos al personal no calificado se realizan cada quincena, por lo tanto en el modelo de dinámica de sistemas se utilizó una periodicidad de 15 días y la magnitud de los flujos se asumió de acuerdo a los cálculos realizados en el numeral 3.6.2; en la magnitud incluida en el modelo se tuvo en cuenta el salario, prestaciones sociales, descanso remunerado, aportes a la seguridad social y parafiscales, para cada el oficial y el ayudante.

En la siguiente figura es posible observar el diagrama de flujo de nivel obtenido en el software Evolución 4.5.

Figura 44: Diagrama de flujo de nivel para la nómina del personal no calificado.



Fuente: Elaboración propia en el software Evolución 4.5.

En el siguiente cuadro se observa la abreviatura, el nombre, el tipo de elemento y la definición de cada uno de los elementos empleados en el diagrama del flujo de nivel de las nóminas del personal calificado.

Cuadro 27: Nomenclatura utilizada en el modelo de dinámica de sistemas para los elementos relacionados con la nómina del personal no calificado.

| Abreviatura | Nombre | Tipo de elemento | Definición |
|-------------|------------------------------------|-------------------|---|
| N_Oficial | Nómina del oficial de construcción | Variable Auxiliar | Representa el salario, auxilio de transporte, cesantías, primas, intereses sobre cesantías, vacaciones, pensiones, salud, riesgos laborales y parafiscales que se generan por concepto del servicio prestado los oficial de construcción. La unidad de medida es en pesos colombianos (\$). |

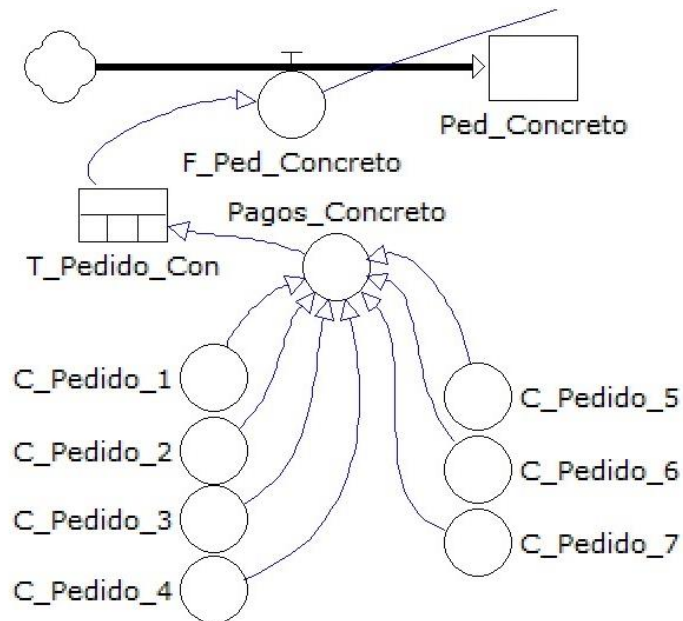
| | | | |
|-------------|---|-------------------|--|
| N_Ayudante | Nómina del ayudante de construcción | Variable Auxiliar | Representa el salario, auxilio de transporte, cesantías, primas, intereses sobre cesantías, vacaciones, pensiones, salud, riesgos laborales y parafiscales que se generan por concepto del servicio prestado de los ayudantes de construcción. La unidad de medida es en pesos colombianos (\$). |
| Nomina_PNC | Nómina del personal no calificado | Variable Auxiliar | Representa el flujo acumulado por concepto de la nómina de los cargos: oficial de construcción y ayudante de construcción. La unidad de medida es en pesos colombianos (\$). |
| T_Nom_PNC | Tempo de frecuencia de la nómina del personal no calificado | Retardo | Representa el tiempo de periodicidad de los salarios del personal no calificado, el cual se asumió como 15 días para el caso de estudio, teniendo en cuenta las características del sector de la construcción colombiano. La unidad de medida se encuentra en días (día). |
| F_Const_PNC | Flujo de la nómina del personal no calificado | Flujo | Es el flujo correspondiente a la nómina del personal no calificado: oficial de construcción y ayudante de construcción. La unidad de |

3.7.5 Pedidos de concreto

Los pedidos de concreto ocasionan flujos de efectivo no periódicos durante la ejecución del proyecto; para el caso de estudio las fechas y el número de pedidos fueron determinados a partir de los resultados obtenidos en el modelo BIM 5D; la magnitud de los flujos fue calculada en el numeral 2.6.4, de acuerdo al precio unitario del concreto utilizado en la elaboración de los análisis de precios unitarios APU.

En la siguiente figura es posible observar el diagrama de flujo de nivel obtenido en el software Evolución 4.5.

Figura 46: Diagrama de flujo de nivel para los pedidos de concreto.



Fuente: Elaboración propia en el software Evolución 4.5.

En el siguiente cuadro se observa la abreviatura, el nombre, el tipo de elemento y la definición de cada uno de los elementos empleados en el diagrama del flujo de nivel de los pedidos de concreto.

Cuadro 28: Nomenclatura utilizada en el modelo de dinámica de sistemas para los elementos relacionados con los pedidos de concreto.

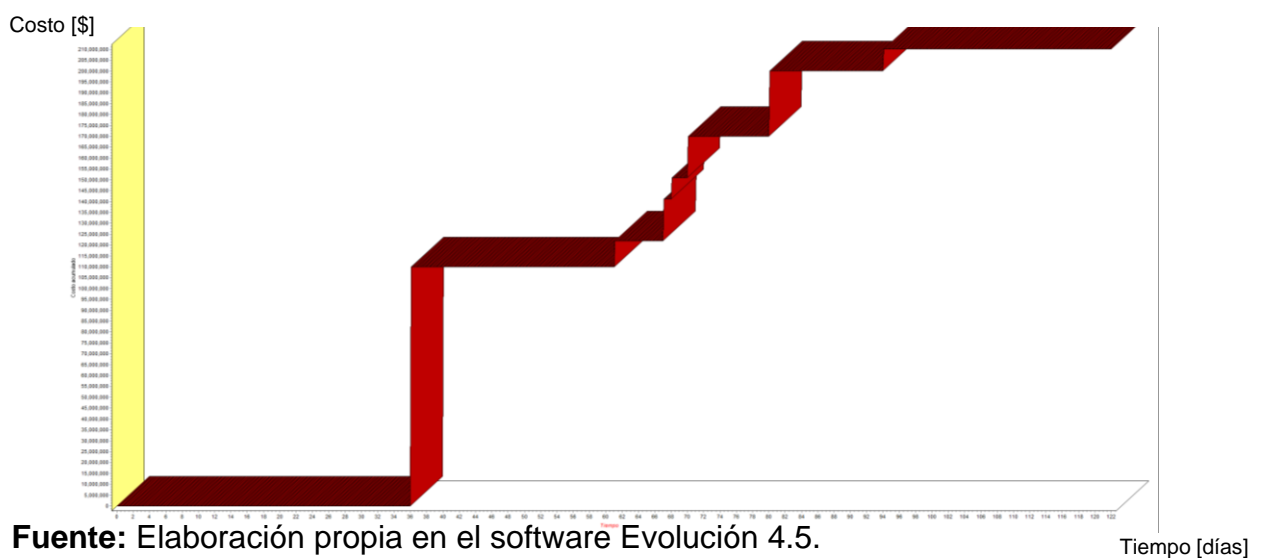
| Abreviatura | Nombre | Tipo de elemento | Definición |
|--|--|-------------------------|--|
| C_Pedido_1 C_Pedido_2 C_Pedido_3 C_Pedido_4 C_Pedido_5 C_Pedido_6 C_Pedido_7 | Costo de los pedidos de concreto definidos | Variables Auxiliares | Representa el costo y la fecha de los pedidos de concreto programados para el caso de estudio. La unidad de medida es en pesos colombianos (\$). |
| Pagos_ concreto | Pagos de los pedidos de concreto | Variable Auxiliar | Representa el flujo acumulado por concepto del pago de los pedidos 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7. La unidad de medida es en pesos colombianos (\$). |
| T_Pedido_ Con | Tiempo para realizar el pedido del material al proveedor | Retardo | Representa el tiempo de anterioridad a la ejecución con el cual se debe formular el pedido de concreto al proveedor. La unidad de medida se encuentra en días (día). |
| F_Ped_ Concreto | Flujo del costo de los pedidos de concreto | Flujo | Es el flujo correspondiente al pago de los pedidos de concreto planificados para la ejecución del caso de estudio. La unidad de |

| | | | |
|--------------|--|-------|--|
| | | | medida es en pesos colombianos por día (\$/día). |
| Ped_Concreto | Costo acumulado de los pedidos de concreto | Nivel | Es el dinero que gasta el constructor por concepto del pago de los pedidos de concreto, su principal característica es que acumula el valor en el transcurso del tiempo de simulación. La unidad de medida es en pesos colombianos (\$). |

Fuente: Elaboración propia.

Al realizar la simulación del diagrama de flujo de nivel para el pago de pedidos de concreto, en el software Evolución 4.5, es posible obtener la figura que se muestra a continuación, donde es posible observar el comportamiento de los flujos de efectivo por concepto del pago de pedidos de concreto en el transcurso de la construcción del caso de estudio.

Figura 47: Costo acumulado en pesos versus tiempo en días para los pedidos de concreto.

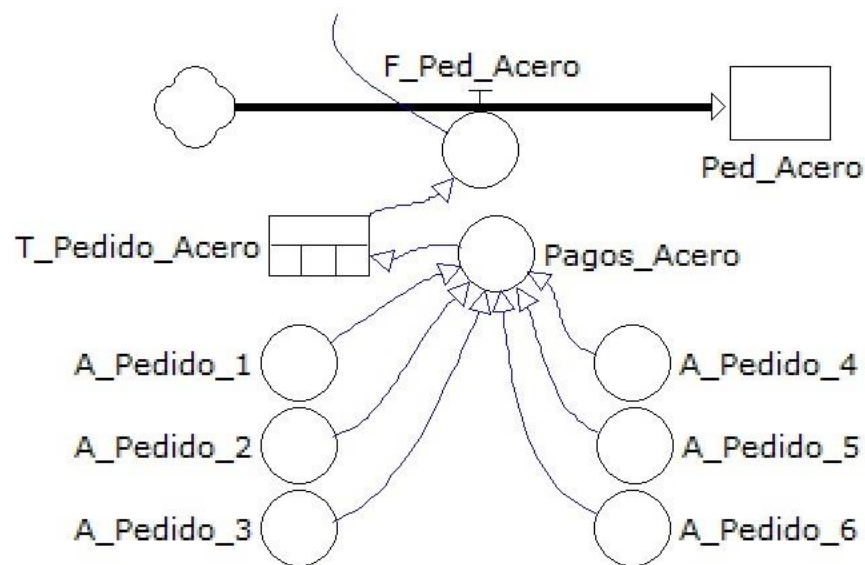


3.7.6 Pedidos de acero de refuerzo

Los pedidos de acero de refuerzo ocasionan flujos de efectivo no periódicos durante la ejecución del proyecto; para el caso de estudio las fechas y el número de pedidos fueron determinados a partir de los resultados obtenidos en el modelo BIM 5D; la magnitud de los flujos fue calculada en el numeral 3.6.5, de acuerdo al precio unitario del acero de refuerzo utilizado en la elaboración de los análisis de precios unitarios APU.

En la siguiente figura es posible observar el diagrama de flujo de nivel obtenido en el software Evolución 4.5.

Figura 48: Diagrama de flujo de nivel para los pedidos de acero.



Fuente: Elaboración propia en el software Evolución 4.5.

En el siguiente cuadro se observa la abreviatura, el nombre, el tipo de elemento y la definición de cada uno de los elementos empleados en el diagrama del flujo de nivel de los pedidos de acero de refuerzo.

Cuadro 29: Nomenclatura utilizada en el modelo de dinámica de sistemas para los elementos relacionados con los pedidos de acero.

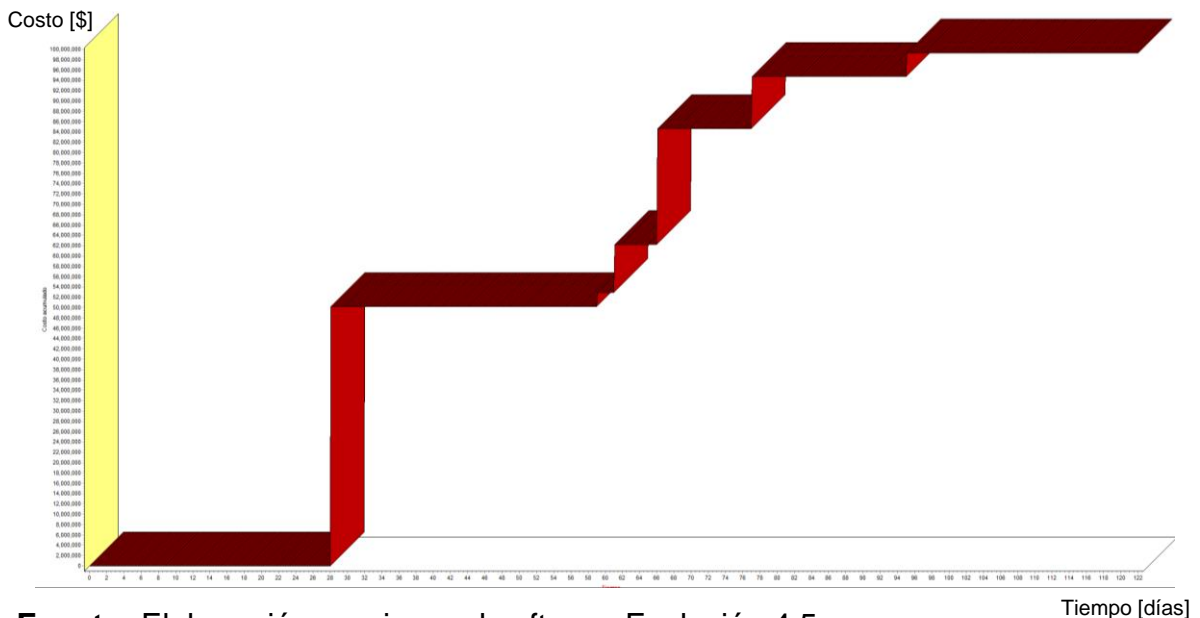
| Abreviatura | Nombre | Tipo de elemento | Definición |
|--|--|-------------------------|---|
| A_Pedido_1 A_Pedido_2 A_Pedido_3 A_Pedido_4 A_Pedido_5 A_Pedido_6 | Costo de los pedidos de acero de refuerzo | Variables Auxiliares | Representan el costo y la fecha de los pedidos de acero de refuerzo programados para el caso de estudio. La unidad de medida es en pesos colombianos (\$). |
| Pagos_Acero | Pagos de los pedidos de acero | Variable Auxiliar | Representa el flujo acumulado por concepto del pago de los pedidos 1, 2, 3, 4, 5 y 6. La unidad de medida es en pesos colombianos (\$). |
| T_Pedido_Acero | Tiempo para realizar el pedido del material al proveedor | Retardo | Representa el tiempo de anterioridad a la ejecución con el cual se debe formular el pedido de acero de refuerzo al proveedor. La unidad de medida se encuentra en días (día). |
| F_Pedido_Acero | Flujo del costo de los pedidos de acero de refuerzo | Flujo | Es el flujo correspondiente al pago de los pedidos de acero de refuerzo planificados para la ejecución del caso de estudio. La unidad de medida es en pesos colombianos por día (\$/día). |

| | | | |
|-----------|---|-------|---|
| Ped_Acero | Costo acumulado de los pedidos de acero de refuerzo | Nivel | Es el dinero que gasta el constructor por concepto del pago de los pedidos de acero de refuerzo, su principal característica es que acumula el valor en el transcurso del tiempo de simulación. La unidad de medida es en pesos colombianos (\$). |
|-----------|---|-------|---|

Fuente: Elaboración propia.

Al realizar la simulación del diagrama de flujo de nivel para el pago de pedidos de acero de refuerzo, en el software Evolución 4.5, es posible obtener la figura que se muestra a continuación, donde es posible observar el comportamiento de los flujos de efectivo por concepto del pago de pedidos de acero de refuerzo en el transcurso de la construcción del caso de estudio.

Figura 49: Costo acumulado en pesos versus tiempo en días para los pedidos de acero de refuerzo.



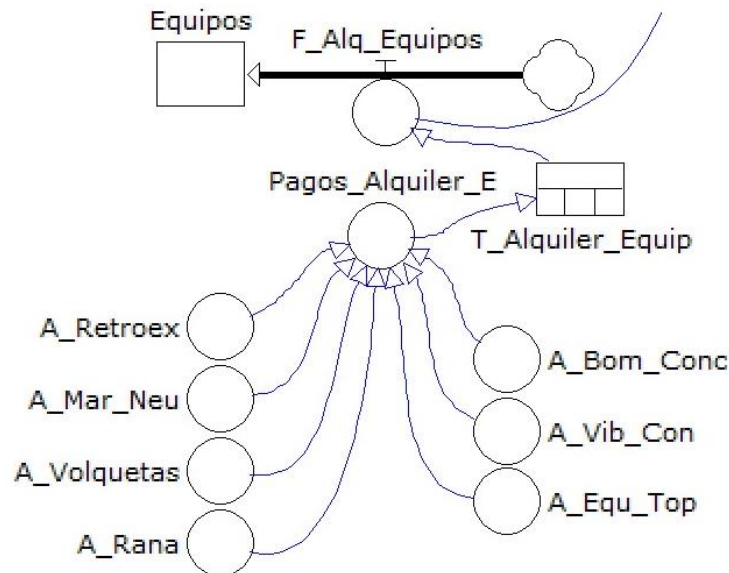
Fuente: Elaboración propia en el software Evolución 4.5.

3.7.7 Alquiler de maquinaria

Los pagos de alquiler de maquinaria ocasionan flujos de efectivo no periódicos durante la ejecución del proyecto; para el caso de estudio las fechas de alquiler de equipos fueron determinadas a partir de los resultados obtenidos en el modelo BIM 5D; la magnitud de los flujos fue calculada en el numeral 3.6.8, de acuerdo al precio unitario de los equipos utilizados en la elaboración de los análisis de precios unitarios APU.

En la siguiente figura es posible observar el diagrama de flujo de nivel obtenido en el software Evolución 4.5.

Figura 50: Diagrama de flujo de nivel para el alquiler de maquinaria.



Fuente: Elaboración propia en el software Evolución 4.5.

En el siguiente cuadro se observa la abreviatura, el nombre, el tipo de elemento y la definición de cada uno de los elementos empleados en el diagrama del flujo de nivel del alquiler de equipos.

Cuadro 30: Nomenclatura utilizada en el modelo de dinámica de sistemas para los elementos relacionados el alquiler de equipos.

| Abreviatura | Nombre | Tipo de elemento | Definición |
|--------------------|---------------------------------|-------------------------|--|
| A_Retroex | Alquiler de la retroexcavadora | Variable Auxiliar | Representa el costo y la fecha de alquiler de las retroexcavadoras requeridas. La unidad de medida es en pesos colombianos (\$). |
| A_Mar_Neu | Alquiler del martillo neumático | Variable Auxiliar | Representa el costo y la fecha de alquiler del martillo neumático requerido. La unidad de medida es en pesos colombianos (\$). |
| A_Volquetas | Alquiler de volquetas | Variable Auxiliar | Representa el costo y la fecha de alquiler de las volquetas requeridas. La unidad de medida es en pesos colombianos (\$). |
| A_Rana | Alquiler de rana | Variable Auxiliar | Representa el costo y la fecha de alquiler de la rana requerida. La unidad de medida es en pesos colombianos (\$). |
| A_Bom_Conc | Alquiler de bomba de concreto | Variable Auxiliar | Representa el costo y la fecha de alquiler de la bomba de concreto requerida. La unidad de medida es en pesos colombianos (\$). |
| A_Vib_Con | Alquiler vibrador de concreto | Variable Auxiliar | Representa el costo y la fecha de alquiler del vibrador de concreto requerido. La unidad de medida es en pesos colombianos (\$). |

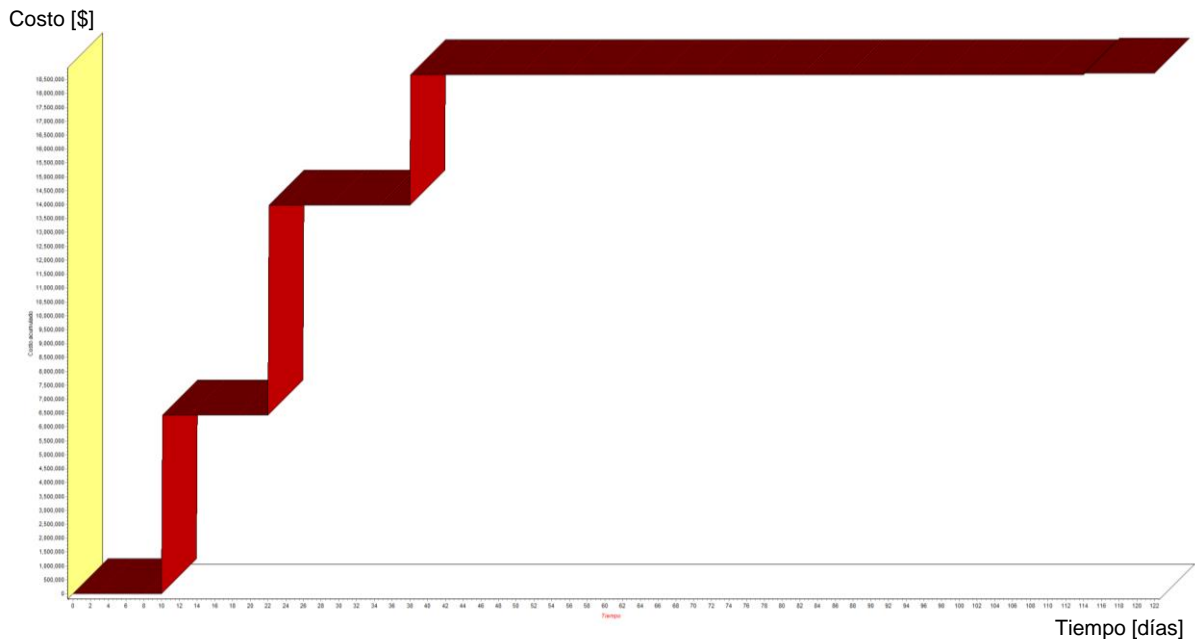
| | | | |
|------------------|---|-------------------|--|
| A_Equ_Top | Alquiler de equipo de topografía | Variable Auxiliar | Representa el costo y la fecha de alquiler del equipo de topografía requerido. La unidad de medida es en pesos colombianos (\$). |
| Pagos_Alquiler_E | Pagos de los alquileres de los equipos | Variable Auxiliar | Representa el flujo de efectivo acumulado del alquiler de los equipos: retroexcavadora, martillo neumático, volquetas, rana, bomba de concreto, vibrador de concreto y equipo de topografía. La unidad de medida es en pesos colombianos (\$). |
| T_Alquiler_Equip | Tiempo para realizar el alquiler de los equipos | Retardo | Representa el tiempo de anterioridad para formular el pedido de alquiler de los equipos requeridos. La unidad de medida se encuentra en días (día). |
| Pagos_Alquiler_E | Flujo del costo del alquiler de los equipos | Flujo | Es el flujo correspondiente al pago del alquiler de los equipos requeridos para la ejecución del proyecto. La unidad de medida es en pesos colombianos por día (\$/día). |
| Equipos | Costo acumulado del alquiler de los equipos | Nivel | Es el dinero que gasta el constructor por concepto del pago del alquiler de los equipos, su principal característica es que acumula el valor en el transcurso del tiempo de |

| | | | |
|--|--|--|---|
| | | | simulación. La unidad de medida es en pesos colombianos (\$). |
|--|--|--|---|

Fuente: Elaboración propia.

Al realizar la simulación del diagrama de flujo de nivel para el pago de alquiler de equipos, en el software Evolución 4.5, es posible obtener la figura que se muestra a continuación, donde se observa el comportamiento de los flujos de efectivo por concepto del pago alquiler de equipos en el transcurso de la construcción del caso de estudio.

Figura 51: Costo acumulado en pesos versus tiempo en días para el alquiler de maquinaria.



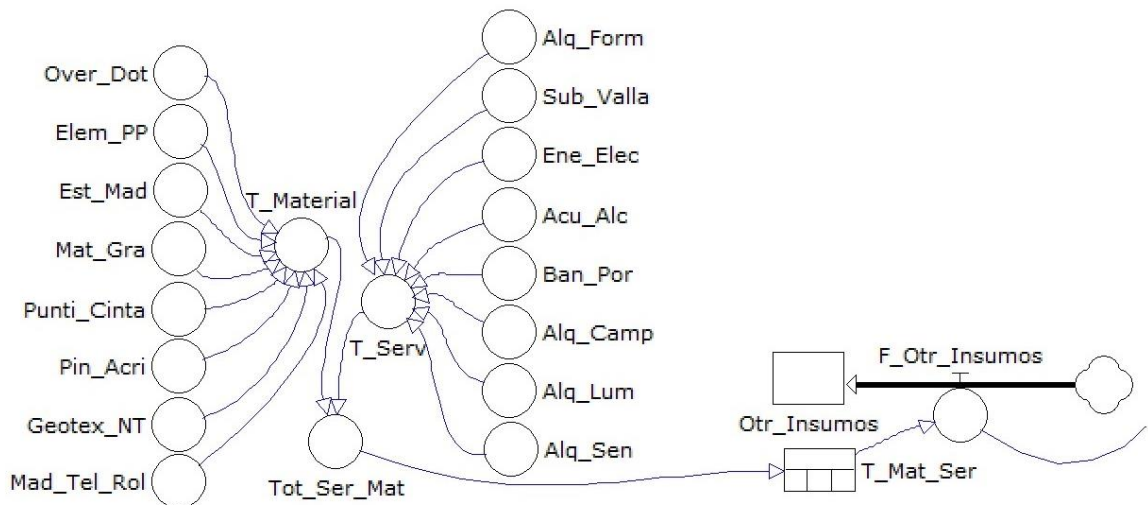
Fuente: Elaboración propia en el software Evolución 4.5.

3.7.8 Servicios y materiales

Los pagos de algunos servicios y materiales ocasionan flujos de efectivo periódicos y no periódicos durante la ejecución del proyecto; para el caso de estudio las fechas de pagos de materiales y de servicios fueron obtenidas a partir del programa de obra y de la simulación del proceso constructivo en el modelo BIM 5D; la magnitud de los flujos fue calculada en el numeral 3.6.8, de acuerdo al precio unitario utilizado en la elaboración de los análisis de precios unitarios APU.

En la siguiente figura es posible observar el diagrama de flujo de nivel obtenido en el software Evolución 4.5.

Figura 52: Diagrama de flujo de nivel para el pago de servicios y materiales.



Fuente: Elaboración propia en el software Evolución 4.5.

En el siguiente cuadro se observa la abreviatura, el nombre, el tipo de elemento y la definición de cada uno de los elementos empleados en el diagrama del flujo de nivel del pago de servicios y materiales.

Cuadro 31: Nomenclatura utilizada en el modelo de dinámica de sistemas para los elementos relacionados con el pago de servicios y materiales.

| Abreviatura | Nombre | Tipo de elemento | Definición |
|--------------------|----------------------------------|-------------------------|---|
| Over_Dot | Overoles de dotación | Variable Auxiliar | Representa el costo y la fecha de compra de los overoles de dotación para el personal en obra. La unidad de medida es en pesos colombianos (\$). |
| Elem_PP | Elementos de protección personal | Variable Auxiliar | Representa el costo y la fecha de compra de los elementos de protección personal para el personal empleado en obra. La unidad de medida es en pesos colombianos (\$). |
| Est_Mad | Compra de estacas de madera | Variable Auxiliar | Representa el costo y la fecha de compra de las estacas de madera necesarias para la relocalización y replanteo. La unidad de medida es en pesos colombianos (\$). |
| Mat_Gra | Compra de material granular | Variable Auxiliar | Representa el costo y la fecha de compra del material granular. La unidad de medida es en pesos colombianos (\$). |
| Punti_Cinta | Compra de puntillas y cinta | Variable Auxiliar | Representa el costo y la fecha de compra de puntillas y cinta de señalización necesarias para la relocalización y replanteo del |

| | | | |
|-------------|--|-------------------|--|
| | | | proyecto. La unidad de medida es en pesos colombianos (\$). |
| Pin_Acri | Compra de Pintura acrílica | Variable Auxiliar | Representa el costo y la fecha de compra de la pintura acrílica de señalización necesaria para la relocalización y replanteo del proyecto. La unidad de medida es en pesos colombianos (\$). |
| Geotex_NT | Compra de geotextil no tejido | Variable Auxiliar | Representa el costo y la fecha de compra del geotextil no tejido, necesario para los muros de contención del caso de estudio. La unidad de medida es en pesos colombianos (\$). |
| Mad_Tel_Rol | Compra de madera rolliza y tela verde para cerramiento | Variable Auxiliar | Representa el costo y la fecha de compra de la madera rolliza y la tela verde para la construcción del cerramiento de obra. La unidad de medida es en pesos colombianos (\$). |
| Alq_Form | Pago del alquiler de la formaleta | Variable Auxiliar | Representa el costo y la fecha de alquiler de la formaleta necesaria para la construcción de elementos en concreto reforzado. La unidad de medida es en pesos colombianos (\$). |
| Sub_Valla | Subcontrato para la fabricación de | Variable Auxiliar | Representa el costo y la fecha de pago del subcontrato para la elaboración de la valla de |

| | | | |
|----------|---|-------------------|--|
| | la valla de información | | información del proyecto. La unidad de medida es en pesos colombianos (\$). |
| Ene_Elec | Pago del servicio de energía eléctrica | Variable Auxiliar | Representa el costo y la fecha de los pagos por concepto del servicio de energía eléctrica. La unidad de medida es en pesos colombianos (\$). |
| Acu_Alc | Pago del servicio de acueducto y alcantarillado | Variable Auxiliar | Representa el costo y la fecha de los pagos por concepto del servicio de acueducto y alcantarillado. La unidad de medida es en pesos colombianos (\$). |
| Ban_Por | Pago del servicio de alquiler de baños portátiles | Variable Auxiliar | Representa el costo y la fecha de del pago de alquiler de los baños portátiles. La unidad de medida es en pesos colombianos (\$). |
| Alq_Camp | Pago del alquiler de campamento | Variable Auxiliar | Representa el costo y la fecha de pago del alquiler del campamento necesario para la ejecución del proyecto. La unidad de medida es en pesos colombianos (\$). |
| Alq_Lum | Pago del alquiler de elementos para el alumbrado | Variable Auxiliar | Representa el costo y la fecha de pago del alquiler de los elementos necesarios para la iluminación provisional en obra. La unidad de medida es en pesos colombianos (\$). |

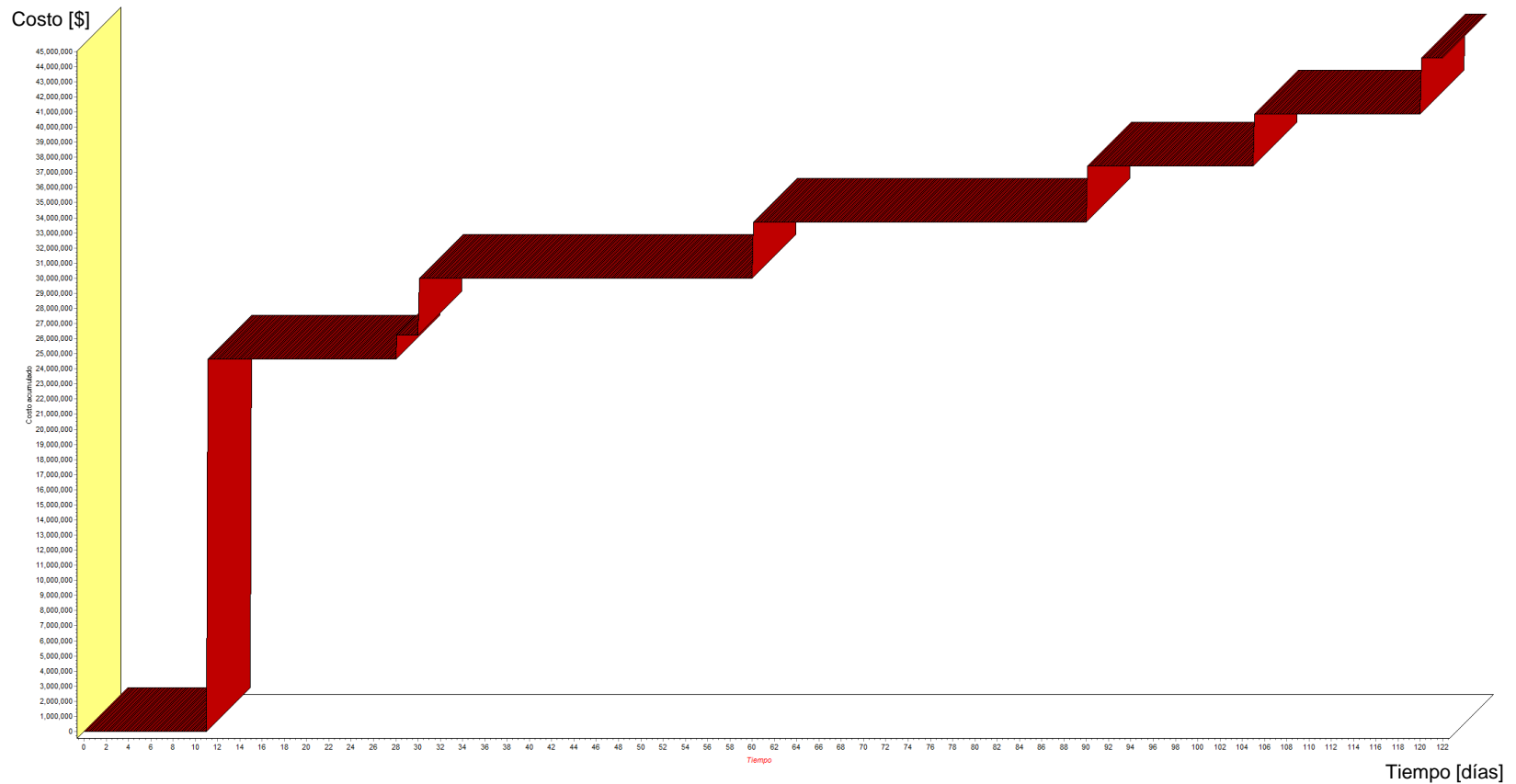
| | | | |
|-------------|---|-------------------|--|
| | provisional de obra | | |
| Alq_Sen | Pago del alquiler de los elementos de la señalización de obra | Variable Auxiliar | Representa el costo y la fecha de alquiler de los elementos necesarios para la señalización en obra. La unidad de medida es en pesos colombianos (\$). |
| T_Material | Pago total de materiales diferentes de concreto y acero | Variable Auxiliar | Representa el flujo de efectivo acumulado de materiales diferentes de concreto y acero. La unidad de medida es en pesos colombianos (\$). |
| T_Serv | Pago total de servicios | Variable Auxiliar | Representa el flujo de efectivo acumulado del pago de servicios necesarios para la ejecución del caso de estudio. La unidad de medida es en pesos colombianos (\$). |
| Tot_Ser_Mat | Pago total de servicios y materiales | Variable Auxiliar | Representa el flujo de efectivo acumulado del pago de materiales diferentes de concreto y acero y de los servicios necesarios para la ejecución del caso de estudio. La unidad de medida es en pesos colombianos (\$). |
| T_Mat_Ser | Tiempo para realizar el pedido de | Retardo | Representa el tiempo de anterioridad para formular el pedido de alquiler de los equipos y |

| | | | |
|-----------|---|-------|---|
| | materiales y servicios | | materiales requeridos. La unidad de medida se encuentra en días (día). |
| Otr_Insum | Flujo del costo de materiales y servicios | Flujo | Es el flujo correspondiente al pago de servicios y materiales diferentes de concreto y acero. La unidad de medida es en pesos colombianos por día (\$/día). |
| Equipos | Costo acumulado del alquiler de los equipos | Nivel | Es el dinero que gasta el constructor por concepto del pago de compra de materiales y servicios necesarios para la ejecución del proyecto del caso de estudio, su principal característica es que acumula el valor en el transcurso del tiempo de simulación. La unidad de medida es en pesos colombianos (\$). |

Fuente: Elaboración propia.

Al realizar la simulación del diagrama de flujo de nivel para el pago de servicios y materiales diferentes de concreto y acero, en el software Evolución 4.5, es posible obtener la figura que se muestra a continuación, donde se observa el comportamiento de los flujos de efectivo.

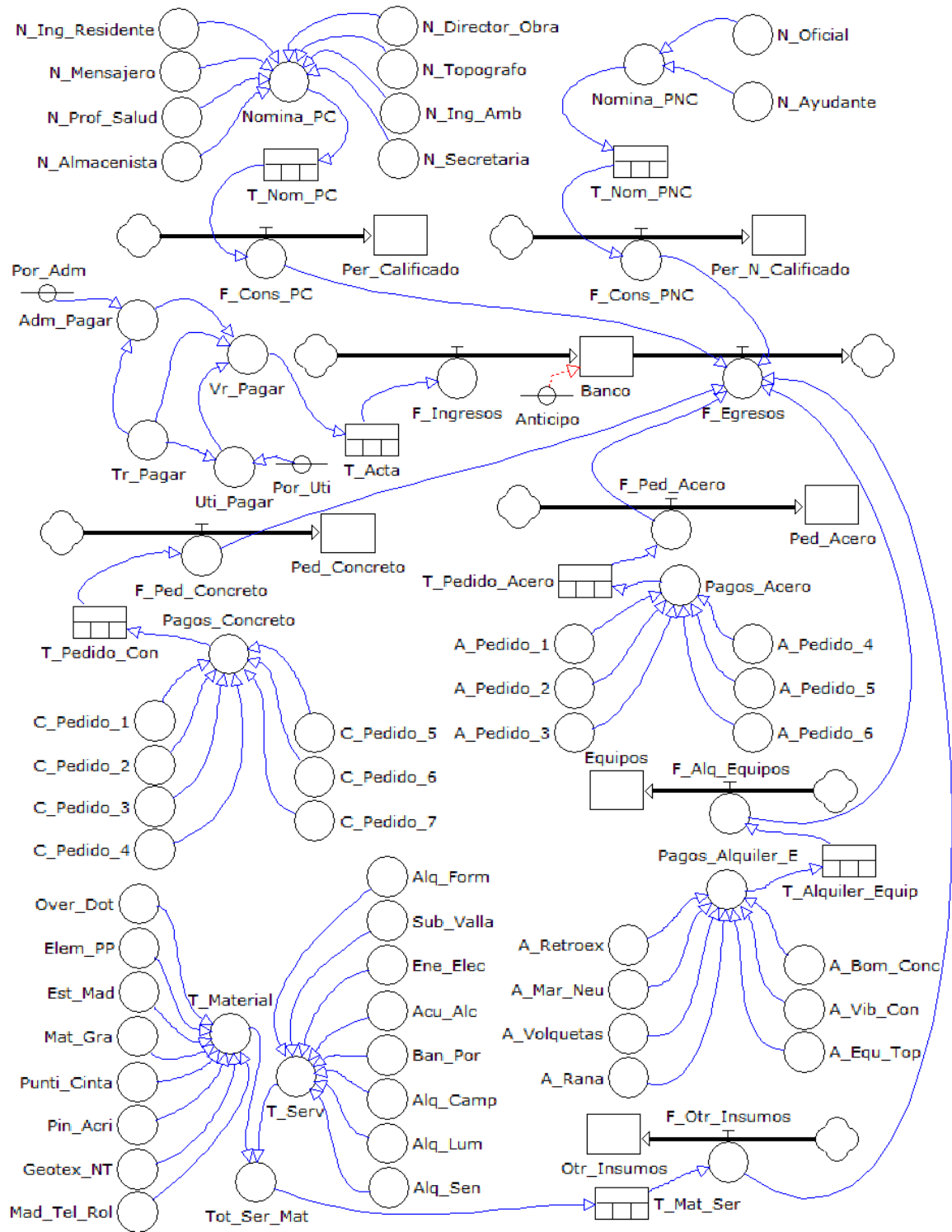
Figura 53: Costo acumulado en pesos versus tiempo en días para el pago de servicios y materiales.



Fuente: Elaboración propia en el software Evolución 4.5.

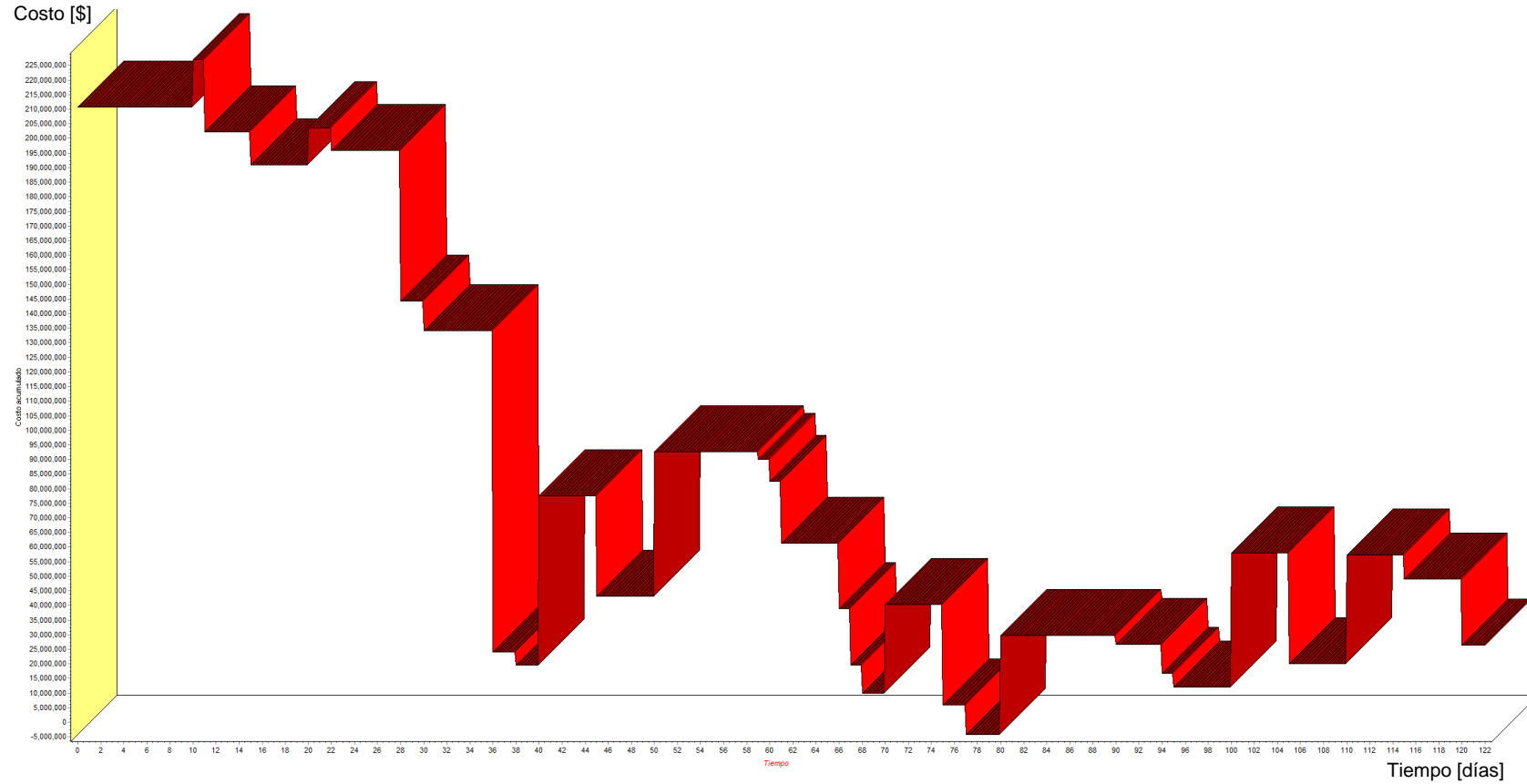
En la siguiente grafica se observa el diagrama del flujo nivel del modelo de dinámica de sistemas completo.

Figura 54: Diagrama de flujo nivel del modelo de dinámica de sistemas completo.



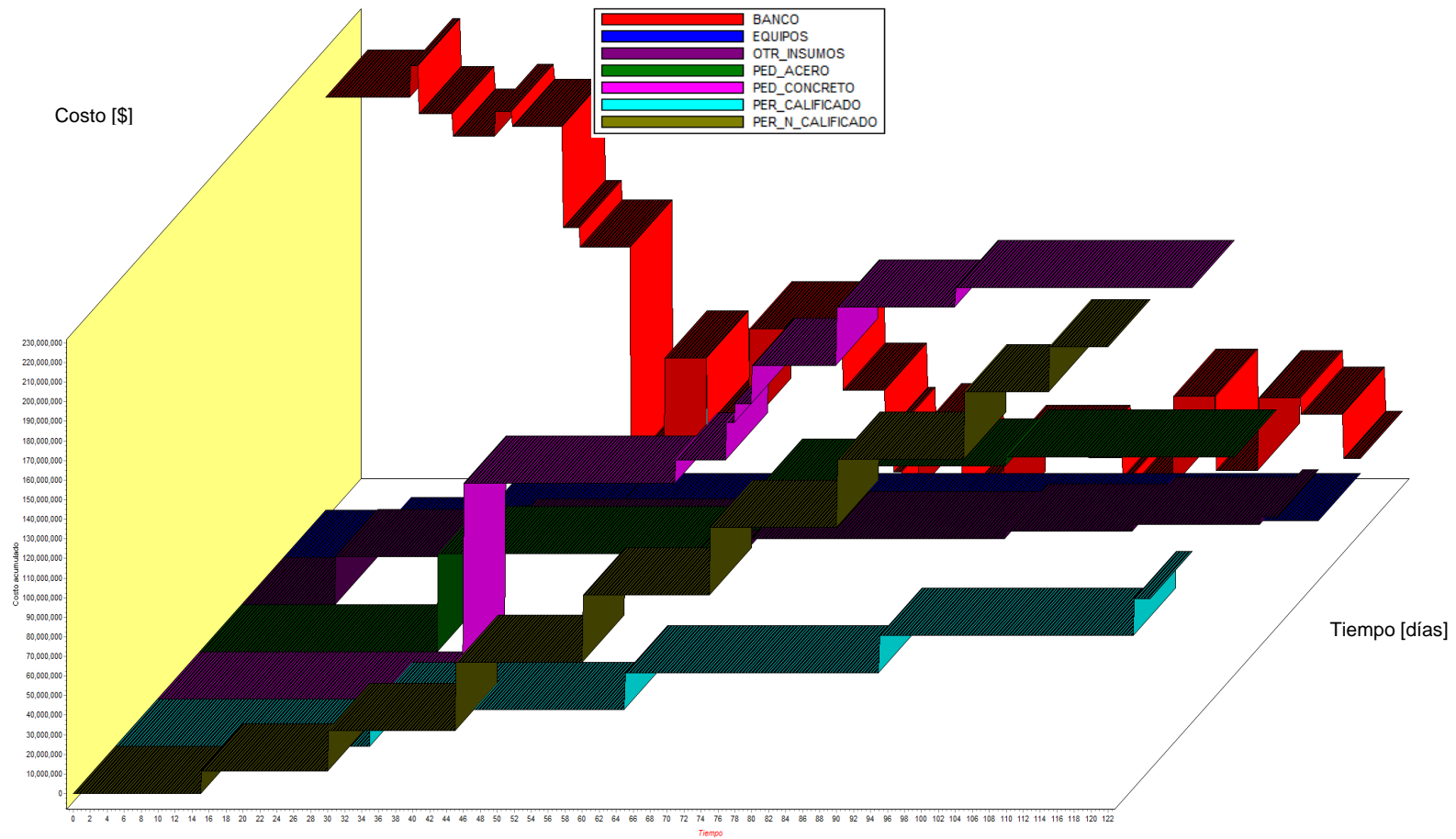
Fuente: Elaboración propia en el software Evolución 4.5.

Figura 55: Costo acumulado en pesos colombianos versus tiempo en días para el balance general del flujo de caja durante la ejecución del caso de estudio.



Fuente: Elaboración propia en el software Evolución 4.5.

Figura 56: Costo acumulado en pesos versus tiempo en días para las partes del sistema de flujo de caja modeladas en el software de dinámica de sistemas.



Fuente: Elaboración propia en el software Evolución 4.5.

4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

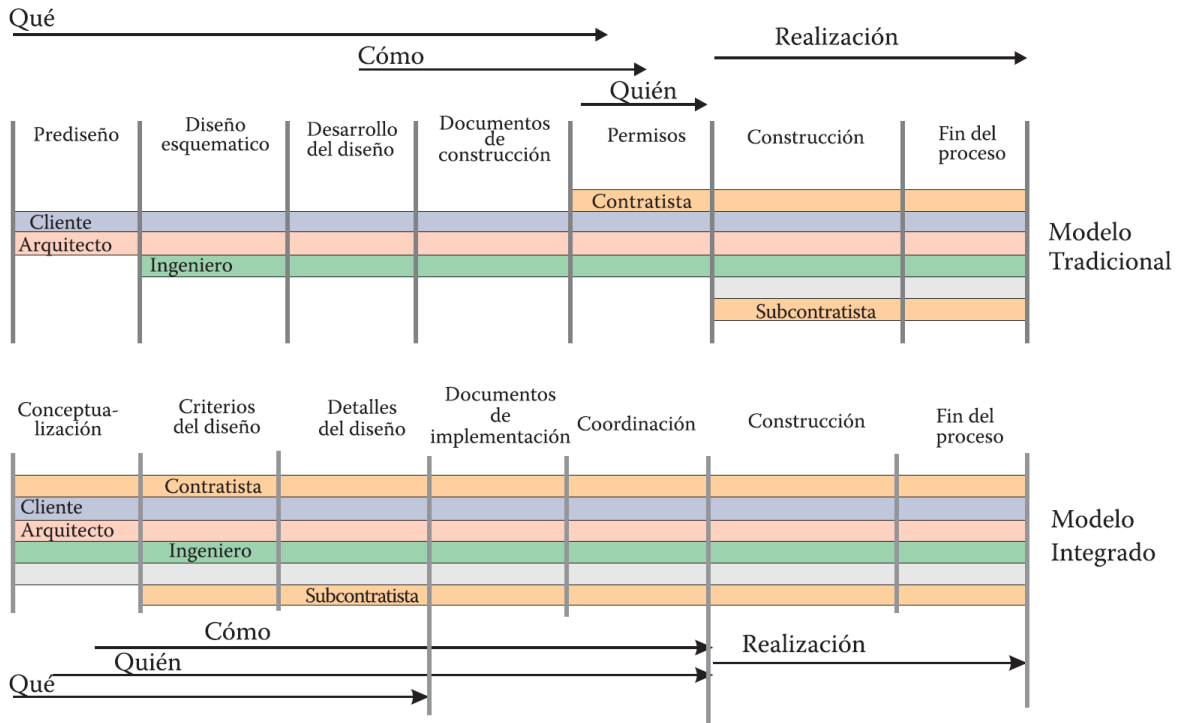
4.1 MODELO BIM

4.1.1 Trabajo colaborativo con BIM, para el mejoramiento de la toma de decisiones relacionadas con el flujo de caja

Como se evidencia en la investigación de Aibinu y Venkatesh [37], en la actualidad los proyectos de construcción son realizados en un ambiente de no colaboración, ambiente en el que interactúan un número significativo de individuos que provienen de diferentes disciplinas y poseen distintos conocimientos, situación que da origen a que la gestión, asignación y control de las actividades, necesarias para la ejecución de los proyectos en sus diferentes fases, resulte una labor con gran dificultad, aspecto que afecta la toma de decisiones relacionadas con el flujo de caja en etapas tempranas de los proyectos.

Se observó que la precisión, en el análisis y la planificación de los flujos de caja, depende de gran manera de la calidad de la información de entrada, lo que coincide con las observaciones de Chen et al. [7] y Melik [21]. En un ambiente de trabajo multidisciplinar, como el que se da en la fase de diseño de los proyectos, garantizar la calidad de la información requerida para la obtención de resultados precisos en la proyección de los flujos de caja, demanda de una eficiente gestión de la información producida por los distintos actores, actividad que requiere de una herramienta informática y la comunicación en tiempo real de los productores de información, teniendo en cuenta el gran volumen de la información de los proyectos y la dificultad existente para la comunicación entre los actores en tiempo real. Es por esto que se recomienda que la ejecución de la fase de diseño los proyectos sea realizada de forma integrada, como se observa en la siguiente gráfica, en donde se expone el modelo tradicional de ejecución de proyectos y se compara con el modelo integrado, el cual es descrito en la investigación de Porras et al. [128].

Figura 57: Modelo tradicional de ejecución de proyectos versus modelos integrado.

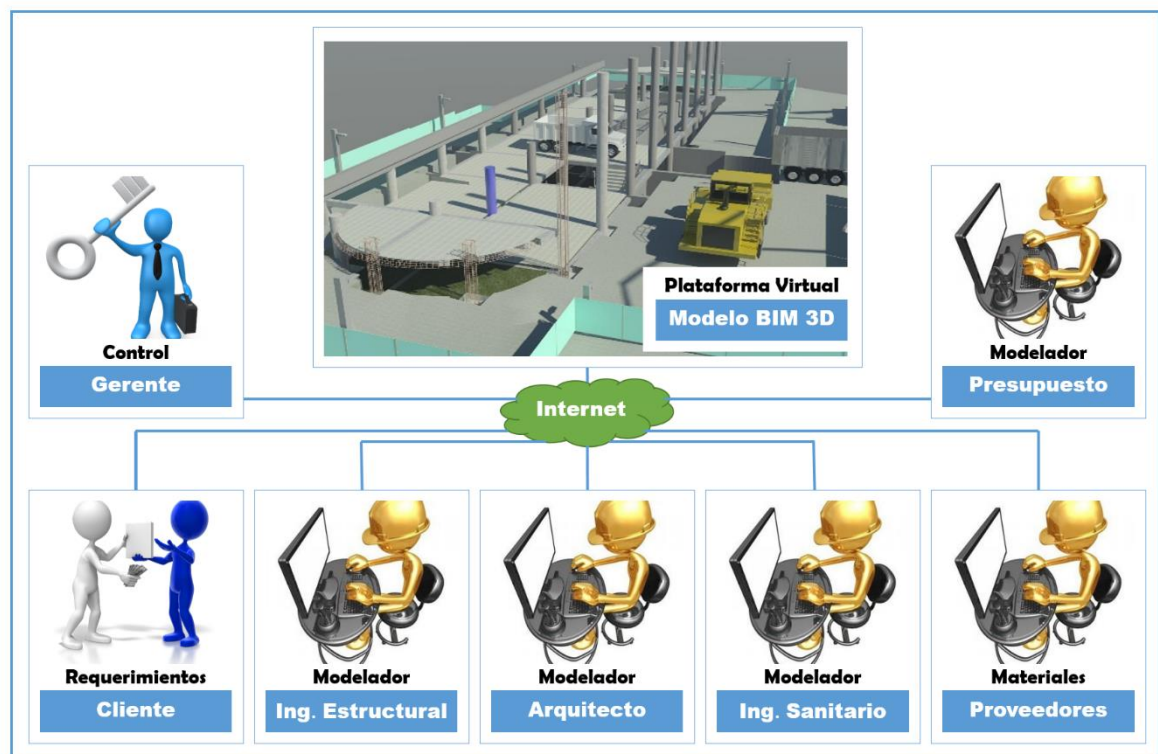


Fuente: Tomado de [128].

La implementación de BIM como herramienta de trabajo colaborativo resulta apropiada, teniendo en cuenta que es posible el fortalecimiento de aspectos como: la comunicación de la información, la detección de incoherencias, la compatibilidad de la información, entre otros; de esta forma desde el inicio de los proyectos se cuenta con la oportunidad de mejorar las decisiones de acabados, procesos constructivos, orden de ejecución de actividades y otros aspectos que permitan minimizar las dificultades en actividades como: análisis, planificación y ejecución del flujo de caja, esto beneficiado con la interacción de los diseñadores de los diferentes elementos de construcción, elementos que se encuentran interrelacionados unos con otros. De la misma forma resultaría adecuada la integración de actores como dueños, proveedores y constructores

En la investigación se observó que es posible utilizar el software Autodesk Revit 2014 para el trabajo colaborativo, en el diseño de los proyectos de construcción, en donde el modelo central es posible ubicarlo en la nube o en un servidor propio, modelo en el que los actores interactúan desde su propia estación de trabajo. En la siguiente figura se observa el bosquejo del trabajo colaborativo en la fase de diseño de un proyecto de construcción, esto con tecnologías BIM.

Figura 58: Bosquejo del trabajo colaborativo con BIM en la nube.



Fuente: Elaboración propia [77].

4.1.2 Beneficios de BIM en la estimación de los flujos de efectivo relacionados con la compra de acero de refuerzo

En algunos países es predominante la construcción de estructuras en concreto reforzado, situación que se presenta en Colombia en donde es frecuente observar

que la representación de los elementos de construcción se realiza en dibujos en dos dimensiones (2D), lo que conlleva a que el cálculo de las cantidades se vea influenciado por un ambiente propicio para los errores humanos fomentados por la dificultad de visualización y caracterización de los elementos de construcción, esto apoyado con el hecho de que algunos elementos son representados con textos y por tanto no dibujados, lo que afecta de forma significativa el cálculo de cantidades del acero de refuerzo que está compuesto por una gran número de elementos, de esta forma se reduce precisión en la planificación y proyección del flujo de caja, teniendo en cuenta el alto costo económico del acero y las altas cantidades requeridas en el reforzamiento estructural.

Un modelo BIM resulta una herramienta eficaz para el cálculo de cantidades de acero de refuerzo, teniendo en cuenta que permite obtener cantidades de obra en un tiempo reducido y con una alta precisión, a diferencia del cálculo de cantidades en dibujos en dos dimensiones que resulta un proceso inflexible a los cambios en diseño. Como se observó en la investigación las modificaciones en el modelo BIM conllevan a la actualización automática de las tablas de cantidades de obra, lo que permite reducir tiempo y de esta forma pérdidas económicas. En la figura 58 se observa el caso de estudio al momento del cálculo de las cantidades de acero de refuerzo en dónde se muestra la facilidad de visualización e interpretación de los documentos de diseño.

Los modelos BIM pueden apoyar las actividades de planificación de pedidos de acero de refuerzo, teniendo en cuenta que el proceso consiste en la elaboración de un listado de los elementos requeridos conforme se indique en los documentos de diseño, listado que generalmente es enviado a un taller externo a la obra que se encarga del corte y figurado de las barras que se convierten en estribos ganchos y barras de traslazo.

BIM contribuye en la generación rápida y precisa de los listados de elementos de construcción requeridos en los distintos momentos de la obra; esto beneficia las actividades de proyección y planificación del flujo de caja tomando en cuenta que los magnitud de los flujos de efectivo salientes por concepto de compra de acero de refuerzo generalmente son elevados.

4.1.3 Precisión en el cálculo de cantidades de obra con BIM, para el aumento de la precisión en la planificación de los flujos de efectivo

Como ya se ha enunciado en secciones anteriores, un modelo BIM proporciona grandes beneficios en el ámbito del cálculo de cantidades de obra, situación que coincide con las investigaciones consultadas [37-45-49-51-54-66-77-78], lo que brinda la posibilidad de obtener cantidades con mayor precisión en relación con el método tradicional; en el siguiente cuadro es posible observar la comparación entre el método de cálculo de cantidades con BIM y método de cálculo a partir de dibujos en dos dimensiones 2D, en donde los datos corresponden al caso de estudio de la presente investigación.

Cuadro 32: Cantidades de obra obtenidas con el método tradicional 2D versus cantidades obtenidas con el modelo BIM 3D.

| Cantidades de obra: elementos de concreto reforzado | | | | | | |
|--|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-----------------------|--------------------|
| Elemento | Método de calculo | | | | Δ concreto (%) | Δ Acero (%) |
| | Método tradicional 2D | | Método BIM 3D | | | |
| | M³ Concreto | Kg de acero de refuerzo | M³ Concreto | Kg de acero de refuerzo | | |
| Concreto pobre (2000 psi) | 40.5 | | 51.3 | | 26.7 | |
| Zapatas (3000 Psi) | 33.6 | 1205.6 | 33.4 | 1148.5 | -0.6 | -4.7 |
| Vigas de amarre (3000 Psi) | 56.4 | 3803.2 | 53.6 | 3783.3 | -5.0 | -0.5 |

| | | | | | | |
|---------------------------------|--------------|----------------|--------------|----------------|------|-----|
| Columnas (3000 Psi) | 55.2 | 9127.5 | 53.4 | 9250.6 | -3.3 | 1.3 |
| Vigas aéreas (3000 Psi) | 26.3 | 2415.2 | 26.0 | 2623.3 | -1.1 | 8.6 |
| Viguetas (3000 Psi) | 30.4 | 745.6 | 35.6 | 777.4 | 17.1 | 4.3 |
| Placa de contra-piso (3000 Psi) | 21.9 | 718.5 | 22.1 | 723.8 | 0.9 | 0.7 |
| Muros de contención (3000 Psi) | 300.5 | 20125.4 | 305.9 | 20635.8 | 1.8 | 2.5 |
| Viga canal (3000 Psi) | 27.6 | 1885.4 | 27.7 | 1887.7 | 0.4 | 0.1 |
| Sumatoria | 592.4 | 40026.4 | 609.0 | 40830.4 | | |
| Variación | | | 2.80% | 2.01% | | |

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en el cuadro anterior, existe una variación en las cantidades de obra obtenidas con los dos métodos; con esta variación se evidencian los errores humanos que se pueden cometer con el uso de dibujos en dos dimensiones 2D; teniendo en cuenta que en la experimentación se observó que la variación se produjo principalmente en el proceso de interpretación de los planos de diseño, al momento de la aplicación del método tradicional 2D, otra fuente de error detectada fueron las operaciones algebraicas necesarias para la obtención de cantidades de obra, en dónde errores de medición en conjunto con los errores de interpretación aumentaron la variación de forma significativa con respecto al método del modelo BIM en dónde las cantidades se obtuvieron de forma automatizada.

Errores en los procesos de cálculos de cantidades de obra ocasionan que exista una gran incertidumbre en la planificación del flujo de caja, teniendo en cuenta que si existe error en una cantidad de obra, esto ocasionara un error en la estimación de la magnitud del flujo de efectivo correspondiente a los materiales, transporte, equipos y mano de obra que se requieren para la ejecución de la actividad involucrada.

En algunas compañías constructoras es frecuente observar que el cálculo de las cantidades de obra se delegue a los individuos que se encuentran iniciando su vida profesional, los cuales por su poca experiencia tienden a pasar por alto elementos de construcción y actividades de obra necesarias para la ejecución de los proyectos; es por esta razón que para lograr gran precisión en las actividades de análisis y planificación del flujo de caja es recomendable que el profesional encargado del cálculo de cantidades de obra posea experiencia y conocimiento en procesos constructivos; en el caso de utilizar un modelo BIM el profesional deberá contar con experiencia suficiente para la generación de tablas de cantidades, esto con motivo a que el modelo BIM por sí solo no garantiza precisión, teniendo en cuenta que el individuo encargado de consultar y almacenar la información de construcción en el modelo debe poseer entrenamiento y/o experiencia previa.

En el ámbito de la toma de decisiones relacionadas con el flujo de caja, resulta indispensable que el cálculo de las cantidades de obra sea una actividad con resultados de gran precisión, teniendo presente que los egresos e ingresos del constructor dependen de forma directa de las cantidades de obra; en las consultas realizadas en la presente investigación, se observó que alrededor del mundo se han presentado varios casos en los que se comenten errores en la estimación del presupuesto de construcción lo que afecta el presupuesto y por consiguiente el flujo de caja, situación que ha dejado en la banca rota a algunas de las organizaciones constructoras.

En el cálculo del presupuesto de construcción fue posible observar que un modelo BIM resulta de gran impacto para la precisión del presupuesto, esto con motivo a que con el modelo BIM es posible obtener las cantidades con gran exactitud y determinar las actividades de obra con el apoyo de un modelo tridimensional, situaciones que disminuyen la posibilidad de cometer errores humanos en el cálculo de cantidades y de olvidar la inclusión de actividades de obra en el presupuesto.

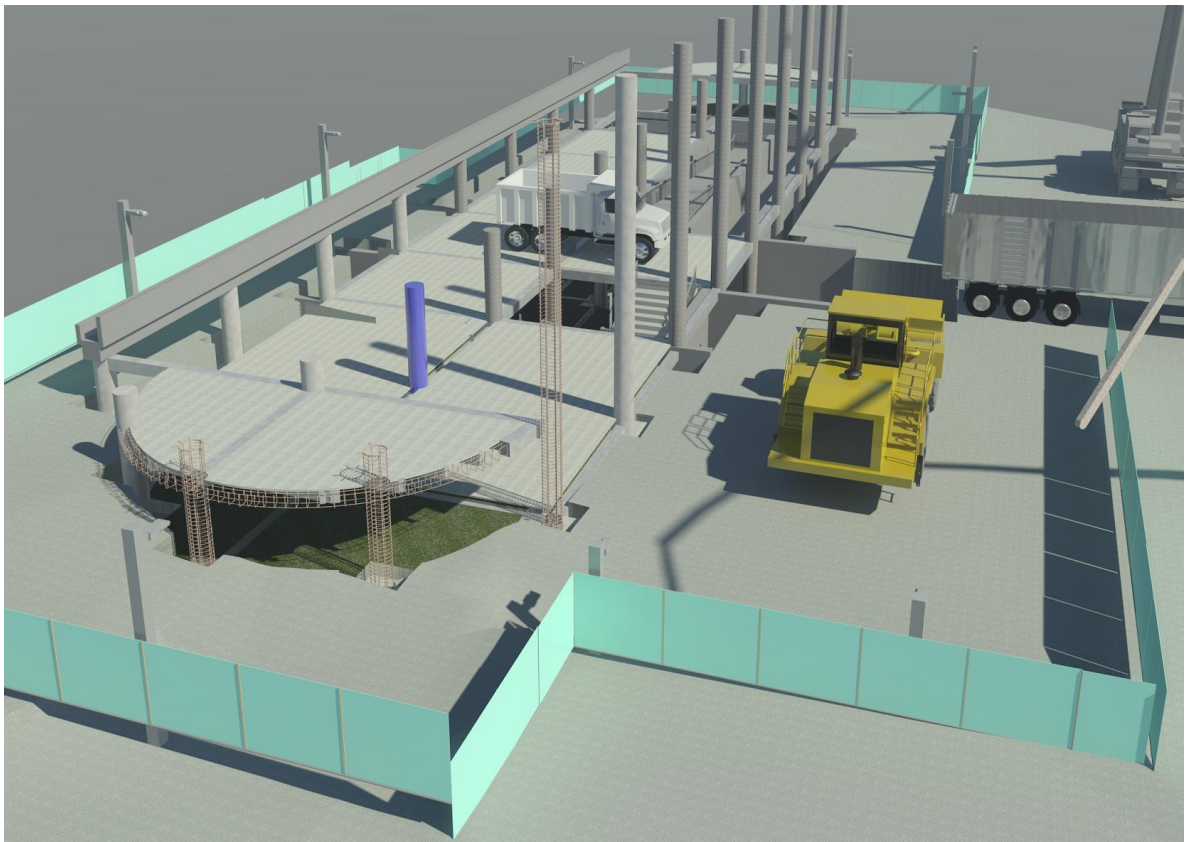
4.1.4 Localización de elementos de construcción con BIM, para la proyección de los flujos de efectivo

Como en la investigación realizada por Becerik-Gerber et al. [46], fue posible comprobar que la elaboración de un modelo BIM puede apoyar de gran manera la localización de elementos de construcción, ya que un proyecto de construcción como el del caso de estudio se encuentra compuesto por un número elevado de elementos, en donde localizar alguno puede resultar una tarea compleja, teniendo en cuenta que la cantidad ocasiona que algunos se encuentren ocultos por otros elementos, situación que se convierte en una fuente generadora de error en la elaboración del presupuesto de construcción y por tanto en el análisis y gestión del flujo de caja.

Localizar los elementos de construcción en un modelo digital, como el modelo BIM, resulta un gran beneficio para la fase construcción, teniendo en cuenta que en obra se requieren herramientas de visualización que permitan planificar de mejor forma el trabajo y las compras. En las obras colombianas es frecuente observar que para la ubicación y caracterización de elementos se utilicen un conjunto de dibujos impresos, lo que resulta en un método complejo, propenso a errores y demorado, situaciones que conllevan a las pérdidas en los procesos de construcción.

Para el proceso de toma de decisiones relacionadas con el flujo de caja de la ejecución de un proyecto resulta importante tener presente la localización de los elementos de construcción, esto con motivo a que si se facilita la detección de los elementos, los pedidos de materiales y equipos se podrán planificar con una mayor precisión, lo que influye en los flujos de efectivo correspondientes a los egresos que son generados por concepto de pago de materiales y alquiler de equipos.

Figura 60: Localización de elementos de construcción con un modelo BIM, caso de estudio.



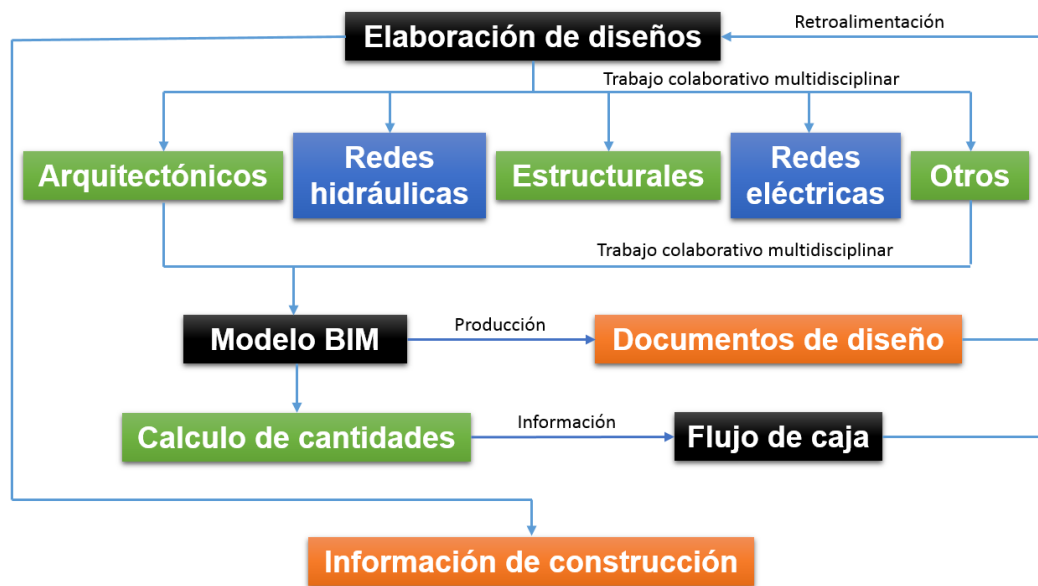
Fuente: Elaboración propia en el software Autodesk Revit 2014.

4.1.5 Implementación de BIM en la fase de diseño de los proyectos

En el desarrollo del modelo BIM del caso de estudio fue posible observar la eficiencia que se podría lograr con la implementación de BIM en la fase de diseño de un proyecto de construcción, ya que los elementos son modelados al mismo

tiempo que son dibujados; de esta forma, el proceso de diseño puede realizarse rápidamente con los paquetes BIM dedicados al diseño, resultando un sistema flexible a los cambios y eficiente en la generación de documentos de diseño, teniendo en cuenta que un cambio a un elemento se realiza de forma automática en todos las vistas y vínculos en donde el documento se encuentre comprometido, a diferencia del método tradicional en donde un cambio implica la modificación de un número significativo de documentos de diseño, lo que ocasiona: pérdidas de trabajo que se traducen en pérdidas económicas, y posibilidad de olvidar actualizar alguno de los documentos comprometidos en el cambio, aspecto que resulta generador de incompatibilidades e inconsistencias en los diseños finales de un proyectos, inconsistencias que generalmente son detectadas en la fase de ejecución de los proyectos, afectando así los programas de obra realizados en la fase de planificación. En la siguiente figura se resume el procedimiento recomendado para la elaboración del modelo BIM como producto de la fase de diseño.

Figura 61: Proceso de recomendado para la obtención del modelo BIM como producto de la fase de diseño.



Fuente: Elaboración propia.

En la bibliografía consultada se observa una gran tendencia mundial a vincular las tecnologías BIM a los procesos de diseño, esto se evidencia con un gran número de trabajos encontrados alrededor del mundo [45-47-46-48-49-51-56-57-58-59-60-61], en donde se exponen los aportes que puede lograr un modelo BIM a las actividades de diseño de un proyecto.

En los ámbitos de la planificación y análisis del flujo de caja, la implementación de BIM en la fase de diseño resulta ideal teniendo en cuenta que el modelo BIM es generado en las actividades de la fase diseño del proyecto, por tanto en la metodología propuesta la elaboración del modelo desaparecería como actividad independiente y se integraría como actividad paralela a la realización del diseño, de esta forma se aprovecharía todo del potencial de la tecnología BIM. En el caso de realizar el modelo BIM únicamente para las actividades relacionadas con el flujo de caja se desaprovecharía todo el potencial del BIM y se podría obtener un alto costo económico para el análisis del flujo de caja.

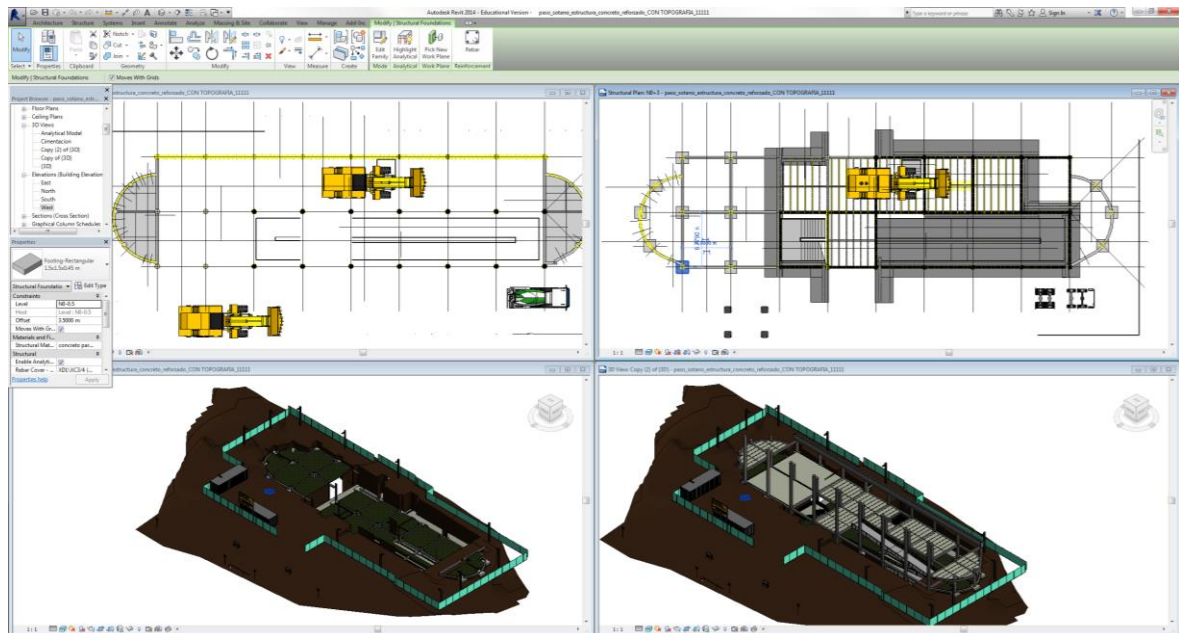
4.1.6 Eficiencia en la generación de informes a partir de un modelo BIM, para la evaluación de opciones en la toma de decisiones

Al igual que en la investigación de Manning y Messner [110], en el desarrollo de la experimentación fue posible observar los beneficios de BIM en cuanto a la facilidad de generación de plantas y cortes en un tiempo reducido, situación que beneficia la generación de documentos de diseño, ya que es posible reducir el tiempo requerido y automatizar el proceso frente a cualquier cambio que pueda presentarse.

En la elaboración del modelo BIM del caso de estudio se observó la facilidad para la generación de vistas correspondientes a documentos de diseño, con la característica de la creación de vínculos dinámicos en donde la modificación de un elemento se actualiza de forma automática en las vistas en la que se encuentre;

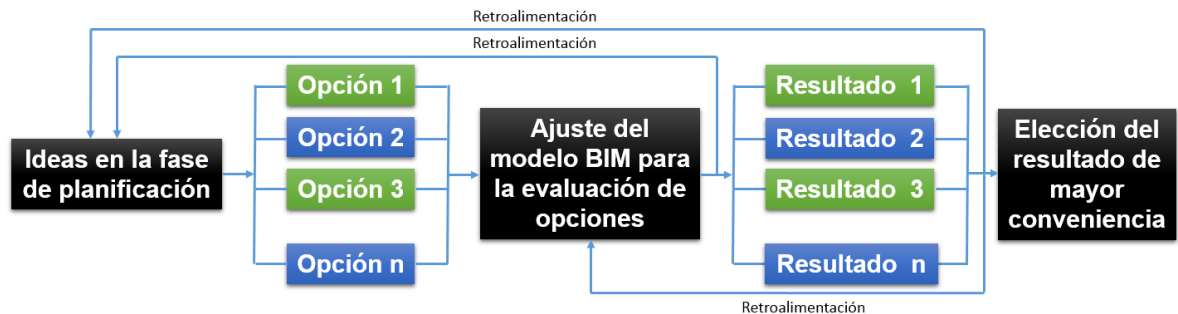
esto resulta adecuado en la toma de decisiones relacionadas con el flujo de caja ya que en el proceso de planificación puede surgir la necesidad de cambiar algún detalle de diseño tal como un acabado y por ende se requiere realizar una evaluación del comportamiento de los flujos de efectivo bajo las modificaciones propuestas de una forma rápida y automatizada, de tal manera que se puedan evaluar diferentes opciones en un tiempo reducido, situación que brinda la posibilidad de contar con un número significativo de alternativas en donde con un mayor número se podrá elegir la de mayor conveniencia mejorando de esta forma la calidad de las decisiones. En la siguiente figura se observa el proceso de evaluación de opciones en la fase de planificación a partir de un modelo BIM, esquema que se puede aplicar a las decisiones relacionadas con el flujo de caja.

Figura 62: Actualización automática de todas las vistas comprometidas con un elemento a partir de la generación de un cambio en los diseños de un proyecto de construcción, caso de estudio.



Fuente: Elaboración propia en el software Autodesk Revit 2014.

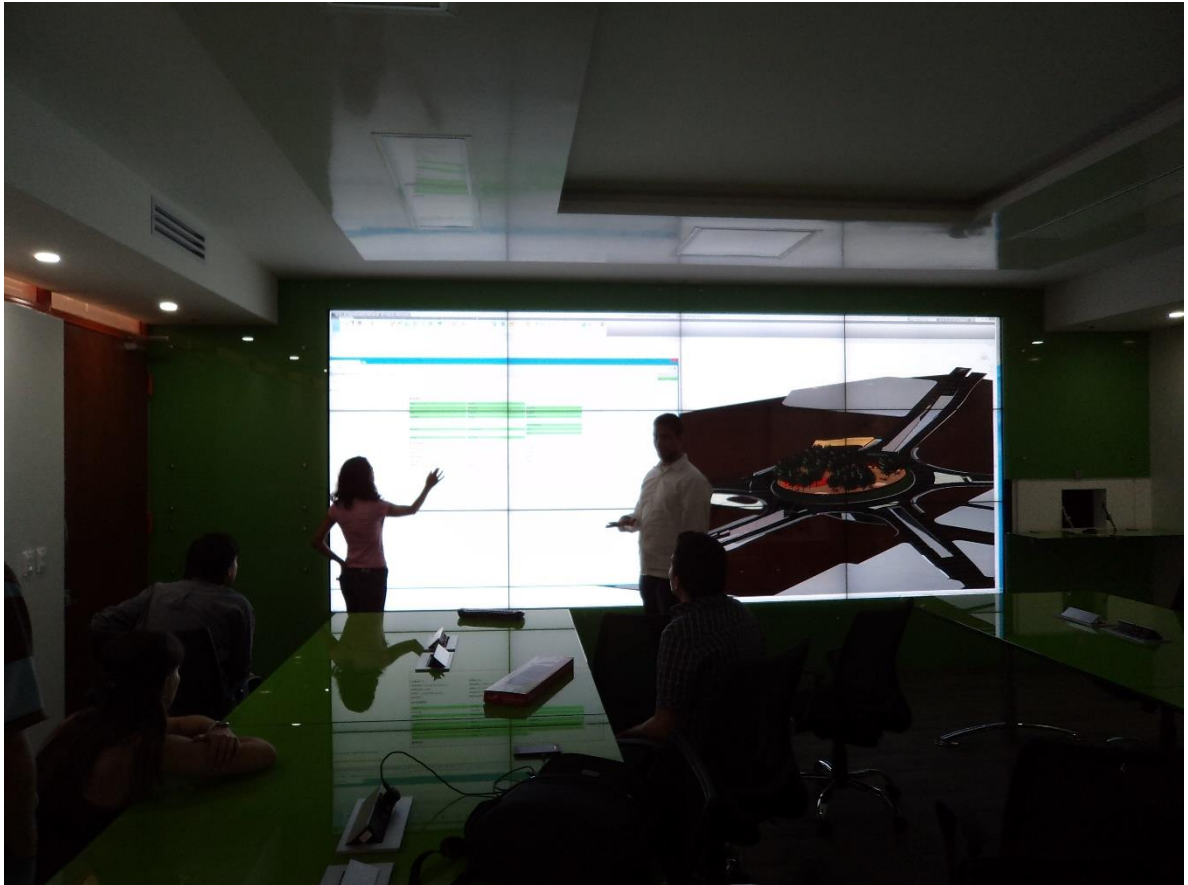
Figura 63: Evaluación de opciones en un modelo BIM, para la toma de decisiones en la fase de diseño.



Fuente: Elaboración propia.

Se recomienda que la evaluación de opciones sea realizada en colaboración con los diferentes actores involucrados en el proyecto, esto con la finalidad de aprovechar los beneficios de visualización de BIM e implementar un proceso colaborativo enriquecido por los aportes de los diferentes actores, aportes basados en su experiencia y formación profesional. Se recomienda que en el proceso de evaluación de opciones con los actores se cuente con una pantalla de gran tamaño que permita la visualización del modelo por parte de todos los participantes, lo cual no resulta de dificultad teniendo en cuenta los avances tecnológicos de los últimos tiempos. En la siguiente figura es posible observar el aporte a la toma de decisiones que podría lograrse con el uso de un medio de visualización que permita lograr un gran detalle; en la figura se observa la Sala de Visualización del Grupo de Investigación de Geomática, Gestión y Optimización de Sistemas de la Universidad Industrial de Santander.

Figura 64: Proceso de evaluación de opciones con en base en el modelo BIM, con el uso de una pantalla de alta resolución.



Fuente: Captura propia en la Sala de Visualización del Grupo de Investigación de Geomática, Gestión y Optimización de Sistemas de la Universidad Industrial de Santander.

4.1.7 Almacenamiento de la información de construcción en un modelo BIM

Al igual que se ha evidenciado en varias investigaciones alrededor del mundo [46-49-79-80-81-82], en el desarrollo de la metodología se identificaron los beneficios en almacenamiento, integración, gestión, comunicación y consulta de la información

de construcción, beneficios que se pueden lograr con la elaboración de un modelo BIM, el cual actúa como una base de datos en donde es posible almacenar el gran volumen de información de los proyectos en un modelo. En el caso de estudio, al iniciar la modelación BIM se clasificaron los archivos como se muestra en el siguiente cuadro:

Cuadro 33: Clasificación archivos producidos en la fase de diseño del caso de estudio según formato digital.

| Formato digital | Cantidad de archivos |
|--------------------------------|-----------------------------|
| Drawing (.dwg) | 23 |
| Drawing Exchange Format (.dxf) | 2 |
| Autocad color dependent (.ctb) | 2 |
| Imagen (.jpg) | 17 |
| Microsoft Word (.doc) | 4 |
| Microsoft Excel (.xlsx) | 12 |
| Microsoft Project (.mpp) | 1 |
| Documento de lectura (.pdf) | 8 |
| Archivo de texto (.txt) | 2 |
| Total | 71 |

Fuente: Elaboración propia.

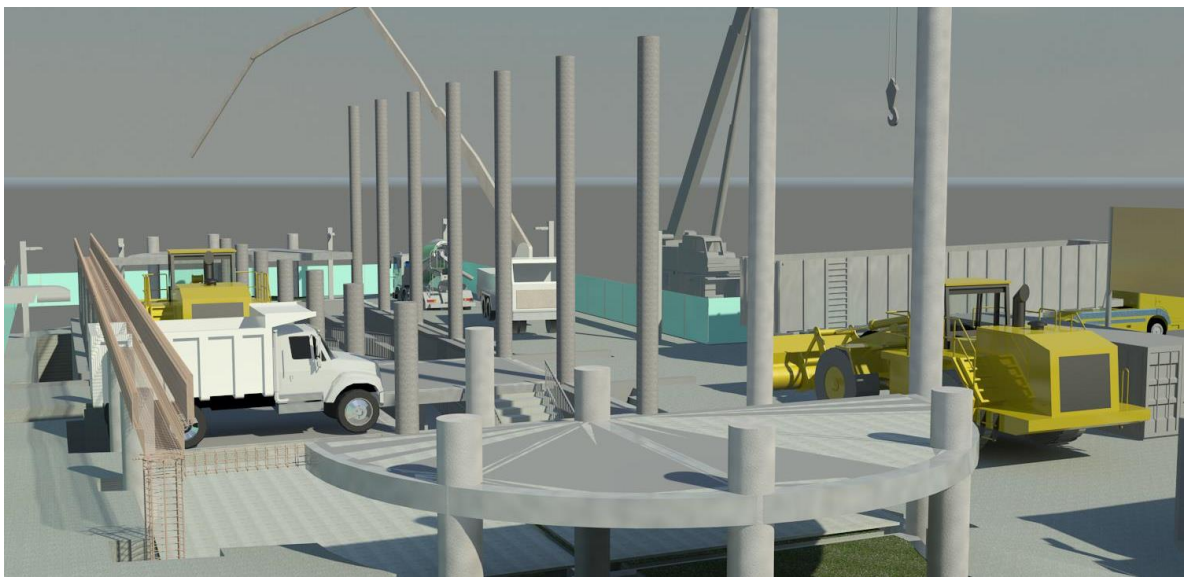
Teniendo en cuenta que los diseños del caso de estudio constan de 71 archivos diferentes listados en el cuadro 33, se observó que la incompatibilidad entre los archivos, por concepto del formato digital, resulta una desventaja para las fases de diseño, construcción y operación, ya que por concepto de la cantidad de archivos se pueden presentar casos de incoherencia de la información contenida, tomando en cuenta que en un archivo se presente una información sobre alguna característica y en otro archivo la información sobre la misma característica sea diferente.

Las situaciones de incoherencia en la información suelen presentarse con frecuencia en los proyectos de construcción, en donde los problemas son

detectados en la fase de construcción, situación, que en la mayoría de los casos, genera la detención de las actividades en obra hasta que se llegue a un acuerdo con el diseñador sobre la información en duda; esto ocasiona pérdidas cuantiosas en los procesos de construcción y atrasos en los cronogramas de obra. En el ámbito los flujos caja, tales situaciones son generadoras de incertidumbre en la estimación de la magnitud de los flujos de efectivo y el tiempo de ocurrencia de los flujos, afectando así los procesos de planificación y toma de decisiones relacionadas con el flujo de caja.

En algunos casos, la elevada cantidad de archivos de los proyectos genera dificultad para la detección de información faltante, teniendo en cuenta que el individuo encargado de la búsqueda de la información tendera a pensar que la información faltante en un archivo se encuentra contenida en otro archivo; esta situación, al igual que el caso de incoherencia de información, es detectada en la fase de construcción de los proyectos generando consecuencias similares a la expuestas para el caso de incoherencia en la información.

Figura 65: Modelo BIM del caso de estudio.



Fuente: Elaboración propia en el software Autodesk Revit 2014.

De acuerdo a los resultados de la modelación BIM, se observó que el modelo BIM actúa como una base de datos digital; al igual que se propone en la investigación de Qing et al. [23], en el modelo BIM fue posible almacenar, integrar, consultar, gestionar y comunicar la información contenida en los 71 archivos correspondientes a los diseños del caso de estudio. En la figura 65 se observa un render del modelo BIM con la información integrada de los archivos del caso de estudio.

4.1.8 Control de calidad de los diseños de un proyecto de construcción a partir de un modelo BIM

Se observó que con la integración de la información correspondiente a los diseños del caso de estudio, fue posible detectar incoherencias e inconsistencias en la información contenida en los diferentes archivos, con lo que se evidencio el potencial de los modelos BIM para el control de calidad de la información producida en la fase de diseño de un proyecto de construcción. En la siguiente tabla se muestran las situaciones encontradas en la elaboración del modelo BIM del caso de estudio.

Cuadro 34: Interferencias e incoherencias en los diseños de la estructura en concreto reforzado de la estación de buses estudiada.

| Caso | Cantidad |
|--|-----------------|
| Los taludes, resultantes de la excavación para la construcción de estructuras a desnivel, se presentaban peligrosos para el personal en la fase de construcción. | 1 |
| Casos de diferencia de cotas de diseño en diferentes planos del proyecto. | 2 |
| Incoherencias en algunos despieces de los elementos de concreto reforzado. | 7 |

| | |
|--|----|
| Falta del despiece del acero de refuerzo de elementos estructurales. | 2 |
| Interferencia entre elementos estructurales y elementos de redes sanitarias e hidráulicas. | 1 |
| Incoherencia entre planos de planta y perfil. | 2 |
| Diferencias significativas en las cantidades del presupuesto de construcción oficial. | 3 |
| Total | 17 |

Fuente: Elaboración propia.

A partir de las situaciones listadas es posible deducir que el flujo de caja resulta afectado.

4.2 PROGRAMA DE OBRA Y MODELO BIM 5D

4.2.1 Planificación del recurso humano en el programa de obra para mejorar la estimación de flujo de efectivo por concepto de pago de mano de obra

En el ejercicio de planificación de proyectos de construcción, resulta de gran beneficio la planificación de cuadrillas de mano de obra, de forma simultánea a la elaboración del programa de actividades, ya que se puede cometer el error de elaborar un programa de obra en donde se deban contratar y despedir miembros de las cuadrillas de trabajo en periodos de tiempo reducidos, lo cual resultaría de difícil aplicación en la ejecución de los proyectos teniendo en cuentas las características laborales de una obra. El software Microsoft Project resulta apropiado para la planificación de cuadrillas de trabajo, tal como fue posible evidenciarlo en la presente investigación.

La estimación de rendimientos de obra resulta una tarea complicada para las organizaciones de la industria de la construcción ya que cada proyecto es único y posee características propias, lo que ocasiona que los rendimientos de obra varíen de un proyecto a otro; además de esto los rendimientos guardan dependencia directa de un gran número de variables, algunas de las de mayor importancia son: temperatura ambiente, herramientas, equipos, horario laboral, remuneración, aspectos legales, gestión del espacio en obra, disponibilidad de materiales, entre otros. Errores en la estimación de rendimientos afectan los programas de obra y por consiguiente los flujos de caja de los proyectos, teniendo en cuenta que una variación en un rendimiento puede ocasionar variaciones en los flujos correspondientes a mano de obra, pagos de alquileres, costos de administración, entre otros.

Resulta de gran beneficio para las compañías constructoras contar con información sobre rendimientos de obra obtenidos en la ejecución de proyectos terminados, pues dicha información resulta de gran provecho para la planificación de actividades de obra de los nuevos proyectos y por ende la planificación y proyección del flujo de caja, reduciendo de esta forma la incertidumbre en el proceso de toma de decisiones, por consiguiente una mejora en la precisión de las estimaciones.

4.2.2 Comprobación de la coherencia del programa de obra con BIM 5D para la evaluación del flujo de caja

Se observa con gran frecuencia que en algunas organizaciones, el programa de obra se realiza con base en un Diagrama de Gantt, en donde el encargado de la planificación de obra debe realizar una abstracción mental e imaginarse el orden lógico de la ejecución de las actividades además de los procesos constructivos que se deben realizar en obra; la mayoría de proyectos de construcción exigen un número significativo de actividades, lo que aumenta la dificultad para la realización del programa de obra, tomando en cuenta que el individuo encargado debe

imaginarse la ejecución de un gran número de actividades, lo que conlleva a la posibilidad de pasar por alto aspectos importantes y/o cometer errores humanos, generando consecuencias como la no coherencia del cronograma de ejecución de actividades, situación que resulta difícil de detectar en la fase de planificación y en el peor de los casos es detectada en la ejecución del proyecto, lo cual genera la necesidad en obra de un replanteo del programa de trabajo.

En los casos en que se presenta incoherencia en el programa de obra, el flujo de caja se ve afacetado, ya que como se observó en el desarrollo de la metodología, el flujo de caja está directamente relacionado con el programa de obra que se realiza en la fase de diseño del proyecto, por tanto si el programa de obra debe ser ajustado en la ejecución del proyecto, puede que las decisiones adoptadas en el diseño generen problemas financieros en el momento en que se realice la adopción del programa de obra ajustado.

Resulta indispensable contar con una herramienta que permita validar las opciones contempladas de programa de obra en la fase de planificación, en donde los profesionales involucrados en la ejecución tengan la oportunidad de participar en el proceso de toma de decisiones. Los modelos BIM 5D resultan una herramienta de apoyo a las actividades de toma de decisiones, teniendo presente que es posible ejecutar los proyectos en un ambiente virtual en el que no se arriesgan vidas humanas ni recursos económicos.

Con base en la simulación del proceso constructivo de un proyecto, en un modelo BIM 5D, es posible detectar falencias en la planificación de obra ya que la simulación podría interpretarse como una construcción virtual donde es posible anticiparse a los posibles obstáculos que pueden presentarse en la obra, por tanto el modelo BIM 5D resulta una herramienta ideal para la planificación de obra teniendo en cuenta que es posible modificar parámetros de entrada, realizar múltiples simulaciones y obtener diferentes escenarios de futuro; de esta forma, es posible elegir el escenario

de mayor conveniencia, resultando así un proceso de optimización de la planificación de obra, lo cual se convierte en un insumo fundamental para el análisis del flujo de caja, esto con motivo a que la información de entrada contara con un alto grado de precisión, lo que permitirá que los resultados del análisis del flujo de caja posean un alto grado de certidumbre.

4.2.3 Gestión del espacio en obra con BIM 5D

En los proyectos de construcción, el espacio es un recurso de gran importancia [129], es por esto que resulta indispensable el ejercicio de la administración del espacio en las todas las fases del ciclo de vida del proyecto. En la fase de la planificación financiera, administrar el espacio contribuye de gran manera a las actividades propias del ejercicio de planificar, por ende es un factor que disminuye la incertidumbre y aumenta la precisión de las estimaciones.

En la fase de diseño, un modelo BIM resulta de gran beneficio para la administración de espacios, actividad previa a la ejecución de las fases de construcción y operación.

Becerik-Gerber et al. [46], proponen que el modelo BIM resulta una herramienta ideal para la gestión de los espacios en el proyecto de construcción, situación que fue posible corroborar en el desarrollo de la investigación, ya que en la elaboración del modelo del proceso constructivo BIM 5D se observó que es posible lograr una mejor planificación y gestión del espacio en obra, de esta forma antes de iniciar la ejecución del proyecto es posible definir espacios para el almacenamiento de materiales, disposición de equipos, instalaciones de estructuras temporales, lugares de cargue y descargue de materiales, entre otros. Esto resulta de gran beneficio para la disminución de la incertidumbre en la planificación del flujo de caja, ya que es posible planificar de mejor forma los flujos de efectivo que se dan por concepto de compra de materiales y alquiler de equipos, en donde las decisiones se toman

teniendo en cuenta el espacio disponible en la obra para almacenamiento y construcción, por lo tanto se mejora la toma de decisiones en la fase de planificación y se reduce la posibilidad de que se presenten pérdidas por concepto de la inadecuada ubicación de materiales de construcción o equipos en los sitios de trabajo.

Figura 66: Construcción de una estación de buses en el municipio de Floridablanca Santander, donde se observa la importancia de una adecuada gestión del espacio.



Fuente: Captura propia en la Estación de Buses de Floridablanca perteneciente al sistema de transporte masivo Metrolinea.

4.2.4 Cálculo de los ingresos del constructor a partir de BIM 5D

Varios investigadores y profesionales alrededor del mundo se encuentran utilizando los modelos BIM 5D para el estudio de los procesos constructivos, es por esto que en el desarrollo de la metodología fue posible encontrar varios documentos relacionados con el tema [66-37-45-46-49-51-67-68-69-70]. Los modelos BIM 5D aportan beneficios que se convierten en ventajas en la fase de planificación de los proyectos. En el ámbito del estudio del flujo de caja, uno de los beneficios de mayor impacto de los modelos BIM 5D es la posibilidad de realizar estimaciones de los ingresos del constructor a partir de la construcción virtual que se obtiene en BIM 5D, en donde es posible conocer el valor económico ejecutado en los distintos momentos de la ejecución del proyecto además de las cantidades de obra, información que resulta fundamental para la estimación de los flujos de efectivo que tienen origen en el dueño del proyecto y destino en el constructor.

Se observó que en el estudio de los flujos de caja, resulta indispensable cuantificar los ingresos del constructor con precisión, ya que de estos pueden depender situaciones no deseadas como los flujos de caja negativos o en casos más graves el detenimiento de la ejecución del proyecto por falta de efectivo para la compra de materiales, pagos de nómina, alquiler de equipos, entre otros. En gran parte de la información consultada los ingresos del constructor son determinados a partir de diagramas de Gantt y hojas de cálculo, en donde se puede llegar a cometer errores ya que no es posible visualizar los procesos constructivos y el orden de las actividades planificadas por lo que pueden presentarse incoherencias que serán visualizadas hasta el momento de la ejecución, situación que ocasiona que los flujos de efectivo correspondientes a los ingresos varíen con respecto a los planificados y por consiguiente la aparición de riesgos financieros para el constructor en la fase de ejecución.

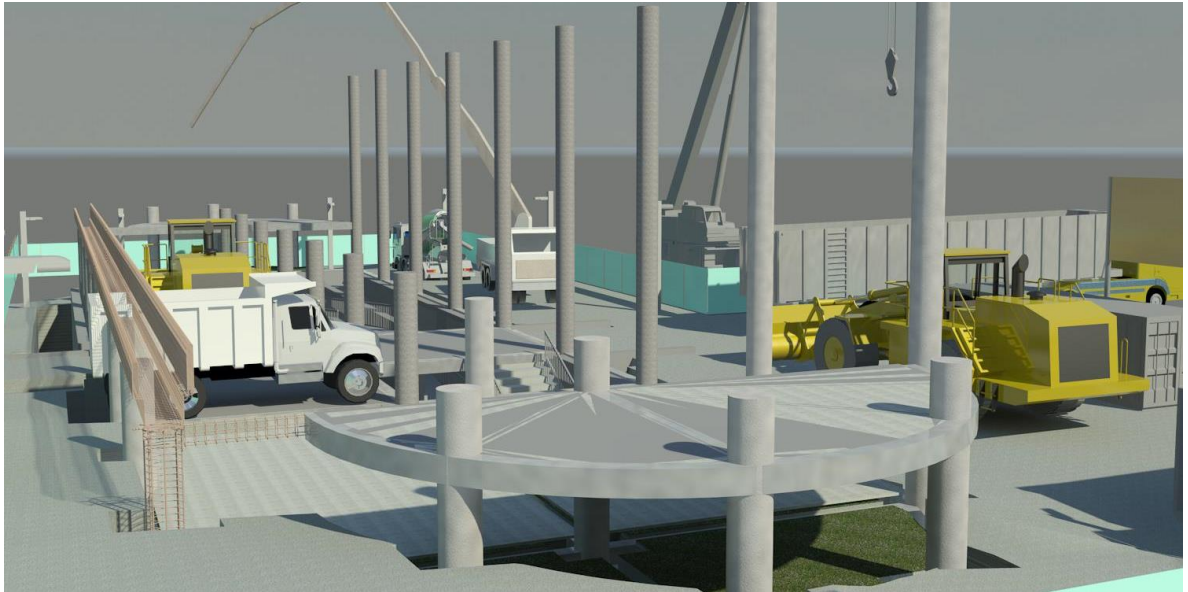
En la fase de planificación de los ingresos, se recomienda que las decisiones sean tomadas con el concepto de los actores del proyecto a partir de una simulación virtual en un modelo BIM 5D donde sea posible verificar aspectos como la disponibilidad de efectivo por parte del dueño y la coherencia de ejecución de las actividades de obra, se debe procurar en la etapa de planificación que los involucrados en los flujos de efectivo se comprometan con lo pactado en los productos resultantes de la fase de planificación del flujo de caja.

4.2.5 Cuantificación de materiales y momentos de compra con BIM 5D

Algunos investigadores coinciden en que la precisión del flujo de caja se encuentra ligada al nivel de detalle de la información de entrada [7-10-11-21], lo que fue posible comprobar en el desarrollo de la investigación, ya que la construcción del proyecto del caso de estudio requiere de la compra de varios tipos de materiales con significativas cantidades lo que aumenta la complejidad y dificultad en la planificación del flujo de caja, teniendo presente que la situación descrita ocasiona que se presenten una cantidad considerable de flujo de efectivo, en donde para lograr precisión en el flujo de caja general se debe tener presente la precisión en la estimación de la magnitud de los flujos y el momento en el que suceden.

La simulación del proceso constructivo en un modelo BIM 5D permite obtener las cantidades de materiales requeridas para la ejecución del proyecto en los diferentes momentos de la obra, según el programa de obra realizado en la planificación del proyecto; además de las cantidades el modelo BIM 5D resulta una herramienta tecnológica de gran provecho para la estimación y planificación de los momentos en los que se deben formular los pedidos de materiales en donde se debe tener presente el espacio en obra disponible para el almacenamiento de materiales y equipos aspecto que es posible controlarlo con un modelo BIM o BIM 5D.

Figura 67: Gestión y planificación del espacio de obra y de las cantidades de ejecución del caso de estudio.



Fuente: Elaboración propia en el software Autodesk Revit 2014.

En el modelo BIM 5D elaborado en la presente investigación fue posible determinar los pedidos de materiales y los momentos adecuados en que se deben realizar además de las cantidades necesarias, lo que resulto en una fuente de información de gran detalle para el análisis del flujo de caja, teniendo en cuenta que se definió la cantidad de los pedidos teniendo presente los requerimientos en obra y el espacio de almacenamiento en obra.

En el caso del material relacionado con el acero de refuerzo de la estructura en concreto, se observó que BIM 5D permite determinar cantidades y los momentos de realización de los pedidos con grandes ventajas respecto al método tradicional, ya que el acero de refuerzo está compuesto por un gran número de elementos de diferentes formas y tamaños situación que conlleva a la necesidad de una cantidad considerable de trabajo para la definición de los pedidos, aspecto que resulta de

gran importancia en el estudio del flujo de caja teniendo en cuenta el alto costo económico que generalmente se da para el acero de refuerzo

4.2.6 Procesos de enseñanza y aprendizaje con BIM 5D

Como se ha evidenciado en algunas investigaciones [44-45], los modelos BIM pueden apoyar los procesos de enseñanza y aprendizaje en diferentes ámbitos. En el desarrollo de la investigación se observó que un modelo del proceso constructivo BIM 5D puede contribuir a los procesos de inducción del personal en obra, lo que resulta de gran beneficio teniendo en cuenta las cualidades de visualización propias con las que cuenta BIM.

En la fase de construcción, un modelo BIM 5D puede aportar a la determinación de los equipos y herramientas adecuados para la ejecución, teniendo presente que es posible consultar con un experto el cual tendría la posibilidad de visualizar la construcción virtual del proyecto y de esta forma determinar las situaciones de mayor solicitud para los equipos y herramientas.

En el ámbito de seguridad en obra fue posible observar que la simulación del proceso constructivo permite identificar situaciones de peligro para los trabajadores, ya que por medio de la construcción virtual es posible detectar procesos constructivos o elementos que ponen en riesgo la vida del personal o la estabilidad del proyecto en la fase de construcción; de esta forma es posible anticiparse y corregir tales situaciones en el fase de planificación del proyecto con el objetivo de lograr evitarlas al momento de la ejecución.

4.3 MODELO DE DINÁMICA DE SISTEMAS

4.3.1 Nivel de detalle del modelo de dinámica de sistemas

Como se pudo evidenciar en el proceso de investigación, un modelo de dinámica de sistemas puede ser tan detallado como se quiera; sin embargo se debe pensar el uso potencial del modelo, al momento de iniciar la etapa de elaboración, ya que según su uso es posible realizar algunas simplificaciones que permiten una mejor representación del sistema estudiado. En el caso de elaborar un modelo con un alto grado de detalle es posible llegar a un alto nivel de complejidad que no represente una réplica del comportamiento del sistema en el proceso de simulación.

El nivel detalle de un modelo de dinámica de sistemas se encuentra estrechamente relacionado con el nivel de detalle de la información de entrada con la que se cuente; como se observó, la elaboración de un modelo BIM 5D proporciona la posibilidad de contar con una fuente de información de entrada con un alto grado de detalle lo que conlleva a la necesidad de generar un modelo de dinámica de sistemas compuesto por un gran número de elementos y relaciones, por lo que se debe ser cuidadoso al momento de la modelación.

4.3.2 Interpretación de las relaciones del flujo de caja en el modelo de dinámica de sistemas

En el modelo del flujo de caja de dinámica de sistemas para caso de estudio, se observó que en la representación obtenida en el Diagrama de Forrester es posible obtener una visión del funcionamiento del sistema, lo cual resulta de gran ayuda en el proceso de toma de dediciones relacionadas con el flujo de caja, ya que permite visualizar la interrelación de las variables, lo que facilita el entendimiento del impacto o afectación de la variación de uno de los parámetros. Esta situación puede ser aprovechada en los momentos en que se requiere variar alguno de los parámetros

con el objetivo de obtener algún resultado deseado, tal como sucede en las actividades de la planificación en donde se procura probar distintos valores en los parámetros que componen el sistemas con el objetivo de determinar el valor de mayor conveniencia.

La interpretación de las relaciones del flujo de caja con el modelo de dinámica de sistemas también puede ser utilizada en la etapa de construcción del proyecto, ya que en dicha etapa pueden presentarse situaciones en donde se requiera la mitigación, atraso o adelanto de algún flujo de efectivo con el objetivo de hacer frente a alguna situación en específico; de la misma forma el modelo de dinámica de sistemas permite la comprobación de la viabilidad de la variación de los flujos de afectivo, teniendo presente que una variación de algún flujo o característica puede ocasionar los eventos que se trataron de evitar en la fase de planificación.

El modelo de dinámica de sistemas es una herramienta que facilita el estudio del comportamiento del sistema con base en la variación o modificación de alguna de las variables, por lo tanto puede ser utilizado en la fase de planificación y en la fase de construcción como soporte de las actividades en donde se requiere explorar posibilidades con el objetivo de tomar las decisiones de mayor conveniencia para las compañías.

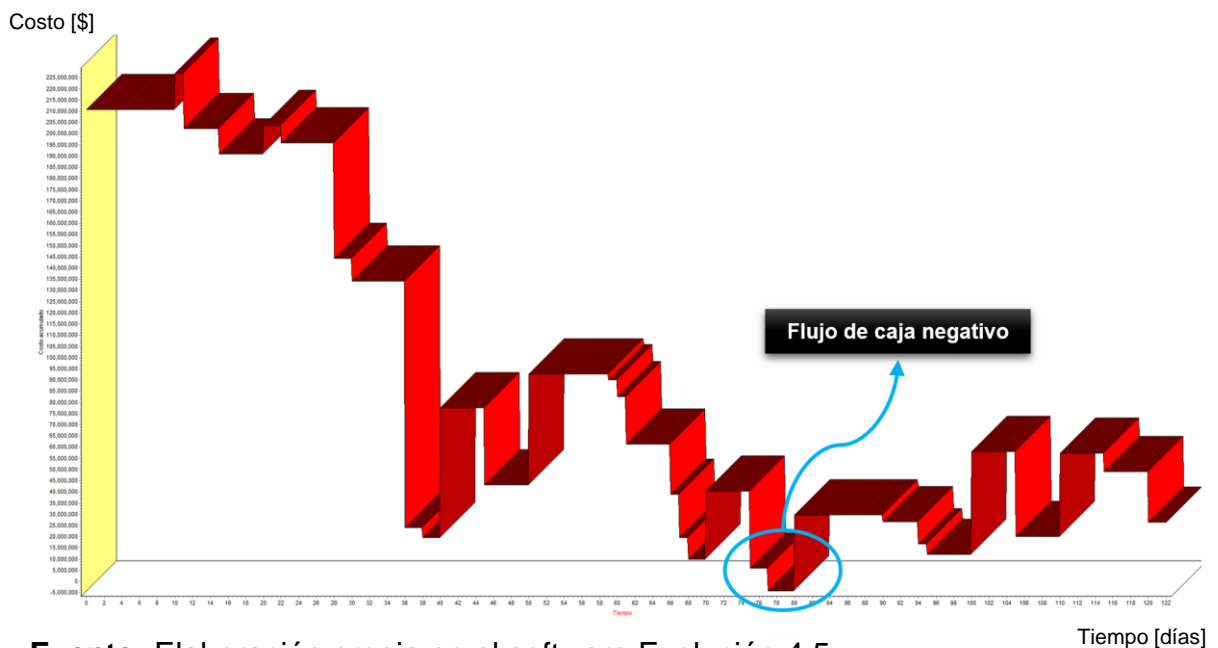
4.3.3 Identificación de eventos no deseados relacionados con el flujo de caja, a partir del modelo de dinámica de sistemas

La simulación del comportamiento del flujo de caja, en un modelo de dinámica de sistemas, posibilita la identificación de las situaciones que ponen en riesgo la continuidad de la ejecución del proyecto de construcción, aspecto que resulta de gran relevancia en la fase de planificación del proyecto teniendo presente que es posible anticiparse a las situaciones indeseadas, lo que brinda la posibilidad de

modificar los parámetros que conducen a tales situaciones resultando una herramienta para la predicción y evitación de eventos indeseados.

Uno de los eventos indeseados que fue posible identificar y mitigar en el caso de estudio fue el evento de flujo de caja negativo del constructor, el cual fue posible identificarlo a partir de la simulación del flujo de caja; en la siguiente figura se muestra la situación descrita.

Figura 68: Identificación de eventos indeseados en la simulación del modelo de dinámica de sistemas.



Fuente: Elaboración propia en el software Evolución 4.5.

En el desarrollo y simulación del modelo del flujo de caja correspondiente al caso de estudio se observó que a medida que se ingresa la información producida por el modelo BIM 5D fue posible identificar y corregir los eventos no deseados, de esta forma se modificó el programa de obra de tal manera que se evitaran tales situaciones como flujos de caja negativa, además de la respectiva retroalimentación

del programa de obra en el modelo del procesos constructivo BIM 5D, donde fue posible verificar la viabilidad de ejecución del programa de obra.

Los beneficios en la identificación de eventos indeseados, en el flujo de caja, con la simulación del modelo de dinámica de sistemas y del proceso constructivo BIM 5D apoyado por el trabajo colaborativo de los actores del proyecto resulta una metodología ideal para la toma de decisiones en la fase de análisis y planificación del flujo de caja, teniendo presente las retro alimentación que se presenta entre los modelos y los aportes que puede brindar cada uno de los actores desde su perspectiva y experiencia vivida.

4.3.4 Flexibilidad al cambio en los parámetros del flujo de caja con dinámica de sistemas y generación de alternativas para la toma decisiones

En el desarrollo del modelo del flujo de caja en dinámica de sistemas, fue posible observar los beneficios que se obtienen en cuanto a la flexibilidad del modelo al cambio, lo que resulta de gran beneficio teniendo en cuenta que en la fase de análisis y planificación del flujo de caja pueden presentarse un número significativo de cambios, teniendo presente que existe la necesidad de evaluar distintas opciones, con distintos valores en las variables, en un tiempo reducido, esto con el objetivo de contar con varias alternativas donde se procura elegir la de mayor conveniencia; de esta forma es posible obtener un gran número de alternativas con diferentes características en donde se tendrá la posibilidad de elegir la que mejor se ajuste a las necesidades tanto del constructor como del dueño del proyecto.

La flexibilidad al cambio del modelo de dinámica de sistemas, en el caso de estudio, se utilizó para la detección y mitigación de los eventos indeseados, ya que en tales casos fue necesario el ajuste de parámetros y la evaluación del comportamiento del flujo de caja, proceso que requirió de varias iteraciones en donde los resultados se obtuvieron en un tiempo reducido a partir de la modificación de los parámetros en

el modelo de dinámica de sistemas, lo cual se diferencia de las metodologías consultadas en donde existe dificultades para la evaluación de los cambios en los modelos de dinámica de sistemas.

La flexibilidad al cambio del modelo del flujo de caja, en dinámica de sistemas, hace que la metodología expuesta en la presente investigación resulte una opción de gran viabilidad para la aplicación en las compañías constructoras en donde generalmente se presentan varios cambios en los proyectos y existe la necesidad de evaluar la afectación de los cambios que se realizan.

4.3.5 Seguimiento de los flujos de ingresos y egresos con dinámica de sistemas

Como se observó con el caso de estudio, la simulación del flujo de caja en un modelo de dinámica de sistemas permite conocer el comportamiento de los flujos de efectivo correspondientes a los distintos aspectos, en la generación del modelo se debe tener presente este aspecto pues los reportes obtenidos por el software dependen de la organización del modelo.

En el proceso de análisis del flujo de caja puede presentarse la necesidad de mover en el tiempo algún o algunos flujos de efectivo, situación en donde resulta indispensable conocer el comportamiento en función del tiempo de los flujos de interés; en desarrollo de la metodología fue posible evidenciar que una adecuada organización del modelo permite mejorar y optimizar el proceso de retroalimentación y modificación que se da en la toma de decisiones; además disminuye la posibilidad de pasar por alto la modelación de algún flujo, ya que en un proyecto de gran magnitud puede presentarse la necesidad de utilizar un gran número de elementos en donde un modelo desordenado resultaría de gran dificultad para la abstracción de la información correspondiente.

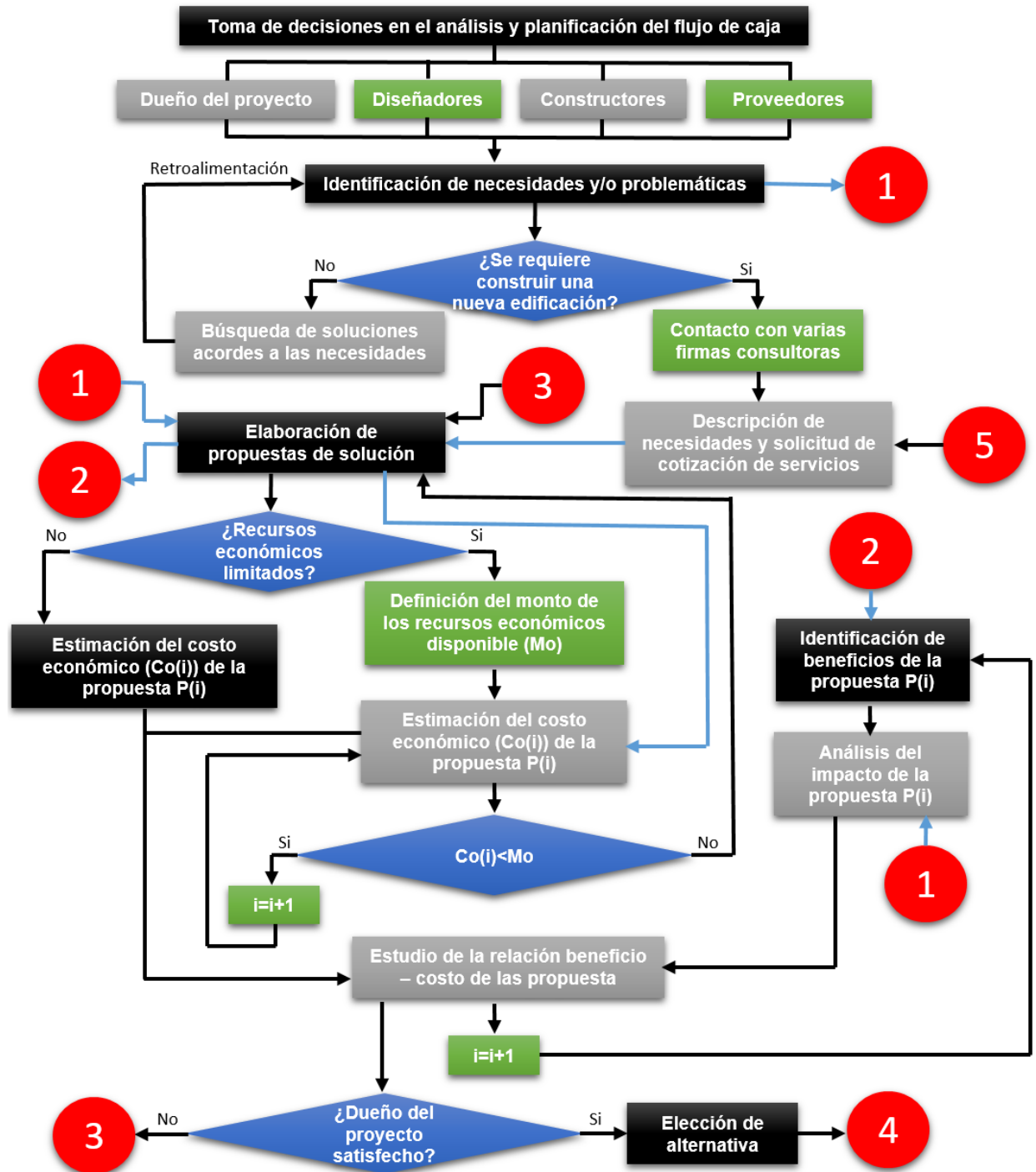
4.3.6 Toma de decisiones, en la planificación y análisis del flujo de caja, sustentada en modelos de dinámica de sistemas y BIM 5D

La toma de decisiones en la planificación y análisis del flujo de caja de un proyecto de construcción resulta beneficiada con la metodología propuesta, teniendo en cuenta que es posible mejorar los procesos de trabajo colaborativo entre los actores involucrados partiendo de los beneficios de visualización y almacenamiento de BIM y de la agilidad para la evaluación y generación de alternativas en el modelo de dinámica de sistemas.

La plataforma virtual de trabajo colaborativo que es posible generar a partir del modelo BIM brinda la posibilidad de que los actores del proyecto interactúen y aporten a la toma de decisiones desde etapas tempranas del proyecto en donde la información es producida, almacenada, integrada, consultada y comunicada en tiempo real por parte de los diferentes profesionales que actúan en el proyecto.

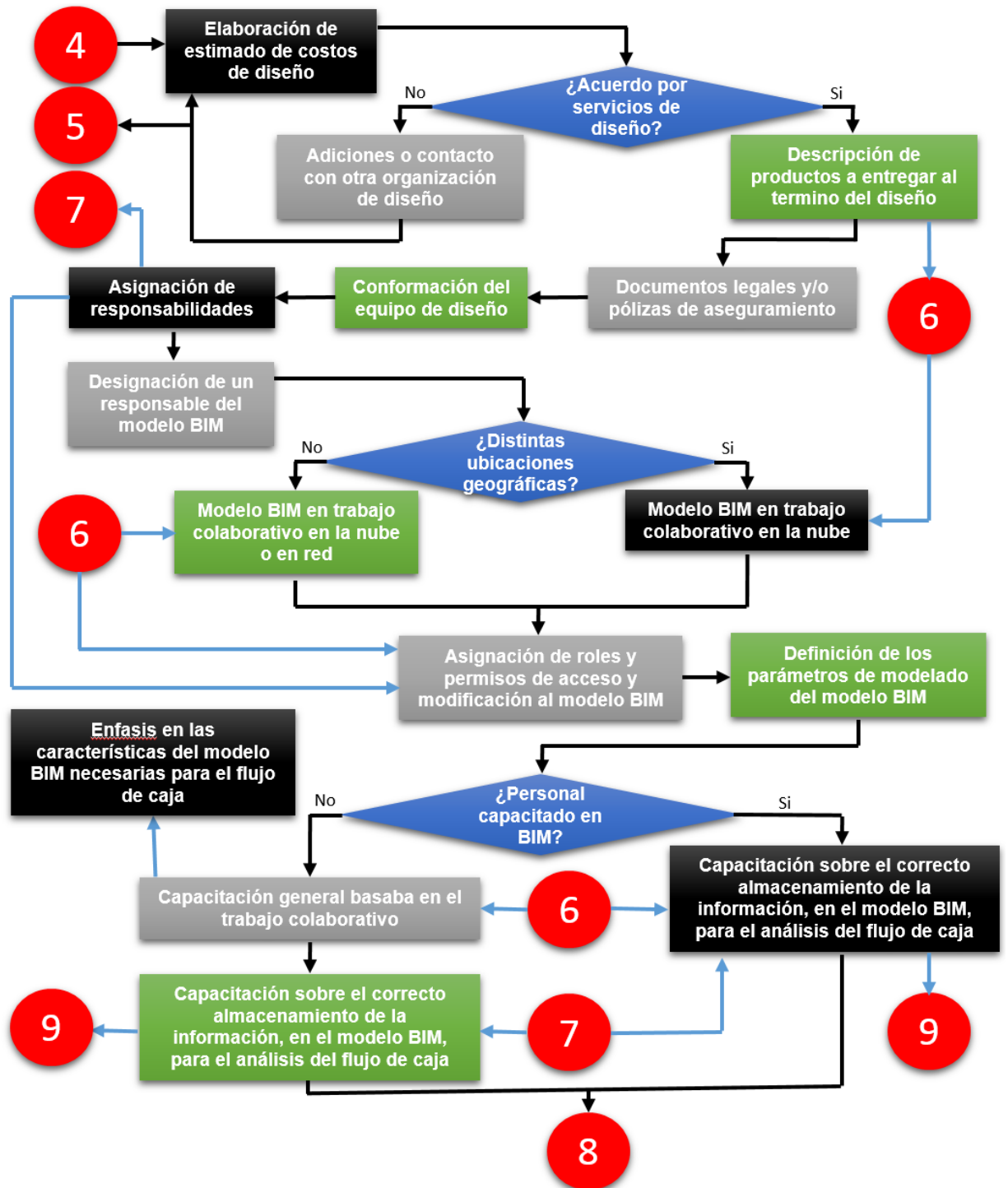
Con la metodología propuesta, la toma de decisiones se realiza de una forma integrada en donde actores como los constructores y proveedores actúan en etapas tempranas de los proyectos y las tecnologías utilizadas permiten la generación y evaluación de un gran número de alternativas entre las cuales es posible elegir la de mayor conveniencia en un ambiente en donde los involucrados en el proyecto participan. En las siguientes seis graficas se presenta un algoritmo en donde es posible observar el conjunto de procedimientos y metodologías que pueden utilizarse para la toma de decisiones en el análisis y planificación del flujo de caja.

Figura 69: Algoritmo para la toma de decisiones en el análisis y planificación del flujo de caja, parte 1 de 6.



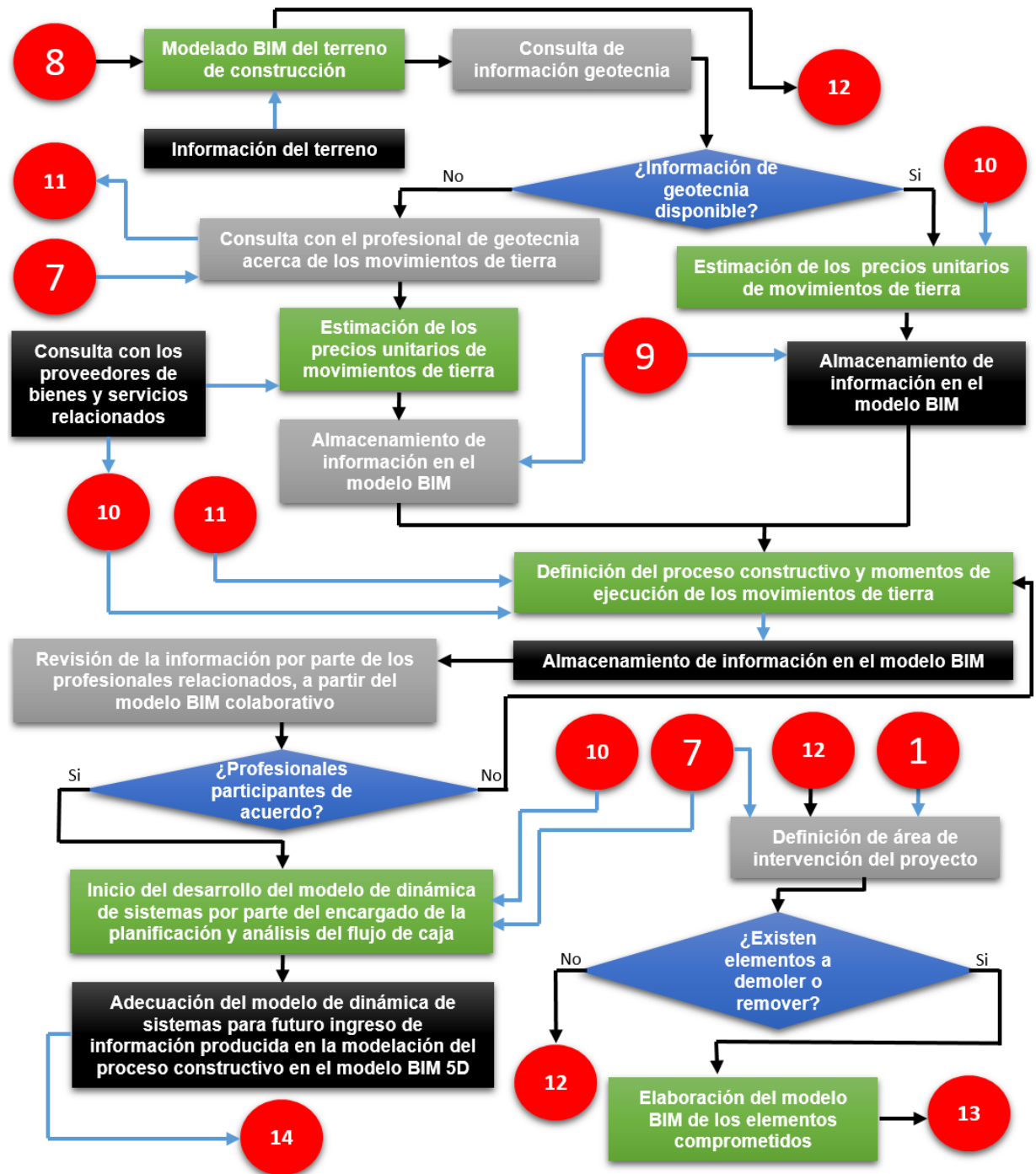
Fuente: Elaboración propia.

Figura 70: Algoritmo para la toma de decisiones en el análisis y planificación del flujo de caja, parte 2 de 6.



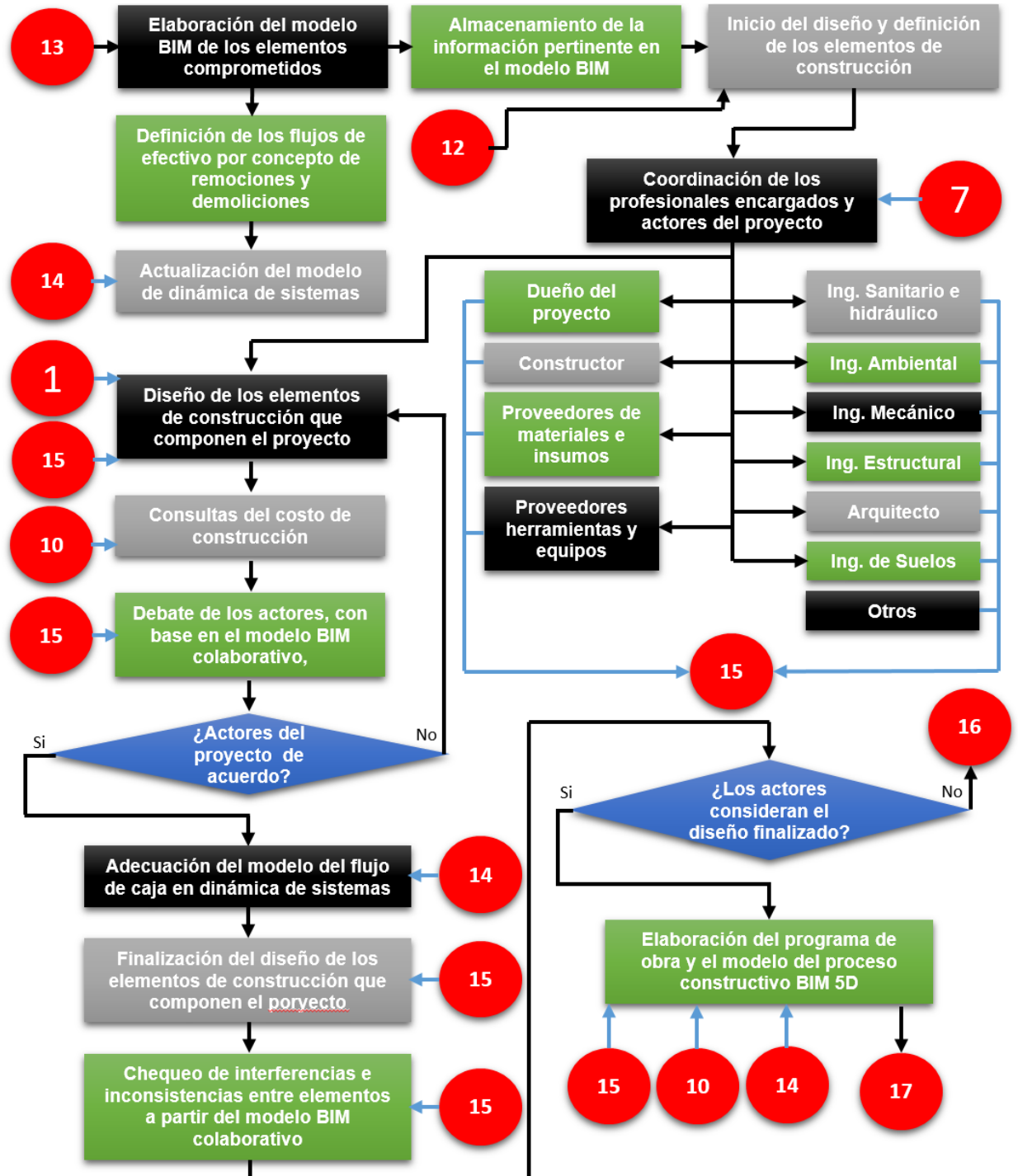
Fuente: Elaboración propia.

Figura 71: Algoritmo para la toma de decisiones en el análisis y planificación del flujo de caja, parte 3 de 6.



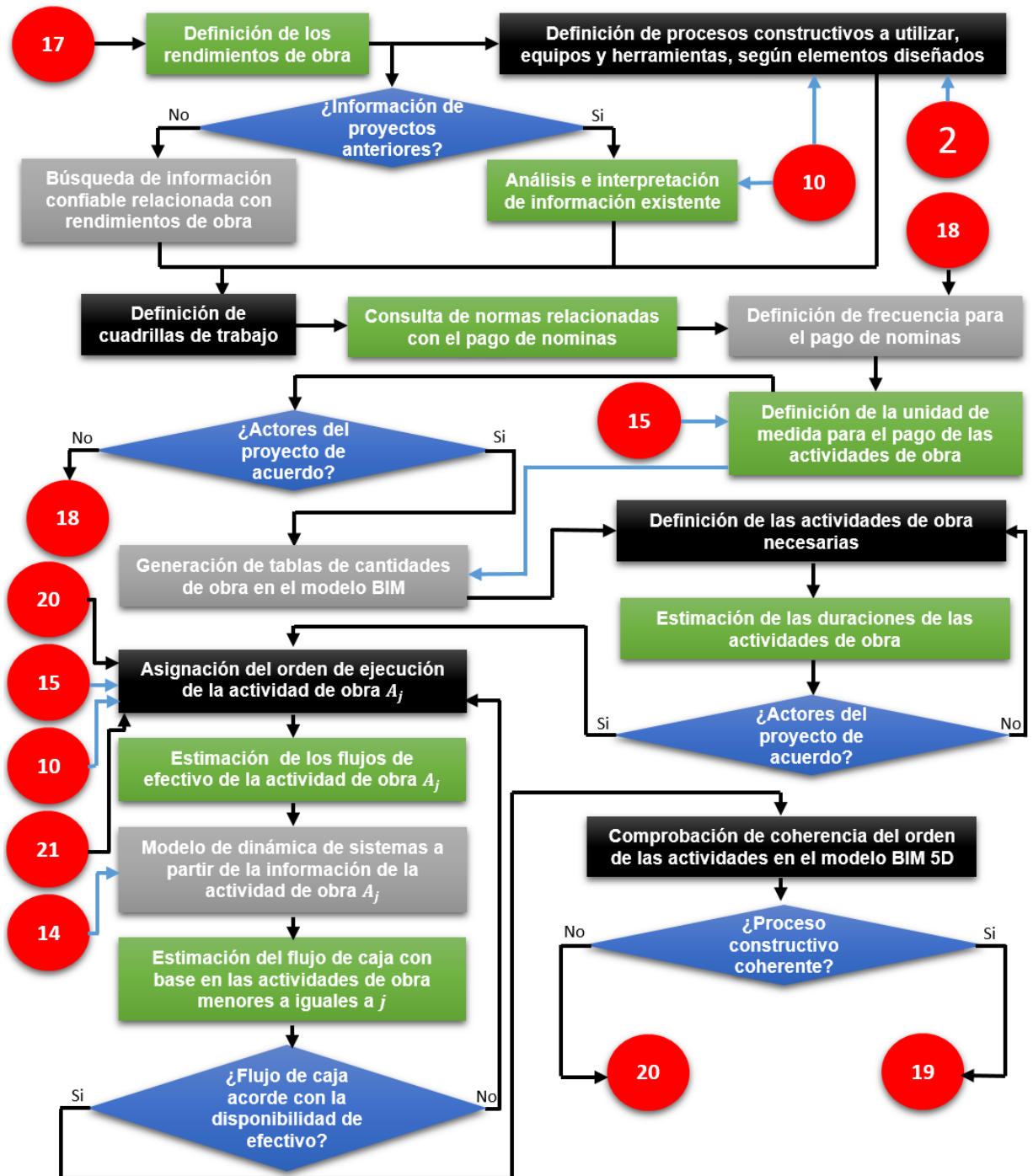
Fuente: Elaboración propia.

Figura 72: Algoritmo para la toma de decisiones en el análisis y planificación del flujo de caja, parte 4 de 6.



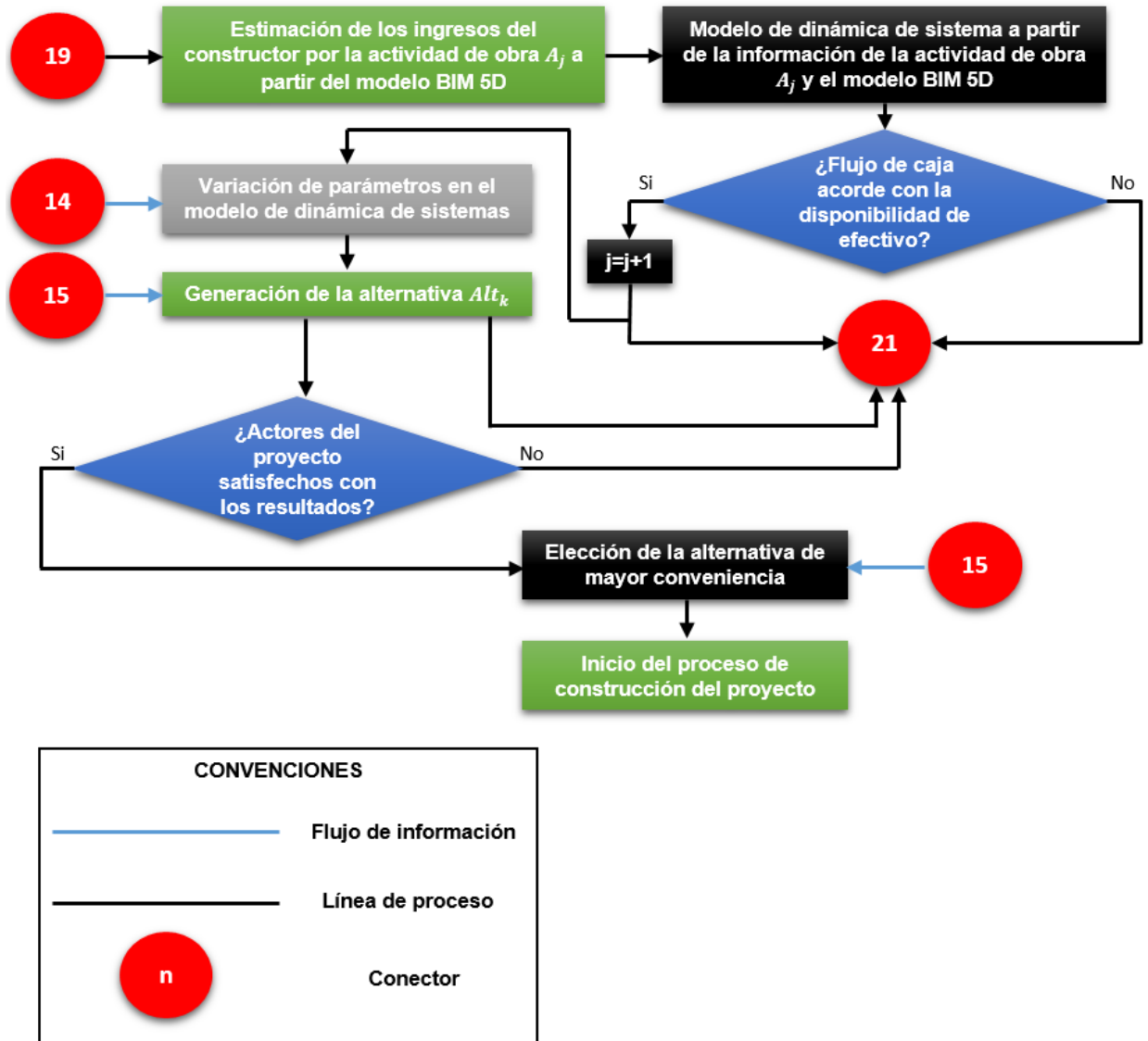
Fuente: Elaboración propia.

Figura 73: Algoritmo para la toma de decisiones en el análisis y planificación del flujo de caja, parte 5 de 6.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 74: Algoritmo para la toma de decisiones en el análisis y planificación del flujo de caja, parte 6 de 6.



Fuente: Elaboración propia.

5. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

5.1 CONCLUSIONES GENERALES

- Como se evidencia en el desarrollo de la investigación, el nivel de detalle de la información de entrada para el análisis del flujo de caja de un proyecto de construcción, resulta un factor determinante para asegurar una buena precisión en los resultados; sin embargo se debe tener presente que lograr un alto nivel de detalle en la información conlleva a la necesidad de una gran cantidad de trabajo, es por este motivo que el momento de iniciar el análisis de un flujo de caja, una de las primeras cuestiones que se deberá resolver es el nivel de precisión que se requiere.
- La implementación de BIM en los procesos de planificación y cuantificación, del flujo de caja de proyectos de construcción, contribuye de gran manera al trabajo colaborativo entre las distintos actores de los proyectos (dueños, diseñadores, constructores, proveedores, etc.), ya que es posible establecer un proceso de toma de decisiones, fundamentado en retroalimentaciones de los actores y un ambiente virtual, en donde el modelo BIM funciona como herramienta de comunicación y visualización de la información de construcción. De esta forma el proceso resulta beneficiado por los aportes e integración de los distintos actores, disminuyendo así la incertidumbre que caracteriza a la planificación y cuantificación de los flujos de caja.
- La modelación del flujo de caja de un proyecto de construcción en dinámica de sistemas, permite entender las variables, las relaciones existentes entre las variables, el comportamiento en el tiempo, entre otros, situación que beneficia de gran manera la toma de decisiones, ya que es posible identificar las variables relevantes que afectan los flujos de efectivo; de esta forma es posible contar con

la posibilidad de entender y mejorar la planificación de los flujo de efectivo a través del control de variables y el entendimiento de las relacionales existentes.

- Los proyectos de construcción se caracterizan por generar un gran volumen de información en el transcurso de sus diferentes fases (factibilidad, diseño, construcción, operación etc.), como fue posible observar en el caso de estudio. Esta situación ocasiona que el almacenamiento, consulta y gestión de la información de construcción sea una labor compleja; la tecnología BIM resulta de gran beneficio para la gestión de la información del proyecto, ya que actúa como una base de datos digital que brinda numerosos beneficios; uno de los beneficios es posible observarlo en el análisis del flujo de caja del proyecto, ya que permite obtener información de forma rápida y efectiva con un alto nivel de detalle, lo que permite lograr que el análisis del flujo de caja sea preciso y automatizado, teniendo en cuenta que el insumo fundamental para un flujo de caja es el nivel de detalle de la información y su precisión.
- Como fue posible evidenciar en el desarrollo de la investigación, la inclusión de dinámica de sistemas y modelos del proceso constructivo BIM 5D, en el análisis del flujo de caja de proyectos de construcción, contribuye de gran manera al aumento de la precisión en las estimaciones de los flujos de entrantes y salientes generados por la ejecución de un proyecto; es por esto que las compañías, interesadas en lograr una efectiva y precisa toma de decisiones del flujo de caja, resultan beneficiadas con la implementación de la metodología propuesta en la presente investigación, ya que resulta una metodología flexible al cambio y con numerosos beneficios como el del trabajo colaborativo donde es posible enriquecer los procesos con la retroalimentación por parte de los actores involucrados en el proyecto. Sumado a esto la posibilidad de realizar diferentes simulaciones con diferentes datos de entrada lo que genera distintos escenarios de futuro donde el usuario tiene la posibilidad de escoger el de mayor

conveniencia, situación que posibilita la optimización del procesos de toma de decisiones.

- En el ejercicio de planificación del flujo de caja de un proyecto de construcción, con modelos BIM 5D y dinámica de sistemas, se debe procurar integrar a los actores (dueño, diseñador, constructor, proveedor, etc.) del proyecto desde etapas tempranas del desarrollo de la planificación, esto con motivo a que cada uno puede contribuir a mejorar la precisión de resultados a partir de sus conocimientos y experiencias previas. Es importante que cada uno de actores, en los procesos de planificación del flujo de caja, adquiera los compromisos de fechas y actividades tenidos en cuenta, ya que el no cumplimiento de alguna de las partes afecta a las demás partes, lo que conlleva a que los resultados de la planificación no se lleven a cabo y por tanto la inclusión de incertidumbre a los flujos de dinero.
- De acuerdo a la experimentación, se observó que la implementación de un modelo BIM 5D en la planificación del flujo de caja resulta de gran beneficio para disminuir la incertidumbre relacionada con las fechas de pedidos y el pago de materiales, ya que en la simulación del proceso constructivo es posible observar los momentos en los cuales resulta adecuado realizar pedidos de material, además de la cantidad de material; de esta forma es posible aumentar la precisión tanto de la magnitud del flujo como del momento en el que ocurre. Desde esta perspectiva la implementación de los modelos BIM 5D fortalece la planificación de actividades de obra, ya que es posible planificar fechas de inicio y terminación de las actividades de obra soportadas en una simulación virtual, donde es posible cambiar parámetros y verificar las consecuencias en un tiempo reducido, resultando una herramienta ideal para la planificación de obra y detección de falencias en los procesos constructivos.

- En la planificación de un proyecto de construcción se presenta la necesidad de determinar la opción de ejecución donde el tiempo empleado resulte ser lo más reducido posible sin exceder el presupuesto de construcción [42-43]. Con la utilización de un modelo del flujo de caja de dinámica de sistemas, alimentado por información proveniente de un modelo del proceso constructivo BIM 5D es posible estudiar el comportamiento del flujo a partir de variaciones en el programa de obra; por lo tanto, la metodología utilizada en la presente investigación resulta ideal para la determinación del programa de obra en el que se construye un proyecto en un tiempo reducido con un presupuesto igual o inferior al establecido, brindando la posibilidad al usuario de maximizar las utilidades.
- En el análisis de los flujos de caja de proyectos de construcción, los beneficios de la dinámica de sistemas resultan complementarios a los beneficios de la tecnología BIM 5D, teniendo en cuenta que la dinámica de sistemas permite la modelación de la variación de los flujos de efectivo en el tiempo, lo que requiere de una fuente de datos de entrada confiable para la obtención de estimaciones de gran precisión en donde un modelo BIM 5D resulta ideal teniendo presente que es posible determinar con gran exactitud las cantidades y fechas de ejecución de las actividades de obra; así dinámica de sistemas permite estudiar la variación en el tiempo de los datos producidos por el modelo BIM 5D.
- La implementación de modelos BIM 5D y dinámica de sistemas en el análisis de flujo de caja, contribuye a la disminución de pérdidas en los procesos de construcción, ya que es posible elaborar un programa de obra de tal manera que se minimice el pago de servicios que no aportan valor al proyecto, tal como el servicio de financiamiento el cual suele ser una importante fuente de pérdida para los constructores, teniendo en cuenta que los constructores deben pagar altas sumas de dinero por concepto de intereses bancarios, sumas que aumentan en la medida en que la planificación financiera sea deficiente. Con la

metodología aplicada en la presente investigación es posible mejorar la toma de decisiones relacionadas con el flujo de caja del proyecto, en la fase de diseño, de tal manera que como producto del proceso resulte un programa de obra diseñada de tal forma que los gastos por servicios bancarios sean mínimos.

- En la planificación de los flujos de caja de los proyectos de construcción, la magnitud y el tiempo de ocurrencia de los flujos, correspondientes a los pagos del dueño del proyecto al constructor, resultan variables generadoras de incertidumbre, teniendo en cuenta que tienen dependencia del avance de la ejecución del proyecto, el cual está compuesto por un gran número de variables que resultan difíciles de predecir. En la elaboración del flujo de caja del caso de estudio fue posible observar que el modelo BIM 5D resulto una herramienta de gran utilidad para la estimación del valor ejecutado en obra desde el primer día de ejecución, de esta forma, fue posible conocer el valor ejecutado en la obra, lo que permite calcular los ingresos del constructor con una mayor precisión.
- La implementación de un modelo de dinámica de sistemas, en el estudio del comportamiento del flujo de caja de un proyecto de construcción, resulta una herramienta ideal para el apoyo a los procesos de toma de decisiones, teniendo en cuenta que es posible conocer, en un tiempo reducido, el comportamiento del sistema bajo la variación de uno o varios de los parámetros; de esta forma, es posible obtener diferentes visiones de futuro entre las cuales es posible elegir la de mayor conveniencia; por tal razón la dinámica de sistemas contribuye al mejoramiento y optimización de los procesos de toma de decisiones.
- Uno de los factores, causantes de la bancarrota de los constructores, es el reducido valor de anticipos que reciben por parte del dueño del proyecto al inicio de la construcción; con el análisis del flujo de caja a partir de la metodología presentada es posible simular diferentes escenarios con diferentes valores de anticipos, en donde se puede estudiar cual valor de anticipo resulta adecuado

para el desarrollo de proyecto, permitiendo mejorar la toma de decisiones relacionadas con los flujos de efectivo por concepto de anticipos. El análisis de anticipos podría ser realizado por el dueño del proyecto, el constructor o cualquier otro actor involucrado; lo recomendado sería que en el momento de la definición del anticipo se encontraran presentes los actores involucrados y la toma de decisiones fuera realizada con el apoyo de la simulación de diferentes escenarios, en donde fuera posible la elección del de mayor conveniencia.

- Como se observó en la revisión del estado del arte: en la actualidad, BIM es aplicado a un gran número de campos pertenecientes a las diferentes fases del ciclo de vida de un proyecto de construcción; es por esta razón que se aconseja a las compañías constructoras que deseen implementar BIM, en las actividades relacionadas con el flujo de caja, que el ejercicio de implementación de BIM se realice a nivel general, es decir desde las etapas tempranas del diseño, de esta forma las ventajas y beneficios del modelo BIM son aprovechados en su mayoría en el ciclo de vida del proyecto, esto teniendo en cuenta que se puede cometer el error de realizar el modelo BIM únicamente para el análisis del flujo de caja, dejando de lado las notables ventajas que se pueden obtener en otros procesos.
- Los modelos del proceso constructivo BIM 5D, resultan una herramienta tecnológica de apoyo al proceso de toma de decisiones relacionadas con el proceso constructivo, teniendo en cuenta que es posible realizar simulaciones de diferentes procesos en un entorno virtual en el que no se arriesgan vidas humanas ni recursos económicos, los beneficios en el ámbito de la visualización de la tecnología BIM permiten que el proceso de planificación de la construcción sea enriquecido por la retroalimentación que se obtiene del análisis de las simulaciones proceso en el cual es posible elegir las decisiones a tomar que tienen un mayor grado de beneficio, situación que afecta al flujo de caja ya que existe una estrecha dependencia entre el programa de obra y el flujo de caja.

- En el desarrollo de la metodología de investigación, fue posible observar que la elaboración de un modelo BIM funciona como una herramienta para el control de calidad de los diseños de los proyectos, teniendo en cuenta que con un modelo BIM es posible llegar al nivel de detalle de un tornillo, en donde es posible almacenar la información de construcción, situación que afecta el análisis y la planificación del flujo de caja, ya que uno de los mayores generadores de incertidumbre, en la predicción de los flujos, es el olvido de actividades al momento de la cuantificación, situación que suele ser generada por la falta de información de diseño o por la dificultad de interpretación de los diseños del proyecto. Con BIM cada uno de los elementos de construcción es modelado e integrado, de esta forma es posible realizar un control de calidad de los diseños más riguroso y así contar con la posibilidad de adelantarse a la ejecución del proceso.
- Un modelo BIM 5D permite aumentar la seguridad en obra de los operarios por medio de la observación de la simulación, en donde es posible detectar situaciones o elementos que representen un alto riesgo para el personal en obra, lo que afecta el flujo de caja ya que por medio de la observación se puede determinar los elementos de protección personal apropiados para la ejecución del proyecto, lo cual afecta los flujos de efectivo correspondientes a los egresos.

5.2 FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

5.2.1 BIM 5D y dinámica de sistemas en el control del flujo de caja en la fase de construcción

La modelación y simulación del flujo de caja, a partir de modelos BIM 5D y dinámica de sistemas, podría resultar una metodología eficaz para el control del flujo de caja en la fase de construcción, teniendo en cuenta que resulta una metodología flexible al cambio que permite la actualización rápida y efectiva de información producida en la obra y de esta forma contar con la posibilidad de proyectar el flujo de caja y poder evitar posible quiebras financieras.

5.2.2 BIM 5D y dinámica de sistemas en el análisis del flujo de caja durante el ciclo de vida del proyecto de construcción

La metodología propuesta, para la planificación y gestión del flujo de caja de un proyecto de construcción, podría ser implementada en el estudio del flujo de caja de un comprador de vivienda en donde podrían ser incluidas las variables: mantenimiento de la edificación, impuestos, facturas de servicios públicos, pagos de créditos bancarios, entre otros. De esta forma se podría prevenir la posible bancarrota de los compradores de vivienda, fenómeno responsable de la reciente crisis económica mundial.

5.2.3 Planificación de estructuras temporales con BIM 5D y dinámica de sistemas

Como se evidencio en la investigación, un modelo BIM 5D resulta una herramienta ideal para: la administración de espacios en obra y verificación de la coherencia de los programas de obra, beneficios que resultan apropiados para la planificación y gestión de la instalación de estructuras temporales tales como formaletas y

andamios, teniendo en cuenta que en la actualidad existe una extensa problemática por la acumulación de estructuras temporales en obra y dificultades para la planificación y gestión de la instalación además del uso del espacio.

5.2.4 Aplicación de BIM en la ejecución integrada de proyectos de construcción

En la actualidad existen varios problemas generados por concepto de la ejecución de los proyectos en un ambiente de trabajo no colaborativo, donde la comunicación de la información en tiempo real requiere de herramientas tecnológicas soportadas en la informática, tales que permitan: almacenar, integrar y gestionar el gran volumen de información de los proyectos de construcción, esto de tal manera que la información pueda ser compartida por los actores del proyecto en el momento en que es producida. Las plataformas de trabajo colaborativo en la nube, soportadas en modelos BIM, pueden apoyar el proceso de toma de decisiones en etapas tempranas de los proyectos, de esta forma se beneficiaría el proceso de toma de decisiones relacionadas tanto con el flujo de caja como con otros aspectos.

CITAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ODEYINKA, Henry; KAKA, Ammar y MORDELEDGE, Roy. An evaluation cash flow management approaches in contracting organisations. En: The 19th Annual Association of Researchers in Construction Management (ARCOM) Conference. Septiembre, 2003, p. 33-41.
- [2] AL-JOBURI, Khalil; AL-AOMAR, Raid y BAHRI, Mohammed. Analyzing the impact of negative cash flow on construction performance in the Dudai area. En: Journal of Management in Engineering – ASCE. Octubre, 2012, vol. 28, p. 382-390.
- [3] HAWAS, Francisco y CIFUENTES, Arturo. Valuation of projects with stochastic cash flows and intertemporal correlations: practical modeling guidelines. En: Journal of Management in Engineering – ASCE. Febrero, 2014, p. 140-145.
- [4] LUCKO, Gunnar. Optimizing cash flows for linear schedules modeled with singularity functions by simulated annealing. En: Journal of Construction Engineering and Management – ASCE. Julio, 2011, vol. 137, p. 523-535.
- [5] KENLEY, Russell. Financing Construction. Unitec, New Zealand. Taylor & Francis Group, 2003.
- [6] LIU, Yaqiong; ZAYED, Tarek y LI Shunjing. Cash flow analysis of construction projects. En: 8th Construction Specialty Conference. Mayo, 2009, 8, p. 1-8.

- [7] CHEN, Hong; O'BRIEN, William y HERBSMAN Zohar. Assessing the accuracy of cash flow models: the significance of payment conditions. En: Journal of Construction Engineering and Management – ASCE. Junio, 2005, vol. 131, p. 669-676.
- [8] KHOSROWSHAHI, Fernando y KAKA, Ammar. A decision support model for construction cash flow management. En: Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, vol. 22, p. 527-539.
- [9] KISHORE, Varun; ABRAHAM, Dulcy y SINFIELD, Joseph. Portfolio cash assessment using fuzzy systems theory. En: Journal of Construction Engineering and Management – ASCE. Mayo, 2009, vol. 137, p. 333-343.
- [10] JARRAH, Ra'ed; KULKARNI, Devdatta y O'CONNOR, James. Cash flow projections for selected TxDOT highway projects. En: Journal of Construction Engineering and Management - ASCE. Marzo, 2007, vol. 133, p. 235-241.
- [11] NAVON, Ronie. Company level cash flow management. En: Journal of Construction Engineering and Management – ASCE. Septiembre, 1994, vol. 122, p. 22-29.
- [12] CHEN, Hong. Developing cost response models for company-level cost flow forecasting of project-based corporations. En: Journal of Management in Engineering – ASCE. Marzo, 2007, vol. 23, p. 171-181.

- [13] SU, Yi y LUCKO, Gunnar. Synthetic cash flow model with singularity functions. I: theory for periodic phenomena and time value of money. En: Journal of Construction Engineering and Management – ASCE. Febrero, 2015, vol. 141, p. 1-12.
- [14] PARK, Hyung; HAN, Seung y RUSSELL, Jeffrey. Cash flow forecasting model for general contractors using moving weights of cost categories. En: Journal of Management in Engineering – ASCE. Octubre, 2005, vol. 21, p. 164-172.
- [15] KIM, Hyunjoo y GROBLER, Françoise. Preparing a construction cash flow analysis using building information modeling (BIM) technology. En: KICEM Journal of a Construction Engineering and Project Management. Febrero, 2013, vol. 3, p. 1-9.
- [16] LIU, Shu y WANG, Chang. Profit optimization for multiproject scheduling problems considering cash flow. En: Journal of Construction Engineering and Management. Diciembre, 2010, vol. 136, p.1268-1278.
- [17] SURETY INFORMATION OFFICE (SIO). Why do constructors fail? [online]. 2011. Disponible en internet: http://suretyinfo.org/?wpfb_dl=151.
- [18] TANG, C. M.; LEUNG, Andrew y LAM, Ka chi. Entropy application to improve construction finance decisions. En: Journal of Construction Engineering and Management – ASCE. Octubre, 2006, vol. 132, p. 1099-1113.

- [19] NAVON, Ronie. Resource-based model for automatic cash-flow forecasting. En: Construction Management and Economics. Enero, 1995, vol. 13, p. 501-510.
- [20] CHEN, Hong. Development of a systematic integration approach for multi-level cost flow prediction and management. PHD dissertation, University of Florida, Florida, United States. 2002.
- [21] MELIK, Serhat. Cash flow analysis of construction projects using fuzzy set theory. Thesis submitted to the degree of Master of Science in Civil Engineering. Middle East Technical University, Ankara, Turquía. 2010.
- [22] QIAN, Ang. Benefits and ROI of BIM for multi-disciplinary project management. Thesis Undergraduated of Civil Engineering. National University of Singapore, Singapore. 2012.
- [23] QING, Liu; TAO, Gao y PING, Wang. Study on building lifecycle management platform based on BIM. En: Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology. Enero, 2014, vol. 7, p. 1-8.
- [24] HARTMANN, Timo; GAO, Ju. y FISCHER, Martin. Areas of application for 3D and 4D models on construction projects. En: Journal of Construction Engineering and Management – ASCE. Octubre, 2008, vol. 134, p. 776-785.

- [25] CEROVSEK, Tomo. Process reuse in product development with 5D models: concepts, similarity measures and querying techniques. Ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2012.
- [26] DING, Lieyun; ZHOU, Ying y AKINCI, Burcu. Building information modeling (BIM) application framework: the process of expanding from 3D to computable nD. En: Automation in Construction. Mayo, 2014, vol. 46, p. 82-93.
- [27] SMART, Chris y BRYANT, Virginia. Enhancing cash flow forecasting by the use of system dynamic modelling techniques. En: System Dynamics. 1993, p. 495-504.
- [28] YI-HAN, Zhang y HONG-XIN, Wang. Simulation study of cash flow for the firm based on system dynamics. En: 2010 International Conference on Education and Management Technology. 2010, vol. 10, p. 292-296.
- [29] RENDÓN, Yelsyn y BUITRAGO, Carlos. Application of systems dynamics in long-term financial planning in power transmission utilities. En: Cigre. 2012, p. 1-6.
- [30] NAIR, Girish y RAJ, Lewlyn. Dynamics of financial system: a system dynamics approach. En: International Journal of Economics and Financial Issues. 2013, vol. 3, p. 14-26.

- [31] FORRESTER, Jay. Industrial dynamics. Cambridge: MIT Press, 1961.
- [32] YI-HAN, Zhang y HONG-XIN, Wang. Simulation study of cash flow for the firm based on system dynamics. En: 2010 International Conference on Education and Management Technology. 2010, p. 292-296.
- [33] SMART, Chris y VIRGINIA, Bryant. Enhancing cash flow forecasting by the use of system dynamic modelling techniques. En: System Dynamics. 1993, p. 495-504.
- [34] CHOI, Younga. Financial crises and contagion: dynamical systems approach. Montclair State University, Junio, 2012.
- [35] ALGHAZI, Anas; SELIM, Shokri y ASHRAF, Elazouni. Performance of shuffled frog-leaping algorithm in finance-based scheduling. En: Journal of Computing in Civil Engineering – ASCE. Octubre, 2012, vol. 26, p. 396-408.
- [36] HUANG, Wen-Haw; TSERNG, H. Ping; JASELSKIS, Edward y LEE, Shu. Dynamic threshold cash flow-based structural model for contractor. En: Journal of Construction Engineering and Management – ASCE. Noviembre, 2014, vol. 140, p. 1-10.
- [37] AIBINU, Ajibade y VENKATESH Sudha. Status of BIM adoption and the BIM experience of cost consultants in Australia. En: Journal of Professional Issues

in Engineering Education & Practice – ASCE. Diciembre, 2013, vol. 140, p. 1-10.

- [38]** NAZEM, S. M. Planning constructor capital. En: Journal of Building Technology and Management. 1968, vol. 6, p. 256-260.
- [39]** JEPSON, W. B. Financial control of construction and reducing the element of risk. En: Contract Journal. Abril, 1969, p. 862-864.
- [40]** BROMILOW, F. J. Contract time performance expectations and the reality. En: Building Forum. Septiembre, 1969, p. 70-80.
- [41]** ASHLEY, David; UEHARA, Kazuyoshi y ROBINSON Burke. Critical decision during construction. En: Journal of Construction Engineering and Management – ASCE. Marzo, 1982, vol. 109, p. 146-162.
- [42]** AMMAR, Mohammad. Optimization of project time-cost trade-off problem with discounted cash flows. En: Journal of Construction Engineering and Management - ASCE. Julio, 2010, vol. 137, p. 65-71.
- [43]** YANG, I-Tung. Using elitist particle swarm optimization to facilitate bicriterion time-cost trade-off analysis. En: Journal of Construction Engineering and Management – ASCE. Julio, 2005, vol. 133, p. 498-505.

- [44] LU, Weisheng; YI, Peng; SHEN, Qiping y LI, Heng. Generic model for measuring benefits of BIM as a learning tool in construction tasks. En: Journal of Construction Engineering and Management – ASCE. Mayo, 2012, vol. 139, p. 195-203.
- [45] KIM, Jin-Lee. Use of BIM for effective visualization teaching approach in construction education. En: Journal of Professional Issues in Engineering Education & Practice – ASCE. Noviembre, 2011, vol. 138, p. 214-223.
- [46] BECERIK-GERBER, Burcin; JAZIZADEH, Farrokh; LI, Nan y GULBEN, Calis. Application areas and data requirements for BIM-enabled facilities management. En: Journal of Construction Engineering and Management – ASCE. Junio, 2015, vol. 138, p. 431-442.
- [47] CLEVINGER, Caroline y KHAN, Ricardo. Impact of BIM-enabled design-to-fabrication on building delivery. En: Journal Practice Periodical on Structural Design and Construction – ASCE. Febrero, 2014, p. 122-128.
- [48] KANER, Israel; SACKS, Rafael; KASSIAN, Wayne y QUITT, Tomas. Case studies of BIM adoption for precast concrete design by mid-sized structural engineering firms. En: Journal ITcon. Junio, 2008, vol. 13, p. 303-323.
- [49] VOLK, Rebekka; STENGEL, Julian y SCHULTMANN, Frank. Building information modeling (BIM) for existing buildings – literature review and future needs. En: Automation in Construction. Diciembre, 2013, vol. 38, p. 109-127.

- [50] ISO Standard, ISO 29481-1. 2010 (E): Building information modeling – information delivery manual – part 1: methodology and format, 2010.
- [51] EASTMAN, Chuck; TEICHOLZ, Paul; SACKS, Rafael y LISTON, Kathleen. BIM Handbook: A guide to building information for owners, managers, designers, engineers and contractors. Aufl, 2, Wiley, Hoboken, 2011.
- [52] WATSON, Alastair. Digital buildings - challenges and opportunities. En: Advanced Engineering Informatics. Agosto, 2011, vol. 25, p. 573-581.
- [53] TANG, Pingbo; HUBER, Daniel; AKINCI, Burcu; LIPMAN, Robert y LYTTLE, Alan. Automatic reconstruction of as-built building information modeling models from laser-scanned point clouds: a review of related techniques. En: Automation in Construction. Junio, 2010, vol. 19, p. 829-843.
- [54] NAWARI, O. BIM standard in off-site construction. En: Journal of Architectural Engineering – ASCE. Junio, 2012, vol. 18, p. 107-113.
- [55] NEPAL, M.P.; JUPP J.R. y AIBINU, A.A. Evaluations of BIM: frameworks and perspectives. En: Journal of Computing In Civil and Building Engineering – ASCE. Enero, 2014, p. 769-776.

- [56] SACKS, Rafael y BARAK, Ronen. Impact of three-dimensional parametric modeling of buildings on productivity in structural engineering practice. En: Automation in Construction. Enero, 2008, vol. 17, p. 439-449.
- [57] NATIONAL INSTITUTE OF BUILDING SCIENCES BUILDINGSMART ALLIANCE. National BIM standard – United States. En: Practice Document. Diciembre, 2012, vol. 2, p. 1-14.
- [58] CHO, Yong; ALASKAR, Sultan y BODE Thaddaeus. BIM-Integrated sustainable material and renewable energy simulation. En: Construction Research Congress – ASCE. 2010, p. 288-297.
- [59] MOON, Hyeun; KIM, Byung y CHOI, Min. A BIM based data model for an integrated building energy information management in the design and operational stages. En: 13th Conference of International Building Performance Simulation Association, Chambéry, France. Agosto, 2013, p. 26-28.
- [60] BAZJANAC, Vladimir. IFC BIM-Based methodology for semi-automated building energy performance simulation. En: CIB-W78 25th International Conference on Information Technology in Construction, Santiago, Chile. Julio, 2008, p. 1-15.
- [61] WELLE, Benjamin; HAYMAKER, John y ROGERS, Zack. ThermalOpt: A methodology for automated BIM-Based multidisciplinary thermal simulation

for use in optimization environments. En: CIFE, Center for Integrated Facility Engineering, Stanford University. Junio, 2011.

- [62]** WONG, J. y YANG J. Research and application of building information modeling (BIM) in the architecture, engineering, and construction (AEC) industry: a review and direction for the future research. En: Proceedings of the 6th International Conference on Innovation in Architecture, Engineering & Construction (AEC). Loughborough University, U.K., Pennsylvania State University, 2010, p. 356-365.

- [63]** AZHAR, Salman; CARLTON, Wade; OLSEN, Darren y AHMAD, Irtishad. Building information modeling for sustainable design and LEED rating analysis. En: Automation in Construction. Noviembre, 2010, vol. 20, p. 217-224.

- [64]** BYNUM, Patrick; ISSA, Raja y OLBINA, Svetlana. Building information modeling in support of sustainable design and construction. En: Journal of Construction Engineering Management – ASCE. Enero, 2013, vol. 139, p. 24-34.

- [65]** SUCCAR, Bilal. Building information modeling framework: a research and delivery foundation for industry stakeholders. En: Automation in Construction. Octubre, 2008, vol. 18, p. 357-375.

- [66]** PORRAS, Hernán; SÁNCHEZ, Omar y GALVIS, José. Metodología para la elaboración de modelos del proceso constructivo 5D con tecnologías

“building information modeling”. En: Revista Gerencia Tecnológica Informática – GTI. Abril, 2015, vol. 14, p. 30-45.

- [67]** GU, Ning y LONDON, Kerry. Understanding and facilitating BIM adoption in the AEC industry. En: Automation in Construction. Enero, 2010, vol. 19, p. 988-999.

- [68]** CAMPBELL, Dace. Building information modeling: the web3D application for AEC. En: Proceedings of the 12th international conference on 3D web technology, New York. 2007, p.173-177.

- [69]** CHEUNG, Franco; RIHAN, Jonathan; TAH, Joseph; DUCE, David y KURUL, Esra. Early stage multi-level cost estimation for schematic BIM models. En: Automation in Construction. Junio, 2012, vol. 27, p. 67-77.

- [70]** HARTMANN, Timo; VAN MEERVELD, Hendrik; VOSSEBELD, Niels y ADRIAANSE, Arjen. Aligning building information model tools and construction management methods. En: Automation in Construction. Junio, 2012, vol. 22, p. 605-613.

- [71]** TANG, Pingbo; ANIL Engin; AKINCI, Burcu y HUBER, Daniel. Efficient and effective quality assessment of as-is building information models and 3D laser-scanned data. En: Proceedings of the International Workshop on Computing in Civil Engineering. 2011, p. 1-10.

- [72] HAJIAN, Hamid y BECERIK-GERBER, Burcin. A research outlook for real-time project information management by integrating advanced field data acquisition systems and building information modeling. En: Proceedings of the International Workshop on Computing in Civil Engineering. Austin, USA. 2009.
- [73] HUBER, Daniel; AKINCI Burcu; ADAN, Antonio; ANIL, Engin; OKORN, Brian y XIONG, Xuehan. Methods for automatically modeling and representing as-built building information models. En: Proceedings of the NSF CMMI Research Innovation Conference, 2011.
- [74] ANIL, Engin; AKINCI, Burcu y HUBER, Daniel. Representation requirements of as-is building information models generated from laser scanned point cloud data. En: Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC). 2011.
- [75] PINGBO, Tang y AKINCI, Burcu. Automatic execution of workflows on laser-scanned data for extracting bridge surveying goals. En: Advanced Engineering Informatics. Agosto, 2012, vol. 26, p. 889-903.
- [76] ANIL, Engin; TANG, Pingbo; AKINCI, Burcu y HUBER, Daniel. Deviation analysis method for the assessment of the quality of the as-is building information models generated from point cloud data. En: Automation in Construction. Julio, 2013, vol. 35, p. 507-516.

- [77] PORRAS, Hernán; SÁNCHEZ, Omar; GALVIS, José; JAIMEZ, Nestor y CASTAÑEDA, Karen. Tecnologías “building information modeling” en la elaboración de presupuestos de construcción de estructuras en concretos reforzado. En: Revista Entramado. Abril, 2015, vol. 11, p. 1-20.
- [78] GOUCHER, Dan y THURAIRAJAH, Niraj. Usability and impact of BIM early estimation practices: cost consultant’s perspective. En: Pro. CIB MCRP, Management of Construction: Research to Practice, Birmingham School of the Built Environment, Birmingham City University, 2012, p. 555-569.
- [79] GURSEL, Ipek; SARIYILDIZ, Sevil; AKIN, Ömer, STOUFFS, Rudi. Modeling and visualization of lifecycle building performance assessment. En: Advanced Engineering Informatics. Agosto, 2009, vol. 23, p. 396-417.
- [80] CHRISTOPHE, Nicolle y CRUZ, Christophe. Semantic building information model and multimedia for facility management. En: Lecture Notes in Business Information Processing. 2011, p. 14-26.
- [81] AKCAMETE, Asli; AKINCI, Burcu y GARRETT, James. Potential utilization of building information models for planning maintenance activities. En: Proceedings of the International Conference on Computing in Civil and Building Engineering (ICCCBE). Nottingham, Britain. 2010.
- [82] MURPHY, M; MCGOVERN, E y PAVIA, S. Historic building information modelling – adding intelligence to laser and image based surveys. En:

International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Marzo, 2011, vol. 38, p. 1-7.

- [83]** KIM, Tae Wan; KAVOUSIAN, Amir; FISCHER, Martin y RAJAGOPAL, Ram. Improving facility performance prediction by formalizing an activity-space-performance model. En: CIFE, Center for Integrated Facility Engineering, Stanford University. Octubre, 2012.

- [84]** KIM Tae Wan. Predicting space utilization of buildings through integrated and automated analysis of user activities and spaces. En: CIFE, Center for Integrated Facility Engineering, Stanford University. Junio, 2013.

- [85]** BOSCHE, Frédéric; GUILLEMET, Adrien; TURKAN, Yelda; HAAS, Carl y HAAS, Ralph. Tracking the built status of MEP works: assessing the value of scan-vs.-BIM system. En: Journal of Computing in Civil Engineering – ASCE. Julio, 2013, vol. 28, p. 1-13.

- [86]** BHATLA, Ankit; CHOE, Soo Young; FIERRO, Oscar y LEITE, Fernanda. Evaluation of accuracy of as-built 3D modeling from photos taken by handheld digital cameras. En: Automation in Construction. Agosto, 2012, vol. 28, p. 116-127.

- [87]** TURKAN, Yelda; BOSCHE, Frederic; HASS, Carl y HASS, Ralph. Automated progress tracking using 4D schedule and 3D sensing technologies. En: Automation in Construction. Noviembre, 2011, vol. 22, p. 414-421.

- [88] EL-OMARI, Samir y MOSELHI, Osama. Integrating 3D laser scanning and photogrammetry for progress measurement of construction work. En: Automation in Construction. Mayo, 2008, vol. 18, p. 1-9.
- [89] SHOU, Whenchi; WANG, Xiangyu; WANG, Jun; HOU, Lei y TRUIJENS, Truijens. Integration of BIM and lean concepts to improve maintenance efficiency: a case study. En: Journal of Computing In Civil and Building Engineering – ASCE. Enero, 2014, p. 373-380.
- [90] LUCAS, Jason; BULBUL, Tanyel y THABET, Walid. An object-oriented model to support healthcare facility information management. En: Automation in Construction. Junio, 2013, vol. 31, p. 281-291.
- [91] TURKASLAN-BUKLBUL, Muhsine y AKIN, Omer. Computational support for building evaluation: embedded commissioning model. En: Automation in Construction. 2006, vol. 15, p. 438-447.
- [92] WELLE, Benjamin; ROGERS, Zack y FISCHER, Martin. BIM-Centric daylight profiler for simulation (BDP4SIM): a methodology for automated product model decomposition and recomposition for climate-based daylighting simulation. En: Center for Integrated Facility Engineering (CIFE), #TR206, Stanford University. Abril, 2012.

- [93] VAN, Haley. Building information modeling and historic buildings: how a living model leads to better stewardship of the past. Requiriments of the degree of Master of Science in Historic preservation. Pennsylvania, United States. University of Pennsylvania – Scholarly Commons. Historic Preservation, 2012.
- [94] AKBARNEZHAD, Ali; GARY, Khim; CHANDRA, Lado y LIN Zhisheng. Economic and environmental assessment of deconstruction strategies using building information modeling. En: Construction Research Congress 2012 – ASCE. Mayo, 2012, p. 1730-1739.
- [95] BECERIK-GERBER, Burcin y RICE, Samara. The perceived value of building information modeling in the U.S. building industry. En: Journal of Information Technology in Construction (ITcon). Febrero, 2010, vol. 15, p. 185-201.
- [96] BRYDE, David; BROQUETAS, Martí y VOLM, Jürgen Marc. The project benefits of building information modeling (BIM). En: International Journal of Project Management. Diciembre, 2012, vol. 31, p.971-980.
- [97] CEROVSEK, Tomo. A review and outlook for a “Building information model” (BIM): A multi-standpoint framework for technological development. En: Advanced Engineering Informatics. Julio, 2010, vol. 25, p. 224-244.
- [98] RICS. RICS BIM survey results. The Royal Institute of Chartered Surveyors, 2013.

- [99]** BECERIK-GERBER, Burcin; KENSEK, Karen. Building information modeling in architecture, engineering, and construction: emerging research directions and trends. En: Journal of Professional Issues in Engineering Education & Practice – ASCE. Diciembre, 2009, vol. 136, p. 139-147.
- [100]** LEVITT, Raymond. CEM research for the next 50 years: maximizing economic environmental, and societal value of the built environment. En: Journal of Construction Engineering and Management – ASCE. Septiembre, 2007, p. 619-628.
- [101]** DU, Jing; LIU, Rui y ISSA, Raja. BIM cloud score: benchmarking BIM performance. En: Journal of Construction Engineering and Management – ASCE. Diciembre, 2014, vol. 140, p. 1-13.
- [102]** LU, Weisheng; FUNG, Ada; PENG, Yi; LIANG, Cong y ROWLINSON. Demystifying construction project time-effort distribution curves: BIM and non-BIM comparison. En: Journal of Management in Engineering – ASCE. Marzo, 2015, p. 1-8.
- [103]** SACKS, Rafael y BARAK, Ronen. Teaching building information modeling as an integral part of freshman year civil engineering education. En: Journal of Professional Issues in Engineering Education & Practice – ASCE. Marzo, 2009, vol. 136, p. 30-38.

- [104] KASSEM, Mohamad y SUCCAR Bilal. Macro-BIM adoption: Conceptual structures. En: Automation in Construction. Mayo, 2015, vol. 57, p. 64-79.
- [105] McGraw-Hill-Construction. The business value of BIM Europe. Smart Market Report. 2010.
- [106] McGraw-Hill-Construction. The business value of BIM in North America. Smart Market Report. 2007-2012.
- [107] McGraw-Hill-Construction. The business value of BIM Australia and New Zealand. Smart Market Report. 2014.
- [108] CASEY, M. Work in progress: how building information modeling may unify IT in the civil engineering curriculum. En: IEEE Frontiers in Education Conference - Computer Society. 2008, p. 1-8.
- [109] BERWALD, Sarah. From CAD to BIM: The experience of architectural education with building information modeling. En: Architectural Engineering Conference (AEI) – ASCE. Septiembre, 2008, p.1-5.
- [110] MANNING, Russell y MESSNER, John. Case studies in BIM implementation for programming of healthcare facilities. En: Journal of Information Technology in Construction (ITcon), 2008, vol. 13, p. 246-257.

- [111] ARAYICI, Y. y TAH, J. Towards building information modeling for existing structures. En: Journal Structural Survey. Enero, 2008, vol. 26, p. 210-222.
- [112] SINGH, Vishal; GU, Ning y WANG, Xiangyu. A theoretical framework of a BIM-based multidisciplinary collaboration platform. En: Automation in Construction. Noviembre, 2010, vol. 20, p.134-144.
- [113] WANG, Wei-Chih; WENG, Shao-Wei; WANG, Shih-Hsu y CHEN, Cheng-Yi. Integrating building information models with construction process simulations for project scheduling support. En: Automation in Construction. Noviembre, 2013, vol. 37, p. 68-80.
- [114] KOO, Bonsang y FISCHER, Martin. Feasibility study of 4D CAD in commercial construction. En: CIFE, Center for Integrated Facility Engineering, Stanford University. Agosto, 1998.
- [115] MAHALINGAM, Ashwin; KASHYAP, Rahul y MAHAJAN, Charudatta. An evaluation of the applicability of 4D CAD on construction projects. En: Automation in Construction. Enero, 2010, vol. 19, p. 148-159.
- [116] FISHER, Martin; HAYMAKER, Jhon y LISTON, Kathleen. Benefits of 3D and 4D models for facility managers and AEC service providers. En: Swets & Zeitlinger B. V. 2003, p. 1-30.

- [117] MIKULAKOVA, Eva; KÖNIG, Markus; TAUSCHER, Eike; BEUCKE, Karl. Knowledge-based schedule generation and evaluation. En: Advanced Engineering Informatics. Agosto, 2010, vol. 24, p. 389-403.
- [118] MALLASI, Zaki. Dynamic quantification and analysis of the construction workspace congestion utilising 4D visualisation. En: Automation in Construction. Enero, 2006, vol. 15, p. 640-655.
- [119] WANG, H.J; ZHANG, J.P; CHAU, K.W y ANSON, M. 4D dynamic management for construction planning and resource utilization. En: Automation in Construction. Enero, 2004, vol. 13, p. 575-589.
- [120] ARACIL, Javier y GORDILLO, Francisco. Dinámica de sistemas. Madrid, España. Alianza Editorial Textos, 1978.
- [121] Universidad Nacional Abierta y a Distancia. Dinamica de sistemas [online]. Colombia. [Citado 11 mar. 2015]. Disponible en: http://datateca.unad.edu.co/contenidos/301126/301126/leccin_17_diagramas_de_forrester.html.
- [122] BUNGE, Mario. La ciencia. Su método y la filosofía. Foundations & Philosophy of Science Unit. McGill University. Montreal, Quebec, Canada. 1994.

- [123] ASHLEY, David; UEHARA, Kazuyoshi y ROBINSON Burke. Critical decision during construction. En: Journal of Construction Engineering and Management – ASCE. Marzo, 1982, vol. 109, p. 146-162.
- [124] MEJÍA, Guillermo y HERNÁNDEZ, Triny. Seguimiento de la productividad en obra: técnicas de medición de rendimientos de mano de obra. En: Revista Gerencia Tecnológica Informática – GTI. Diciembre, 2007, vol. 6, p. 35-59.
- [125] POLANCO, Lina Marithza. Análisis de rendimientos de mano de obra para actividades de construcción. Trabajo de grado del pregrado en Ingeniería Civil. Bucaramanga. Universidad Pontificia Bolivariana. Escuela de Ingenierías y Administración. Facultad de Ingeniería Civil, 2009.
- [126] MINISTERIO DE TRABAJO DE COLOMBIA. Calculadora Laboral del Ministerio de Trabajo. [Citado 10 de junio de 2014]. Disponible en: <http://www.mintrabajo.gov.co/calculadora-laboral.html>.
- [127] REVISTA DINERO. Calculadora de salarios por profesión para graduados 2001-2011. [Citado 10 de junio de 2014]. Disponible en: <http://www.finanzaspersonales.com.co/calculadoras/articulo/salarios-profesion-para-graduados/45541>.
- [128] PORRAS, Hernán; SANCHEZ, Omar y GALVIS, José. Filosofía Lean Construction para la gestión de proyectos de construcción: una revisión actual. En: Revista Avances, Investigación en Ingeniería. Junio, 2014, vol. 11, p. 33-53.

- [129] LUCKO, Gunnar. Construction spatial modeling and scheduling with three-dimensional singularity functions. En: Automation in Construction. Julio, 2014, vol. 43, p. 132-143.
- [130] NEPAL, M; STAUD FRENCH, S; ZHANG, J; LAWRENCE, M y PORTTINGER. Deriving construction features from an IFC model. En: Deriving construction features from an IFC model, proceedings of the CSSE – Annual conference. 2008.
- [131] KANGARY, Roozbeh. Business failure in construction industry. En: Journal of Construction Engineering and Management – ASCE. Junio, 1988, vol. 114, p. 172-190.
- [132] TANKARD, Colin. Big data security. En: Network Security. Julio, 2012, vol. 2 p. 1-7.
- [133] CHENG, Jack y MA, Lauren. RFID Supported cooperation for construction waste management. En: CEVE'11 proceedings of the 8th international conference on cooperative desing, visualization and engineering. 2011, p. 125-128.
- [134] COSTIN, Aaron; PRADHANANGA, Nipesh y TEIZER, Jochen. Leveraging passive RFID technology for construction resource field mobility and status

monitoring in high-rise renovation project. En: Automation in Construction. Marzo, 2011, vol. 24, p. 1-15.

- [135]** BECERIK-GERBER, y LI, Nan. Assessment of a smart phone-based indoor localization solution for improving context awareness in the construction industry. En: Computing in Civil Engineering – ASCE. 2012, p. 561-568.