

Mejoramiento de Procesos Constructivos de una Edificación a Partir de Simulación Digital y Videos Time Lapse

Juan Diego Echeverry Hoyos

María Ximena Giraldo Palma

Director de Trabajo de Grado: Adriana Gómez Cabrera

Co-Director Trabajo de Grado: Arq. Andrés Rubio Jiménez

Maestría en Ingeniería Civil

Pontificia Universidad Javeriana

Bogotá D.C.

Abril de 2012

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	9
1.1	PROBLEMA.....	10
1.2	JUSTIFICACIÓN	11
1.3	OBJETIVOS	11
1.3.1	OBJETIVO GENERAL	11
1.3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
1.4	ALCANCE Y DELIMITACIÓN	12
2.	MARCO CONCEPTUAL	13
2.1	PRODUCTIVIDAD.....	13
2.1.1	PRINCIPIOS LEAN CONSTRUCTION.....	14
2.1.2	CLASIFICACIÓN DE TRABAJOS EN CONSTRUCCIÓN.....	16
2.2	SIMULACIÓN	16
2.2.1	PASOS PARA UN MODELO DE SIMULACIÓN	16
2.2.2	VENTAJAS DE REALIZAR PROCESOS DE SIMULACIÓN	17
2.3	TIME-LAPSE.....	18
2.4	DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD	19
3.	MARCO DE REFERENCIA	20
3.1	SÍNTESIS	30
3.2	ANÁLISIS DE IMPACTO	31
3.2.1	BASE DE DATOS SCOPUS.....	31
3.2.2	BASE DE DATOS ISI WEB OF SCIENCE.....	32
4.	CARACTERÍSTICAS DE LA OBRA.....	33
5.	METODOLOGÍA	37
5.1	CARACTERIZACIÓN DE PROCESOS CONSTRUCTIVOS	37
5.2	SIMULACIÓN DE PROCESOS CONSTRUCTIVOS	39
5.3	PROPUESTAS DE MEJORAMIENTO.....	40
6.	TRABAJO DE CAMPO	41
6.1	MONTAJE DE DEL SISTEMA DE TOMA DE IMÁGENES	41

6.2	CÁMARA 1	43
6.3	CÁMARA 2	44
6.4	FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA	45
6.4.1	UNIDAD CENTRAL DE CONTROL, CONEXIÓN A INTERNET Y RED WI-FI.....	46
6.4.2	TOMA DE IMÁGENES	46
6.4.3	COMPUTADOR DE ALMACENAMIENTO	48
6.4.4	INCONVENIENTES ENCONTRADOS	48
7.	RESULTADOS OBTENIDOS	50
7.1	IDENTIFICACIÓN FLUJO DE TRABAJO	50
7.1.1	CONSTRUCCIÓN DE COLUMNAS.....	52
7.1.2	ARMADO DE PARALES, CERCHAS, CAMILLAS Y AMARRE DE ACERO.....	53
7.1.3	CONCRETO VIGAS	54
	COLOCACIÓN DE LÁMINAS DE METALDECK	54
7.1.4	54
7.1.5	VACIADO DE RECUBRIMIENTO	55
	CRONOGRAMA DE TRABAJO	56
7.1.6	56
7.2	IDENTIFICACIÓN ACTIVIDADES PRODUCTIVAS, CONTRIBUTIVAS Y NO CONTRIBUTIVAS	57
7.2.1	COLUMNAS	57
7.2.2	INSTALACIÓN CAMA Y AMARRE DE ACERO	58
7.2.3	CONCRETO DE VIGAS.....	59
7.2.4	COLOCACIÓN LÁMINAS METALDECK.....	59
7.2.5	VACIADO RECUBRIMIENTO:.....	60
7.3	PROBLEMAS ENCONTRADOS EN OBRA Y POSIBILIDADES DE MEJORA	61
7.3.1	FORMALETA VIGAS	61
7.3.2	ESTADO DE LAS CAMILLAS	63
7.3.3	RETIRO DE FORMALETA DE VIGAS	64
7.3.4	CONSTRUCCIÓN DE CIMENTACIÓN ZONA 3	65
7.3.5	CORTE DE LÁMINAS DE METALDECK	66
7.3.6	TRANSPORTE DE BLOQUES DE MAMPOSTERÍA EN CARRETA CONVENCIONAL	67
7.4	MEDICIÓN DE TIEMPOS DE ACTIVIDADES	68
7.4.1	MEDICIONES 5 MINUTOS.....	68
7.5	MEDICIÓN DE DURACIÓN DE ACTIVIDADES	74
7.5.1	DISTRIBUCIÓN DE RECURSOS	75
7.5.2	TIEMPOS ACTIVIDADES.....	76
7.5.3	CONSIDERACIONES MEDICIONES DE TIEMPOS.....	106
7.6	MODELO SIMULACIÓN	106
7.6.1	FUNCIONAMIENTO MODELO DE SIMULACIÓN	107
7.6.2	VERIFICACIÓN	114
7.6.3	VALIDACIÓN.....	117
7.7	RESULTADOS DEL MODELO	118
7.7.1	DURACIÓN TOTAL.....	118
7.7.2	PORCENTAJES DE USO	119

7.8	ASPECTOS DE MEJORA IDENTIFICADOS A PARTIR DE LA SIMULACIÓN	119
7.9	NUEVOS ESCENARIOS DE MODELACIÓN	120
7.10	RESULTADOS NUEVOS ESCENARIOS	121
7.10.1	ESCENARIO 1 - MODIFICACIÓN CUADRILLA PARALES-CAMILLAS.....	121
7.10.2	ESCENARIO 2 - MODIFICACIÓN CUADRILLA COLUMNAS	122
7.10.3	ESCENARIO 3 - MODIFICACIÓN CUADRILLA HERREROS	123
7.10.4	ESCENARIO 4 - MODIFICACIÓN CUADRILLA VIGAS	124
7.10.5	ESCENARIO 5 - MODIFICACIÓN TODAS LAS CUADRILLAS.....	124
7.10.6	ESCENARIO 6 - MODIFICACIÓN CANTIDAD DE FORMALETAS	126
7.10.7	ESCENARIO 7 - MODIFICACIÓN ESTRATEGIA DE 3 A 6 ZONAS	126
7.10.8	ESCENARIO 8 - MODIFICACIÓN RECURSOS POR OPTQUEST	127
7.10.9	ESCENARIO 9 - MODIFICACIÓN DISPONIBILIDAD DE RECURSOS POR BALANCEO DE CUADRILLAS	129
7.10.10	ESCENARIO 10 - COMBINACIÓN ESCENARIOS 7 Y 5	131
7.10.11	ESCENARIO 11 - COMBINACIÓN ESCENARIOS 7 Y 8.....	132
7.10.12	COMBINACIÓN ESCENARIOS 7 Y 9	133
7.10.13	COMPARACIÓN RESULTADOS	134
8.	DISCUSIÓN.....	137
9.	RECOMENDACIONES	139
10.	CONCLUSIONES.....	141
11.	BIBLIOGRAFÍA	143
12.	ANEXOS	145
13.	GLOSARIO.....	146

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Pasos para la creación de un modelo de Simulación, Fuente: Banks (2000)	17
Figura 2, 3, 4. Montaje de la videocámara en la construcción. Fuente: Céspedes, 2010	20
Figura 5. Distribución de trabajo por secciones. Fuente: Céspedes (2010)	21
Figura 6. Inicio de Proceso Constructivo en Arena. Fuente: Gómez (2009)	23
Figura 7. Distribución de tiempos de trabajo en Bogotá. Fuente: Núñez (2006)	27
Figura 8. Publicaciones por año base de datos SCOPUS	31
Figura 9. Publicaciones por país base de datos SCOPUS	31
Figura 10. Publicaciones por año base de datos ISI Web of Science	32
Figura 11. Publicaciones por país base de datos ISI Web of Science	32
Figura 12. Vista de la obra a estudiar en su etapa inicial	33
Figura 13. Plano general del Layout de obra	35
Figura 14. Etapas de la ejecución del proyecto	37
Figura 15. Actividades a caracterizar mediante simulación digital	39
Figura 16. Vista Cámara 1	41
Figura 17. Vista Cámara 2	42
Figura 18. Áreas cubiertas por las cámaras 1 y 2	42
Figura 19. Montaje cámara 1	43
Figura 20. Montaje cámara 2	44
Figura 21. Dispositivos instalados	45
Figura 22. Vista página HTML de control	46
Figura 23. Panel fotovoltaico	47
Figura 24. Vista Servidor Eye-Fi	47
Figura 25. Router y computador industrial	48
Figura 26. Distribución de zonas de trabajo	50
Figura 27. Esquema de trabajo	51
Figura 28. Actividades a realizar para cada zona	52
Figura 29 y 30. Construcción de columnas	52
Figura 31. Fraguado de columnas	53
Figura 32. Armado de camas y amarre de acero	53
Figura 33 y 34. Formaleta y fraguado de vigas	54
Figura 35 y 36. Disposición y corte de metaldeck	55
Figura 37. Placa de entepiso	55
Figura 38. Cronograma de trabajo en obra	56
Figura 39. Cronograma de trabajo en obra Torre 1	56
Figura 40 y 41. Formaleta para vaciado de vigas en concreto	61
Figura 42. Puntales en madera para sostener formaleta	62
Figura 43. Corte de elementos en madera para la formaleta	62
Figura 44 y 45. Estado de las camillas en madera	63
Figura 46. Camillas reparadas	63
Figura 47. Camillas en mal estado	64
Figura 48. Retiro de formaleta	65
Figura 49. Diferencia en avance de Zona 3 comparado con Zona 1 y 2	65
Figura 50 y 51. Viga reforzada para la construcción de las columnas posteriores	66
Figura 52 y 53. Caseta y zona de disposición de láminas de metaldeck cortadas	67
Figura 54. Herramienta de movimiento de bloques de mampostería	67
Figura 55. Video 5 minutos – Colocación formaleta vigas	68
Figura 56. Formato prueba de los 5 min	69
Figura 57. Resultados mediciones Vigas	70
Figura 58. Resultados mediciones columnas	71
Figura 59. Resultados mediciones Placa	72
Figura 60. Clasificación de TP, TC y TNC en construcción de vigas	73
Figura 61. Clasificación de TP, TC y TNC en construcción de columnas	74
Figura 62. Clasificación de TP, TC y TNC en construcción de placa	74

LISTA DE FIGURAS

Figura 63. Fotografía 11-FEB-12. Sección de Fotografía de Armado de Columnas	76
Figura 64. Representación grafica distribución de probabilidad Input Analyzer	78
Figura 65. Fotografía 11-FEB-12. Sección de Fotografía Armado Formaletas Columnas	78
Figura 66. Fotografía 09-NOV-11. Sección de Fotografía concreto columnas	80
Figura 67. Fotografía 14-FEB-12. Sección de Fotografía Retiro Formaleta Columnas	81
Figura 68. Fotografía 15-FEB-12. Sección de Fotografía Instalación de parales y cerchas	83
Figura 69. Fotografías 15-FEB-12. Sección de Fotografía Instalación de Camillas	84
Figura 70. Fotografías 17-FEB-12. Sección de Fotografía amarre de Vigas	86
Figura 71. Fotografía 18-FEB-12. Sección de Fotografía Formaleta Vigas	87
Figura 72. Fotografía 18-FEB-12. Sección de Fotografía Concreto Vigas	89
Figura 73. Fotografía 01-MAR-12. Sección de Fotografía Retiro Formaleta Vigas	90
Figura 74. Fotografía 20-FEB-12. Sección de Fotografía Disposición láminas metaldeck	92
Figura 75. Fotografía 20-FEB-12. Sección de Fotografía Disposición malla y vaciado recubrimiento	93
Figura 76. Fotografía 29-SEP-11. Sección de Fotografía amarre ascensor	95
Figura 77. Fotografía 14-FEB-12. Sección de formaleta ascensor	96
Figura 78. Fotografía 15-FEB-12. Sección de Concreto Ascensor	98
Figura 79. Fotografía 03-OCT-11. Sección de retiro formaleta ascensor	99
Figura 80. Fotografía 15-FEB-12. Sección de Amarre Escalera	101
Figura 81. Fotografía 17-FEB-12. Sección de Formaleta Escalera	102
Figura 82. Fotografía 04-OCT-11. Sección de concreto escalera	104
Figura 83. Fotografía 18-FEB-12. Sección de Retiro Formaleta Escalera	105
Figura 84. Partes del modelo	107
Figura 85. Control de ingreso de entidades	108
Figura 86. Identificación de entidades	109
Figura 87. Construcción elementos verticales	109
Figura 88. Parales / Cerchas / Camillas	111
Figura 89. Construcción vigas	111
Figura 90. Disposición de láminas de metaldeck y vaciado de recubrimiento	112
Figura 91. Recirculación de entidades	113
Figura 92. Animación del modelo de simulación	114
Figura 93. Nueva distribución de áreas de trabajo	121
Figura 94. Cantidad de recursos vs. Simulación	128
Figura 95. Ahorro Escenarios Teóricos en tiempo	135
Figura 96. Ahorro económico Escenarios Teóricos	136

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Distribuciones de probabilidad	19
Tabla 2. Duración por secciones. Fuente: Céspedes (2010)	21
Tabla 3. Redistribución de Mano de Obra. Fuente: Céspedes (2010)	22
Tabla 4. Resultados para Escenarios establecidos. Fuente: Gómez (2009)	24
Tabla 5. Características de proyectos observados. Fuente: Nuñez (2006)	25
Tabla 6. Desempeño de tiempo trabajado en estudios anteriores. Fuente: Nuñez (2006)	26
Tabla 7. Distribución de tiempo trabajado en Bogotá. Fuente: Nuñez (2006)	27
Tabla 8. Equipo/ Hardware	38
Tabla 9. Recursos requeridos por actividad para cada unidad constructiva	75
Tabla 10. Recursos disponibles	76
Tabla 11. Mediciones amarre de columnas	77
Tabla 12. Mediciones de instalación de formaleta de columnas	79
Tabla 13. Mediciones de concreto de columnas	80
Tabla 14. Mediciones retiro formaleta de columnas	82
Tabla 15. Mediciones instalación de parales y cerchas	83
Tabla 16. Mediciones instalación de camillas	85
Tabla 17. Mediciones amarre de vigas	86
Tabla 18. Mediciones instalación formaleta de vigas	87
Tabla 19. Mediciones concreto de vigas	89
Tabla 20. Mediciones retiro formaleta de vigas	91
Tabla 21. Mediciones disposición láminas de metaldeck	92
Tabla 22. Mediciones disposición de malla y vaciado de recubrimiento	94
Tabla 23. Mediciones amarre ascensor	95
Tabla 24. Mediciones instalación de formaleta ascensor	97
Tabla 25. Mediciones concreto ascensor	98
Tabla 26. Mediciones retiro formaleta ascensor	100
Tabla 27. Mediciones amarre escalera	101
Tabla 28. Mediciones instalación formaleta escalera	103
Tabla 29. Mediciones instalación de formaleta	104
Tabla 30. Mediciones retiro formaleta escalera	106
Tabla 31. Fecha de finalización primeras 10 replicaciones	116
Tabla 32. Resultado replicaciones semilla	117
Tabla 33. Iteraciones para calcular cantidad de replicaciones	118
Tabla 34. Resultados de duración total	118
Tabla 35. Resultados de porcentaje de uso de los recursos	119
Tabla 36. Resultados Escenario 1	121
Tabla 37. Comparación económica Escenario 1	122
Tabla 38. Costo unitario ítems representativos	122
Tabla 39. Resultados Escenario 2	123
Tabla 40. Comparación económica Escenario 2	123
Tabla 41. Resultados Escenario 3	123
Tabla 42. Comparación económica Escenario 3	124
Tabla 43. Resultados Escenario 4	124
Tabla 44. Comparación económica Escenario 4	124
Tabla 45. Resultados Escenario 5	125
Tabla 46. Comparación económica Escenario 5	125
Tabla 47. Resultados Escenario 6	126
Tabla 48. Comparación económica Escenario 6	126
Tabla 49. Resultados Escenario 7	126
Tabla 50. Comparación económica Escenario 7	127
Tabla 51. Resultados Escenario 8	128
Tabla 52. Comparación económica Escenario 8	129

LISTA DE TABLAS

Tabla 53. Personal propuesto Escenario 9	129
Tabla 54. Resultados Escenario 9	130
Tabla 55. Comparación económica Escenario 9	131
Tabla 56. Resultados Escenario 10	131
Tabla 57. Comparación económica Escenario 10	132
Tabla 58. Resultados Escenario 11	132
Tabla 59. Comparación económica Escenario 11	132
Tabla 60. Resultados Escenario 12	133
Tabla 61. Comparación económica Escenario 12	134
Tabla 62. Tabla comparativa Escenarios estudiados	135

1. INTRODUCCIÓN

La construcción, particularmente en Colombia, ha sido considerada una actividad en la que poco se puede implementar mejoras en cuanto a productividad y demás filosofías provenientes de la ingeniería industrial y la producción en serie. Algunas de las razones son que cada proyecto es único, temporal, incierto y afectado por el ambiente (Céspedes, 2010). Sin embargo, desde un punto de vista más general, se puede observar que la actividad de la construcción está compuesta por actividades de producción en serie repetitivas, de productos pequeños pero en grandes cantidades, y de ciclos cortos pero de alta repetitividad.

En aras de buscar mejorar la productividad en la construcción, se propuso la filosofía *Lean Construction* (Koskela, 1992), que tiene sus fundamentos en dar prioridad a las actividades que agregan valor al producto sobre las que no, y por otro lado en pasar a un enfoque más general, no sólo estudiando actividades de producción, sino todos los procesos involucrados a la empresa o proyecto.

En el presente trabajo se presenta como se realizó la implementación de la filosofía *Lean Construction* y la simulación de procesos en un proyecto de construcción, utilizando cámaras fotográficas para realizar videos *Time Lapse* para identificar tiempos de ciclo, materiales y la forma de circulación de los agentes involucrados. Se analizaron los tiempos observados en los videos y se obtuvo una recopilación de datos para realizar la simulación en el software Arena y determinar algunos de los factores de falla del proyecto. Finalmente, buscando mejorar la productividad, se establecieron nuevos escenarios teóricos como el cambio de estrategia, el aumento o disminución de equipos y personal, los cuales fueron simulados obteniendo ahorros en tiempo y costos.

A continuación, se describe el proceso del montaje de las cámaras en el proyecto con su funcionamiento, la construcción de videos *Time Lapse* y la medición de tiempo y rendimientos. Posteriormente, se presenta la identificación del flujo de trabajo de los procesos ejecutados en el proyecto, la clasificación de los tiempos de dichos procesos según el valor que agrega al proyecto, los problemas encontrados en las actividades ejecutadas y las posibilidades de mejora para éstos. Finalmente, se describe el modelo de simulación en el software Arena y los resultados que permiten proponer nuevos escenarios de trabajo con el fin de disminuir tiempos de ejecución, costos y pérdidas en dicho proyecto.

1.1 PROBLEMA

La industria de la construcción presenta grandes deficiencias tanto en productividad como en seguridad (Alarcón et al, 2008), porque a diferencia de los demás procesos industriales, la construcción es una industria en la que difícilmente se han involucrado las herramientas para mejorar rendimientos, eficiencias y tiempos de ejecución.

Esto se debe principalmente a que (Botero, 2004):

- La productividad es media a baja, mientras que en los procesos industriales la cantidad de productos desarrollados es alto.
- Los productos son únicos e irrepetibles, a comparación de la producción en masa y cíclica de los procesos industriales
- El riesgo es alto por las utilidades marginales, gran rotación de empresa y muy poca elasticidad en el sector. En otro tipo de industrias el riesgo es menor pues se tiene gran variedad de productos y en mercados alternativos
- El control de tiempos de entrega es complicado por la magnitud del producto, por esta razón es común el incumplimiento de plazos y presupuestos.
- El ciclo del producto es muy largo, en la industria el ciclo es corto.

Esta coyuntura hace que se debe contar con un método de análisis con herramientas y estrategias únicos (Céspedes, 2010).

En el caso específico de Colombia, mediante un estudio de CAMACOL y el Consejo Privado de Competitividad, se ha llegado a establecer que específicamente en las obras estudiadas , el porcentaje de trabajo que resulta no contributivo en obra es del 40%, cuando en países como Chile es de 21%, Estados Unidos 15%, y se tiene un promedio internacional del 32%. Siendo entre las actividades que requieren mejoría la implementación de capacitación en mano de obra no calificada (CAMACOL, Consejo Privado de Competitividad, 2007).

En países como Chile, la construcción es el sector económico nacional con la tasa más baja de crecimiento durante los últimos 15 años debido a que, entre otros motivos, no hay información para realizar análisis adecuados para la toma de decisiones. La aplicación de tecnologías de información para facilitar la captura de datos esenciales para el análisis de procesos presenta importantes oportunidades tanto en mejoramiento de seguridad como en productividad (Alarcón et al, 2008).

De esta forma, de acuerdo con las cifras de productividad en la construcción, se han estudiado metodologías enfocadas a medir rendimientos de una manera efectiva que puedan ofrecer herramientas que hagan más sencilla la toma de decisiones, mitigando riesgos o disminuyendo tiempos de ejecución.

Time Lapse, es una metodología en la que se realizan capturas de imagen en lapsos muy cortos de tiempo, que permite tener una visión general del proyecto para la medición de rendimientos en obra o simplemente para la observación de la forma como se lleva a cabo la circulación de los recursos. En la investigación se propone la caracterización de los procesos constructivos de un estudio de caso en particular, mediante el análisis de videos *Time Lapse*, para que en complemento con auscultación en obra, se realice la simulación de escenarios teóricos que brinden conclusiones enfocadas al mejoramiento de los procesos constructivos.

1.2 JUSTIFICACIÓN

Debido a la necesidad que presentan los proyectos de construcción para tener un seguimiento en tiempo real de las actividades, los materiales, el personal y demás recursos, se decidió implementar la metodología de videos *Time Lapse* en una obra específica.

En Colombia, los indicadores de productividad en actividades constructivas son sólo calculados con fines de investigación, principalmente por universidades, porque no se tienen métodos establecidos que no afecten de manera importante los recursos a invertir en personal o el mismo presupuesto del proyecto. Es aquí donde se obtiene la diferencia al implementar la herramienta de las cámaras fotográficas y la construcción de videos *Time Lapse*.

Con la ayuda de las herramientas de video y el software de simulación se pretende medir los tiempos de duración de las actividades, determinar la cantidad óptima de personal a utilizar en cada actividad e identificar los factores de pérdidas relevantes. Al identificar estos aspectos se realiza un análisis de los resultados de la simulación obtenida para establecer propuestas teóricas y satisfacer los objetivos de aumentar la productividad del personal, reducir los costos y reducir los tiempos de ejecución del proyecto.

Todo este desarrollo tiene la finalidad de aportar una herramienta de control al constructor que le permita reducir los costos que acarrea la realización de un proyecto y adicional a esto, al implementar la filosofía *Lean Construction*, se pueden obtener mejores rendimientos, según Céspedes (2010), o la disminución del tiempo de construcción de la estructura, según Gómez (2009).

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

- Establecer propuestas de mejoramiento, de acuerdo a la filosofía *Lean Construction*, con la realización de un modelo de simulación digital, para el proceso constructivo de la edificación a estudiar.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Caracterizar los procesos constructivos de la etapa de estructura que representen alto impacto en el presupuesto de la edificación a estudiar por medio de la toma de imágenes detalladas de los procedimientos.
2. Realizar la simulación de los procesos constructivos caracterizados durante la etapa inicial del proyecto.
3. Establecer propuestas de mejoramiento a partir de la metodología *Lean Construction* simulando nuevos escenarios para los procesos constructivos.

1.4 ALCANCE Y DELIMITACIÓN

Este proyecto se desarrolló en una construcción ubicada en la ciudad de Bogotá, en la cual se implementó un módulo programable para captura de imágenes digitales que permitieron la recopilación de información en tiempo real de los procesos directamente involucrados en el desarrollo del proyecto. Esta recopilación de información, necesaria para el desarrollo de la investigación, se realizó inicialmente en las etapas de cimentación y estructura.

Realizando una simulación en el software Arena, con base en los datos obtenidos en obra, se obtiene la modelación de los aspectos involucrados en los procesos constructivos que se desarrollan en el proyecto. Es importante tener en cuenta que durante la simulación, se realizan tantas corridas del modelo de Arena como sea necesario para considerar válido y estadísticamente adecuado el estudio. Posteriormente, se establecen las propuestas teóricas, que de acuerdo a las simulaciones, ofrecen oportunidades de mejora en ahorro de recursos o simplemente en la disminución de pérdidas.

Los resultados obtenidos pueden ser utilizados por empresas constructoras para la planeación de un proyecto de manera que se implemente la filosofía de construcción sin pérdidas, y se puedan conceptualizar proyectos con mejores procedimientos de conversión y evitando sobrecostos en flujos.

2. MARCO CONCEPTUAL

2.1 PRODUCTIVIDAD

Para estudiar la construcción como un sistema productivo es importante entender que la productividad es la relación entre la cantidad producida y los recursos humanos para realizar un trabajo específico (Céspedes, 2010). Después de varias investigaciones se pudo encontrar que hay tres clases de productividad en la construcción (Botero, 2004):

- Productividad de los materiales: Evitar desperdicios.
- Productividad de la mano de Obra: Es el recurso que fija el ritmo de trabajo de la construcción
- Productividad de la Maquinaria: Es importante su planeación por los altos costos de funcionamiento

En la búsqueda de entender la productividad en la construcción, es también importante conocer la nueva filosofía de producción, *Lean Production*, propuesta por Koskela (1992).

La nueva filosofía de producción nace en Japón hacia los años 1950, con la aplicación de los métodos de fabricación de Toyota basados en la eliminación de inventarios, reducción de lotes de producción, disminución de tiempos de instalación, automatización de procesos, cooperación con proveedores, entre otras técnicas. Conceptos que a su vez fueron perfeccionadas por ingenieros industriales por medio de prueba y error, conduciendo a que en los años noventa se propusiera la nueva filosofía de producción, a la que inicialmente se llamo Manufactura de Clase Mundial, Producción sin pérdidas, o Nuevo Sistema de Producción (Koskela, 1992)

Esta nueva filosofía de producción tiene sus bases en dos conceptos, el **JIT** (*Just in Time*) y el **TQC** (*Total Quality Control*).

El concepto **JIT** (*Just in Time*) se basa en la eliminación o reducción de inventarios, contando con disponibilidad de aquello que se utilizará a corto plazo. Su implementación se logra con reducción de lotes de acopio, reconfiguración del *Layout* de trabajo, cooperación con proveedores y reducción de tiempos de instalación. El control de la producción se basa más en la demanda real que planes basados en pronósticos.

Por otro lado, el **TQC** (*Time Quality Control*) tiene sus fundamentos en enfocar la visión de la producción desde un punto más general, es decir, pasar de establecer métodos de control del área de producción en específico, a todos los departamentos de la empresa; además de pasar de los trabajadores a la gerencia, y expandir el control de la calidad a la totalidad de la organización. El control, por su parte, pasa de estar centrado en el control estadístico y de muestreos, a inspecciones enfocadas al mejoramiento continuo.

Se denomina conversiones a todas las actividades de transformación que convierten los materiales y la información en productos pensando en los requerimientos del cliente. Y pérdidas, por el contrario se consideran todas las actividades que no agregan valor, pero que consumen tiempo, recursos y espacio, generando costos en el proceso de producción (actividades de flujo) (Botero-Álvarez, 2003).

En razón a que todas las actividades consumen recursos, ya sea en tiempo o costos, pero sólo la conversión agrega valor al producto, se deben implementar acciones que lleven a desaparecer o disminuir los flujos.

2.1.1 PRINCIPIOS LEAN CONSTRUCTION

Los principales aspectos a tener en cuenta para obtener mejorías en los procesos, de acuerdo a la filosofía *Lean Construction* (Koskela, 1992), son:

- **REDUCIR ACTIVIDADES QUE NO GENERAN VALOR AL PRODUCTO**

Como se mencionó, las conversiones son aquellas que generan valor al producto y los flujos aquellos que no lo hacen, por tanto, pueden considerarse como pérdidas. Los flujos son actividades que nacen en las organizaciones jerárquicas, donde los procesos son llevados a cabo por diferentes personas, por este motivo pueden surgir cambios que generen pérdidas o re-procesos. Entre las principales pérdidas se encuentran las inspecciones, movimientos, transportes, esperas, etc.

El primer principio establece por tanto, que estos flujos deben disminuir o desaparecer, teniendo también en cuenta que no se deben tratar indiscriminadamente, pues actividades como la planeación no generan valor agregado como tal, pero si tiene un valor para clientes internos.

- **INCREMENTAR VALOR AL PRODUCTO**

Este principio establece que se deben tener muy claras las necesidades y requerimientos del cliente, buscando siempre la completa satisfacción del mismo.

- **REDUCIR LA VARIABILIDAD**

Se busca reducir la variabilidad principalmente para satisfacción del cliente en cuanto a la uniformidad de los productos. Además, la variabilidad produce más actividades que no generan valor, y por tanto, se hace menos productivo el proceso de producción.

- **REDUCIR TIEMPOS DE CICLO**

Reducir tiempos de ciclo tiene mucha relación con el primer principio porque establece que se deben establecer tendencias a desaparecer todos los flujos, buscando hacer que el ciclo se comprima y se consuman menos recursos. Al implementar la reducción de tiempo de ciclo se obtiene también menor tiempo de entregas a los clientes, le desestimación de la necesidad de realizar pronósticos, y se consigue facilitar el proceso de gestión de la producción.

- **SIMPLIFICAR PROCESOS**

Básicamente, como su nombre lo dice, consiste en buscar hacer más sencillo el procedimiento, ya sea por medio de reducir los pasos de un proceso o disminuir el número de componentes de un producto.

- **INCREMENTAR FLEXIBILIDAD**

El incremento en la flexibilidad en la producción se puede lograr por medio de la implementación de la simplificación de la instalación de los productos o simplemente por medio de capacitación.

- **TRANSPARENCIA**

Al incentivar la transparencia se da al cliente una mayor participación en el proyecto, permitiéndole estar más enterado de los procedimientos y del estado actual de la producción.

- **ENFOQUE A TODO EL PROCESO**

Como se mencionó, se basa en pasar de realizar el control a la producción exclusivamente, a mirar la empresa como un todo, teniendo en cuenta todos los procesos involucrados.

- **MEJORAMIENTO CONTINUO**

Buscando siempre revisar y evaluar la forma como se llevan a cabo los procesos, identificando continuamente oportunidades de mejora y su implementación para hacer más productivos los procesos.

- **BALANCE POSITIVO ENTRE MEJORAMIENTO EN FLUJOS Y EN CONVERSIONES**

El balance se realiza mediante la comparación entre las mejoras realizadas en los procesos de conversión y los flujos. Teniendo en cuenta que para optimizar, la tendencia debe ser a mejorar más en los flujos porque su mejoría no requiere tanta inversión como si sucede con las conversiones.

- **REFERENCIACIÓN**

Finalmente, es importante siempre estar al tanto de la forma como se están llevando a cabo los procedimientos en la competencia o en organizaciones afines, buscando encontrar oportunidades de mejora.

2.1.2 CLASIFICACIÓN DE TRABAJOS EN CONSTRUCCIÓN

Una forma sencilla de identificar pérdidas para buscar aspectos de mejora es el muestreo del desempeño del sistema. Una herramienta es la realización de numerosas observaciones cortas de la labor de los operarios en su sitio de trabajo y se categoriza en tres grupos principales. Las categorías son Trabajo Productivo (TP), Trabajo Contributivo (TC) y Trabajo No Contributivo (TNC) (Botero-Álvarez, 2003).

Las definiciones detalladas se encuentran en el Glosario (Ver Capítulo 13).

2.2 SIMULACIÓN

La simulación es un gran conjunto de métodos y aplicaciones que busca imitar el comportamiento de sistemas reales (Kelton et al, 2008). También se define como la imitación de la operación de un proceso real o sistema a través del tiempo (Banks, 2000).

La simulación es una metodología indispensable para la solución de problemas reales y se usa para describir y analizar comportamientos de un sistema, responder incógnitas del tipo “Que pasa si” y para establecer criterios para diseñar procesos reales (Banks, 2000).

Los principales conceptos que se deben tener en cuenta se encuentran en el Glosario (Ver Capítulo 13)

2.2.1 PASOS PARA UN MODELO DE SIMULACIÓN

Los pasos para llevar a cabo un adecuado modelo de simulación se presentan en la Figura 1. Sus principales etapas son la formulación del problema, establecimiento de objetivos, conceptualización del modelo, recolección de información, verificación y validación.

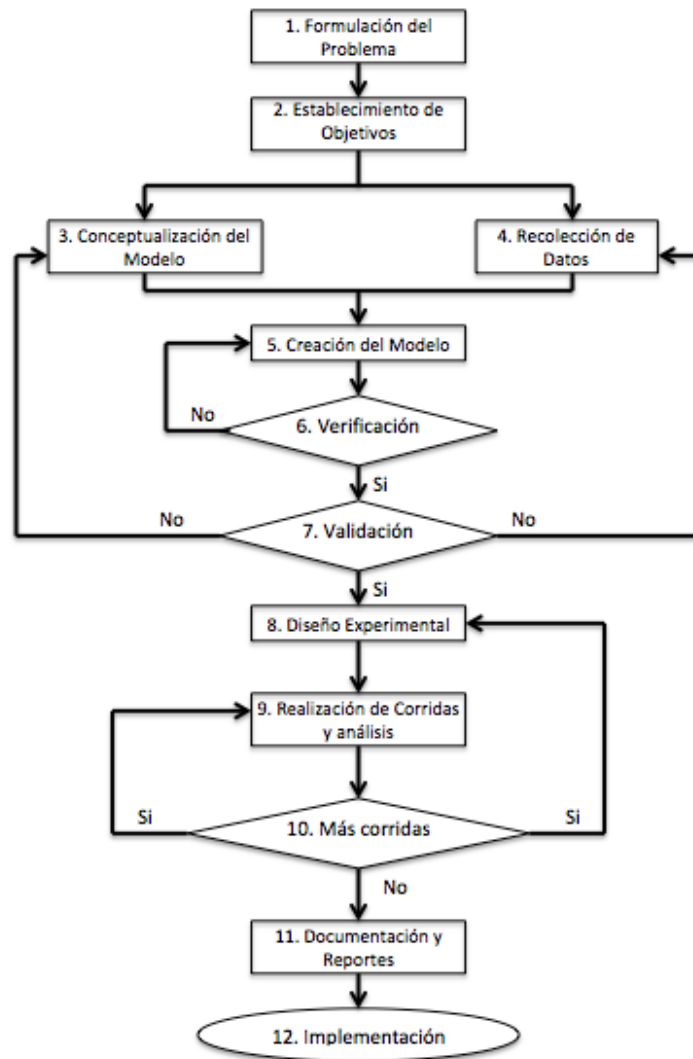


Figura 1. Pasos para la creación de un modelo de Simulación, Fuente: Banks (2000)

2.2.2 VENTAJAS DE REALIZAR PROCESOS DE SIMULACIÓN

Las principales ventajas de la realización de simulación son (Banks, 2000):

- Permite evaluar todos los aspectos para la toma de decisiones en cambios o adiciones que se deseen implementar en un sistema.
- Puede presentar un proceso o fenómeno en la escala de tiempo que se requiera, obteniendo información más o menos detallada según las necesidades.
- Su análisis permite entender el porqué de algunas situaciones.

- Al tener un modelo válido de simulación, se pueden explorar diferentes posibilidades en cuanto al comportamiento de un sistema
- Permite diagnosticar problemas presentes en los procesos de producción
- Identifica restricciones o cuellos de botella en un proceso
- Permite visualizar el plan de trabajo
- Ofrece un punto de vista objetivo para la presentación de cambios
- Prepara a los procesos para cambios
- Resulta una inversión baja con relación a los costos de implementación de los cambios
- Se puede utilizar para la obtención específica de requerimientos en un sistema

2.3 TIME-LAPSE

Este método se basa en hacer un seguimiento en intervalos de tiempo muy cortos (menores al minuto), a todos los agentes que se ven involucrados en el proceso (Céspedes, 2010). Este seguimiento se puede hacer por medio de cámaras fotográficas o videocámaras. Por medio de los videos se puede analizar un proceso en su totalidad y se pueden reconocer las principales actividades, movimientos, ejercicios, etc.

En la construcción, este tipo de videos se puede utilizar para hacer un análisis de productividad por medio de la medición de tiempos, movimientos, utilización de recursos, distribución de cuadrillas, seguridad industrial o prevención de riesgos.

El *Time Lapse* se origina cuando el arquitecto y cineasta Peter Greenaway en el año 1986 documenta la historia de dos hermanos que observan los distintos grados de descomposición de la materia, mediante la toma de fotografías, las cuales posteriormente se montaban en una película continua. Finalmente se concluye que a raíz de la velocidad de los procesos involucrados no es posible conocerlos o hacerles un seguimiento, y mediante esta técnica de toma de imágenes denominada *Time Lapse* era posible reconstruir dichos procesos (Vostok, 2012).

En sus inicios esta técnica fue empleada en el ámbito de la ciencia, como fue utilizada por los hermanos de la película de Greenaway. Este sistema de toma de imágenes busca hacer un seguimiento a aquellos procesos que debido a su velocidad escapan al rango de percepción del ser humano. En los años ochenta cuando esta técnica fue adoptada por cineastas no interesados en el registro con fines científicos, realizaron el registro de los entornos a los cuales pertenecen la arquitectura y la construcción de ciudades (Vostok, 2012).

Oglesby, Parker, & Howell (1989) aplican la el sistema *Time Lapse*, demostrando que para mejorar la productividad es importante realizar muestreos, observando y clasificando el trabajo de un pequeño porcentaje de los trabajadores de una obra para obtener una representación de todos los obreros. Los resultados de esta metodología dan bases para emitir juicios acerca de problemas

de productividad, porque permiten tomar conciencia de cómo se distribuyen las tareas o las actividades a realizar dentro de un proyecto de construcción (Mora, 2009).

2.4 DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD

Las distribuciones de probabilidad pueden ser discretas cuando resultan de una serie de datos y la variable aleatoria se asocia con cierta probabilidad; o continuas cuando son el resultado de mediciones y no se puede expresar en forma tabular (Canavos, 1988). En Arena, las distribuciones pueden ser de dos tipos: Teóricas y empíricas. Las teóricas generan muestras con base en la formulación matemática y las empíricas dividen los datos reales en grupos y calculan los valores para cada uno (Kelton *et al*, 2008).

Las distribuciones de probabilidad son en este caso parte fundamental para el proceso de simulación de los procesos debido a que permitirán la obtención de las duraciones de las actividades mediante la generación de una variable aleatoria. En la Tabla 1 se presentan las distribuciones de probabilidad que se utilizan y sus parámetros (Kelton *et al*, 2008).

Tabla 1. Distribuciones de probabilidad

DISTRIBUCIÓN	PARÁMETROS
BETA	BETA, ALFA
ERLANG	EXPOMEDIA, K
EXPONENCIAL	MEDIA
GAMMA	BETA, ALFA
LOGNORMAL	LOG MEDIA, LOG DESV. ESTÁNDAR
NORMAL	MEDIA, DESV. ESTÁNDAR
TRIANGULAR	MÍNIMO, MODA, MÁXIMO
UNIFORME	MÍNIMO, MÁXIMO
WEIBULL	BETA, ALFA

3. MARCO DE REFERENCIA

La simulación de procesos constructivos es un tema últimamente estudiado debido a los requerimientos de la industria de mejorar su productividad y conseguir ahorro de recursos. Algunos de los estudios documentados fueron:

Céspedes (2010) realizó un estudio en el que por medio de auscultación en obra y análisis de videos *Time Lapse*, se obtuvieron los rendimientos relativos a actividades principalmente de construcción de muros estructurales de concreto y mampostería. El análisis se llevó a cabo para la construcción del proyecto La Reserva de la empresa CONFAPI. La edificación se construyó en el norte de Bogotá, consta de 9 torres de apartamentos entre 70 y 88 m², 2 torres tienen 9 pisos y las restantes 18.

El sistema estructural de los edificios está compuesto por pantallas de concreto reforzado de formaleta mano portable. El concreto de los muros se fabricó en sitio con una planta mezcladora y el concreto de las placas fue comprado y recibido directamente de una empresa concretera.

La toma de información que se llevó a cabo mediante videos *Time Lapse* se realizó con una videocámara de disco duro integrado que permitía grabación de 20 horas de trabajo en formato de baja resolución.

El montaje de la videocámara se presenta en las Figuras 2, 3 y 4.



Figura 2, 3, 4. Montaje de la videocámara en la construcción. Fuente: Céspedes, 2010

Las grabaciones se realizaron exclusivamente para la etapa de estructura, y llevaron a cabo la semana del 28 de septiembre al 3 de octubre de 2009, en jornadas de 6 am a 6 pm.

Se dividió el trabajo por secciones para la construcción de los muros de acuerdo al esquema de trabajo presentado en la Figura 5:

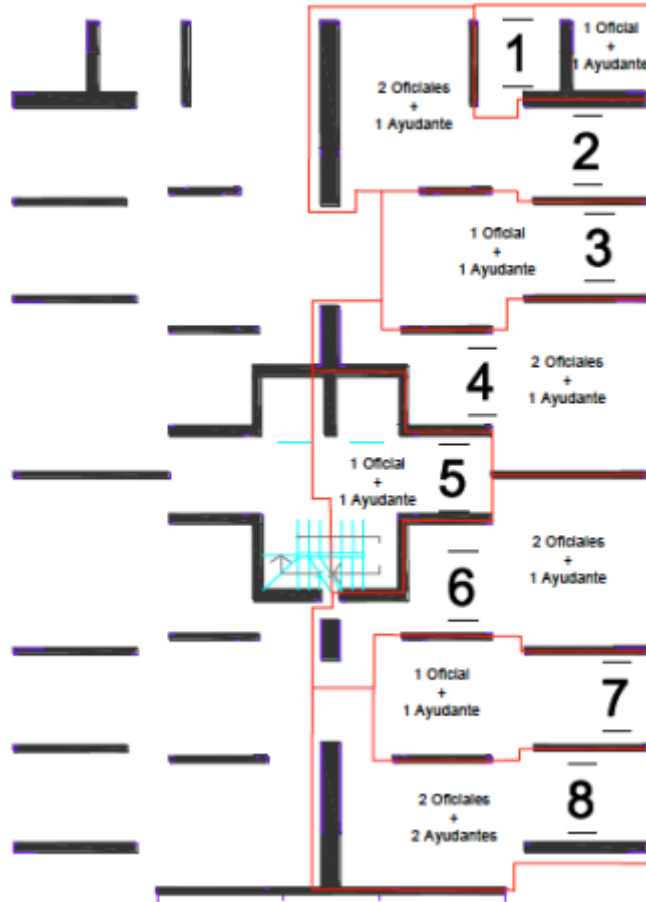


Figura 5. Distribución de trabajo por secciones. Fuente: Céspedes (2010)

Al realizar la modelación en el software Arena, se obtuvieron las siguientes duraciones presentadas en la Tabla 2, para cada sección y su respectiva comparación con el tiempo real.

Tabla 2. Duración por secciones. Fuente: Céspedes (2010)

SECCIÓN	DURACIÓN REAL PROMEDIO	DURACIÓN MODELO (50 CORRIDAS)	ERROR
Sección 1	3,5333	3,5322	0,03%
Sección 2	3,4667	3,4832	0,47%
Sección 3	4,45	4,4288	0,48%

Sección 4	4,2167	4,1784	0,92%
Sección 5	5,2167	5,1486	1,32%
Sección 6	4,5667	4,5726	0,13%
Sección 7	4,05	3,9936	1,41%
Sección 8	4,45	4,3848	1,49%

Finalmente, conociendo el sistema general de trabajo, se establecieron aspectos que pueden generar mejoras en los procesos constructivos, entre los principales se encuentran:

- Ubicar centros de acopio más cercanos a puntos de transporte
- Cambiar los vehículos en que se transporta el material
- Revisar proceso de cortado de unidades de mampostería

Para la etapa de estructura específicamente, se propuso:

- Garantizar la terminación de actividades del día anterior. Principalmente por que se presentaron atraso para la iniciación de actividades el día siguiente.
- Mejorar la forma de entrega y revisión de los muros terminados, porque no se contaba con suficiente personal de revisión para proceder a la fundición de los elementos
- Establecer una secuencia fija y repetitiva para las actividades
- Mejorar logística de materiales
- Adquisición de un segundo juego de corbatas para la construcción de los muros
- Adquisición de baldes y rodillos con líquidos desencofrantes
- Puntualidad

Las posibilidades de mejoramiento de rendimientos para este estudio se proponen desde el punto de vista de hacer más eficiente el trabajo en las secciones. Por tanto, en la Tabla 3, se propone la siguiente distribución de personal para cada una de las secciones:

Tabla 3. Redistribución de Mano de Obra. Fuente: Céspedes (2010)

SECCIÓN	DISTRIBUCIÓN ORIGINAL	REDISTRIBUCIÓN PROPUESTA
Sección 1	1 Oficial + 1 Ayudante	1 Oficial + 1 Ayudante
Sección 2	2 Oficial + 1 Ayudante	2 Oficial + 1 Ayudante
Sección 3	1 Oficial + 1 Ayudante	2 Oficial + 1 Ayudante
Sección 4	2 Oficial + 1 Ayudante	2 Oficial + 2 Ayudante
Sección 5	1 Oficial + 1 Ayudante	2 Oficial + 1 Ayudante
Sección 6	2 Oficial + 1 Ayudante	1 Oficial + 1 Ayudante
Sección 7	1 Oficial + 1 Ayudante	1 Oficial + 1 Ayudante
Sección 8	2 Oficial + 2 Ayudante	1 Oficial + 1 Ayudante

Y de esta forma, el proceso se demoraría 15 minutos menos, el apartamento 1 casi 35 minutos menos que el modelo original, y se obtendría una disminución en las actividades diarias en aproximadamente 1 hora.

Gómez (2009) propone un estudio en el que, por medio de medición en campo de una obra en particular, se obtienen las diferentes características de rendimiento y productividad de procesos constructivos para realizar un modelo de simulación digital. En este caso se realiza el estudio para la construcción de un establecimiento comercial tipo bodega. El local está compuesto por un piso y un mezzanine, con un área aproximada de 600 m². La estructura se construyó en concreto reforzado apoyada sobre zapatas aisladas y vigas de amarre.

Con los resultados obtenidos se definieron los histogramas de comportamiento de los datos de duraciones y se establecieron las distribuciones probabilísticas a las que cada actividad se adaptó. Los cálculos se realizaron con la herramienta Input Analyzer de Arena – Rockwell Software, la cual calcula también las pruebas Chi-cuadrado y Kolmogorov-Smirnov, y se seleccionaron distribuciones triangulares, uniformes, normales y exponenciales.

Se conceptualizó el proceso constructivo y se desarrolló un modelo en el software de simulación digital Arena de acuerdo a las distribuciones de probabilidad obtenidas para cada actividad y se simularon las actividades de construcción de zapatas, pedestales, vigas de amarre, columnas primer piso, placa de entrepiso y columnas del mezzanine. Una sección del modelo de simulación se presenta en la .

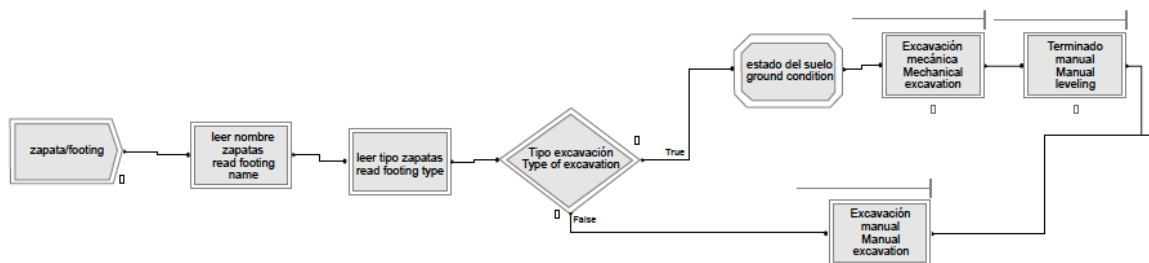


Figura 6. Inicio de Proceso Constructivo en Arena. Fuente: Gómez (2009)

El modelo se verificó de acuerdo con las duraciones y rendimientos reales en obra y se validó estadísticamente con la metodología de intervalos de confianza, en la que se calcula el número de replicaciones necesarias para que la confiabilidad sea del 95%.

Para analizar las diferentes oportunidades de mejora en el proceso constructivo se propusieron los siguientes escenarios:

- **Escenario 1:** Materiales siempre disponibles, poniendo la materia prime siempre disponible desde el primer día de la construcción.

- **Escenario 2:** Excavación mecánica de suelo no saturado, suprimiendo la excavación manual del proceso y excavando siempre suelo no saturado.
- **Escenario 3:** Excavación mecánica de suelo saturado.
- **Escenario 4:** Excavación Manual, suprimiendo la excavación mecánica manteniendo las condiciones del suelo que se presentaron en el proyecto.
- **Escenario 5:** Inicio más temprano de las zapatas del mezzanine.
- **Escenario 6:** Inicio de construcción de 4 zapatas diarias
- **Escenario 7:** Combinación de escenarios 5 y 6.
- **Escenario 8:** Combinación de Escenarios 1 y 5.
- **Escenario 9:** Combinación de Escenarios 1, 5 y 6.
- **Escenario 10, 11, 12:** Aumentando la cantidad de personal involucrado a 25 ayudantes y 10 oficiales, 20 ayudantes y a 15 oficiales, y 40 ayudantes y 20 oficiales, respectivamente.
- **Escenario 13:** Combinación Escenarios 8 y 11.
- **Escenario 14:** Combinación Escenarios 8 y 12.

En la Tabla 4, se presentan los resultados de las duraciones mínimas, máximas y promedio obtenidas.

Tabla 4. Resultados para Escenarios establecidos. Fuente: Gómez (2009)

No.	ESCENARIO	VALOR MÍNIMO (Días)	VALOR MÁXIMO (Días)	PROMEDIO (Días)	DISMINUCIÓN (Días)
0	Original	49,61	51,22	50,19	-
1	Materiales siempre Disponibles	43,08	49,54	46,88	3,62
2	Excavación mecánica suelo No Saturado	49,57	51,56	50,17	0,33
3	Excavación Mecánica Suelo Saturado	49,74	51,89	50,34	0,16
4	Excavación Manual	49,65	51,69	50,26	0,24
5	Inicio Zapatas Zona Mezzanine	47,62	50,77	48,39	2,11
6	Inicio 4 Zapatas por día	49,69	51,83	50,43	0,07
7	Inicio 4 Zapatas por día + Inicio Zona Mezzanine	47,83	51,18	49,05	1,45
8	Materiales Siempre Disponibles + Inicio Zona Mezzanine	33,93	39,61	35,68	14,82
9	Inicio 4 Zapatas por día + Materiales Siempre Disponibles + Inicio Zona Mezzanine	32,87	39,39	36,12	14,38
10	Aumento Recurso Humano (25 Ay - 15 Of)	46,36	47,41	46,76	3,74
11	Aumento Recurso Humano (30 Ay - 15 Of)	45,99	46,73	46,28	4,22
12	Aumento Recurso Humano (40 Ay - 20 Of)	45,94	46,68	46,21	4,29
13	Materiales Siempre Disponibles + Inicio Zona Mezzanine + Aumento Recurso Humano (30 Ay - 15 Of)	30,44	33,07	31,78	18,72
14	Materiales Siempre Disponibles + Inicio Zona Mezzanine + Aumento Recurso Humano (40 Ay - 20 Of)	30,37	32,79	31,56	18,94

De la Tabla 4 se puede observar que para un escenario ideal se pueden obtener hasta 19 días de disminución en el tiempo de ejecución del proyecto, cosa que entre otras ventajas, representa ahorros considerables de los costos indirectos de un proyecto.

Núñez (2006) pretende aportar estrategias mediante un sistema de referencia a empresas constructoras de la ciudad de Bogotá, utilizando los principios de filosofía de construcción sin pérdidas, evaluando la utilización del tiempo e identificando las principales causas de pérdidas de éste en actividades no contributivas o que no generan valor en proyectos de construcción inmobiliaria. Su objetivo principal es lograr una cultura de medición y control de pérdidas buscando una mayor productividad e inversión en las empresas del sector construcción.

Realiza una investigación en la ciudad de Bogotá tomando como referencia los resultados obtenidos de la implementación de la filosofía *Lean Construction* en dos proyectos de investigación. El primero, realizado en Santiago de Chile en el año 1995, fue dirigido por el Ingeniero Luis Fernando Alarcón, quien estudió el proceso de la construcción de 370.000 m². Y por otro lado, en la ciudad de Medellín, la investigación dirigida por Luis Fernando Botero y Martha Eugenia Álvarez, de 9 proyectos y 4 constructoras en el año 2002 con 43.569 m² construidos, y en el año 2003, 17 proyectos de 9 constructoras con 136.572m².

Se documentó y se capacitó a las empresas sobre las observaciones y datos que se pretendía obtener. Se utilizaron los formatos diseñados por Luis Fernando Botero en la investigación “Mejoramiento de la productividad en proyectos de vivienda a través de la filosofía *Lean Construction*” con el fin de crear una cultura a nivel nacional y poder comparar los resultados de la investigación en Bogotá con los obtenidos en la ciudad de Medellín. Se buscó identificar y medir el tiempo productivo, el tiempo contributivo y el tiempo no contributivo; esta información recopilada es de ayuda para identificar las causas del tiempo contributivo y no contributivo, lo cual permite la búsqueda de soluciones para minimizar el tiempo contributivo y eliminar las pérdidas.

Inicialmente se escogieron dos empresas del sector construcción en la ciudad de Bogotá con conocimiento sobre construcción sin pérdidas y que estaban interesadas en aplicar esta filosofía a sus proyectos. Se seleccionaron cuatro proyectos de obras inmobiliarias ubicados en tres diferentes localidades de la ciudad en donde iban a ser utilizados dos sistemas constructivos como lo son la mampostería estructural y el sistema tipo túnel, con un total de 133.700 m² construidos, como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Características de proyectos observados. Fuente: Nuñez (2006)

OBRA	SISTEMA CONSTRUCTIVO	NUMERO DE UNIDADES	ÁREA M ²	TIPO DE OBRA
01	Mampostería Estructural	254 Casas	16.600	Unifamiliar
02	Mampostería Estructural	256 Casas	16.600	Unifamiliar
03	Sistema Tipo Túnel	320 Apto.	46.300	Edificio
04	Sistema Tipo Túnel	360 Apto.	54.200	Edificio

Se definieron las actividades a medir y se identificaron las causas de pérdidas utilizando información de proyectos investigados con anterioridad. Fueron observadas 13 actividades en el desarrollo de la investigación, las cuales fueron:

- Instalación de formaleta
- Armado de Vigas
- Vaciado de Vigas
- Instalaciones Eléctricas
- Instalaciones Hidrosanitarias
- Mampostería
- Pañete
- Armado de Placa
- Vaciado de placa
- Armado de estructura
- Vaciado de estructura
- Excavación manual
- Transporte vertical de Materiales

La recopilación de datos se realizó durante 4 meses y se tomaron 311 mediciones, las cuales fueron distribuidas en tres formatos: un formato de prueba de la ronda, en donde se determinaba el tiempo productivo y el no productivo en la obra; el formato de prueba de los 5 min, para determinar el porcentaje de tiempo empleado por los trabajadores en labores productivas, contributivas y no contributivas; y un tercer formato dirigido a los profesionales encargados del área administrativa de la obra.

Como resultado de la investigación de los 4 proyectos se obtuvo que el máximo valor del tiempo productivo en las obras observadas es 64.25 % y el mínimo 47.18%, con un promedio de 57.4 %; En el tiempo contributivo el máximo valor es 29.23 % y el mínimo 15.33 %, dando un promedio de 21.5 % y en el tiempo no contributivo el máximo tiempo es 23.59%, el mínimo 19.68 % con un promedio de 21.1 %.

Comparando con los resultados obtenidos en Chile y Medellín, se llegó a la conclusión que la utilización del tiempo en la ciudad de Bogotá es bueno, como se muestra en la Tabla 6:

Tabla 6. Desempeño de tiempo trabajado en estudios anteriores. Fuente: Nuñez (2006)

CATEGORÍA	% TP	%TC	%TNC	OBSERVACIONES
Optimo	60	25	15	Chile 1995 370.000 m ²
Normal	55	25	20	Chile 1995 370.000 m ²
Promedio chile	47	28	25	Chile 1995 370.000 m ²

Promedio Medellín 1	49	28	23	Medellín 2002 43.569 m ²
Promedio Medellín 2	47.2	37.5	15.2	Medellín 2003 136.572 m ²
Promedio Bogotá	57.4	21.5	21.1	Bogotá 2005 134.000 m ²

Se realizó un comparativo de los resultados obtenidos en las 4 obras de las cuales se observó que la obra 03 y la obra 04 se obtuvo un desempeño considerado como óptimo en la investigación realizada en Chile. Estos resultados se muestran en la Tabla 7 y la Figura 7.

Tabla 7. Distribución de tiempo trabajado en Bogotá. Fuente: Nuñez (2006)

OBRA	% TP	% TC	% TNC
Obra 01	55.68	23.65	20.67
Obra 02	47.18	29.23	23.59
Obra 03	64.25	15.33	20.42
Obra 04	62.69	17.63	19.68
PROMEDIO	57.4	21.5	21.1

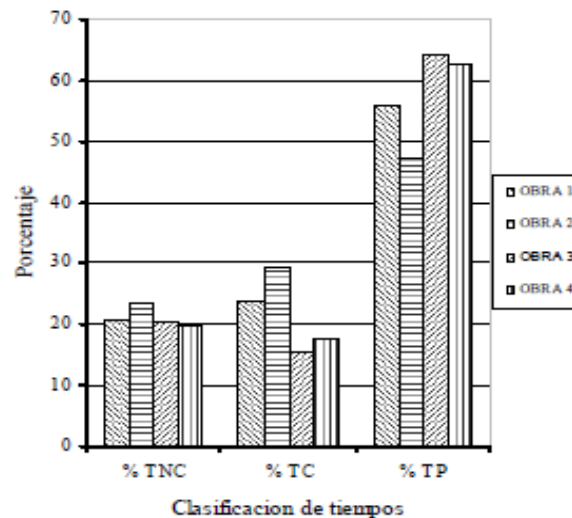


Figura 7. Distribución de tiempos de trabajo en Bogotá. Fuente: Núñez (2006)

Finalmente se identificaron las siguientes causas de pérdidas de tiempo en las obras:

- Tiempo de espera por sobrepoblación y falta de equipo o herramienta.
- Tiempo ocioso por conversaciones.
- Uso del celular y esperas en lugares de descanso.

- Largos recorridos por inadecuada distribución o localización de recursos .
- Largos desplazamientos por pobres condiciones de trabajo.

Las principales causas de presencia de tiempo contributivo son:

- Preparación de mezclas, materiales y superficies.
- Transporte vertical y horizontal de materiales al sitio de trabajo.
- Mediciones o control de alturas.

Se propuso algunas estrategias para minimizar y mitigar las pérdidas de tiempo en obra como:

- Brindar al trabajador los elementos personales de seguridad industrial.
- Debida demarcación de seguridad en la obra, evitando riesgos y accidentes de trabajo.
- Localizar acopio de materiales estratégicamente.
- Programar mantenimientos preventivos de herramientas y equipos utilizados en obra.
- Organizar el tiempo de trabajo y descanso del personal.
- Disponer de personal exclusivo para colaborar con actividades contributivas y organizarlo en la obra según su necesidad.

Pabón (2005) comparó sistemas para la implementación de la tecnología *Time Lapse* buscando definir el más adecuado. En la Universidad de Los Andes inicialmente se implementó un sistema para realizar *Time Lapse* compuesto por una cámara de video análoga *HANDY_CAM Sony*, un dispositivo para generar el *Time Lapse* llamado *D-BOX* y un software para generar la toma y configuración de fotografías del *Time Lapse* llamado *Lane control*. La información obtenida es llevada al *Windows Movie Maker* para crear el video final.

La idea de la investigación es pasar de la tecnología *Time Lapse* de primera generación, a la tecnología de segunda generación o digital. Esta tecnología de segunda generación se basa en el uso de cámaras de video digitales, que permiten mayor resolución de la imagen y mayor capacidad de almacenamiento, así como interacción más fácil con software desarrollado comercialmente. Para este propósito usaron un software que interactúa con la cámara directamente llamado *Xray Vision* que realiza la configuración de la cámara para el proceso de *Time Lapse*, luego de esto, se pasan las imágenes obtenidas a *Windows Movie Maker* y se realiza el video.

Por último se plantea la idea de realizar un sistema de Seguimiento en Tiempo Real de Proyectos o S.T.R.P., el cual se basa en transmitir la información de video obtenida por el sistema *Time Lapse* de segunda generación o digital. Para realizar esto se basaron en la investigación de 3 software comercialmente conocidos, *NET-MEETING* (creado por Microsoft, e incluido gratuitamente en el paquete del sistema operativo Windows), *BROADCAST-TV* (servidor web de tipo público, que permite la transmisión de video en tiempo real gratuitamente) y *WINDOWS MEDIA ENCODER* (desarrollado por Microsoft gratuitamente, con sistema *Streaming* para transmisión de audio y

video en tiempo real). Del análisis de estos tres software se llegó a la conclusión que el que mejores prestaciones presentaba era el *WINDOWS MEDIA ENCODER*, el cual permitía la transmisión de audio y video en tiempo real hasta 100 dispositivos simultáneamente, y con la posibilidad de realizar *buffering*.

Como resultado final se plantea que el mejor paquete de software a utilizar en Colombia, para un sistema S.T.R.P. es *WINDOWS MOVIE MAKER + WINDOWS MEDIA ENCODER + WINDOWS MEDIA PLAYER*.

Córdoba y Delgado (2005) basados en la simulación digital crearon una herramienta computacional denominada SISPLAN el cual permite simular procesos constructivos y determinar cuál sería la más adecuada asignación de recursos en dichos procesos para optimizar la productividad desde el punto de vista de tiempos y costos.

Debido a la necesidad de un sistema de simulación de procesos constructivos flexible y apoyado de una plataforma de fácil uso, se creó SISPLAN. Este sistema permite, por medio de un adecuado análisis de los resultados obtenidos, determinar una combinación óptima de recursos para lograr una mayor productividad a un menor costo.

SISPLAN es una herramienta de simulación digital de procesos constructivos que tiene como finalidad combinar estrategias por eventos, basada en el seguimiento del desarrollo de las actividades ejecutadas que se presentan con tiempos específicos.

Esta herramienta posee un reloj de simulación que controla el tiempo durante el período de ejecución del programa, mediante una variable encargada de llevar el control del tiempo, y un sistema simple de almacenamiento de información permite conocer en qué momento ocurre cada uno de los eventos del proceso.

El reloj avanza por medio de una transferencia de tiempo o actualización del mismo, que se da entre las actividades que terminan en un momento dado y el comienzo de las siguientes. SISPLAN determina la duración de una actividad mediante el uso de cualquiera de las siguientes funciones de probabilidad: Uniforme, Triangular, Normal, Exponencial, Lognormal, Weibull, Erlang, Gamma, Beta.

Se realizó una comparación de resultados de diferentes modelos de procesos constructivos realizados con herramientas como *Microcyclone* y *Stroboscope* con los obtenidos con SISPLAN, mostrando que los valores muy poco; Así que esta herramienta da los mismos beneficios que las que han sido implementadas con anterioridad pero siendo un poco más económica y sencilla de manejar.

3.1 SÍNTESIS

Con el fin de buscar un incremento en la productividad de los procesos en el área de la construcción, es importante hacer un seguimiento a la ejecución de las actividades, teniendo un control de calidad y retroalimentando al personal para mejorar su desempeño en los trabajos realizados. Pabón (2005) investiga una metodología para éste control por medio de una técnica de video denominada *time lapse*; realiza un seguimiento a actividades que pueden ser consideradas como productivas o como tiempo perdido, mediante un montaje con una cámara análoga y otro con una cámara digital; mientras que Céspedes (2010) realiza el control de los procesos constructivos, mediante auscultación visual, registro fotográfico y videos tomados con una cámara ubicada de manera que capturara el proceso a analizar. Finalmente, utilizando la técnica *time lapse* en un programa especializado, realizo la recolección de la información necesaria para realizar la simulación digital de dichos procesos.

Céspedes (2010) mediante la ejecución de videos de las actividades realizadas en el proceso de estructura, identifica la productividad de los procesos constructivos, realizando mediciones de tiempos, movimientos, utilización de recursos y distribución de cuadrillas. Ésta técnica permite repetir los procesos de tal forma que facilita el análisis de los tiempos de ocio y tiempos de productividad. Gómez (2009) por su parte, realiza mediciones utilizando un cronómetro en visitas realizadas a la obra y toma información suministrada por expertos quienes como los tiempos estimados de ejecución para cada actividad. Dichos tiempos son registros del la ejecución de actividades que se considera agregan valor al proyecto, como la construcción de zapatas, vigas y placa de entrepiso. También, Núñez (2006) con el fin de encontrar las causas y proponer soluciones para los tiempos no contributivos en un proyecto, documenta y capacita a empresas que tienen conocimiento y han aplicado la filosofía de la construcción sin perdidas; se realiza un seguimiento a sus proyectos, en donde se identificaban tiempos productivos, contributivos y no contributivos a actividades de construcción.

Realizar una simulación implica formular el problema, construir el modelo, recolectar información o datos, desarrollo del modelo, validación y verificación del modelo y análisis y recomendaciones. Córdoba y Delgado (2005) crean una herramienta de simulación de procesos constructivos llamada SISPLAN, la cual es una herramienta que permite simular eventos discretos; mientras que Céspedes (2010) y Gómez (2009) realizan el modelo de simulación de los procesos constructivos a los cuales se les ha realizado un seguimiento en tiempo real, mediante el software Arena, el cual permite la simulación de eventos que trascurren en un tiempo.

3.2 ANÁLISIS DE IMPACTO

Se realizó el análisis de impacto del tema “Simulación de procesos Constructivos” en las bases de datos SCOPUS y ISI Web of Science, obteniendo las siguientes gráficas en número de publicaciones por año y por ubicación geográfica:

3.2.1 BASE DE DATOS SCOPUS



Figura 8. Publicaciones por año base de datos SCOPUS

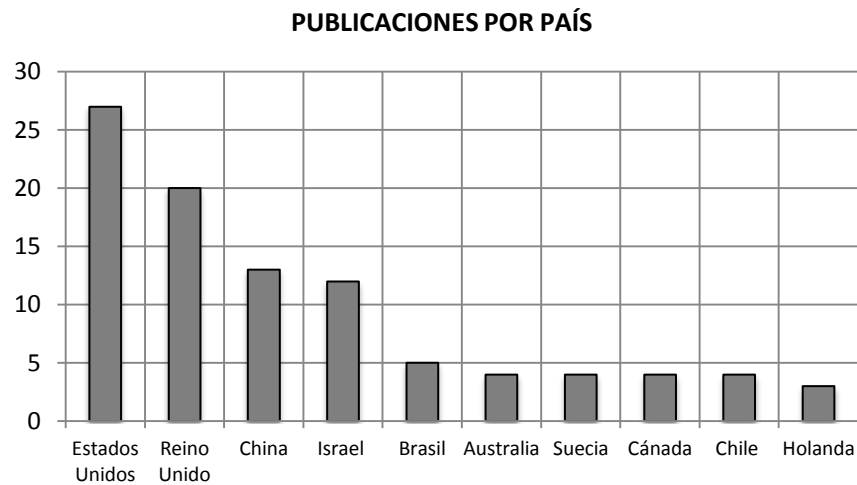


Figura 9. Publicaciones por país base de datos SCOPUS

3.2.2 BASE DE DATOS ISI WEB OF SCIENCE



Figura 10. Publicaciones por año base de datos ISI Web of Science

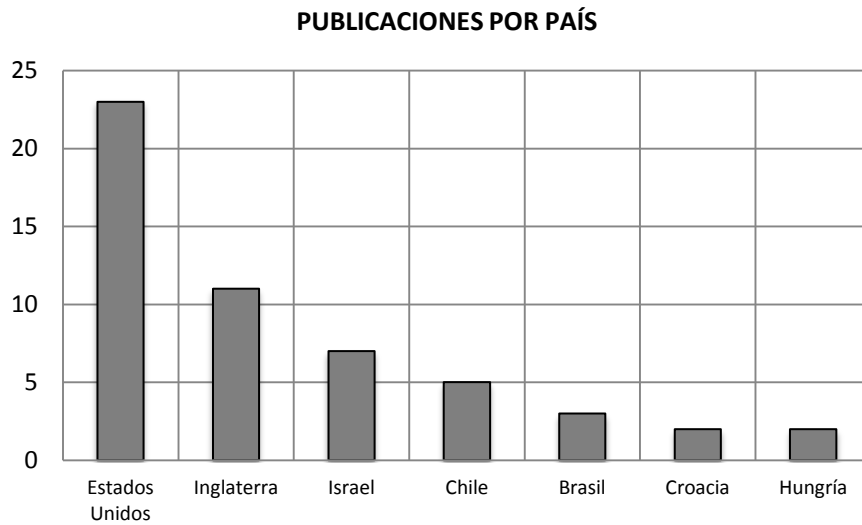


Figura 11. Publicaciones por país base de datos ISI Web of Science

4. CARACTERÍSTICAS DE LA OBRA

El proyecto consiste en un conjunto residencial estrato 6 ubicado en la localidad de Usaquén en la Avenida 19 con Calle 127 en la ciudad de Bogotá. Está conformado por dos torres de 17 pisos con 3 apartamentos cada uno, tres parqueaderos y zonas comunes como parque, juegos infantiles, cancha de squash, piscina, sauna, turco y gimnasio.

La fachada de las torres es en ladrillo a la vista, el urbanismo del conjunto residencial es en adoquín y los apartamentos tienen como acabados pisos laminados, enchapes en cerámica y los muros en las habitaciones, zonas sociales y cocina son pañetados y pintados.

El sistema constructivo elegido para la edificación corresponde al de estructura convencional de pórticos en concreto reforzado combinado con muros pantalla del mismo material; este sistema permite realizar construcciones flexibles debido a que se presentan luces amplias y es posible realizar modificaciones internas en los apartamentos, lo cual es común en edificaciones de estrato alto, mientras que utilizar un sistema industrializado los muros hacen parte de la estructura y no sería posible realizar el tipo de modificaciones mencionadas.

Para el transporte y el bombeo del concreto se emplearon autobombas, bombas estacionarias, torre grúas con baldes, y la propia canal de las mixers para disponer el concreto premezclado. La resistencia de los elementos estructurales de concreto varió de acuerdo a la localización del elemento en la torre, su exposición o requerimientos específicos de la estructura.



Figura 12. Vista de la obra a estudiar en su etapa inicial

La necesidad de implementar varios sistemas de colocación del concreto radica en el alcance del equipo y las condiciones de rendimiento requeridas. El bombeo se realizó para los primeros pisos o para elementos masivos como placas de entrepiso, la torre grúa para los pisos superiores o durante fallas de la bomba estacionaria y la canal de las mixers para la etapa de cimentación.

La cimentación de la torre está compuesta por pilotes pre-excavados, pantallas pre-excavadas perimetrales en concreto y losa de supresión con vigas descolgadas. La excavación de los pilotes se realizó con una almeja, se utilizó lodo bentonítico para garantizar la estabilidad de la excavación y se vació el concreto de la mixer al embudo de la tubería Tremie. Las pantallas perimetrales se construyeron mediante trincheras o ventanas, para garantizar la estabilidad de las construcciones aledañas y la vía. La losa por su parte, se realizó en varias etapas con concreto bombeado.

Durante la cimentación se requirió especial cuidado en el manejo de los taludes y las excavaciones. El ingeniero geotecnista estableció un plan detallado de movimiento de tierras, especificando las zonas a desalojar y su secuencia para no descompensar el suelo. En la época de lluvias se protegieron los taludes ya conformados para evitar movimientos del suelo.

Como se mencionó, la estructura está compuesta por columnas, muros, vigas y su losa aligerada en concreto. En la construcción de las columnas y muros se utilizó formaleta metálica manportable y la placa de entrepiso se aligeró con láminas de metaldeck. El concreto de los elementos fue bombeado o transportado con torre grúa de acuerdo a la altura de los elementos o la disponibilidad y rendimiento de los equipos.

Como estrategia de construcción del proyecto se propuso la subcontratación de las actividades de cimentación, estructura e instalaciones hidrosanitarias y eléctricas. El comité directivo de la obra tuvo las funciones de realizar seguimiento al cronograma y presupuesto de los ejecutores, controlar aspectos relativos a seguridad y personal, y garantizar la adecuada interferencia entre los consultores/diseñadores y los mismos subcontratistas.

El proyecto fue programado para que la construcción de la estructura de la primera torre se iniciara el 7 de octubre de 2011 y finalizara el 23 de abril de 2012. Para la construcción de las torres, se identificaron tres zonas para implementar la especialización de cuadrillas, es decir, para cada actividad se contó con personal seleccionado y capacitado para cumplir específicamente con las actividades asignadas.

Algunas de las facilidades u oportunidades identificadas para la ejecución del proyecto fueron: Compras centralizadas desde la empresa constructora, adquisición de acero figurado, experiencia adecuada de subcontratistas y disponibilidad y la adecuada planeación en la llegada de los materiales.

Por su parte algunos de los inconvenientes identificados fueron: la restricción de horario de trabajo (7:00 am a 7:00 de lunes a viernes y sábado hasta 3:00 pm), problemas de acceso de

materiales por alto tráfico de las vías, limitado espacio para disponer materiales, malas condiciones climáticas y la necesidad de realizar cortes de láminas de metaldeck debido a la configuración de las vigas y viguetas.

Un esquema general de la ubicación del campamento del personal de la constructora, el de los contratista, el casino, los accesos, el patio de acopio de los materiales, entre otros, se evidencia en la Figura 13.

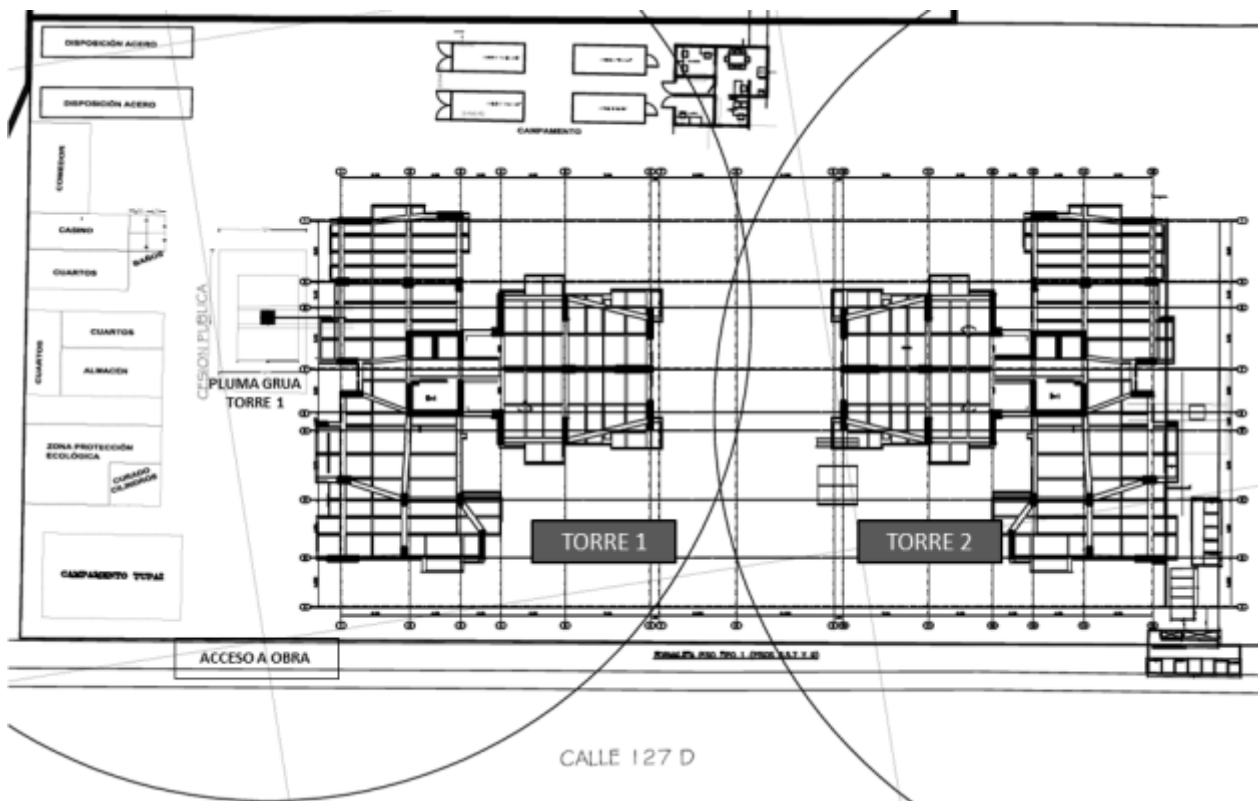


Figura 13. Plano general del Layout de obra

Para la ejecución de la construcción de la torre se planificó inicialmente realizar un estudio de suelos, se define el diseño arquitectónico, estructural, eléctrico e hidrosanitario y se realiza un presupuesto a partir de estos diseños; luego para dar inicio a la obra dejando consignado esto en un acta, se planea realizar un seguimiento al avance de las actividades a partir de la programación estipulada y finalmente a la terminación de cada actividad se entrega un acta con todos los requisitos cumplidos; las tareas o actividades son expuestas tanto al contratista como al maestro encargado de la constructora mediante reuniones o comités de obra.

En la etapa de planeación del proyecto interviene la gerencia de construcciones, la cual es la encargada de la aprobación de diseños, contratos y definición de procesos constructivos, adicionalmente se encarga de las modificaciones técnicas que han de realizarse en el transcurso de la ejecución del proyecto, la aprobación de compras y programar las actividades que sean a largo y mediano plazo en el proyecto.

En obra por parte de la constructora el director de obra es el encargado de hacer cumplir lo programado por la gerencia de construcciones, de aprobar los cortes de los contratistas, los trabajos realizados y de realizar la planeación de la ejecución del proyecto a mediano plazo; el residente de obra y el residente de acabados, quienes realizan la planeación de la ejecución del proyecto a corto plazo, realizan un seguimiento diario a las actividades y a los procesos constructivos que se ejecutan por parte de los contratistas.

5. METODOLOGÍA

Para la realización del trabajo en referencia, se proponen 3 fases de acuerdo a los objetivos específicos propuestos. En la Figura 14 se muestran las etapas mencionadas.

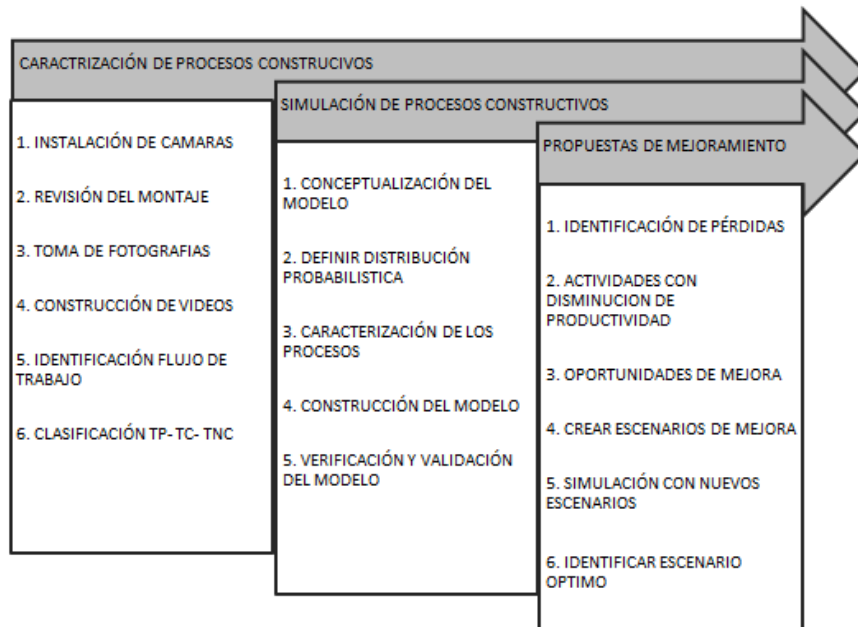


Figura 14. Etapas de la ejecución del proyecto

5.1 CARACTERIZACIÓN DE PROCESOS CONSTRUCTIVOS

Esta primera fase inicia con la instalación del montaje para la toma de fotografías el cual, fue diseñado en el marco del proyecto de investigación “Aplicación de la metodología *Time Lapse* para el mejoramiento de procesos constructivos mediante simulación en el software *Arena*”, financiado por la Vicerrectoría Académica de la Pontificia Universidad Javeriana. Este sistema se caracteriza por poseer cámaras de alta definición y ser de fuente de alimentación solar. (Ver numeral 6.2 Funcionamiento del Sistema).

Los equipos adquiridos para el proyecto se encuentran listados en la Tabla 8.

Tabla 8. Equipo/ Hardware. Fuente: Proyecto de investigación Aplicación de la metodología Time-Lapse para el mejoramiento de procesos constructivos mediante simulación en el software Arena

EQUIPO
1. CÁMARAS DIGITALES
NIKON D3100 14.2MP DIGITAL SLR CAMERA WITH 18-55MM F/3.5-5.6 AF-S DX VR NIKKOR ZOOM LENS
2. ACCESORIOS CÁMARAS
NIKON DR-6, RIGHT ANGLE, SLIP-ON FINDER
EYE-FI CONNECT X2 WIFI 4GB SECURE DIGITAL SDHC MEMORY CARD
SANDISK 8GB SECURE DIGITAL HIGH CAPACITY (SDHC) MEMORY CARD
PRO OPTIC PRO 52MM CIRCULAR POLARIZER (CPL)
NIKON 50MM F/1.2 NIKKOR AI-S MANUAL FOCUS LENS
NIKON CAMERA CONTROL PRO 2
NIKON MC-DC2 REMOTE RELEASE CORD
NIKON EP-5A POWER SUPPLY CONNECTOR
NIKON EH-5A AC ADAPTER
NIKON DG-2 2X EYEPIECE MAGNIFIER FOR NIKON
NIKON DK-22 EYEPIECE ADAPTER FOR NIKON SLR CAMERAS
3. COMPUTADORES
COMPUTADOR DE ESCRITORIO
MINI COMPUTADOR PORTÁTIL: HP MINI 110-3026LA N450
COMPUTADORES INDUSTRIALES - Q-BOX
4. ACCESORIOS MONTAJE
PANEL SOLAR: HQRP 20W Mono-crystalline Solar Panel 20 Watt 12 Volt
GENERADOR DE ENERGÍA EÓLICO: GudCraft CD500 500W Watt 12V

El proceso de caracterización de los procesos constructivos se inicia con la toma de fotografías de prueba y revisión el mecanismo buscando corregir eventuales problemas o inconvenientes. Una vez se encuentre el sistema depurado, se toman las fotografías en la etapa de estructura para la construcción de los videos que permiten ver de una manera adecuada la secuencia de actividades.

Las actividades a caracterizar se presentan en la Figura 15.

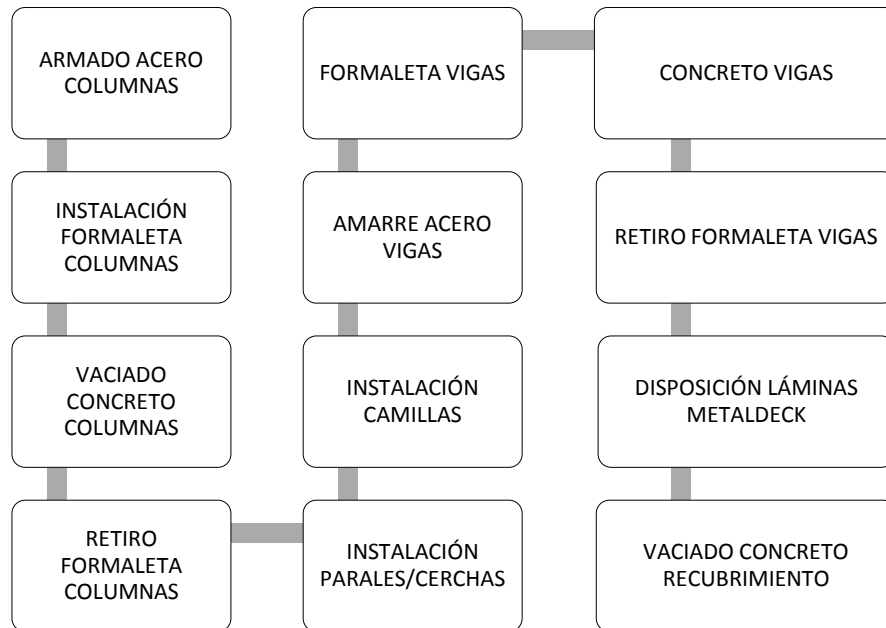


Figura 15. Actividades a caracterizar mediante simulación digital

Al tener las fotografías, se procede con la construcción de los videos *Time Lapse* utilizando como herramienta Windows Movie Maker y iStopMotion (versión gratuita para Macintosh). Con los videos se identifica el flujo de trabajo y se realiza la medición de los rendimientos de todos los agentes involucrados que se simularán en fases posteriores.

Simultáneamente, por medio de auscultación en obra, se identifican las actividades que resultan productivas, contributivas y No contributivas, y se realiza la proporción de tiempo invertido en cada una de ellas. La identificación de estas actividades permitirá establecer propuestas de mejora o escenarios teóricos de simulación para disminuir pérdidas en los trabajos mediante los resultados y la lógica del modelo original. Con estos escenarios teóricos se busca la optimización de los recursos disponibles, ahorros en tiempo de ejecución o de recursos económicos.

5.2 SIMULACIÓN DE PROCESOS CONSTRUCTIVOS

A medida que se construyen los videos *Time Lapse* y se analizan las imágenes digitales, se obtienen las duraciones de las actividades a caracterizar, información útil para la construcción del modelo de simulación digital. Esta base de datos es el punto de partida para el adecuado funcionamiento del modelo porque determina la duración total del proyecto según la simulación digital y el comportamiento probabilístico de las actividades.

Se realiza la conceptualización del modelo en el software Arena, partiendo de las actividades del proceso de construcción que se consideran representativas y el flujo de trabajo previamente identificado mediante los videos. Posteriormente se establecen las actividades predecesoras para cada actividad y se tiene en cuenta el desarrollo de cada uno de los procesos de cada actividad.

Después, mediante la herramienta complementaria del Software Arena denominada Input Analyzer, se obtienen las distribuciones probabilísticas a las que mejor se acomodan las series de datos de las duraciones de cada una de las actividades. Las distribuciones probabilísticas son utilizadas para caracterizar los procesos y la construcción del modelo de simulación digital en el software mencionado.

Finalmente, con el modelo construido, se verifica el sistema, revisando el error obtenido entre la duración original de la construcción y los resultados obtenidos. Adicionalmente se valida el modelo con la revisión de su confiabilidad mediante el cálculo de la cantidad de réplicas que se deben realizar para considerar válido y correcto el modelo.

5.3 PROPUESTAS DE MEJORAMIENTO

Finalmente, con los videos y el modelo de simulación construidos, se establecen las pérdidas importantes y oportunidades de mejora de acuerdo a la filosofía *Lean Construction*, se identifican actividades que representan disminución en rendimientos y productividad, y se establecen oportunidades de mejora para aumentar la proporción de tiempo productivo y disminuir el tiempo no contributivo.

Con los aspectos de mejora y las pérdidas relevantes identificadas, se crean escenarios teóricos que buscan mejorar la productividad, los cuales se simulan en el modelo de Arena previamente validado y verificado. Algunas de las variaciones que se proponen en los escenarios teóricos son la modificación en el orden de ejecución de las actividades, aumento y disminución en el personal involucrado.

Para finalizar el trabajo, se comparan las duraciones y productividades obtenidas estableciendo qué escenario teórico es el más adecuado, y se realiza el análisis de la totalidad de los resultados obtenidos.

6. TRABAJO DE CAMPO

6.1 MONTAJE DE DEL SISTEMA DE TOMA DE IMÁGENES

Inicialmente se realizó la instalación del montaje para la toma de fotografías, diseñado en el marco del proyecto de investigación “Aplicación de la metodología *Time Lapse* para el mejoramiento de procesos constructivos mediante simulación en el software *Arena*”, financiado por la Vicerrectoría Académica de la Pontificia Universidad Javeriana. Mediante este sistema, se buscó caracterizar e identificar la forma como se llevó a cabo la ejecución de la Torre 1 del proyecto en mención.

Se realizaron dos montajes independientes, cada uno ubicado en un lugar estratégico del proyecto con el fin de cubrir en su totalidad el área en construcción de las dos torres de la construcción. En las Figuras 16 y 17 se puede observar el campo visual de las cámaras instaladas.



Figura 16. Vista Cámara 1. Fecha de toma: 04-NOV-2011 12:05 pm



Figura 17. Vista Cámara 2. Fecha de toma: 17-DIC-2011 10:14 am

Un esquema general del área cubierta por cada una de las cámaras se encuentra en la Figura 18.

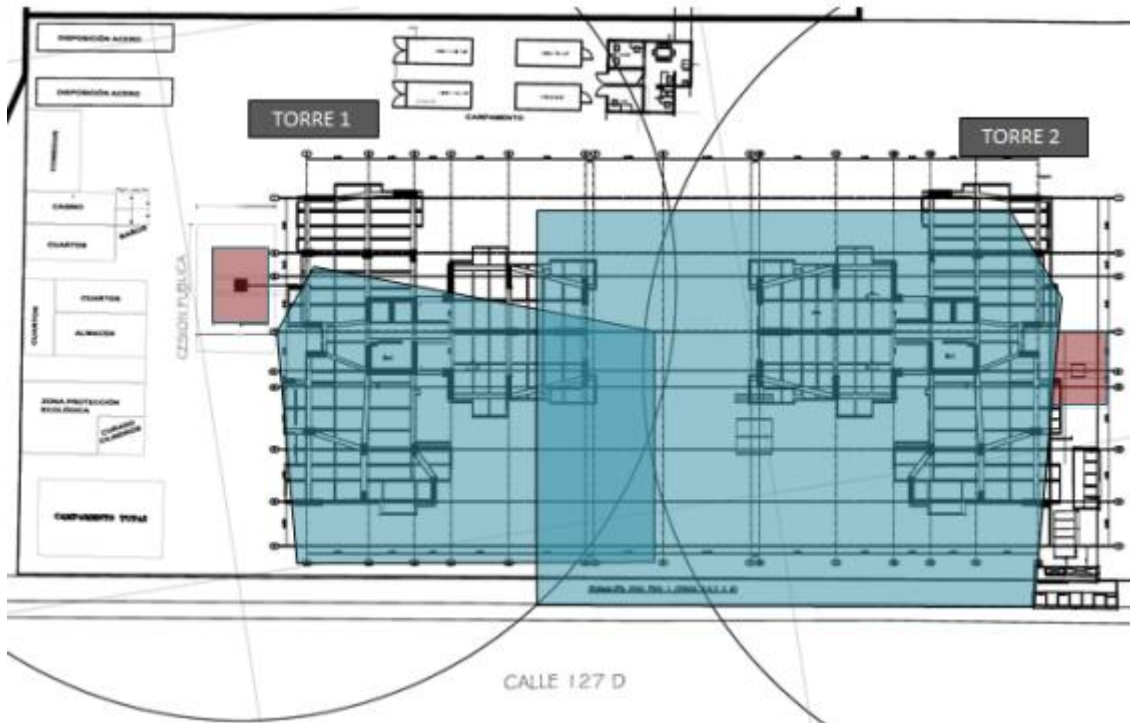


Figura 18. Áreas cubiertas por las cámaras 1 y 2

6.2 CÁMARA 1

El sistema de la cámara 1 se ubicó en la torre grúa con la cual se realizó el traslado de los materiales a utilizar en la construcción de la Torre 1. Se instaló cerca del campamento de la obra y se instaló un computador industrial con el que se realizó el seguimiento y almacenamiento de las fotografías.

En ésta torre grúa también se encuentra instalado el Router para repetir la señal de la red inalámbrica de internet que permitió la transferencia de las imágenes al computador industrial mencionado. En la Figura 19 se presentan fotografías del montaje completo instalado en la torre grúa 1.



Figura 19. Montaje cámara 1

Inicialmente, con el montaje de la cámara 1 se documentó la construcción de la cimentación de la Torre 1 y al finalizar la construcción de la placa de primer piso de la zona 1 de la torre, se cambió el enfoque de la cámara con el fin de abarcar la construcción de los pisos posteriores y las actividades involucradas.

La información obtenida desde la torre grúa 1 fue relevante para el proyecto en el sentido que la simulación digital se enfocó en las actividades realizadas en la torre 1. Con este primer montaje, se midieron los rendimientos de las actividades, se identificaron los recursos involucrados y en general se caracterizaron los procedimientos y actividades de la primera torre del proyecto.

6.3 CÁMARA 2

El segundo montaje consta de dos cámaras, como se visualiza en la Figura 20, y se instaló en la torre grúa ubicada al lado de la sala de ventas. Esta cámara tiene un área de cobertura del proyecto más amplia que la cámara 1, como se visualiza en la Figura 18.

Para el almacenamiento y transferencia de fotografías, se instaló un Access Point en una distancia media entre las torre grúas con el fin de aumentar el alcance de la red y obtener la información almacenada en la computadora 2.



Figura 20. Montaje cámara 2

A mediados de diciembre de 2011 se presentó un problema con la torre grúa 2 y se debió desmontar la estructura. Por este motivo, se decidió instalar el montaje en la Torre grúa 1 con el fin de obtener una mayor área cubierta por las fotografías y un mayor detalle de las actividades estudiadas.

6.4 FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA

Dentro de las cajas instaladas en la zona superior de las torre grúas, a parte de la cámara fotográfica, se encuentra dispuesto un sistema de control inalámbrico con el que se regula la frecuencia de disparo del obturador y se controla, entre otras utilidades, la conectividad a la red y la carga de las baterías.

Un esquema general de la ubicación de los diferentes dispositivos utilizados en el proyecto se encuentra en la Figura 21.

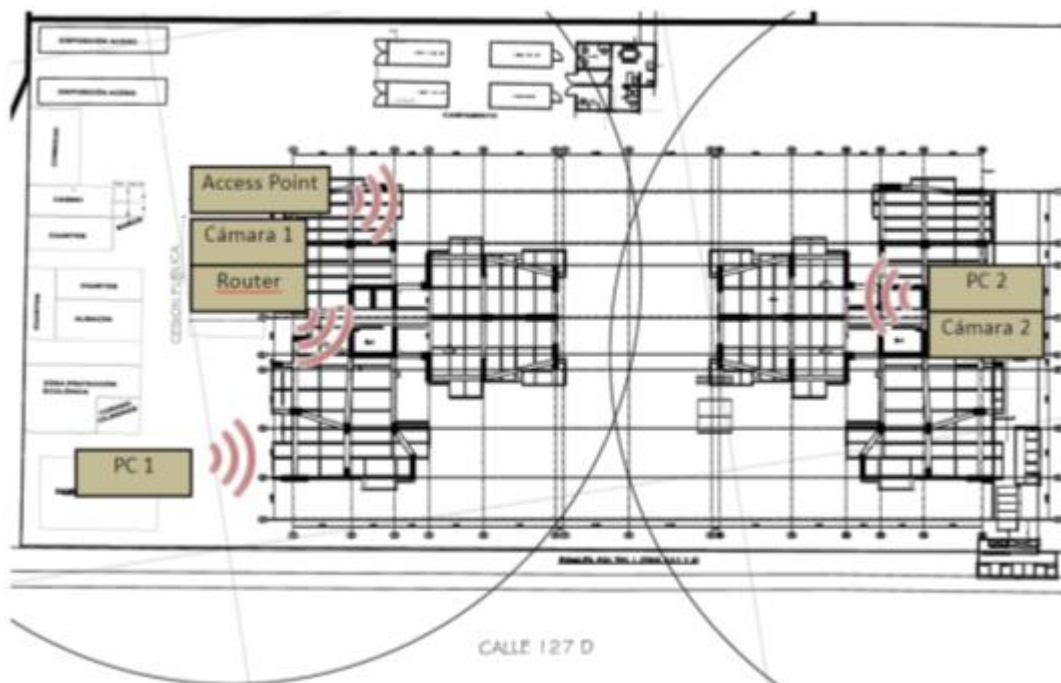


Figura 21. Dispositivos instalados

En la Figura 19, presentada anteriormente, se puede ver el sistema anexo a la cámara con el cual se activa el disparador para realizar la toma de fotografías. Todo esto se complementa con el sistema del Router inalámbrico y el computador industrial instalado para la transferencia y almacenamiento de las imágenes.

El montaje está compuesto de tres subsistemas que se encargan del manejo de la energía, del control de la secuencia de la toma de imágenes y del almacenamiento y consulta de las mismas.

Estos subsistemas son (Gómez, *et al*, 2011):

6.4.1 UNIDAD CENTRAL DE CONTROL, CONEXIÓN A INTERNET Y RED WI-FI

Es el subsistema compuesto por el Router inalámbrico para conexión GPRS mediante el cual se obtiene acceso a la red wi-fi y se realiza la conexión a otros dispositivos mediante puertos Ethernet. En uno de estos puertos Ethernet se encuentra instalada la tarjeta que actúa como Unidad Central de Control con la que se configura la toma de imágenes desde una página HTML (Gómez, et al, 2011).

Desde dicha página se controla la frecuencia de toma de fotografías, la hora de inicio y fin de operación y se observa el nivel de voltaje de las baterías y del panel solar. En la Figura 22 se presenta una vista de lo anterior en la página web.

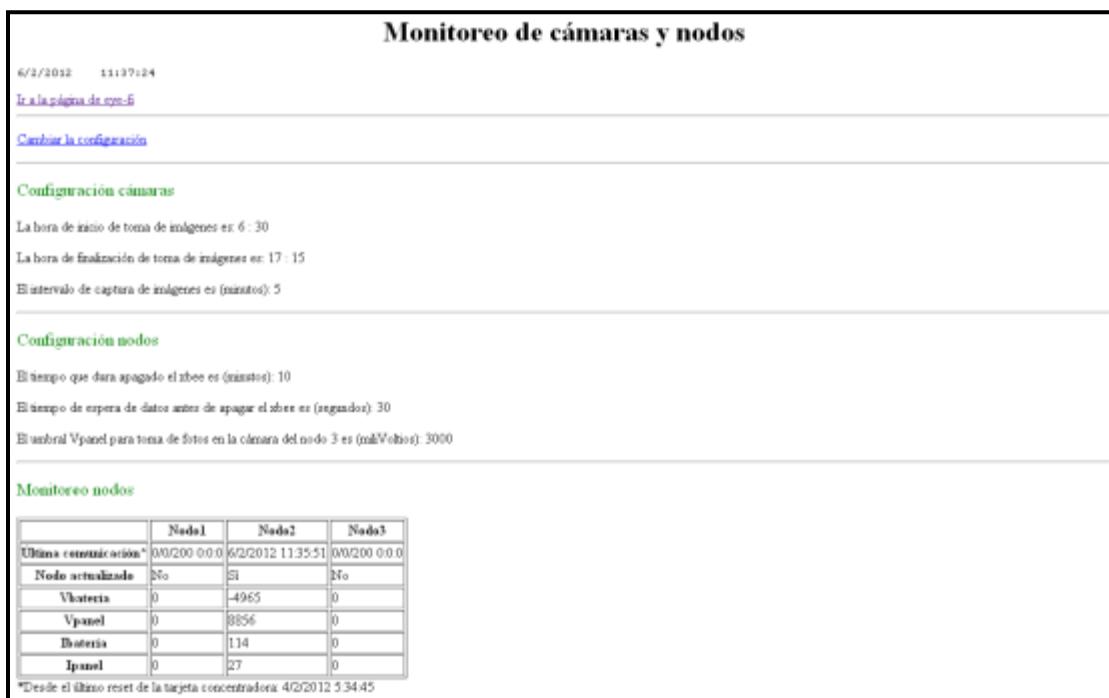


Figura 22. Vista página HTML de control

6.4.2 TOMA DE IMÁGENES

El segundo subsistema carga la batería por medio de paneles fotovoltaicos, toma las fotografías y las almacena localmente. Cada uno de los puntos de captura de imágenes, o nodos, tiene una cámara fotográfica Nikon D3100 de 14,2 mega píxeles, que se activa mediante el sistema previamente explicado con la configuración requerida (Gómez, et al, 2011).

En este subsistema se encuentra también el algoritmo que muestra, en la página web de control, los valores de voltaje e intensidad en el panel solar y las baterías. Esto representa una ventaja para el sistema autónomo, porque permite identificar problemas de carga de las baterías y apagar la

cámara cuando se lleva a un nivel bajo para evitar que se descarguen totalmente (Gómez, *et al*, 2011).



Figura 23. Panel fotovoltaico

Estos paneles solares (Figura 23) se implementaron debido a que con la conexión a la red eléctrica convencional se puede llegar a perder información cuando se presenten intermitencias en el servicio y para obtener la versatilidad del sistema con paneles pues con estos no se necesita el cableado para su funcionamiento.

Las fotografías tomadas se almacenaron en una tarjeta SD con tecnología WiFi que permite, mediante conexión inalámbrica, pasar las fotos directamente al computador. Así pues, se puede acceder a las fotografías remotamente desde el servidor de Eye-Fi o por acceso remoto al computador. En la Figura 24 se presenta una vista del servidor Eye-Fi de donde se cargan las fotografías para su acceso desde internet.

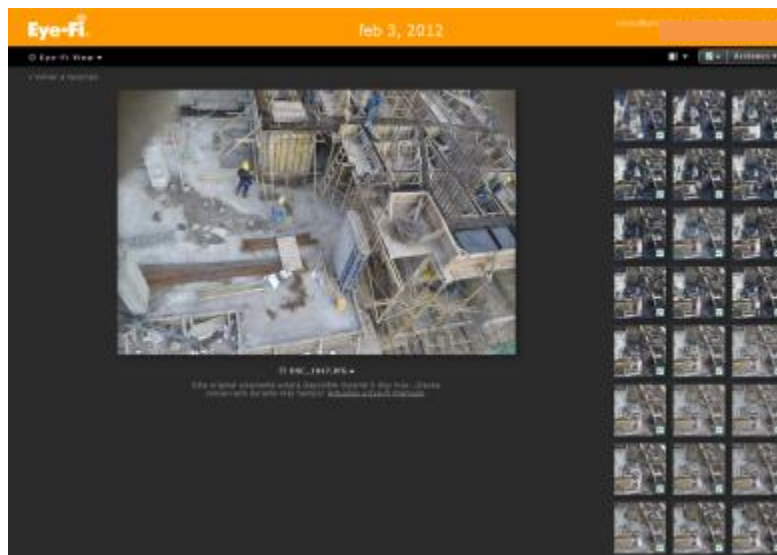


Figura 24. Vista Servidor Eye-Fi

6.4.3 COMPUTADOR DE ALMACENAMIENTO

Este subsistema compuesto por el computador industrial, que actúa como centro de almacenamiento local de las fotografías tomadas, está conectado a la red inalámbrica, y posee el software necesario para cargar las fotografías en el servidor Eye-Fi en internet (Gómez, *et al*, 2011).

Este computador se ubicó inicialmente en el campamento, pero por conectividad y alcance de la red inalámbrica, resultó más conveniente su instalación en el montaje de la torre grúa junto a las cámaras fotográficas. De esta forma se garantizó la disponibilidad de toda la información tomada por la cámara fotográfica.

En la Figura 25 se presenta el computador industrial y el router para aumentar el alcance de la red.



Figura 25. Router y computador industrial

6.4.4 INCONVENIENTES ENCONTRADOS

Estos son algunos de los inconvenientes que se presentaron durante la toma de fotografías:

- Se presentaron inconvenientes técnicos por desconexión de algunos cables de los paneles solares (posiblemente mientras se realizaba el montaje en la torre grúa) lo que llevó a que las pilas se descargaran totalmente y fuera necesario retirarlas para su carga. Para realizar este procedimiento se bajó el montaje de la torre grúa y por tanto, se presentaron modificaciones en el área de foco de la cámara y se perdió información.
- Al inicio del montaje de la Cámara 2 no se contaba con el repetidor de señal y se tuvieron que bajar las imágenes por medio de conexión por acceso remoto al PC 2 y directamente desde la memoria SD al desmontar el sistema.

- Se presentaron inconvenientes en la toma de fotografías con las cámaras instaladas en la torre 2 del proyecto y se desarmó la estructura debido a las malas condiciones climáticas de fin del año 2011. La principal muestra del inminente fallo que sucedería fue el asentamiento diferencial que se presentó en la placa de la torre grúa con respecto al nivel del suelo.
- Se presentaron problemas de conexión a la red principalmente cuando se dieron intermitencias en el servicio de energía. Este inconveniente se solucionó encendiendo y reiniciando el computador ubicado en el campamento de la obra. Las consecuencias que se generaron fueron principalmente el inicio tardío de la toma de fotografías en la mañana o la demora en la carga de fotografías al portal Eye-Fi.
- En las ocasiones que se debió bajar el montaje de la torre grúa, se modificó el enfoque de la cámara, cosa que aunque no genera consecuencias a la medición de rendimientos y tiempos, provoca discontinuidades en los videos.
- El alcance del Router de conexión a internet no era suficiente para descargar las fotos de la memoria SD de la Cámara 2. Por tanto, se acumulaba mucha información y se hacía más demorada la descarga por acceso remoto. Con el ánimo de solucionar el inconveniente se instaló en una de las casetas de vigilancia un Access Point para ampliar el alcance de la red inalámbrica.
- La conexión a internet que se tuvo para el sistema era lenta debido a que se utilizó un dispositivo USB de una empresa de telefonía celular. A pesar de la velocidad de transferencia de información, no se generaron mayores inconvenientes debido a que en el lapso de toma de fotografías se subía el archivo a la página de Eye-Fi y siempre se tuvo la información disponible. Sin embargo, para acceder a la información desde acceso remoto si se podían generar inconvenientes en cuanto a la velocidad de transferencia o la estabilidad de conexión.
- A medida que se avanzó en la construcción de la torre y mientras no se subió la torre grúa, se limitó el foco de las fotografías debido a la cercanía entre el piso en ejecución y la cámara, perdiendo información principalmente de la Zona 2 de la torre.

7. RESULTADOS OBTENIDOS

7.1 IDENTIFICACIÓN FLUJO DE TRABAJO

En el proyecto, desde su inicio se planteó un esquema de trabajo contemplando la división del piso tipo en tres zonas, como se muestra en el Figura 26, buscando distribuir los recursos en cuadrillas especializadas de acuerdo con las actividades a realizar.

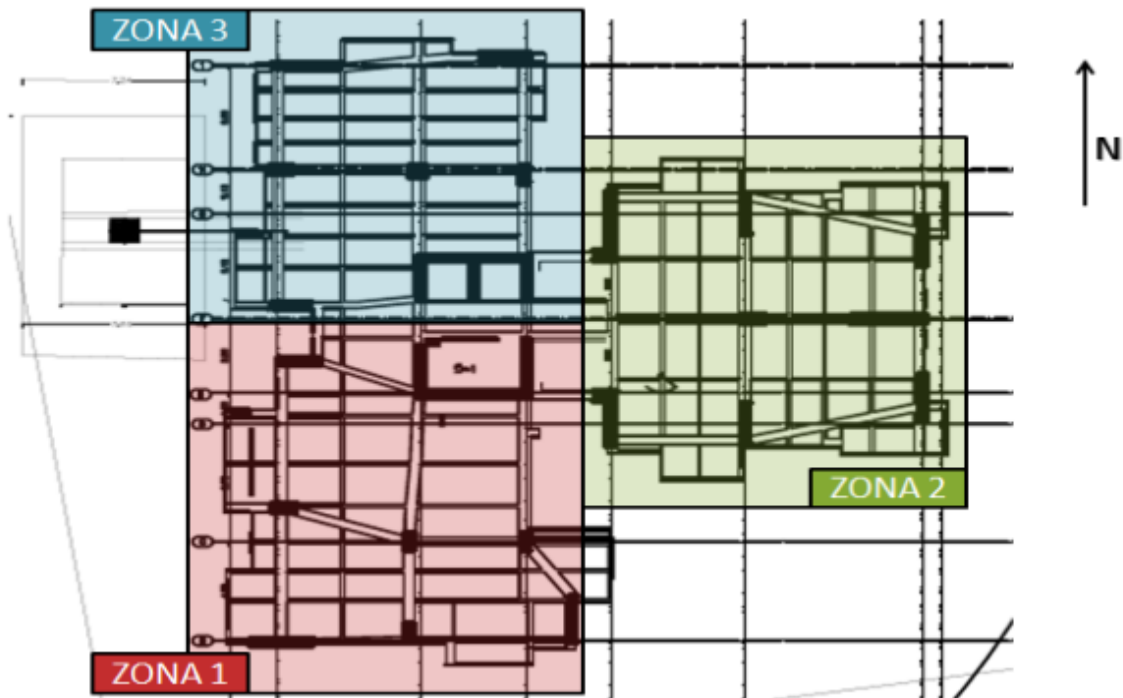


Figura 26. Distribución de zonas de trabajo

Los recursos se distribuyeron según los roles asignados con el fin de ahorrar tiempo, aumentar la eficiencia y evitar o disminuir los tiempos considerados como no contributivos o pérdidas en el proyecto.

Se consideró la siguiente distribución de cuadrillas buscando tener un frente de trabajo para llevar a cabo cada una de las actividades establecidas:

- **CUADRILLA DE HERREROS:** Amarre o armadura de acero en elementos estructurales como columnas, vigas y placas.

- **CUADRILLA COLUMNAS:** Colocación y nivelación de la formaleta, vaciado de concreto y quitar formaleta de las columnas para cada zona.
- **CUADRILLA VIGAS:** colocación formaleta, vaciado de concreto, control de fraguado y el desencofrado de vigas; colocación de láminas de metaldeck y vaciado concreto de recubrimiento placa.
- **CUADRILLA DE PARES Y CERCHAS:** Es la encargada de la colocación de los pares, las cerchas y las camillas para el armado de la cama de la placa.

Este esquema de trabajo se estableció buscando la especialización de cuadrillas, es decir, que los trabajadores no tuvieran tiempo libre en su horario laboral. Pretendiendo como resultado reducir el tiempo no contributivo a cero.

El proceso constructivo consiste en que las cuadrillas trabajen en zonas diferentes simultáneamente, ya que la se pretende optimizar la utilización de los recursos de manera que siempre estén realizando un trabajo que le aporte valor al proyecto.

En la Figura 27 se muestra como por zonas se distribuye el trabajo de cada cuadrilla. Básicamente, se busca la circulación de los equipos de trabajo buscando que cuando se finalice una actividad se movilice el personal especializado a la siguiente zona, y así se especializan en sus actividades y se disminuye el tiempo no contributivo.



Figura 27. Esquema de trabajo

Las actividades realizadas en cada zona de trabajo se presentan en la Figura 28. Posteriormente, se explica cada una de las actividades con sus tareas y trabajos menores.

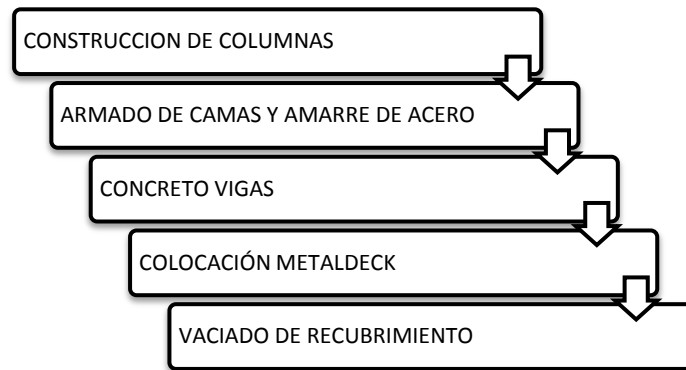


Figura 28. Actividades a realizar para cada zona

7.1.1 CONSTRUCCIÓN DE COLUMNAS

Como actividad inicial, se realiza el replanteo de las columnas y las vigas, trazando su ubicación. La cuadrilla de herreros realiza el amarre del acero, como se muestra en la Figuras 29 y 30, según la distribución y características definidas en los planos dados por el ingeniero estructural.



Figura 29 y 30. Construcción de columnas. Fecha de Toma: 05-NOV-11

Antes de la colocación de la formaleta, se debe revisar que el armado se haya realizado de forma adecuada. Luego se instala la formaleta, se revisa su verticalidad de forma que cuando se realice el vaciado del concreto, la columna quede totalmente vertical.

Finalmente la cuadrilla columnas se encarga de la colocación de concreto, el desencofrado y la colocación del plástico para el fraguado tal y como muestra en la Figura 31.



Figura 31. Fraguado de columnas. Fecha de Toma: 05-NOV-11

7.1.2 ARMADO DE PARALES, CERCHAS, CAMILLAS Y AMARRE DE ACERO

La cuadrilla de parales, cerchas y camillas se encarga de disponer estos elementos en adición a los testeros y lamina súper T; después la cuadrilla prosigue a nivelarla, para que la cuadrilla de herreros inicie con la actividad de amarre de acero de las vigas. En la Figura 32 se presentan los parales, cerchas y camillas armadas.



Figura 32. Armado de camas y amarre de acero. Fecha de Toma: 05-NOV-11

7.1.3 CONCRETO VIGAS

Con las vigas armadas, se dispone la formaleta como se ve en la Figura 33, y luego, cuando está debidamente colocada la formaleta, se continua con el vaciado del concreto, mostrado en la Figura 34, dejando una altura libre de 10 cm con el fin de realizar después un vaciado monolítico de la placa de entrepiso. Se desinstala la formaleta y se finaliza con la colocación de las láminas de metaldeck.

Inicialmente no estaba contemplado el uso de láminas de metaldeck porque se tenía planeado instalar casetón de icopor como formaleta para el vaciado del concreto de la placa y las viguetas. La principal razón del cambio de aligeramiento de la placa fue la búsqueda de tener un sistema constructivo ambientalmente más limpio.

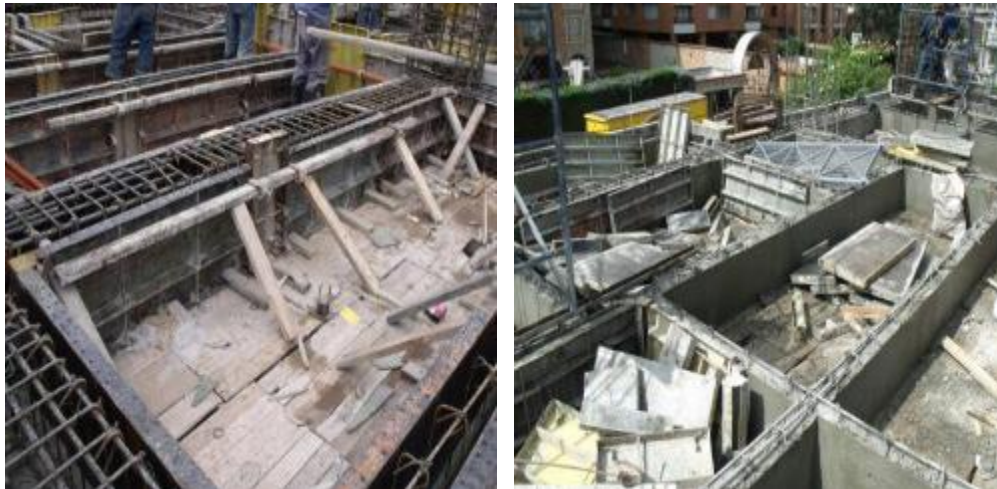


Figura 33 y 34. Formaleta y fraguado de vigas. Fecha de Toma: 05-NOV-11

7.1.4 COLOCACIÓN DE LÁMINAS DE METALDECK

Se disponen las láminas de metaldeck, como se muestra en la Figura 35, apoyadas 2 cm sobre de las vigas. Después se dispone la malla de acero de la placa, para finalmente seguir con el vaciado del concreto del elemento.

Como se muestra en la Figura 36, los paneles llegan siempre a la obra de acuerdo con especificaciones de medidas rectangulares. Debido a la presencia de vigas diagonales, se debe llevar a cabo el procedimiento de corte de las láminas en obra.



Figura 35 y 36. Disposición y corte de metaldeck. Fecha de Toma: 05-NOV-11

7.1.5 VACIADO DE RECUBRIMIENTO

Se procede con el vaciado de concreto de la placa y como se muestra en la Figura 37, se nivela la superficie de la placa. Por último se retiran los parales, crucetas y cerchas que soportan el elemento.



Figura 37. Placa de entrepiso. Fecha de Toma: 20-FEB-12

7.1.6 CRONOGRAMA DE TRABAJO

El cronograma de trabajo establecido para la construcción de un piso se encuentra en la Figura 38.



Figura 38. Cronograma de trabajo en obra

De acuerdo a lo planeado, la estructura de cada una de las zonas, que corresponde a un apartamento, debe ser construida con una duración de 8 días, de manera que el tiempo estimado para la finalización piso sería de 10 días.

En la Figura 39, se presenta el esquema de trabajo de la Torre 1. De allí se pueden observar los 9 días que se tarda y la forma como se relaciona, el vaciado de las placas de cada piso. Por su parte la Torre 2 inicia una vez se finaliza la estructura de la Torre 1.

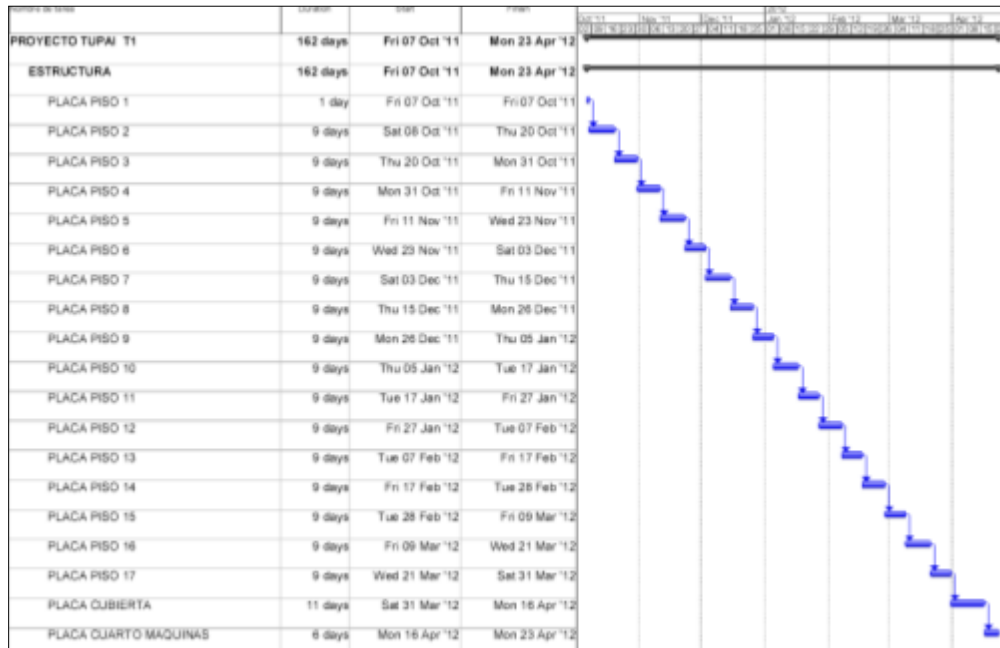


Figura 39. Cronograma de trabajo en obra Torre 1

7.2 IDENTIFICACIÓN ACTIVIDADES PRODUCTIVAS, CONTRIBUTIVAS Y NO CONTRIBUTIVAS

Entre los procesos constructivos que hacen parte del desarrollo de un proyecto se pueden identificar actividades definidas según el valor que las mismas agregan al proyecto. Dichas actividades pueden ser actividades productivas, que son las actividades que agregan valor, actividades contributivas, que son aquellas que aportan un soporte a las actividades productivas, y las actividades no contributivas que son consideradas como pérdidas en el proyecto. (Botero, 2003).

A continuación se clasifican y se agrupan según el valor que agreguen al proyecto, las actividades que son necesarias para cada uno de los procesos constructivos que hacen parte del flujo de trabajo previamente expuesto:

7.2.1 COLUMNAS

Las siguientes son las actividades productivas, contributivas y no contributivas identificadas en la construcción de los elementos verticales de la estructura:

7.2.1.1 ACTIVIDADES PRODUCTIVAS

- Cimbrado de columna
- Amarre de acero
- Instalación de formaleta
- Vaciado de concreto
- Retiro de formaleta

7.2.1.2 ACTIVIDADES CONTRIBUTIVAS

- Transporte de acero
- Organizar acero en lugar cercano a columna
- Corte de alambre
- Traslado acero de donde está organizado a columna
- Revisión acero de columnas con los planos
- Transporte formaleta metálica columna
- Transporte parales
- Revisión verticalidad formaleta columna
- Transporte concreto
- Movimiento de tolva con concreto
- Vibrado concreto

- Curado concreto
- Colocación plástico curado
- Revisión verticalidad columna

7.2.1.3 ACTIVIDADES NO CONTRIBUTIVAS

- Movimiento de material después de haber sido transportado al sitio
- Espera mientras se transporta el acero
- Espera mientras se transporta el equipo de formaleta
- Espera de llegada del concreto
- Re-procesos por malas practicas
- Suspensión actividades por mal clima
- Tiempos de ocio, trabajadores distraídos o hablando por celular

7.2.2 INSTALACIÓN CAMA Y AMARRE DE ACERO

Para la etapa de la instalación de la camilla y el amarre de acero, se identificaron las siguientes actividades:

7.2.2.1 ACTIVIDADES PRODUCTIVAS

- Colocación parales, crucetas y cerchas
- Instalación lamina súper T
- Instalación testeros
- Colocación camillas
- Cimbrado de vigas

7.2.2.2 ACTIVIDADES CONTRIBUTIVAS

- Traslado parales, crucetas y cerchas
- Traslado lamina súper T
- Traslado testeros
- Revisión verticalidad parales
- Traslado camillas
- Arreglo camillas rotas
- Transporte acero
- Organizar Acero en lugar cercano a columna
- Corte Alambre
- Traslado acero de donde está organizado a vigas
- Revisión acero de vigas con los planos

- Colocación de distanciadores (Para recubrimiento)

7.2.2.3 ACTIVIDADES NO CONTRIBUTIVAS

- Movimiento de material después de haber sido transportado al sitio
- Espera mientras se transporta el acero
- Espera mientras se transportan los testeros
- Espera mientras se transporta el equipo (parales, cerchas , crucetas)
- Re-trabajos por malas practicas
- Suspensión actividades por mal clima
- Tiempos de ocio, trabajadores distraídos o hablando por celular

7.2.3 CONCRETO DE VIGAS

En la disposición del concreto de las vigas, se identificaron las siguientes actividades agrupadas según la clasificación en mención:

7.2.3.1 ACTIVIDADES PRODUCTIVAS

- Vaciado de concreto
- Retiro de testeros

7.2.3.2 ACTIVIDADES CONTRIBUTIVAS

- Transporte concreto
- Movimiento de tolva con concreto
- Vibrado concreto
- Revisión espesor libre para concreto placa
- Curado de concreto vigas

7.2.3.3 ACTIVIDADES NO CONTRIBUTIVAS

- Movimiento de material después de haber sido transportado al sitio
- Espera de llegada del concreto
- Re-procesos por malas practicas
- Suspensión actividades por mal clima
- Tiempos de ocio, trabajadores distraídos o hablando por celular

7.2.4 COLOCACIÓN LÁMINAS METALDECK

Al colocar las láminas de metaldeck, se pueden identificar las siguientes actividades productivas, contributivas y no contributivas:

7.2.4.1 ACTIVIDADES PRODUCTIVAS

- Disposición de láminas de metaldeck
- Disposición de malla electrosoldada

7.2.4.2 ACTIVIDADES CONTRIBUTIVAS

- Transporte laminas
- Corte láminas de metaldeck
- Instalación tapas metaldeck
- Transporte malla electrosoldada
- Corte alambre

7.2.4.3 ACTIVIDADES NO CONTRIBUTIVAS

- Movimiento de material después de haber sido transportado al sitio
- Espera mientras se transportan las láminas de metaldeck
- Espera mientras se transporta la malla electrosoldada
- Re-procesos por malas prácticas
- Suspensión actividades por mal clima
- Tiempos de ocio, trabajadores distraídos o hablando por celular

7.2.5 VACIADO RECUBRIMIENTO:

Finalmente, en la etapa de vaciado de recubrimiento se identifican las siguientes actividades y su clasificación:

7.2.5.1 ACTIVIDADES PRODUCTIVAS

- Vaciado concreto
- Afinado de placa

7.2.5.2 ACTIVIDADES CONTRIBUTIVAS

- Transporte concreto
- Movimiento de tolva con concreto
- Vibrado concreto
- Curado placa

7.2.5.3 ACTIVIDADES NO CONTRIBUTIVAS

- Espera de llegada del concreto
- Re-procesos por malas prácticas
- Suspensión actividades por mal clima
- Tiempos de ocio, trabajadores distraídos o hablando por celular

7.3 PROBLEMAS ENCONTRADOS EN OBRA Y POSIBILIDADES DE MEJORA

7.3.1 FORMALETA VIGAS

Aunque la formaleta utilizada por el contratista de estructura no se encuentra en mal estado; la forma como se realizó la modularización de los elementos exige re-procesos y tiempos importantes en la instalación de una gran cantidad de piezas.



Figura 40 y 41. Formaleta para vaciado de vigas en concreto. Fecha de toma: 05-NOV-11

En la Figura 40 y 41 se puede ver claramente la necesidad de utilizar madera para lograr una buena acomodación de la formaleta buscando obtener un buen acabado y evitar fugas durante el vaciado del concreto. Adicionalmente, se puede observar la cantidad de elementos metálicos y la forma como se deben acomodar con la madera para modular los elementos.

Así mismo, la problemática de utilizar estos elementos en las formaletas representará un tiempo relevante para el retiro de los mismos y generará una mayor cantidad de residuos de madera.



Figura 42. Puntales en madera para sostener formaleta. Fecha de toma: 05-NOV-11

En la Figura 42 se puede observar la gran cantidad de pedazos de madera que requiere la formaleta de una viga para mantener la verticalidad del futuro elemento de concreto.



Figura 43. Corte de elementos en madera para la formaleta. Fecha de toma: 05-NOV-11

Adicionalmente, al requerir esta gran cantidad de elementos, se utilizará más tiempo en el corte y adecuación de los mismos. En la Figura 43, se puede observar uno de los ayudantes de la cuadrilla de vigas realizando el corte del elemento para su posterior ubicación en la formaleta.

7.3.2 ESTADO DE LAS CAMILLAS

Las camillas de madera utilizadas como piso para realizar el armado del acero y disposición de las láminas súper T se encontraban en mal estado. Esto se puede evidenciar en que faltaban algunas secciones de elementos, había partes podridas o con grietas que comprometían la funcionalidad del elemento.



Figura 44 y 45. Estado de las camillas en madera. Fecha de toma: 05-NOV-11

En las Figuras 44 y 45, se puede observar el estado en que se encontraban algunas de las camillas de madera utilizadas en la obra. Algunas de las camillas que se muestran ni siquiera se consideraron aptas para un arreglo toda vez que la integridad de la madera dificultaba la funcionalidad del futuro elemento.

Aquellas camillas aptas para su arreglo deben ser intervenidas reemplazando el elemento de madera en mal estado por uno de buena calidad. En la Figura 46 se pueden observar algunas de las camillas intervenidas con el reemplazo de uno de sus elementos. Cabe anotar que este proceso representa tiempo perdido que se podría eliminar contando con herramientas y materiales en buenas condiciones.



Figura 46. Camillas reparadas. Fecha de toma: 05-NOV-11

Es también importante tener en cuenta que se pone riesgo la seguridad industrial por el estado de las camillas, pues resultan elementos con puntillas que pueden causar accidentes menores en obra. En la Figura 47 se pueden observar las camillas en mal estado que no se pudieron utilizar y que además tenían puntillas expuestas que pueden causar accidentes.



Figura 47. Camillas en mal estado. Fecha de toma: 05-NOV-11

Para solucionar este inconveniente se implementó un equipo de trabajo en el primer piso para la revisión y arreglo de las camillas. Esto con el fin de evitar realizar este tipo de trabajos en altura y así evitar incidentes.

7.3.3 RETIRO DE FORMALETA DE VIGAS

Durante la construcción de los primeros pisos de la primera torre se encontraron falencias en cuanto al orden en que se retira la formaleta cuando ha fraguado el concreto del elemento.

La adecuada organización del retiro de las formaletas permitirá un trabajo más fluido en el sentido que se recogerán los desperdicios de madera, se organizarán los elementos de la formaleta y se podrán disponer las láminas de metaldeck más rápidamente. En el numeral 7.5.2 Sección J, se encuentran los resultados medidos para esta actividad.

En la Figura 48 se puede observar el proceso de retiro de la formaleta y su disposición en zonas libres. Como aspecto de mejora se puede establecer un orden lógico de desencofrado que permita liberar los elementos más eficientemente para proceder con el vaciado de la placa.



Figura 48. Retiro de formaleta. Fecha de toma: 05-NOV-11

7.3.4 CONSTRUCCIÓN DE CIMENTACIÓN ZONA 3

Iniciando la construcción de la Torre 1 se presentaron atrasos en la Zona 3 (propuesta anteriormente de acuerdo a la distribución de áreas para la construcción de los apartamentos). El problema que se presentó por inconvenientes del sistema constructivo de la cimentación de la zona en referencia provocó atrasos del área con respecto a la zona 1 y 2. Por tanto, para nivelar la zona 3 con las demás y lograr la ejecución de la construcción de acuerdo a lo planeado, se aumentaron los recursos y se dio prioridad a sus actividades.

En la Figura 49 se puede observar la diferencia en el avance de la zona 3 con respecto a las zonas 1 y 2. Allí se puede notar que mientras en las zonas 1 y 2 se realiza el armado del acero de la placa de piso 2, en la zona 3 se realiza el amarre del acero de las columnas del piso 1.



Figura 49. Diferencia en avance de Zona 3 comparado con Zona 1 y 2. Fecha de toma: 19-NOV-11

La medida que se tomó para recuperar el atraso en las actividades de la zona 3 consistió en la solicitud del diseño estructural de las vigas del sótano, de forma tal que por flexión soportaran la construcción de las columnas posteriores sin finalizar la cimentación de las mismas. En la Figura 50 y 51 se puede observar la viga de sótano reforzada y el proceso de construcción de la columna sobre ella sin finalizar la cimentación.



Figura 50 y 51. Viga reforzada para la construcción de las columnas posteriores. Fecha de toma: 19-NOV-11

7.3.5 CORTE DE LÁMINAS DE METALDECK

Otro inconveniente que provocó reprocesos y mayores tiempos de ejecución de las actividades de disposición de láminas de metaldeck, fue el corte de estos paneles para obtener su adecuada modularización. Esto se dio porque las láminas son entregadas de forma rectangular y en el proyecto hay vigas transversales que requieren paneles triangulares o de lados irregulares. En el numeral 7.5.2 Sección K, se encuentran las mediciones para esta actividad.

Con el fin de solucionar este inconveniente se dispuso en el primer piso, un área para el corte de los paneles de metaldeck que se requerirían en la placa. En las Figuras 52 y 53 se presenta la caseta de corte de los paneles y su zona de disposición temporal.



Figura 52 y 53. Caseta y zona de disposición de láminas de metaldeck cortadas. Fecha de toma: 05-NOV-11

7.3.6 TRANSPORTE DE BLOQUES DE MAMPOSTERÍA EN CARRETA CONVENCIONAL

Se identificó también en las visitas a obra que el transporte de bloques de mampostería se realiza con medio no adecuados. En la Figura 54 se puede observar que el movimiento de estos materiales se lleva a cabo con carretas convencionales que no tienen las dimensiones adecuadas para esta actividad.



Figura 54. Herramienta de movimiento de bloques de mampostería. Fecha de toma: 05-FEB-12

7.4 MEDICIÓN DE TIEMPOS DE ACTIVIDADES

7.4.1 MEDICIONES 5 MINUTOS

Con el fin de identificar la proporción de tiempos útiles y de pérdidas, se realizaron mediciones de las duraciones de procesos que agregan valor y de tiempos considerado como pérdida. La medición de estos tiempos se realizó mediante la prueba de los 5 minutos.

La prueba de los 5 minutos consiste en cuantificar las pérdidas en los procesos de construcción, identificando y clasificando los tiempos que se pueden presentar en dichas actividades en tiempo productivo, que es aquel que agrega valor a la actividad, el tiempo contributivo, el cual contribuye a la actividad o el tiempo que agrega valor, y el tiempo no contributivo, considerado como pérdida.

En visitas realizadas al proyecto, se tomaron videos de 5 minutos de duración a los diferentes procesos del flujo de trabajo que llevaron a cabo el día de la visita (en la Figura 55 se presenta uno de los videos estudiados). El objetivo de estos videos es tomar el tiempo invertido por cada uno de los trabajadores en actividades que pueden ser productivas, contributivas o no contributivas.



Figura 55. Video 5 minutos – Colocación formaleta vigas

Para identificar el tiempo invertido en actividades que no agregan valor al proyecto, con la información suministrada por los videos, se realizó el registro de los tiempos empleados en el desarrollo de cada proceso constructivo y la clasificación de los tiempos según el valor que agregue al proyecto cada actividad. Estos registros se documentan en el formato de la prueba de los 5 minutos que se muestra en la Figura 56.

VIDEO: DSCF4798			
ACTIVIDAD: Armado cama placa		OFICIO: Colocación parales y cerchas	
TIEMPO PRODUCTIVO:	03:58	79%	Observación: Colocando parales y cerchas
TIEMPO CONTRIBUTIVO:	00:25	8%	Observación: Traslado de equipo
TIEMPO NO CONTRIBUTIVO:	00:37	12%	Observación: Espera llegada de equipo
FUERA DE FOCO:	00:00	0%	Observación:

Figura 56. Formato prueba de los 5 min

Las actividades analizadas para identificar los tiempos que no agregan valor al proyecto son las correspondientes a construcción de las columnas, las vigas y la placa.. Para la ejecución de éstas actividades se deben llevar a cabo trabajos como transporte de material, amarre de acero, vaciado de concreto, vibrado de concreto, instalación de malla y de láminas de metaldeck entre otros; trabajos que ayudaran con la clasificación de tiempos descrita con anterioridad, obteniendo los resultados presentados en las Figuras 57, 58 y 59.

En la observación de los videos tomados en obra se ve la necesidad de adicionar a la clasificación de los tiempos, una categoría en la cual se agrupa el tiempo en el cual el trabajador no se encuentra en el área de la cobertura de la cámara, esta categoría se llamó Fuera de Foco (FF). Este tiempo se presenta debido a que el trabajador se ve en la necesidad de transportar equipo y material hasta los lugares ubicados en zonas alejadas del punto de trabajo.

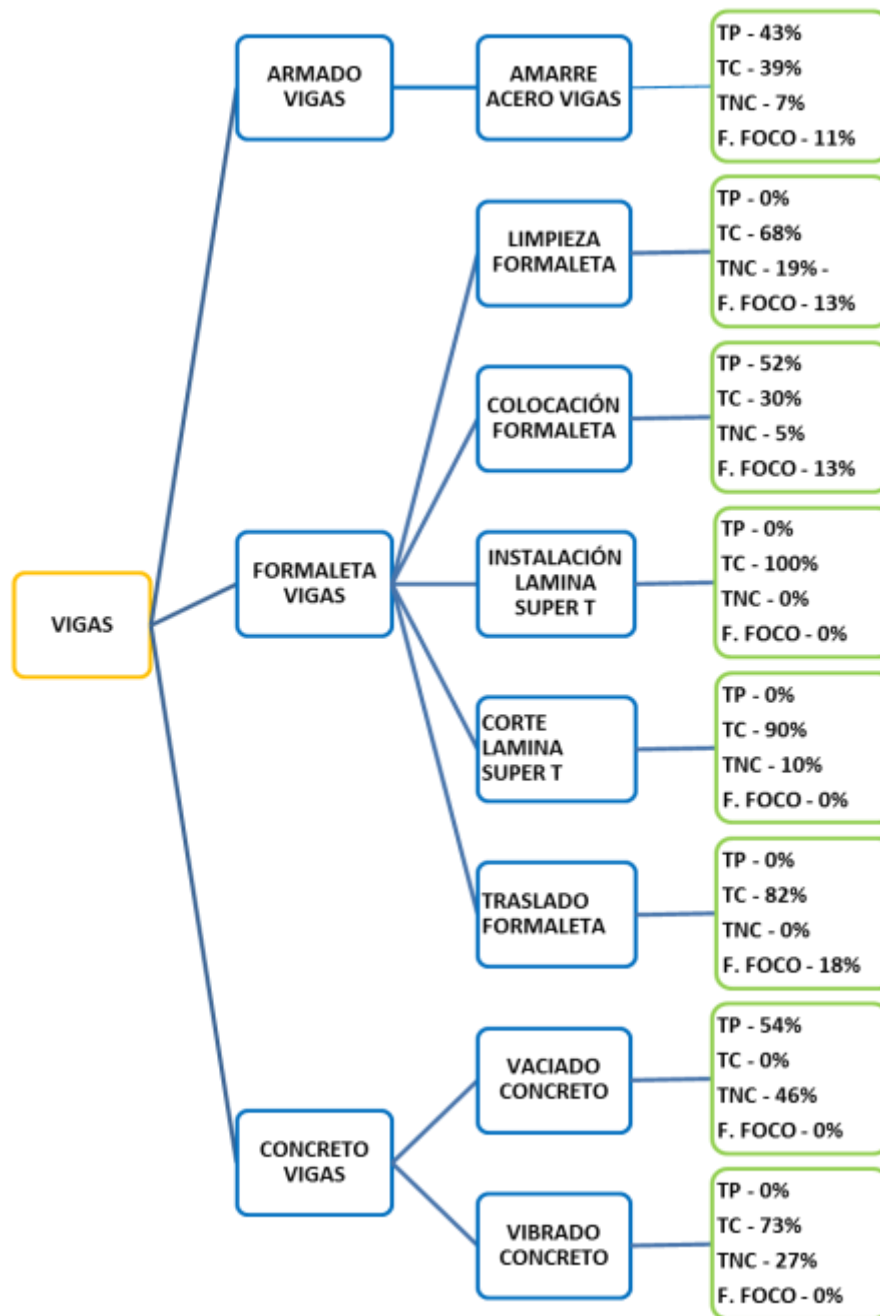


Figura 57. Resultados mediciones Vigas

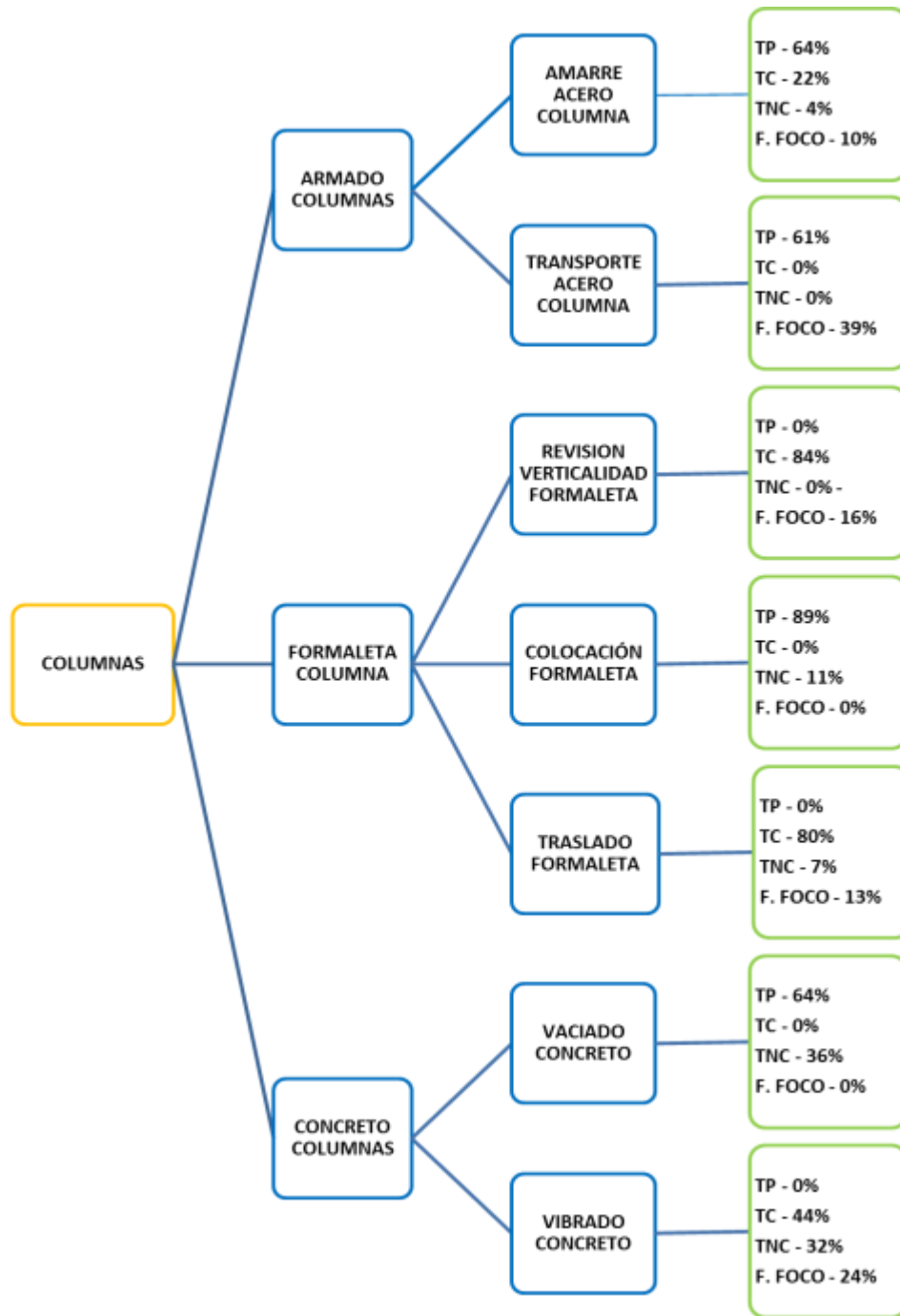


Figura 58. Resultados mediciones columnas

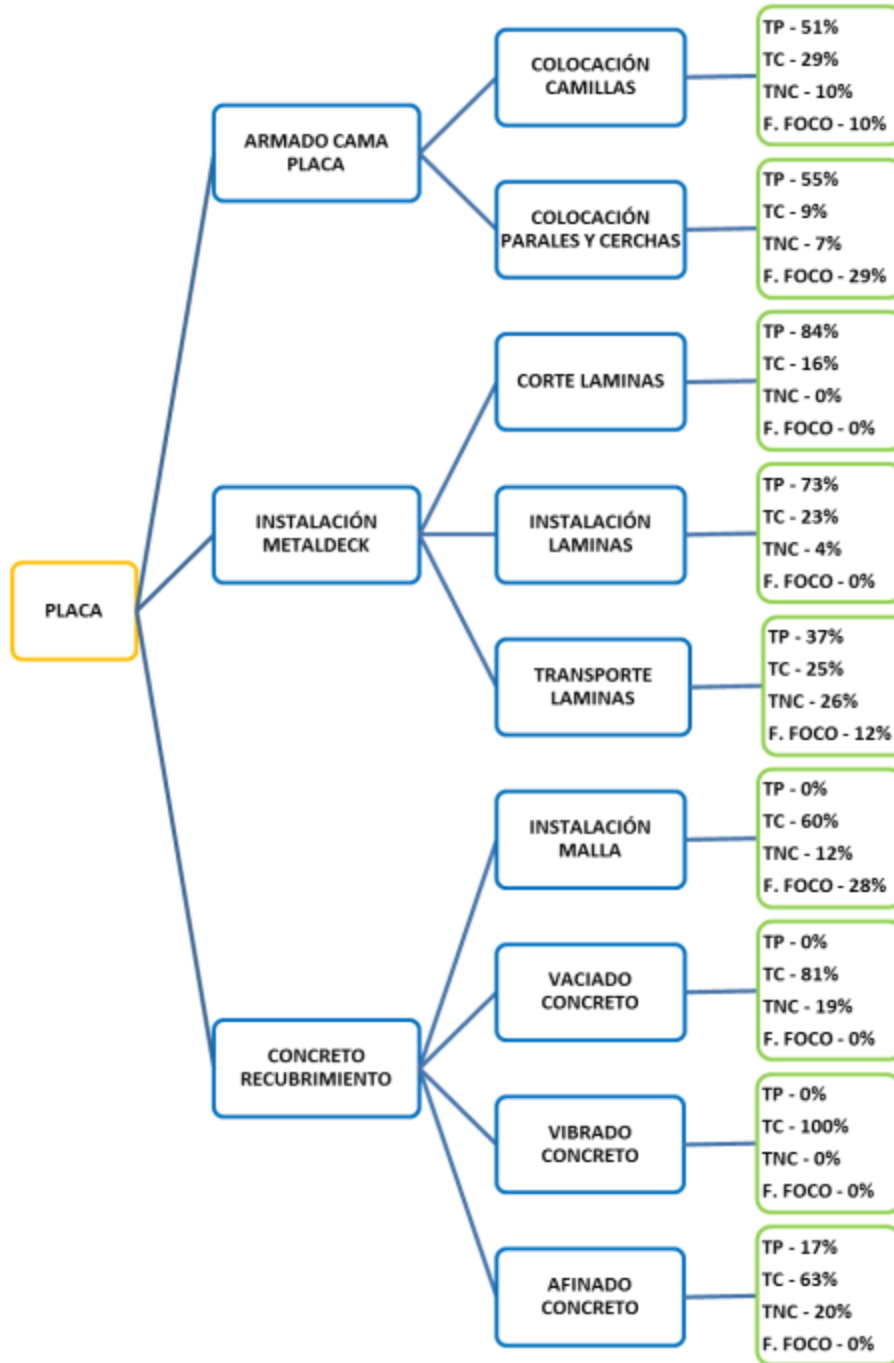


Figura 59. Resultados mediciones Placa

Basados en los tiempos dados por los videos, se identifican algunas de las causas del tiempo no contributivo en los procesos de construcción de la estructura de la torre 1. Estas causas son:

- Espera de llegada de materiales
- Espera llegada de equipo
- Espera por traslado de material
- Parar trabajos para conversar
- Tiempos de ocio o descanso

Finalmente, luego de haber analizado e identificado las razones por las cuales se pueden presentar tiempos no contributivos, es importante destacar por medio de estadísticas el comportamiento de los tiempos utilizados por los trabajadores para la los diferentes procesos constructivos. En las Figuras 60, 61 y 62, se muestra que en la construcción de columnas el tiempo que es considerado como productivo es el mayor comparado con las mediciones de tiempo de las actividades como construcción de vigas y placa, esto se debe a que este proceso constructivo requiere de un personal calificado. El tiempo no contributivo de todas las actividades se encuentra en un rango en el cual se deben tomar medidas de mejoramiento, ya que el objetivo es reducir al máximo las perdidas.

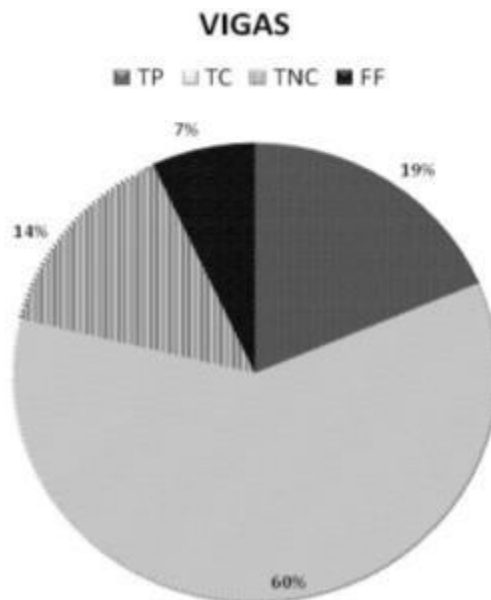


Figura 60. Clasificación de tiempos productivos, contributivos y no contributivos en construcción de vigas

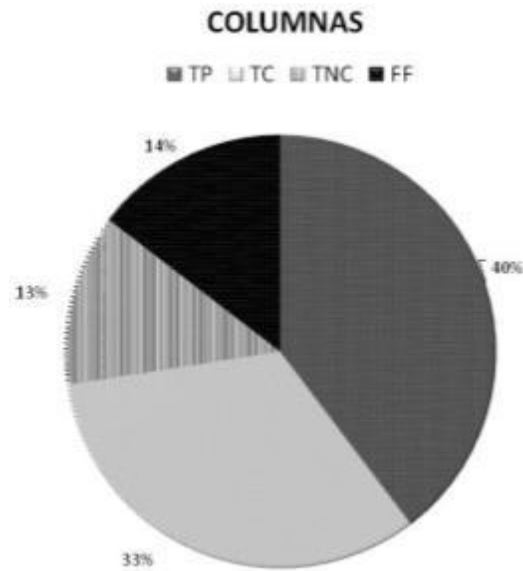


Figura 61. Clasificación de tiempos productivos, contributivos, no contributivos en construcción de columnas

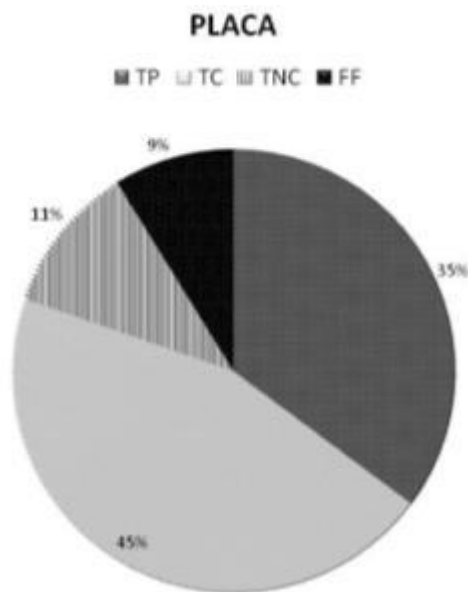


Figura 62. Clasificación de tiempos productivos, contributivos, no contributivos en construcción de placa

7.5 MEDICIÓN DE DURACIÓN DE ACTIVIDADES

La medición de tiempos de ejecución de los procesos constructivos se realizó a partir de los videos *Time Lapse* y la información detallada de cada una de las fotografías que se utilizó. Se determinó el tiempo de ejecución de una actividad mediante la diferencia entre la hora de finalización y de inicio de cada una de las actividades registradas.

7.5.1 DISTRIBUCIÓN DE RECURSOS

Con el fin de simular adecuadamente las actividades estudiadas, se realizó la identificación de los recursos involucrados en cada uno de los procesos, diferenciando entre Oficiales y Ayudantes de acuerdo a las responsabilidades asignadas. En la Tabla 9 se muestra la distribución del personal requerido que se evidenció durante las actividades de construcción.

Tabla 9. Recursos requeridos por actividad para cada unidad constructiva

ACTIVIDADES	CUADRILLA	RECURSOS REQUERIDOS	
		# OFICIALES	# AYUDANTES
AMARRE COLUMNAS	HERRERO	1	2
FORMALETA COLUMNAS	COLUMNAS	2	1
CONCRETO COLUMNAS	COLUMNAS	1	2
RETIRO FORMALETA COLUMNAS	COLUMNAS	1	2
INSTALACIÓN PARALES	PARALES-CAMILLAS	1	2
INSTALACIÓN CERCHAS	PARALES-CAMILLAS	1	2
INSTALACIÓN CAMILLAS	PARALES-CAMILLAS	1	2
AMARRE VIGAS	HERREROS	2	1
FORMALETA VIGAS	VIGAS	2	4
CONCRETO VIGAS	VIGAS	3	6
RETIRO FORMALETA VIGAS	VIGAS	1	5
DISPOSICIÓN LÁMINAS METALDECK	VIGAS	1	5
DISPOSICIÓN MALLA Y RECUBRIMIENTO	VIGAS	2	5
AMARRE ESCALERA	HERREROS	2	3
AMARRE ASCENSOR	HERREROS	3	4
FORMALETA ASCENSOR	COLUMNAS	3	1
FORMALETA ESCALERA	COLUMNAS	3	2
CONCRETO ASCENSOR	COLUMNAS	1	3
CONCRETO ESCALERA	COLUMNAS	1	3
RETIRO FORMALETA ASCENSOR	COLUMNAS	1	2
RETIRO FORMALETA ESCALERA	COLUMNAS	1	2

Cabe anotar que, aunque el personal puede variar en las actividades de acuerdo a las necesidades o requerimientos del momento, generalmente se utilizó la distribución de recursos presentada.

Por otro lado, en la Tabla 10 se presenta el personal disponible para la construcción de la torre 1.

Tabla 10. Recursos disponibles

CUADRILLA	RECURSOS DISPONIBLES	
	# OFICIALES	# AYUDANTES
PARALES-CAMILLAS	4	5
VIGAS	12	13
HERREROS	9	4
COLUMNAS	3	3
TOTAL	28	25

7.5.2 TIEMPOS ACTIVIDADES

a. AMARRE DE COLUMNAS

En esta actividad, como se ha mencionado, se realiza el amarre del acero de las columnas, la revisión de su verticalidad, y, cuando se requiere, instalación de tubería para instalaciones eléctricas o hidráulicas. En la Figura 63 se puede identificar la actividad tal y como puede ver en los videos.



Figura 63. Fotografía 11-FEB-12. Sección de Fotografía de Armado de Columnas

Los resultados de mediciones obtenidas de amarre de columnas se presentan en la Tabla 11.

Tabla 11. Mediciones amarre de columnas

MEDICIÓN	FECHA	DURACIÓN (H)	PARÁMETRO	VALOR
1	04/10/2011	5,42	Valor mínimo:	4.37 h
2	24/10/2011	12,10	Valor máximo:	17.20 h
3	09/11/2011	6,23	Media:	8.58 h
4	11/02/2012	12,08	Desv. Estándar:	4.2 h
5	14/02/2012	12,48		
6	14/02/2012	17,20		
7	24/02/2012	6,77		
8	25/02/2012	5,87		
9	27/02/2012	4,37		
10	02/03/2012	4,40		
11	06/03/2012	7,47		

Mediante la herramienta Input Analyzer (Rockwell Software), se obtuvieron los siguientes resultados en el estudio de la distribución de las mediciones realizadas:

Distribución: Tipo Beta

Expresión: $4 + 14 * \text{BETA} (0.471, 0.969)$

Error: 0.013755

Resultado Prueba Kolmogorov-Smirnov: 0.193

Esta herramienta ajusta una distribución a los datos, estima los parámetros de la distribución y calcula el nivel de ajuste de la serie de datos con la distribución obtenida. Este nivel de correlación se puede obtener mediante las pruebas de hipótesis de bondad de ajuste chi cuadrada y Kolmogorov-Smirnov (K-S) de escogencia de acuerdo a la cantidad de valores en la serie. El resultado siempre resultará entre 0 y 1 y aunque mayores valores indican mejores ajustes, a partir de 0,1 se considera suficientemente aceptable para trabajar con una distribución teórica obtenida de una serie de datos real (Kelton *et al*, 2008).

En la Figura 64, se presenta la representación obtenida en el Input Analyzer para este primer ajuste a los datos observados para amarre de columnas.

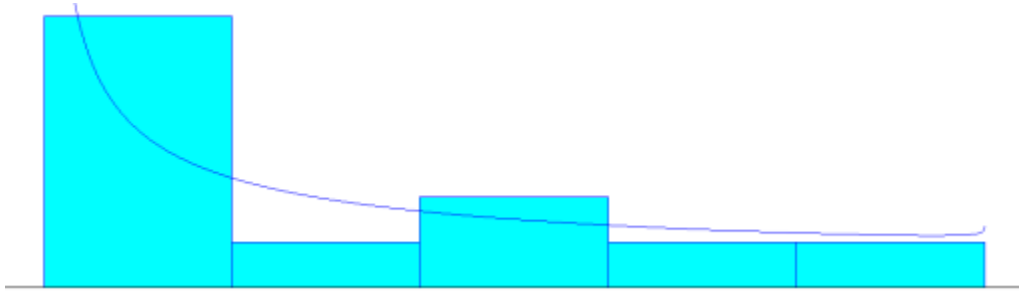


Figura 64. Representación grafica distribución de probabilidad Input Analyzer

Con el fin de establecer una curva de aprendizaje, se realizó la comparación entre el valor promedio de las primeras y las últimas mediciones, identificando una disminución de 48,66% en los tiempos de ejecución en aproximadamente 5 meses de trabajo.

b. FORMALETA DE COLUMNAS

Al tener las columnas armadas y con el acero dispuesto adecuadamente se procede a la instalación de la formaleta. Esta actividad, tal y como se puede identificar en los videos, se presenta en la Figura 65.



Figura 65. Fotografía 11-FEB-12. Sección de Fotografía Armado Formaletas Columnas

Las mediciones obtenidas de formaleta de columnas se presentan en la Tabla 12.

Tabla 12. Mediciones de instalación de formaleta de columnas

MEDICIÓN	FECHA	DURACIÓN (H)	PARÁMETRO	VALOR
1	04/10/2011	11,00	Valor mínimo:	3.42 h
2	24/10/2011	7,27	Valor máximo:	13.85 h
3	25/10/2011	10,28	Media:	7.09 h
4	09/11/2011	5,08	Desv. Estándar:	3.3 h
5	10/11/2011	5,25		
6	10/11/2011	13,85		
7	15/02/2012	4,23		
8	25/02/2012	3,42		
9	27/02/2012	5,85		
10	03/03/2012	4,40		
11	04/03/2012	1,97		

La distribución obtenida es la siguiente:

Distribución: Tipo Lognormal

Expresión: $3 + \text{LOGN}(4.36, 4.95)$

Error: 0.039419

Resultado Prueba Kolmogorov-Smirnov: 0.122

Para establecer una curva de aprendizaje, se comparó el valor promedio de las primeras y las últimas mediciones identificando una disminución de 54,78% en los tiempos de ejecución, en aproximadamente 5 meses.

c. CONCRETO DE COLUMNAS

Al finalizar la instalación de la formaleta de las columnas se procede con el vaciado de concreto de estos elementos verticales. Entre sus actividades principales se encuentra el movimiento del concreto, su disposición y el vibrado. En la Figura 66 se presenta la imagen de cómo se puede identificar el vaciado de concreto en los videos.



Figura 66. Fotografía 09-NOV-11. Sección de Fotografía concreto columnas

Las mediciones obtenidas de vaciado de concreto de columnas se presentan en la Tabla 13.

Tabla 13. Mediciones de concreto de columnas

MEDICIÓN	FECHA	DURACIÓN (H)	PARÁMETRO	VALOR
1	24/10/2011	2,05	Valor mínimo:	0.817 h
2	09/11/2011	2,53	Valor máximo:	2.53 h
3	11/11/2011	0,82	Media:	1.51 h
4	23/02/2012	1,42	Desv. Estándar:	0.605 h
5	28/02/2012	1,57		
6	03/03/2012	0,97		
7	07/03/2012	1,25		

La distribución obtenida es la siguiente:

Distribución: Tipo Beta

Expresión: $0.64 + 2.07 * \text{BETA}(0.786, 1.07)$

Error: 0.008089

Resultado Prueba Kolmogorov-Smirnov: 0.162

Para establecer una curva de aprendizaje, se comparó el valor promedio de las primeras y las últimas mediciones identificando una disminución de 25,90% en los tiempos de ejecución, en aproximadamente 4,5 meses.

d. RETIRO FORMALETA DE COLUMNAS

Posterior al fraguado, se procede con el retiro de las formaletas de las columnas para ser instaladas en otros elementos verticales. En la Figura 67 se presenta la vista de la actividad en los videos estudiados.



Figura 67. Fotografía 14-FEB-12. Sección de Fotografía Retiro Formaleta Columnas

Las mediciones obtenidas de retiro de formaleta de columnas se presentan en la Tabla 14.

Tabla 14. Mediciones retiro formaleta de columnas

MEDICIÓN	FECHA	DURACIÓN (H)	PARÁMETRO	VALOR
1	5/10/2011	7,38	Valor mínimo:	1.80 h
2	10/11/2011	3,98	Valor máximo:	7.38 h
3	15/11/2011	1,80	Media:	4.17 h
4	03/02/2012	6,10	Desv. Estándar:	2.6 h
5	14/02/2012	2,52		
6	23/02/2012	3,25		

La distribución obtenida es la siguiente:

Distribución: Tipo Beta

Expresión: $1.24 + 6.71 * \text{BETA}(0.603, 0.777)$

Error: 0.002424

Resultado Prueba Kolmogorov-Smirnov: 0.219

Para establecer una curva de aprendizaje, se comparó el valor promedio de las primeras y las últimas mediciones identificando una disminución de 9,80% en los tiempos de ejecución, en aproximadamente 4,6 meses.

e. INSTALACIÓN PARALES Y CERCHAS

A medida que se avanza con la construcción de las columnas, se instalan los parales y las cerchas que servirán como soporte para las camillas y la materialización de la losa. En la Figura 68 se presenta la instalación de los parales y las cerchas identificada en los videos.



Figura 68. Fotografía 15-FEB-12. Sección de Fotografía Instalación de parales y cerchas

Las mediciones obtenidas de instalación de parales y cerchas se presentan en la Tabla 15.

Tabla 15. Mediciones instalación de parales y cerchas

MEDICIÓN	FECHA	DURACIÓN (H)	PARÁMETRO	VALOR
1	1/10/2011	6,90	Valor mínimo:	1.80 h
2	25/10/2011	4,92	Valor máximo:	7.38 h
3	10/11/2011	25,35	Media:	4.17 h
4	06/02/2012	4,62	Desv. Estándar:	2.6 h
5	15/02/2012	4,97		
6	24/02/2012	3,77		
7	28/02/2012	27,65		
8	05/03/2012	5,60		
9	08/03/2012	13,22		

La distribución obtenida es la siguiente:

Distribución: Tipo Beta

Expresión: $3 + 25 * \text{BETA} (0.472, 0.738)$

Error: 0.072477

Resultado Prueba Kolmogorov-Smirnov: 0.293

Para establecer una curva de aprendizaje, se comparó el valor promedio de las primeras y las últimas mediciones identificando una disminución de 34,22% en los tiempos de ejecución, en aproximadamente 5,2 meses.

f. INSTALACIÓN CAMILLAS

Al tener áreas completas de parales y cerchas instaladas, se procede con la disposición estos elementos de soporte temporal en madera. En la Figura 69 se presenta la instalación de las camillas identificada en los videos.



Figura 69. Fotografías 15-FEB-12. Sección de Fotografía Instalación de Camillas

Las mediciones obtenidas de instalación de camillas se presentan en la Tabla 16.

Tabla 16. Mediciones instalación de camillas

MEDICIÓN	FECHA	DURACIÓN (H)	PARÁMETRO	VALOR
1	03/10/2011	5,42	Valor mínimo:	2.92 h
2	25/10/2011	8,05	Valor máximo:	15.75 h
3	11/11/2011	15,75	Media:	7.56 h
4	07/02/2012	9,68	Desv. Estándar:	3.65 h
5	14/02/2012	7,38		
6	15/02/2012	5,27		
7	24/02/2012	2,92		
8	01/03/2012	5,70		
9	05/03/2012	7,87		

La distribución obtenida es la siguiente:

Distribución: Tipo Erlang

Expresión: 2 + ERLA (1.85, 3)

Error: 0.034323

Resultado Prueba Kolmogorov-Smirnov: 0.148

Para establecer una curva de aprendizaje, se comparó el valor promedio de las primeras y las últimas mediciones identificando una disminución de 41,23% en los tiempos de ejecución, en aproximadamente 5 meses.

g. AMARRE VIGAS

A medida que se tiene área de soporte suficiente, se inicia el amarre de las vigas, dando prioridad por los elementos principales seguido con las viguetas o elementos de menor tamaño. En la Figura 70 se puede observar la el proceso de amarre de vigas.



Figura 70. Fotografías 17-FEB-12. Sección de Fotografía amarre de Vigas

Las mediciones obtenidas de amarre de vigas se presentan en la Tabla 17.

Tabla 17. Mediciones amarre de vigas

MEDICIÓN	FECHA	DURACIÓN (H)	PARÁMETRO	VALOR
1	03/10/2011	24,52	Valor mínimo:	5.62 h
2	09/11/2011	12,90	Valor máximo:	24.52 h
3	08/02/2012	13,02	Media:	11.9 h
4	15/02/2012	6,67	Desv. Estándar:	5.78 h
5	17/02/2012	5,62		
6	27/02/2012	10,03		
7	02/03/2012	10,45		
8	07/03/2012	12,28		

La distribución obtenida es la siguiente:

Distribución: Tipo Weibull

Expresión: $5 + WEIB(7.48, 1.28)$

Error: 0.069358

Resultado Prueba Kolmogorov-Smirnov: 0.21

Para establecer una curva de aprendizaje, se comparó el valor promedio de las primeras y las últimas mediciones identificando una disminución de 32,80% en los tiempos de ejecución, en aproximadamente 5,1 meses.

h. FORMALETA VIGAS

En cuanto se finaliza y se revisa el acero de las vigas, se procede con el armado de la formaleta de los elementos. En la Figura 71 se puede observar el proceso de armado de formaleta de vigas.



Figura 71. Fotografía 18-FEB-12. Sección de Fotografía Formaleta Vigas

Las mediciones obtenidas de instalación de formaleta de vigas se presentan en la Tabla 18.

Tabla 18. Mediciones instalación formaleta de vigas

MEDICIÓN	FECHA	DURACIÓN (H)	PARÁMETRO	VALOR
1	24/10/2011	24,42	Valor mínimo:	6.47 h
2	03/11/2011	36,00	Valor máximo:	36,00 h
3	03/11/2011	19,52	Media:	16.7 h
4	10/11/2011	24,03	Desv. Estándar:	8.75 h
5	15/11/2011	15,00		

6	08/02/2012	12,53
7	15/02/2012	12,58
8	17/02/2012	10,10
9	29/02/2012	7,58
10	02/03/2012	14,97
11	08/03/2012	6,47

La distribución obtenida es la siguiente:

Distribución: Tipo Weibull

Expresión: 6 + WEIB (11.3, 1.2)

Error: 0.033156

Resultado Prueba Kolmogorov-Smirnov: 0.133

Para establecer una curva de aprendizaje, se comparó el valor promedio de las primeras y las últimas mediciones identificando una disminución de 52,82% en los tiempos de ejecución, en aproximadamente 4,5 meses.

i. CONCRETO VIGAS

Al finalizar la instalación de las formaletas de las vigas, se procede con el vaciado del concreto de las vigas dejando expuesta una sección en la parte superior del armado para su vaciado monolíticamente con la placa. En la Figura 72 se puede observar el proceso de vaciado de concreto de vigas.



Figura 72. Fotografía 18-FEB-12. Sección de Fotografía Concreto Vigas

Las mediciones obtenidas de vaciado de concreto de vigas se presentan en la Tabla 19.

Tabla 19. Mediciones concreto de vigas

MEDICIÓN	FECHA	DURACIÓN (H)	PARÁMETRO	VALOR
1	30/09/2011	2.2	Valor mínimo:	2.00 h
2	24/10/2011	3.82	Valor máximo:	5.87 h
3	12/11/2011	5.67	Media:	3.6 h
4	09/02/2012	2.0	Desv. Estándar:	1.43 h
5	17/02/2012	3.2		
6	29/02/2012	2.95		
7	01/03/2012	4.27		
8	03/03/2012	2.45		
9	09/03/2012	5.87		

La distribución obtenida es la siguiente:

Distribución: Tipo Exponencial

Expresión: $2 + \text{EXPO}(1.6)$

Error: 0.046059

Resultado Prueba Kolmogorov-Smirnov: 0.123

Para establecer una curva de aprendizaje, se comparó el valor promedio de las primeras y las últimas mediciones identificando un aumento de 15,01% en los tiempos de ejecución, en aproximadamente 5,3 meses.

j. RETIRO FORMALETA VIGAS

Posterior al fraguado se retiran los elementos de la formaleta de las vigas. Estas secciones de la formaleta son llevadas a otra zona de la torre donde serán utilizadas para la misma actividad. En la Figura 73 se presenta esta actividad tal y como se puede observar en los videos.



Figura 73. Fotografía 01-MAR-12. Sección de Fotografía Retiro Formaleta Vigas

Las mediciones obtenidas de retiro de formaleta de vigas se presentan en la Tabla 20.

Tabla 20. Mediciones retiro formaleta de vigas

MEDICIÓN	FECHA	DURACIÓN (H)	PARÁMETRO	VALOR
1	08/11/2011	12.78	Valor mínimo:	1.47 h
2	15/11/2011	4.5	Valor máximo:	12.78 h
3	10/02/2012	2.43	Media:	4.44 h
4	14/02/2012	3.17	Desv. Estándar:	3.53 h
5	17/02/2012	2.77		
6	20/02/2012	4.47		
7	01/03/2012	1.47		
8	05/03/2012	3.9		

La distribución obtenida es la siguiente:

Distribución: Tipo Lognormal

Expresión: $1 + \text{LOGN}(3.45, 3.6)$

Error: 0.031800

Resultado Prueba Kolmogorov-Smirnov: 0.203

Para establecer una curva de aprendizaje, se comparó el valor promedio de las primeras y las últimas mediciones identificando una disminución de 44,89% en los tiempos de ejecución, en aproximadamente 3,9 meses.

k. DISPOSICIÓN LÁMINAS METALDECK

Tras retirar la formaleta de las vigas, se disponen los paneles de metaldeck, asegurando su modularización para cubrir la totalidad del área de la placa. En la Figura 74 se presenta la actividad en referencia.



Figura 74. Fotografía 20-FEB-12. Sección de Fotografía Disposición láminas metaldeck

Las mediciones obtenidas de disposición de láminas de metaldeck se presentan en la Tabla 21.

Tabla 21. Mediciones disposición láminas de metaldeck

MEDICIÓN	FECHA	DURACIÓN (H)	PARÁMETRO	VALOR
1	8/11/2011	6.65	Valor mínimo:	2.63 h
2	9/11/2011	2.63	Valor máximo:	6.65 h
3	8/11/2011	5.92	Media:	4.48 h
4	15/11/2011	5.98	Desv. Estándar:	1.47 h
5	10/02/2012	3.93		
6	14/02/2012	4.22		
7	17/02/2012	2.68		
8	01/03/2012	3.43		
9	05/03/2012	4.88		

La distribución obtenida es la siguiente:

Distribución: Tipo Beta

Expresión: $2.23 + 4.77 * \text{BETA}(1.11, 1.22)$

Error: 0.002849

Resultado Prueba Kolmogorov-Smirnov: 0.139

Para establecer una curva de aprendizaje, se comparó el valor promedio de las primeras y las últimas mediciones identificando una disminución de 24,28% en los tiempos de ejecución, en aproximadamente 3,9 meses.

I. DISPOSICIÓN MALLA Y VACIADO RECUBRIMIENTO

Al tener el área totalmente cubierta por los paneles de metaldeck, se procede con la instalación de la malla electro-soldada y el vaciado del recubrimiento para finalizar la construcción de la placa. En la Figura 75 se presenta la actividad mencionada.



Figura 75. Fotografía 20-FEB-12. Sección de Fotografía Disposición malla y vaciado recubrimiento

Las mediciones obtenidas de disposición de malla y vaciado de recubrimiento se presentan en la Tabla 22.

Tabla 22. Mediciones disposición de malla y vaciado de recubrimiento

MEDICIÓN	FECHA	DURACIÓN (H)	PARÁMETRO	VALOR
1	08/11/2011	2	Valor mínimo:	1.25 h
2	09/11/2011	3.18	Valor máximo:	6.3 h
3	08/11/2011	2	Media:	3.38 h
4	16/11/2011	6.3	Desv. Estándar:	1.48 h
5	10/02/2012	4.38		
6	14/02/2012	4.32		
7	18/02/2012	4.87		
8	20/02/2012	2.5		
9	24/02/2012	3.42		
10	01/03/2012	1.25		
11	05/03/2012	2.98		

La distribución obtenida es la siguiente:

Distribución: Tipo Triangular

Expresión: TRIA (1, 1.58, 6.81)

Error: 0.008244

Resultado Prueba Kolmogorov-Smirnov: 0.159

Para establecer una curva de aprendizaje, se comparó el valor promedio de las primeras y las últimas mediciones identificando una disminución de 18,74% en los tiempos de ejecución, en aproximadamente 3,9 meses.

m. AMARRE ASCENSOR

Tal y como se ha mencionado anteriormente, en esta actividad se realiza el amarre del acero, la revisión de verticalidad y la previsión de tubería e instalaciones, hidráulicas o eléctricas, cuando se requiere. En la Figura 76 se presenta la forma como se puede identificar el amarre de ascensor en los videos estudiados.



Figura 76. Fotografía 29-SEP-11. Sección de Fotografía amarre ascensor

Las mediciones obtenidas de amarre ascensor se presentan en la Tabla 23.

Tabla 23. Mediciones amarre ascensor

MEDICIÓN	FECHA	DURACIÓN (H)	PARÁMETRO	VALOR
1	03/10/2011	3.93	Valor mínimo:	3.93 h
2	03/03/2012	4.4	Valor máximo:	4.88 h
3	08/03/2012	4.88	Media:	4.41 h
			Desv. Estándar:	0.475 h

La distribución obtenida es la siguiente:

Distribución: Tipo Beta

Expresión: $3.83 + 1.15 * \text{BETA}(0.853, 0.838)$

Error: 0.114999

Resultado Prueba Kolmogorov-Smirnov: 0.237

n. FORMALETA ASCENSOR

Tras finalizar con el amarre del acero, se inicia la instalación de la formaleta del ascensor, asegurando los soportes para garantizar la estabilidad de los elementos durante el vaciado del concreto. En la Figura 77 se presenta la instalación de la formaleta del ascensor tal y como se puede identificar en los videos estudiados.



Figura 77. Fotografía 14-FEB-12. Sección de formaleta ascensor

Las mediciones obtenidas de instalación de formaleta de ascensor se presentan en la Tabla 24.

Tabla 24. Mediciones instalación de formaleta ascensor

MEDICIÓN	FECHA	DURACIÓN (H)	PARÁMETRO	VALOR
1	30/09/2011	5.9	Valor mínimo:	5.90 h
2	09/11/2011	7.42	Valor máximo:	11.32 h
3	03/02/2012	6.92	Media:	8.43 h
4	13/02/2012	11.32	Desv. Estándar:	2.13 h
5	23/02/2012	10.58		
6	03/03/2012	8.45		

La distribución obtenida es la siguiente:

Distribución: Tipo Uniforme

Expresión: UNIF (5.35, 11.9)

Error: 0.077778

Resultado Prueba Kolmogorov-Smirnov: 0.19

Para establecer una curva de aprendizaje, se comparó el valor promedio de las primeras y las últimas mediciones identificando un aumento de 49,95% en los tiempos de ejecución, en aproximadamente 5 meses.

o. CONCRETO ASCENSOR

Al finalizar con la instalación de la formaleta del ascensor, se procede con el vaciado del concreto. Tal y como se mencionó, las actividades principales son el transporte, disposición y vibrado del concreto. En la Figura 78 se presenta la forma como se puede identificar el proceso de vaciado del concreto del ascensor.



Figura 78. Fotografía 15-FEB-12. Sección de Concreto Ascensor

Las mediciones obtenidas de concreto ascensor se presentan en la Tabla 25.

Tabla 25. Mediciones concreto ascensor

MEDICIÓN	FECHA	DURACIÓN (H)	PARÁMETRO	VALOR
1	01/10/2011	3.45	Valor mínimo:	1.13 h
2	09/11/2011	2	Valor máximo:	3.45 h
3	03/02/2012	1.87	Media:	1.83 h
4	15/02/2012	1.3	Desv. Estándar:	0.777 h
5	24/02/2012	1.47		
6	03/03/2012	1.13		
7	28/02/2012	1.57		

La distribución obtenida es la siguiente:

Distribución: Tipo Lognormal

Expresión: $1 + \text{LOGN}(0.842, 0.882)$

Error: 0.048785

Resultado Prueba Kolmogorov-Smirnov: 0.121

Para establecer una curva de aprendizaje, se comparó el valor promedio de las primeras y las últimas mediciones identificando una disminución de 35,49% en los tiempos de ejecución, en aproximadamente 5 meses.

p. RETIRO FORMALETA ASCENSOR

Después del vaciado del concreto, y cuando el mismo tiene la resistencia suficiente, se procede con el desencofrado o retiro de las formaletas. En la Figura 79 se presenta la forma como se puede identificar el retiro de formaleta del ascensor.



Figura 79. Fotografía 03-OCT-11. Sección de retiro formaleta ascensor

Las mediciones obtenidas de retiro de formaleta ascensor se presentan en la Tabla 26.

Tabla 26. Mediciones retiro formaleta ascensor

MEDICIÓN	FECHA	DURACIÓN (H)	PARÁMETRO	VALOR
1	10/11/2011	1.97	Valor mínimo:	1.97 h
2	25/02/2012	2.43	Valor máximo:	2.43 h
3	05/03/2012	1.97	Media:	2.12 h
			Desv. Estándar:	0.269 h

La distribución obtenida es la siguiente:

Distribución: Tipo Beta

Expresión: $1.92 + 0.56 * \text{BETA}(0.513, 0.743)$

Error: 0.136651

Resultado Prueba Kolmogorov-Smirnov: 0.318

q. AMARRE ESCALERA

Tal y como se ha mencionado anteriormente, en esta actividad se realiza el amarre del acero, la revisión de verticalidad y la previsión de tubería e instalaciones, hidráulicas o eléctricas, cuando se requiere. En la Figura 80 se presenta la forma como se puede identificar el amarre de escalera en los videos estudiados.



Figura 80. Fotografía 15-FEB-12. Sección de Amarre Escalera

Las mediciones obtenidas de retiro de amarre escalera se presentan en la Tabla 27.

Tabla 27. Mediciones amarre escalera

MEDICIÓN	FECHA	DURACIÓN (H)	PARÁMETRO	VALOR
1	29/09/2011	14.7	Valor mínimo:	9.43 h
2	24/10/2011	9.43	Valor máximo:	21.02 h
3	15/02/2012	21.02	Media:	15.1 h
4	25/02/2012	15.42	Desv. Estándar:	4.74 h

La distribución obtenida es la siguiente:

Distribución: Tipo Uniforme

Expresión: UNIF (9, 22)

Error: 0.175000

Resultado Prueba Kolmogorov-Smirnov: 0.256

Al comparar el valor promedio de las primeras y las últimas mediciones se puede identificar un aumento de 51,02% en los tiempos de ejecución.

Para establecer una curva de aprendizaje, se comparó el valor promedio de las primeras y las últimas mediciones identificando una disminución de 51,02% en los tiempos de ejecución, en aproximadamente 4,9 meses.

a. FORMALETA ESCALERA

Tras finalizar con el amarre del acero, se inicia la instalación de la formaleta de la escalera, asegurando los soportes para garantizar la estabilidad de los elementos durante el vaciado del concreto. En la Figura 81 se presenta la instalación de la formaleta de la escalera.



Figura 81. Fotografía 17-FEB-12. Sección de Formaleta Escalera

Las mediciones obtenidas de instalación de formaleta de escalera se presentan en la Tabla 28.

Tabla 28. Mediciones instalación formaleta escalera

MEDICIÓN	FECHA	DURACIÓN (H)	PARÁMETRO	VALOR
1	03/10/2011	10.57	Valor mínimo:	2.43 h
2	25/10/2011	8.37	Valor máximo:	10.6 h
3	17/02/2012	5.47	Media:	6.02 h
4	18/02/2012	2.43	Desv. Estándar:	2.94 h
5	27/02/2012	4.38		
6	07/03/2012	4.88		

La distribución obtenida es la siguiente:

Distribución: Tipo Erlang

Expresión: 2 + ERLA (2.01, 2)

Error: 0.098223

Resultado Prueba Kolmogorov-Smirnov: 0.166

Al comparar el valor promedio de las primeras y las últimas mediciones se puede identificar una disminución de 52,11% en los tiempos de ejecución.

Para establecer una curva de aprendizaje, se comparó el valor promedio de las primeras y las últimas mediciones identificando una disminución de 52,11% en los tiempos de ejecución, en aproximadamente 5,1 meses.

r. CONCRETO ESCALERA

Al finalizar con la instalación de la formaleta de la escalera, se procede con el vaciado del concreto. Tal y como se mencionó, las actividades principales son el transporte, disposición y vibrado del concreto. En la Figura 82 se presenta la forma como se puede identificar el proceso de vaciado del concreto de la escalera.



Figura 82. Fotografía 04-OCT-11. Sección de concreto escalera

Las mediciones obtenidas de instalación de formaleta de escalera se presentan en la Tabla 29.

Tabla 29. Mediciones instalación de formaleta

MEDICIÓN	FECHA	DURACIÓN (H)	PARÁMETRO	VALOR
1	04/10/2011	1.47	Valor mínimo:	0.983 h
2	25/10/2011	2.4	Valor máximo:	2.40 h
3	17/02-2012	2.07	Media:	1.73 h
4	28/02/2012	0.98	Desv. Estándar:	0.63 h

La distribución obtenida es la siguiente:

Distribución: Tipo Beta

Expresión: $0.84 + 1.71 * \text{BETA} (0.985, 0.934)$

Error: 0.047917

Resultado Prueba Kolmogorov-Smirnov: 0.206

Para establecer una curva de aprendizaje, se comparó el valor promedio de las primeras y las últimas mediciones identificando un aumento de 21,19% en los tiempos de ejecución, en aproximadamente 4,8 meses.

s. RETIRO FORMALETA ESCALERA

Después del vaciado del concreto, y cuando el mismo tiene la resistencia suficiente, se procede con el desencofrado o retiro de las formaletas. En la Figura 83 se presenta la forma como se puede identificar el retiro de formaleta de la escalera.



Figura 83. Fotografía 18-FEB-12. Sección de Retiro Formaleta Escalera

Las mediciones obtenidas de instalación de formaleta de escalera se presentan en la Tabla 30.

Tabla 30. Mediciones retiro formaleta escalera

MEDICIÓN	FECHA	DURACIÓN (H)	PARÁMETRO	VALOR
1	08/11/2011	0.5	Valor mínimo:	0.50 h
2	08/02/2012	6.92	Valor máximo:	6.92 h
3	29/02/2012	1.47	Media:	2.83 h
4	03/03/2012	2.43	Desv. Estándar:	2.84 h

La distribución obtenida es la siguiente:

Distribución: Tipo Lognormal

Expresión: LOGN (2.93, 3.53)

Error: 0.130591

Resultado Prueba Kolmogorov-Smirnov: 0.169

Para establecer una curva de aprendizaje, se comparó el valor promedio de las primeras y las últimas mediciones identificando un aumento de 47,44% en los tiempos de ejecución, en aproximadamente 3,8 meses.

7.5.3 CONSIDERACIONES MEDICIONES DE TIEMPOS

Estas son algunas de las consideraciones especiales que se tuvieron en cuenta para realizar las mediciones de los tiempos y la obtención de la distribución que siguen:

- Se consideró que las actividades inician a las 7 am y finalizan a las 7 pm.
- Se midieron los tiempos mediante la diferencia entre la hora de fin e inicio de los trabajos.
- Se eligió la distribución, que según la herramienta utilizada (Input Analyzer, Rockwell Software), resulta más adecuada para cada una de las series de datos que se estudia.

7.6 MODELO SIMULACIÓN

En este capítulo se explica el modelo de simulación digital del proceso constructivo, presentando la información de entrada requerida, las partes del mismo y el proceso de verificación y validación de su funcionamiento.

7.6.1 FUNCIONAMIENTO MODELO DE SIMULACIÓN

7.6.1.1 INFORMACIÓN DE ENTRADA

La información de entrada que se utilizó para la construcción del modelo es la siguiente:

- Duraciones de actividades
- Distribuciones probabilísticas de las duraciones medidas
- Flujo de trabajo identificado
- Fecha de inicio de actividades
- Recursos requeridos para cada una de las actividades
- Disponibilidad recursos de personal
- Disponibilidad de equipo menor
- Características específicas de la obra y su ejecución

7.6.1.2 PARTES DEL MODELO

El modelo desarrollado en Arena (Rockwell Software), presentado en la Figura 84, simula las actividades que se llevaron a cabo para construir la torre 1 de la edificación en estudio. A continuación, se presentan cada una de sus partes y su función para el adecuado funcionamiento del modelo de para representar estas actividades:

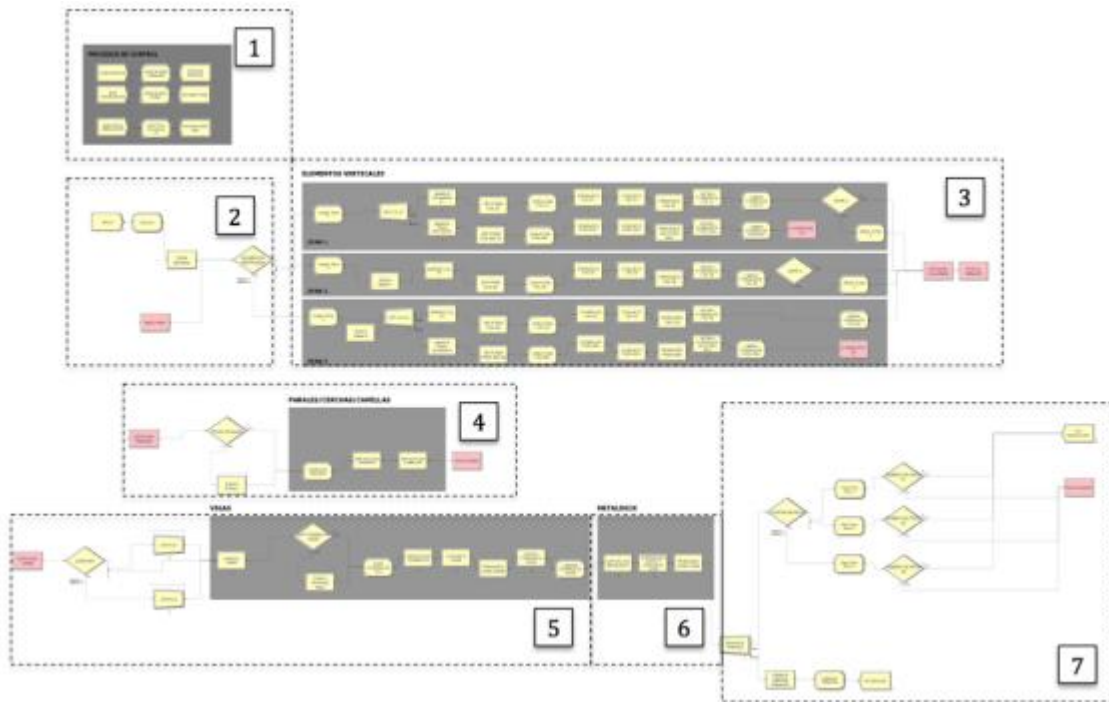


Figura 84. Partes del modelo

7.6.1.2.1 CONTROL INGRESO DE ENTIDADES [1]

El control de ingreso de entidades es la primera parte del modelo, con estos procesos se definen las variables de la cantidad de formaletas, de juegos de parales para la torre 1 y el número de pisos que se simulará en el modelo. En la Figura 85, se presenta la sección de control de ingreso de entidades y definición de variables.

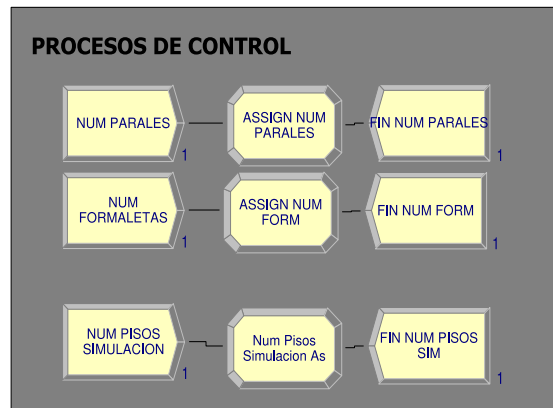


Figura 85. Control de ingreso de entidades

7.6.1.2.2 IDENTIFICACIÓN DE ENTIDADES [2]

Desde este punto inicia la simulación del proceso constructivo. En el primer bloque se crean, desde el tiempo cero de la simulación, tres entidades que entrarán a cada uno de los procesos de construcción.

Estas entidades son identificadas por medio de la asignación de atributos e imágenes que permitirán su reconocimiento mientras se realiza la simulación. El principal atributo que se asigna a cada una de las entidades es la zona a la que pertenece porque dependiendo de su localización deben recorrer diferentes partes del sistema de simulación. La principal diferencia en el recorrido que debe hacer cada una de las entidades en el modelo, radica en los elementos estructurales verticales que se deben construir debido a la presencia de ascensor en la Zona 3 y escalera en la Zona 1.

En la Figura 86, se presenta los bloques de identificación de actividades del modelo.

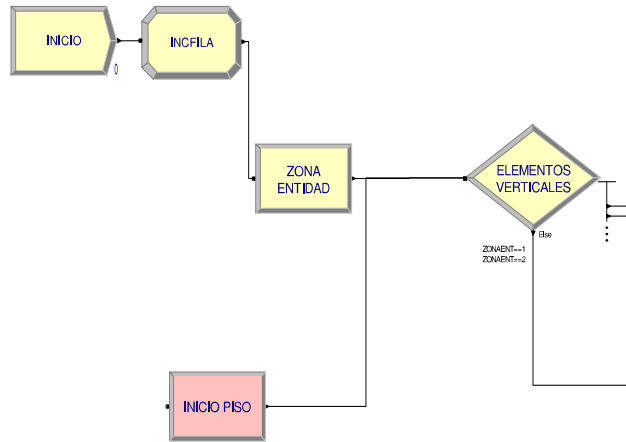


Figura 86. Identificación de entidades

7.6.1.2.3 ELEMENTOS VERTICALES [3]

La primera parte de esta sección de Elementos Verticales tiene la función de enrutar cada una de las entidades, según su zona, por las actividades de columnas y ascensor o escalera según se requiera. En la Figura 87 se puede diferenciar cada una de las zonas con las actividades que se realizan en cada una de ellas.

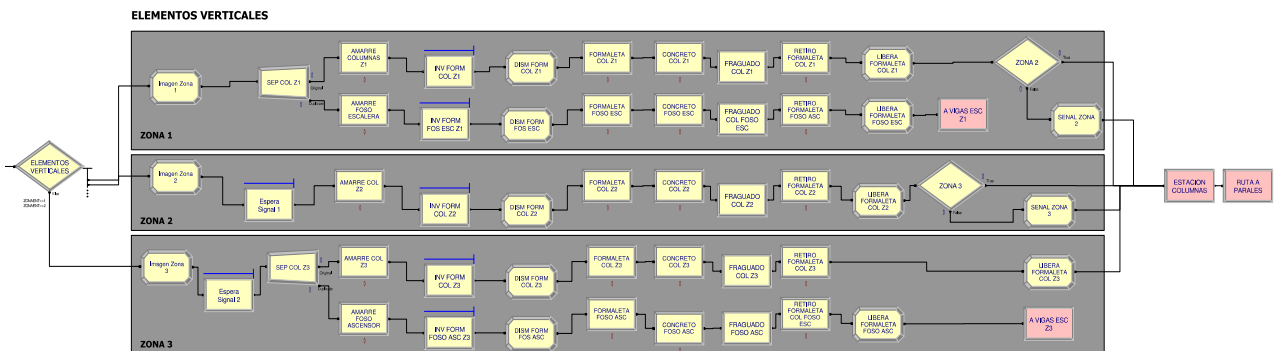


Figura 87. Construcción elementos verticales

En la parte inicial, para las Zonas 1 y 3, se tiene un bloque que separa la entidad en dos completamente idénticas. La primera de ellas hace el recorrido por construcción de las columnas y la segunda por el ascensor o la escalera.

La primera de las actividades que se realiza para los elementos verticales es el amarre de las columnas. En este trabajo, tal y como se ha mencionado, se realiza el amarre del acero y la revisión de los planos estructurales.

Siguiendo el orden del proceso, posterior al amarre del acero de las columnas se revisa si se tiene inventario de formaletas para realizar la instalación de las mismas. Si en algún caso no hay inventario de estas formaletas de elementos verticales, la entidad entra en espera hasta que se liberen las mismas.

La siguiente actividad consiste en la disposición y vibrado del concreto, y después, tras su adquisición de resistencia suficiente se procede con el desenfrado o retiro de la formaleta. En este momento se libera la formaleta aumentando en una unidad la variable inventario de formaleta de columnas.

En esta sección del modelo se encuentra el elemento que permite que la simulación caracterice el proceso constructivo de esta obra en particular. Esta función consiste en una espera que se dispuso al finalizar las actividades de la zona 1 y que condiciona el inicio de la zona 2. De la misma forma se tiene esta función para el inicio de las columnas de la zona 3 al finalizar la zona 2.

7.6.1.2.4 PARALES/CERCHAS/CAMILLAS [4]

Cuando la entidad recorre las actividades de construcción de columnas continúa con la zona de instalación de parales, cerchas y camillas. Inicialmente, y de la misma forma como inician las actividades de las columnas, se revisa el inventario de parales. Así pues, si la variable relacionada a este inventario es mayor o igual a 1 se procede con las actividades o de lo contrario la entidad entra en una espera.

Posteriormente, y de acuerdo a la lógica de la construcción, se realizan las actividades de instalación de parales, cerchas y camillas. Finalmente, la entidad entra a bloque que tiene la transporta hacia la siguiente estación.

En la Figura 88 se presentan las actividades de instalación de parales, cerchas y camillas.

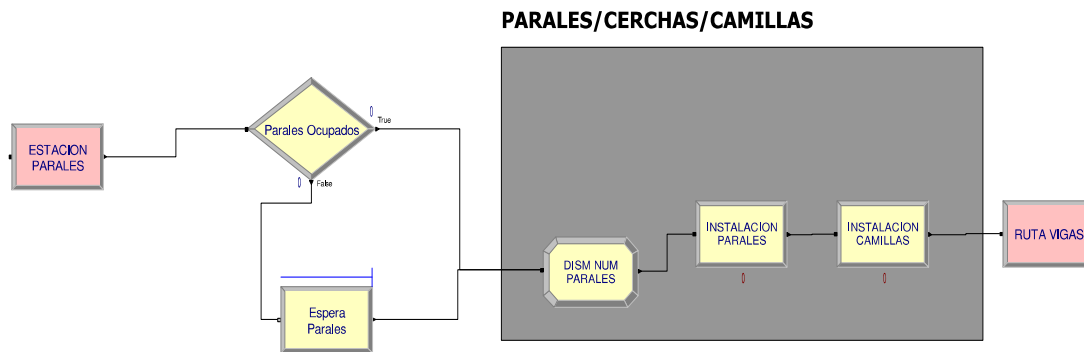


Figura 88. Parales / Cerchas / Camillas

7.6.1.2.5 VIGAS [5]

De la misma manera, cuando la entidad entra a la zona de la construcción de las vigas, inicia por la revisión del inventario para proceder con la disminución de la variable y ejecución de los procesos relacionados.

En la Figura 89, se presentan los bloques con los que se simula la construcción de las vigas en la torre.

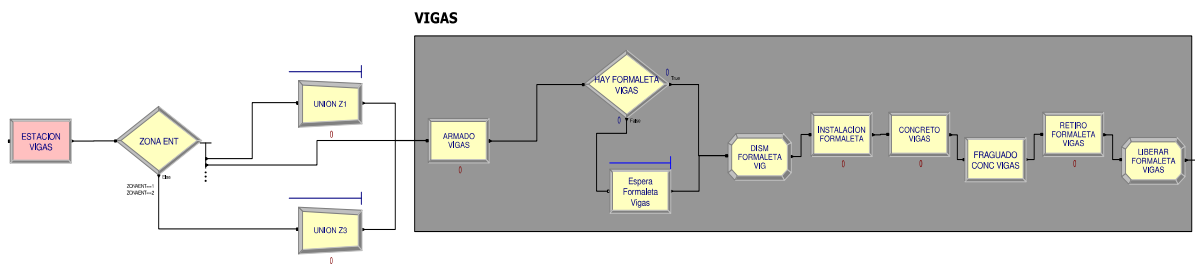


Figura 89. Construcción vigas

7.6.1.2.6 DISPOSICIÓN DE LÁMINAS METALDECK Y VACIADO DE RECUBRIMIENTO [6]

Finalmente, cuando se liberan las formaletas de las vigas, se realizan los procesos relacionados con la disposición de láminas de metaldeck, la malla y el vaciado del concreto de la losa. En este caso, y

debido a la continua presencia de personal para el corte de los paneles de metaldeck, se asumió siempre la disponibilidad del material para su utilización.

En la Figura 90 se presentan los procesos para simular la disposición de láminas de metaldeck y el vaciado del recubrimiento.

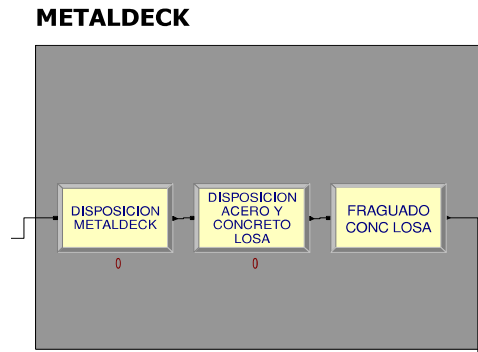


Figura 90. Disposición de láminas de metaldeck y vaciado de recubrimiento

7.6.1.2.7 RECIRCULACIÓN DE ENTIDADES [7]

Finalmente, se dispuso un grupo de bloques que tienen la función de garantizar la recirculación de las entidades. En este punto se realiza la revisión de la variable del número de pisos actuales para que cuando sea menor a los inicialmente establecidos se inicie nuevamente el proceso. Adicionalmente, se tienen los procesos para realizar la liberación de los parales y la asignación de la nueva variable en su inventario.

En la Figura 91, se presentan los bloques utilizados para la recirculación de las entidades y la liberación de los parales.

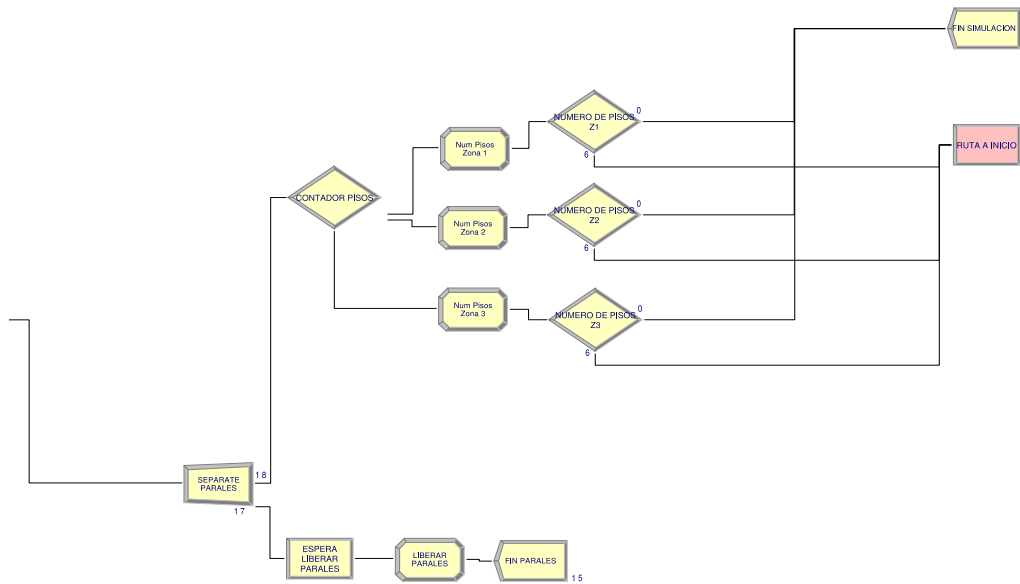


Figura 91. Recirculación de entidades

7.6.1.2.8 ANIMACIÓN DEL MODELO [8]

La animación del modelo es un complemento al funcionamiento del mismo que permite su revisión y la identificación del estado de la simulación. Se realizó la animación del piso actual de cada una de las zonas, el inventario de los parales y las formaletas de las columnas y vigas, y la ocupación de los recursos.

En la Figura 92 se puede observar la animación del modelo. Específicamente para la ocupación de los recursos, el color verde representa el recurso ocupado y el blanco el recurso libre.

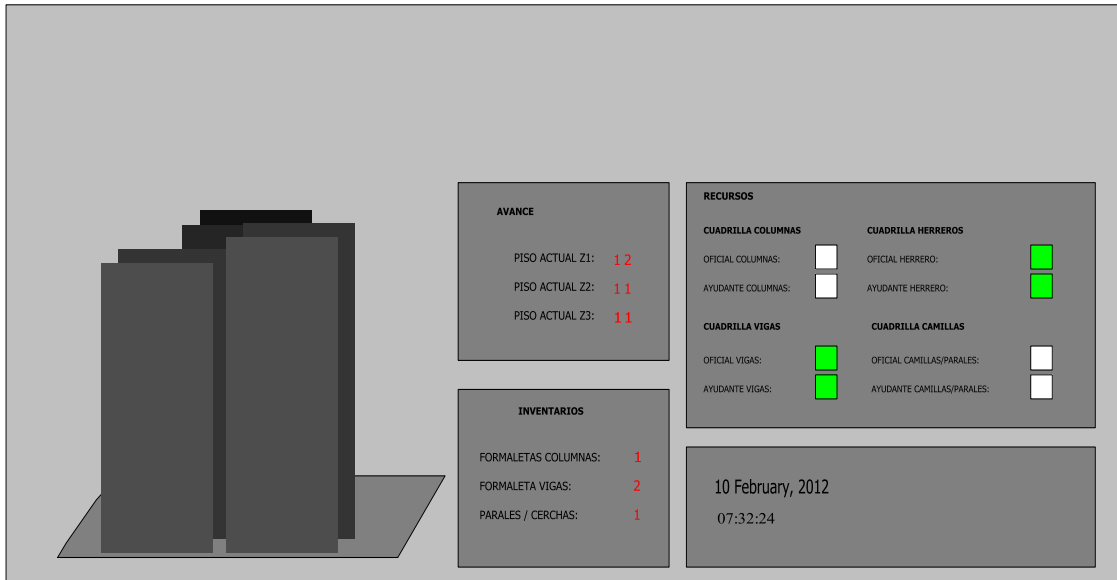


Figura 92. Animación del modelo de simulación

7.6.2 VERIFICACIÓN

La verificación del modelo consiste en la revisión de la forma como se ejecuta la simulación con el fin de identificar si en realidad se están realizando las actividades adecuadamente. En este capítulo se presenta la forma como se revisó que el modelo construido representa idóneamente el proceso constructivo estudiado.

7.6.2.1 REVISIÓN LÓGICA DEL MODELO

Algunas de las observaciones que se realizaron para establecer que en general el modelo se encuentra adecuadamente construido son:

- Las entidades no se quedan en algún procedimiento y siempre finalizan en la última actividad del proceso. Esto puede suceder cuando hay algún inconveniente con la capacidad de los recursos o la disponibilidad de los mismos.
- No se presentan esperas excesivas de las entidades en algún proceso. Si esto ocurre pueden haber problemas con la adecuada liberación y asignación de las variables de inventarios.
- Las entidades realizan el procedimiento tantas veces como se establece en la asignación de las variables. Esto se puede observar en el número de ciclos que realiza una entidad recorriendo el modelo.

- Adecuada configuración de los elementos de decisión en el modelo para garantizar el recorrido de las entidades de acuerdo al plan de ejecución de la obra.
- Flujo de trabajo lógico. Es decir, tener en cuenta que las actividades predecesoras y sucesoras de cada proceso son las adecuadas para la ejecución del proyecto.
- Adecuado funcionamiento de los procesos de control que permiten la recirculación de las entidades, asignación de variables, decisiones por falta de inventarios, o transportes a estaciones internas del modelo.

7.6.2.2 CONTROL DE LOS INVENTARIOS

Para realizar el control de los inventarios en el modelo, se dispusieron contadores para las variables de formaletas de columnas y vigas y cantidad de parales. Se puede concluir que el modelo se encuentra adecuadamente construido cuando en las corridas se inicia con los valores inicialmente asignados y se finaliza con este mismo número. Si por el contrario, estos valores no vuelven a lo inicialmente propuesto puede haber problemas en la liberación o en la asignación de las variables.

Las variables utilizadas para esta verificación y los respectivos valores iniciales de cada una son los siguientes:

- Numero de parales (NumParales) = 6
- Numero de formaleta vigas (NumFormVig) = 3
- Numero de formaletas para ascensor y escalera (NumFormAscEsc) = 1
- Numero de formaletas para columnas (NumFormCol) = 1

7.6.2.3 REVISIÓN CONJUNTA CON EL DIRECTOR DE OBRA E INGENIERO RESIDENTE

Tras la verificación de los puntos anteriores se realizó la revisión conjunta con el director de obra y el ingeniero residente de la firma constructora. De estas revisiones se propusieron cambios que permitieron que el modelo representara más adecuadamente la construcción de la torre.

Con el director de obra y el ingeniero residente se revisaron los siguientes aspectos del modelo:

- Orden de magnitud lógica de la duración de las actividades medidas
- Disponibilidad total de ayudantes y oficiales en la obra
- Recorrido adecuado de cada una de las entidades en el modelo
- Tiempo total de ejecución adecuado de acuerdo a lo planeado y a la forma como se llevaron a cabo las actividades
- Manejo y circulación de las formaletas en obra
- Disponibilidad de Formaletas y cantidad de parales, cerchas y camillas
- Validación del flujo de trabajo

7.6.2.4 REVISIÓN DE FECHAS DE FINALIZACIÓN

Otro aspecto que permitió concluir que el modelo representa adecuadamente el proceso constructivo consiste en la revisión de las fechas de finalización de las corridas inicialmente realizadas.

En la Tabla 31 se presentan las fechas obtenidas para las primeras 10 replicaciones realizadas.

Tabla 31. Fecha de finalización primeras 10 replicaciones

# REPLICACIÓN	FECHA DE FINALIZACIÓN
1	24-Abr-12
2	07-May-12
3	16-Abr-12
4	17-Abr-12
5	03-May-12
6	18-Abr-12
7	22-Abr-12
8	19-Abr-12
9	11-Abr-12
10	13-Abr-12

Al revisar el total de las 50 replicaciones necesarias, se obtuvo una duración promedio de 203 días, valor que corresponde a finalizar el día 23 de Abril de 2012. Teniendo en cuenta que la fecha de finalización inicialmente corresponde al 19 de Abril de 2012, se puede observar la similitud de los valores obtenidos en la simulación digital.

7.6.2.5 VERIFICACIÓN DE TIEMPOS DE ACTIVIDADES

Igualmente, con el fin de verificar la información de entrada del modelo, se revisó con el director de obra la consistencia de los valores promedio obtenidos en las mediciones con las duraciones reales de las actividades. De esta forma, se obtuvo el aval para iniciar con el análisis de las distribuciones probabilísticas de cada una de las series de datos.

7.6.3 VALIDACIÓN

Para realizar la validación del modelo de simulación se utilizó el método de intervalos de confianza mediante el cual se obtiene la longitud de dicho intervalo, para una confiabilidad del $100(1-\alpha)$ %, mediante la expresión [1]:

$$H = t_{\frac{\alpha}{2}, R-1} \frac{S}{\sqrt{R}} \quad [1]$$

Donde,

R corresponde al número de replicaciones, **S** es la desviación estándar de la muestra y **t** es el valor correspondiente a la probabilidad del 95% en la distribución t-Student.

Inicialmente, para calcular una desviación estándar semilla, se realizaron un total de 15 replicaciones obteniendo los resultados de duración total de la ejecución de las actividades presentados en la Tabla 32.

Tabla 32. Resultado replicaciones semilla

# REPLICACIÓN	TIEMPO TOTAL (DÍAS)	PARÁMETRO	VALOR
1	204.98	Promedio	202.84
2	217.72	Desviación Estándar	8.51
3	196.12	Varianza	72.41
4	197.02	HalfWidth (Arena)	2.50
5	213.76		
6	198.54		
7	202.3		
8	199.45		
9	191.56		
10	193.45		
11	203.77		
12	195		
13	192.59		
14	222.39		
15	214		
PROMEDIO	201.49		

El numero de replicaciones que se deben realizar para garantizar la confiabilidad del 95% del modelo, se obtienen mediante la siguiente desigualdad [2]:

$$R \geq \left(\frac{Z_{\alpha/2} S_0}{\epsilon} \right)^2 \quad [2]$$

En la Tabla 33 se presentan las iteraciones realizadas para satisfacer la desigualdad presentada.

Tabla 33. Iteraciones para calcular cantidad de replicaciones

GRADOS DE LIBERTAD	20	30	40	45	47
$t_{0,025} R-1$	2.093	2.045	2.023	2.015	2.013
R_0	50.757	48.465	47.403	47.060	46.945

De acuerdo a la Tabla 33 se obtuvo que para garantizar una confiabilidad del 95%, se deben realizar al menos 47 replicaciones con un rango de resultados de 200,16 a 205,53 días. En este caso, se realizaron en total 50 replicaciones.

El resultado promedio de las replicaciones realizadas corresponde a 203,15 días, valor que se encuentra dentro del intervalo de confianza establecido.

7.7 RESULTADOS DEL MODELO

Tras realizar la cantidad de replicaciones del modelo requeridas se obtuvieron los resultados presentados en las tablas presentadas a continuación:

7.7.1 DURACIÓN TOTAL

En la Tabla 34 se presentan los resultados obtenidos en la duración del proyecto.

Tabla 34. Resultados de duración total

DURACIÓN TOTAL (DÍAS)	
PROMEDIO	203.15
DESVIACIÓN ESTÁNDAR (S)	7.51
VARIANZA (S ²)	56.35
NÚMERO REPLICACIONES	50.00

7.7.2 PORCENTAJES DE USO

A continuación, en las Tabla 35 se presentan los porcentajes de uso de los recursos involucrados en el proyecto.

Tabla 35. Resultados de porcentaje de uso de los recursos

% USO OFICIAL HERRERO		% USO AYUDANTE HERRERO	
PROMEDIO	11,87%	PROMEDIO	28,66%
DESVIACIÓN ESTÁNDAR (S)	0,0053	DESVIACIÓN ESTÁNDAR (S)	0,0117
VARIANZA (S ²)	0,00003	VARIANZA (S ²)	0,00014

% USO OFICIAL CAMILLAS		% USO AYUDANTE CAMILLAS	
PROMEDIO	11,60%	PROMEDIO	18,53%
DESVIACIÓN ESTÁNDAR (S)	0,0076	DESVIACIÓN ESTÁNDAR (S)	0,0123
VARIANZA (S ²)	0,00006	VARIANZA (S ²)	0,0002

% USO OFICIAL VIGAS		% USO AYUDANTE VIGAS	
PROMEDIO	11,36%	PROMEDIO	26,12%
DESVIACIÓN ESTÁNDAR (S)	0,0069	DESVIACIÓN ESTÁNDAR (S)	0,0124
VARIANZA (S ²)	0,00005	VARIANZA (S ²)	0,00015

% USO OFICIAL COLUMNAS		% USO OFICIAL COLUMNAS	
PROMEDIO	28,49%	PROMEDIO	28,49%
DESVIACIÓN ESTÁNDAR (S)	0,0157	DESVIACIÓN ESTÁNDAR (S)	0,0157
VARIANZA (S ²)	0,00025	VARIANZA (S ²)	0,00025

7.8 ASPECTOS DE MEJORA IDENTIFICADOS A PARTIR DE LA SIMULACIÓN

La observación de la forma como se ejecuta una replicación del modelo y los resultados obtenidos del mismo, permiten proponer los siguientes aspectos de mejora al proceso constructivo observado:

- En algunas actividades es clara la presencia de más personal del que realmente se requiere. Esto se puede evidenciar en el bajo nivel de uso obtenido de la modelación, de algunos de los recursos que intervienen en los trabajos de último piso. Por este motivo, resultaría útil la revisión de la conformación de las cuadrillas dispuestas para ejecutar los trabajos en la torre 1. No se propone la disminución total de los recursos de toda la obra

pero si una adecuada planeación de los trabajos que se deben realizar en cada una de las torres o áreas.

- La división en dos de las áreas de trabajo actualmente establecidas puede generar una mayor simultaneidad en las actividades. Teniendo en cuenta que los trabajos son realizados por cuadrillas de oficiales y ayudantes diferentes, se propone la ejecución de los trabajos en paralelo avanzando en dos frentes diferentes. Esto podría generar que las actividades se realicen con el personal establecido en la mitad del tiempo, buscando la reducción de esperas o pérdidas que pueden concluir en una reducción del tiempo total de ejecución del proyecto.
- Es posible que un aumento en la cantidad de las formaletas de los elementos verticales (requeridas en las actividades de las columnas, ascensores y formaletas) genere una reducción en el tiempo total de ejecución del proyecto. Esto se debe a que por su utilización en tantas actividades simultáneas, un aumento en su disponibilidad puede disminuir tiempos de esperar o facilitar actividades en paralelo.

7.9 NUEVOS ESCENARIOS DE MODELACIÓN

De acuerdo a los resultados obtenidos del modelo de simulación digital se identificaron los siguientes escenarios teóricos para buscar el mejoramiento del sistema constructivo y la disminución de pérdidas en obra.

- **ESCENARIO 0:** Consiste en el modelo original que representa la ejecución real de la construcción.
- **ESCENARIO 1:** Se plantea modificar la cantidad de recursos disponibles para la cuadrilla de instalación de parales, cerchas y camillas.
- **ESCENARIO 2:** Modificación de la cantidad de recursos disponibles para la cuadrilla de construcción de columnas.
- **ESCENARIO 3:** Modificación de la cantidad de recursos disponibles para la cuadrilla de herreros.
- **ESCENARIO 4:** Modificación de la cantidad de recursos disponibles para la cuadrilla de vigas.
- **ESCENARIO 5:** Combinatoria de la modificación de la disponibilidad de todos los recursos disponibles para todas las cuadrillas.
- **ESCENARIO 6:** Modificación cantidad de formaletas de elementos estructurales verticales.
- **ESCENARIO 7:** Cambio de estrategia en la división de las zonas en la torre pasando de 3 áreas a 6. En la Figura 93 se presenta la nueva distribución de las áreas propuesta.

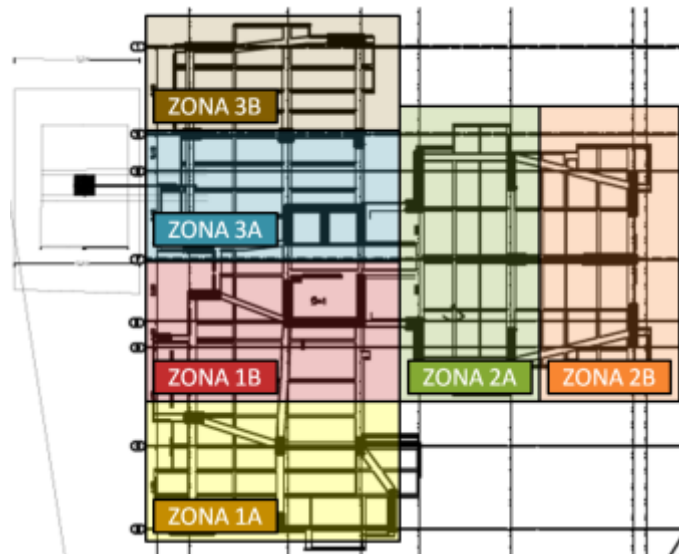


Figura 93. Nueva distribución de áreas de trabajo

- **ESCENARIO 8:** Modificación de disponibilidad de recursos por optimización mediante herramienta OptQuest (Rockwell Software)
- **ESCENARIO 9:** Modificación disponibilidad de recursos por conclusiones de observación en obra
- **ESCENARIO 10:** Combinación escenario 7 y escenario 5
- **ESCENARIO 11:** Combinación escenario 7 y escenario 8
- **ESCENARIO 12:** Combinación escenario 7 y escenario 9

7.10 RESULTADOS NUEVOS ESCENARIOS

7.10.1 ESCENARIO 1 - MODIFICACIÓN CUADRILLA PARALES-CAMILLAS

En la Tabla 36 se presenta la comparación en términos de cantidad recursos, porcentaje de uso de recursos y duración total entre el modelo original y el escenario 1.

Tabla 36. Resultados Escenario 1

PARÁMETRO	ORIGINAL	ESCENARIO 1
CANTIDAD OFICIAL CAMILLAS (Unidades)	4,0	2,0
CANTIDAD AYUDANTE CAMILLAS (Unidades)	5,0	3,0
% USO PROMEDIO OFICIAL CAMILLAS (%)	11,60%	22,87%
% USO PROMEDIO AYUDANTE CAMILLAS (%)	18,53%	30,50%
DURACIÓN TOTAL PROMEDIO (Días)	203,1548	203,5388

Al realizar la comparación económica del escenario propuesto con el modelo original se obtuvieron los resultados presentados en la tabla 37.

Tabla 37. Comparación económica Escenario 1

PARÁMETRO	ORIGINAL	COSTO (\$)	ESCENARIO 1	COSTO (\$)
DURACIÓN TOTAL PROMEDIO (Días)	203,1548		203,5388	
CANTIDAD OFICIAL CAMILLAS (Unidades)	4	\$ 40.630.960,00	2	\$ 20.353.880,00
CANTIDAD AYUDANTE CAMILLAS (Unidades)	5	\$ 35.552.090,00	3	\$ 21.371.574,00
	TOTAL	\$ 76.183.050,00	TOTAL	\$ 41.725.454,00
			AHORRO	\$ 34.457.596,00

Para la realización de la comparación económica se tienen en cuenta los datos suministrados por el contratista encargado de la ejecución del proyecto en estudio, del valor pagado por mano de obra y adicionalmente el costo por día del equipo que se utilizará para la ejecución de las actividades. Esta información se presenta en la Tabla 38.

Tabla 38. Costo unitario ítems representativos

ÍTEM	COSTO UNITARIO
COSTO/DÍA PARALES	\$ 110.00
COSTO/DÍA CERCHA	\$ 105.00
COSTO/DÍA CAMILLA	\$ 150.00
COSTO/DÍA FORMALETA VIGAS	\$ 6,500.00
COSTO/DÍA ALQUILER FORMALETA COLUMNAS	\$ 8,500.00
COSTO/DÍA OFICIAL	\$ 50,000.00
COSTO/DÍA AYUDANTE	\$ 35,000.00

Con la información de los recursos a utilizar y los días de ejecución del proyecto para cada uno de los escenarios obtenidos, se halla el sobre costo o el ahorro para cada uno de los escenarios comparado con los resultados del modelo original. Se consideró la cantidad de equipo, la cantidad de días de ejecución, la cantidad de oficiales y ayudantes involucrados en cada uno de los escenarios y el costo por día de los equipos y del personal.

7.10.2 ESCENARIO 2 - MODIFICACIÓN CUADRILLA COLUMNAS

En la Tabla 39 se presenta la comparación entre el modelo original y el Escenario 2 en términos de cantidad de recursos, porcentaje de uso de los mismos y duración total.

Tabla 39. Resultados Escenario 2

PARÁMETRO	ORIGINAL	ESCENARIO 2
CANTIDAD OFICIAL COLUMNAS (Unidades)	3,0	4,0
CANTIDAD AYUDANTE COLUMNAS (Unidades)	2,0	4,0
% USO PROMEDIO OFICIAL COLUMNAS (%)	11,60%	22,53%
% USO PROMEDIO AYUDANTE COLUMNAS (%)	18,53%	18,68%
DURACIÓN TOTAL PROMEDIO (Días)	203,1548	191,7876

La comparación económica del Escenario 2 y el modelo original se presenta en la Tabla 40.

Tabla 40. Comparación económica Escenario 2

PARÁMETRO	ORIGINAL	COSTO (\$)	ESCENARIO 4	COSTO (\$)
DURACIÓN TOTAL PROMEDIO (Días)	203,1548		191,7876	
CANTIDAD OFICIAL COLUMNAS (Unidades)	3	\$ 30.473.220,00	4	\$ 38.357.520,00
CANTIDAD AYUDANTE COLUMNAS (Unidades)	2	\$ 14.220.836,00	4	\$ 26.850.264,00
	TOTAL	\$ 44.694.056,00	TOTAL	\$ 65.207.784,00
			SOBRECOSTO	\$ 20.513.728,00

7.10.3 ESCENARIO 3 - MODIFICACIÓN CUADRILLA HERREROS

En la Tabla 41 se presenta la comparación de dicho escenario con el modelo original, en términos de cantidad de recursos, porcentaje de uso de los mismos y duración total.

Tabla 41. Resultados Escenario 3

PARÁMETRO	ORIGINAL	ESCENARIO 3
CANTIDAD OFICIAL HERREROS (Unidades)	9,0	4,0
CANTIDAD AYUDANTE HERREROS (Unidades)	4,0	4,0
% USO PROMEDIO OFICIAL HERREROS (%)	11,60%	26,56%
% USO PROMEDIO AYUDANTE HERREROS (%)	18,53%	28,64%
DURACIÓN TOTAL PROMEDIO (Días)	203,1548	203,1548

La comparación económica del escenario 3 y el modelo original se presenta en la Tabla 42.

Tabla 42. Comparación económica Escenario 3

PARÁMETRO	ORIGINAL	COSTO (\$)	ESCENARIO 3	COSTO (\$)
DURACIÓN TOTAL PROMEDIO (Días)	203,1548		203,1548	
CANTIDAD OFICIAL HERREROS (Unidades)	9	\$ 91.419.660,00	4	\$ 40.630.960,00
CANTIDAD AYUDANTE HERREROS (Unidades)	4	\$ 28.441.672,00	4	\$ 28.441.672,00
	TOTAL	\$ 119.861.332,00	TOTAL	\$ 69.072.632,00
			AHORRO	\$ 50.788.700,00

7.10.4 ESCENARIO 4 - MODIFICACIÓN CUADRILLA VIGAS

En la Tabla 43 se presenta la comparación de dicho escenario con el modelo original, en términos de cantidad de recursos, porcentaje de uso de los mismos y duración total

Tabla 43. Resultados Escenario 4

PARÁMETRO	ORIGINAL	ESCENARIO 4
CANTIDAD OFICIAL VIGAS (Unidades)	12,0	9,0
CANTIDAD AYUDANTE VIGAS (Unidades)	13,0	10,0
% USO PROMEDIO OFICIAL VIGAS (%)	11,60%	14,79%
% USO PROMEDIO AYUDANTE VIGAS (%)	18,53%	33,33%
DURACIÓN TOTAL PROMEDIO (Días)	203,1548	204,2986

La comparación económica del escenario 4 y el modelo original se presenta en la Tabla 44.

Tabla 44. Comparación económica Escenario 4

PARÁMETRO	ORIGINAL	COSTO (\$)	ESCENARIO 4	COSTO (\$)
DURACIÓN TOTAL PROMEDIO (Días)	203,1548		204,2986	
CANTIDAD OFICIAL VIGAS (Unidades)	12	\$ 121.892.880,00	9	\$ 91.934.370,00
CANTIDAD AYUDANTE VIGAS (Unidades)	13	\$ 92.435.434,00	10	\$ 71.504.510,00
	TOTAL	\$ 214.328.314,00	TOTAL	\$ 163.438.880,00
			AHORRO	\$ 50.889.434,00

7.10.5 ESCENARIO 5 - MODIFICACIÓN TODAS LAS CUADRILLAS

Se propone la combinación de los escenarios 1, 2, 3 y 4 buscando la optimización de los recursos involucrados. En la Tabla 45 se presenta la comparación entre este escenario y el modelo original en términos de la cantidad de recursos, porcentaje de uso de los mismos y duración total.

Tabla 45. Resultados Escenario 5

PARÁMETRO	ORIGINAL	ESCENARIO 5
CANTIDAD OFICIAL CAMILLAS (Unidades)	4,0	2,0
CANTIDAD AYUDANTE CAMILLAS (Unidades)	5,0	3,0
CANTIDAD OFICIAL COLUMNAS (Unidades)	3,0	4,0
CANTIDAD AYUDANTE COLUMNAS (Unidades)	2,0	4,0
CANTIDAD OFICIAL HERREROS (Unidades)	9,0	4,0
CANTIDAD AYUDANTE HERREROS (Unidades)	4,0	4,0
CANTIDAD OFICIAL VIGAS (Unidades)	12,0	9,0
CANTIDAD AYUDANTE VIGAS (Unidades)	13,0	10,0
% USO PROMEDIO OFICIAL CAMILLAS (%)	11,60%	22,87%
% USO PROMEDIO AYUDANTE CAMILLAS (%)	18,53%	30,50%
% USO PROMEDIO OFICIAL COLUMNAS (%)	11,60%	22,53%
% USO PROMEDIO AYUDANTE COLUMNAS (%)	18,53%	18,68%
% USO PROMEDIO OFICIAL HERREROS (%)	11,60%	26,56%
% USO PROMEDIO AYUDANTE HERREROS (%)	18,53%	28,64%
% USO PROMEDIO OFICIAL VIGAS (%)	11,60%	14,79%
% USO PROMEDIO AYUDANTE VIGAS (%)	18,53%	33,33%
DURACIÓN TOTAL PROMEDIO (Días)	203,1548	198,514

La comparación económica del escenario 5 y el modelo original se presenta en la Tabla 46.

Tabla 46. Comparación económica Escenario 5

PARÁMETRO	ORIGINAL	COSTO (\$)	ESCENARIO 5	COSTO (\$)
DURACIÓN TOTAL PROMEDIO (Días)	203,1548		198,514	
CANTIDAD OFICIAL CAMILLAS (Unidades)	4	\$ 40.630.960,00	2	\$ 19.851.400,00
CANTIDAD AYUDANTE CAMILLAS (Unidades)	5	\$ 35.552.090,00	3	\$ 20.843.970,00
CANTIDAD OFICIAL COLUMNAS (Unidades)	3	\$ 30.473.220,00	4	\$ 39.702.800,00
CANTIDAD AYUDANTE COLUMNAS (Unidades)	2	\$ 14.220.836,00	4	\$ 27.791.960,00
CANTIDAD OFICIAL HERREROS (Unidades)	9	\$ 91.419.660,00	4	\$ 39.702.800,00
CANTIDAD AYUDANTE HERREROS (Unidades)	4	\$ 28.441.672,00	4	\$ 27.791.960,00
CANTIDAD OFICIAL VIGAS (Unidades)	12	\$ 121.892.880,00	9	\$ 89.331.300,00
CANTIDAD AYUDANTE VIGAS (Unidades)	13	\$ 92.435.434,00	10	\$ 69.479.900,00
	TOTAL	\$ 455.066.752,00	TOTAL	\$ 334.496.090,00
			AHORRO	\$ 120.570.662,00

7.10.6 ESCENARIO 6 - MODIFICACIÓN CANTIDAD DE FORMALETAS

En el sexto escenario se propone el aumento de la cantidad de formaletas de elementos verticales, más específicamente, de columnas y ascensor o escaleras. En la Tabla 47 se presenta la comparación entre el escenario y el modelo original en términos de la cantidad de formaletas y la duración total obtenida.

Tabla 47. Resultados Escenario 6

PARÁMETRO	ORIGINAL	ESCENARIO 6
FORMALETA ASCENSOR / ESCALERA	1,0	2,0
JUEGO FORMALETA COLUMNAS	1,0	2,0
DURACIÓN TOTAL PROMEDIO (Días)	203,2	206,9

La comparación económica del escenario 6 y el modelo original se presenta en la Tabla 48.

Tabla 48. Comparación económica Escenario 6

PARÁMETRO	ORIGINAL	COSTO (\$)	ESCENARIO 6	COSTO (\$)
DURACIÓN TOTAL PROMEDIO (Días)	203,1548		206,98	
FORMALETA ASCENSOR / ESCALERA	1	\$ 1.726.815,80	2	\$ 3.518.660,00
JUEGO FORMALETA COLUMNAS	1	\$ 1.726.815,80	2	\$ 3.518.660,00
	TOTAL	\$ 3.453.631,60	TOTAL	\$ 7.037.320,00
			SOBRECOSTO	\$ 3.583.688,40

7.10.7 ESCENARIO 7 - MODIFICACIÓN ESTRATEGIA DE 3 A 6 ZONAS

En este escenario se propone la modificación de la estrategia de ejecución de un piso de 3 a 6 zonas. Es decir, partiendo de las zonas presentadas anteriormente, se subdividen las mismas buscando la simultaneidad de los trabajos. En la Tabla 49 se presentan la comparación entre el escenario estudiado y el modelo original en términos de cantidad de recursos y duración total obtenida.

Tabla 49. Resultados Escenario 7

PARÁMETRO	ORIGINAL	ESCENARIO 7
CANTIDAD OFICIAL CAMILLAS (Unidades)	4.0	4.0
CANTIDAD AYUDANTE CAMILLAS (Unidades)	5.0	5.0
CANTIDAD OFICIAL COLUMNAS (Unidades)	3.0	3.0
CANTIDAD AYUDANTE COLUMNAS (Unidades)	2.0	2.0
CANTIDAD OFICIAL HERREROS (Unidades)	9.0	9.0

CANTIDAD AYUDANTE HERREROS (Unidades)	4.0	4.0
CANTIDAD OFICIAL VIGAS (Unidades)	12.0	12.0
CANTIDAD AYUDANTE VIGAS (Unidades)	13.0	13.0
% USO PROMEDIO OFICIAL CAMILLAS (%)	11.60%	10.44%
% USO PROMEDIO AYUDANTE CAMILLAS (%)	18.53%	16.70%
% USO PROMEDIO OFICIAL COLUMNAS (%)	11.60%	31.73%
% USO PROMEDIO AYUDANTE COLUMNAS (%)	18.53%	43.24%
% USO PROMEDIO OFICIAL HERREROS (%)	11.60%	14.91%
% USO PROMEDIO AYUDANTE HERREROS (%)	18.53%	33.82%
% USO PROMEDIO OFICIAL VIGAS (%)	11.60%	16.47%
% USO PROMEDIO AYUDANTE VIGAS (%)	18.53%	40.21%
DURACIÓN TOTAL PROMEDIO (Días)	203.1548	182.4162

La comparación económica del escenario 7 y el modelo original se presenta en la Tabla 50.

Tabla 50. Comparación económica Escenario 7

PARÁMETRO	ORIGINAL	COSTO (\$)	ESCENARIO 7	COSTO (\$)
DURACIÓN TOTAL PROMEDIO (Días)	203,1548		182,4162	
CANTIDAD OFICIAL CAMILLAS (Unidades)	4	\$ 40.630.960,00	4	\$ 36.483.240,00
CANTIDAD AYUDANTE CAMILLAS (Unidades)	5	\$ 35.552.090,00	5	\$ 31.922.835,00
CANTIDAD OFICIAL COLUMNAS (Unidades)	3	\$ 30.473.220,00	3	\$ 27.362.430,00
CANTIDAD AYUDANTE COLUMNAS (Unidades)	2	\$ 14.220.836,00	2	\$ 12.769.134,00
CANTIDAD OFICIAL HERREROS (Unidades)	9	\$ 91.419.660,00	9	\$ 82.087.290,00
CANTIDAD AYUDANTE HERREROS (Unidades)	4	\$ 28.441.672,00	4	\$ 25.538.268,00
CANTIDAD OFICIAL VIGAS (Unidades)	12	\$ 121.892.880,00	12	\$ 109.449.720,00
CANTIDAD AYUDANTE VIGAS (Unidades)	13	\$ 92.435.434,00	13	\$ 82.999.371,00
	TOTAL	\$ 455.066.752,00	TOTAL	\$ 408.612.288,00
			AHORRO	\$ 46.454.464,00

7.10.8 ESCENARIO 8 - MODIFICACIÓN RECURSOS POR OPTQUEST

En el sexto escenario se propone la modificación de la disponibilidad de los recursos mediante la optimización de los mismos con la herramienta OptQuest de Rockwell Software. Esta función de Arena realiza corridas del modelo con la modificando las variables establecidas y registrando si los resultados son factibles de acuerdo a las restricciones propuestas.

En la Figura 94 se presenta la cantidad de recursos (función objetivo a minimizar) para cada una de las simulaciones realizadas.

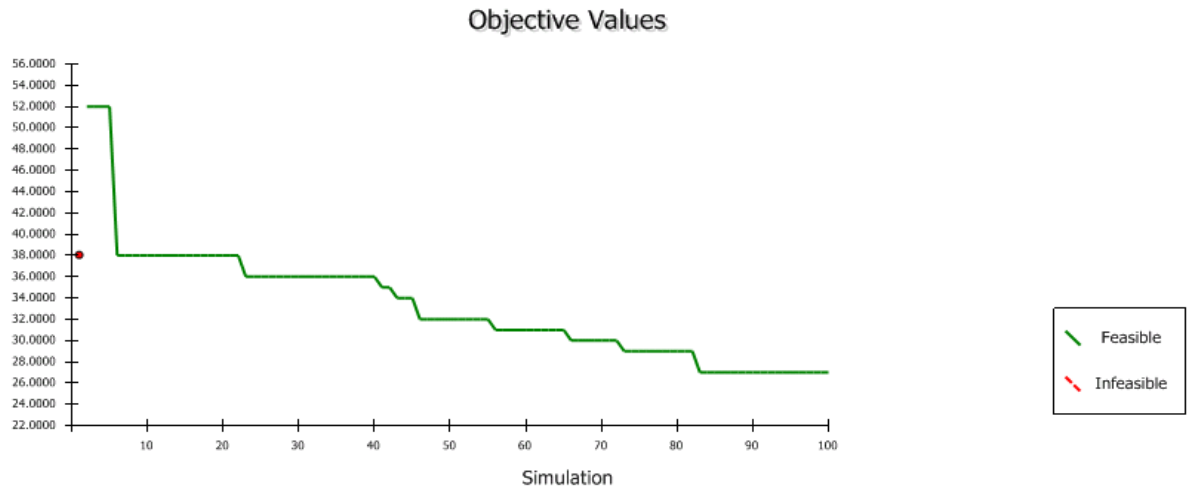


Figura 94. Cantidad de recursos vs. Simulación

En la Tabla 51 se presenta la comparación entre el escenario propuesto y el modelo original en términos de la cantidad de recursos, su porcentaje de uso y la duración total obtenida.

Tabla 51. Resultados Escenario 8

PARÁMETRO	ORIGINAL	ESCENARIO 8
CANTIDAD OFICIAL CAMILLAS (Unidades)	4.0	1.0
CANTIDAD AYUDANTE CAMILLAS (Unidades)	5.0	2.0
CANTIDAD OFICIAL COLUMNAS (Unidades)	3.0	3.0
CANTIDAD AYUDANTE COLUMNAS (Unidades)	2.0	4.0
CANTIDAD OFICIAL HERREROS (Unidades)	9.0	3.0
CANTIDAD AYUDANTE HERREROS (Unidades)	4.0	5.0
CANTIDAD OFICIAL VIGAS (Unidades)	12.0	3.0
CANTIDAD AYUDANTE VIGAS (Unidades)	13.0	6.0
% USO PROMEDIO OFICIAL CAMILLAS (%)	11.60%	38.49%
% USO PROMEDIO AYUDANTE CAMILLAS (%)	18.53%	38.49%
% USO PROMEDIO OFICIAL COLUMNAS (%)	11.60%	23.97%
% USO PROMEDIO AYUDANTE COLUMNAS (%)	18.53%	14.88%
% USO PROMEDIO OFICIAL HERREROS (%)	11.60%	29.76%
% USO PROMEDIO AYUDANTE HERREROS (%)	18.53%	19.33%
% USO PROMEDIO OFICIAL VIGAS (%)	11.60%	37.43%
% USO PROMEDIO AYUDANTE VIGAS (%)	18.53%	47.04%
DURACIÓN TOTAL PROMEDIO (Días)	203.1548	241.2616

La comparación económica del escenario 8 y el modelo original se presenta en la Tabla 52.

Tabla 52. Comparación económica Escenario 8

PARÁMETRO	ORIGINAL	COSTO (\$)	ESCENARIO 8	COSTO (\$)
DURACIÓN TOTAL PROMEDIO (Días)	203.1548		241.2616	
CANTIDAD OFICIAL CAMILLAS (Unidades)	4	\$ 40,630,960.00	1	\$ 12,063,080.00
CANTIDAD AYUDANTE CAMILLAS (Unidades)	5	\$ 35,552,090.00	2	\$ 16,888,312.00
CANTIDAD OFICIAL COLUMNAS (Unidades)	3	\$ 30,473,220.00	3	\$ 36,189,240.00
CANTIDAD AYUDANTE COLUMNAS (Unidades)	2	\$ 14,220,836.00	4	\$ 33,776,624.00
CANTIDAD OFICIAL HERREROS (Unidades)	9	\$ 91,419,660.00	3	\$ 36,189,240.00
CANTIDAD AYUDANTE HERREROS (Unidades)	4	\$ 28,441,672.00	5	\$ 42,220,780.00
CANTIDAD OFICIAL VIGAS (Unidades)	12	\$ 121,892,880.00	3	\$ 36,189,240.00
CANTIDAD AYUDANTE VIGAS (Unidades)	13	\$ 92,435,434.00	6	\$ 50,664,936.00
TOTAL		\$ 455,066,752.00	TOTAL	\$ 264,181,452.00
			AHORRO	\$ 190,885,300.00

7.10.9 ESCENARIO 9 - MODIFICACIÓN DISPONIBILIDAD DE RECURSOS POR BALANCEO DE CUADRILLAS

En este escenario se propone la modificación de la disponibilidad de recursos y el personal dispuesto para cada actividad. En la Tabla 53 se presenta el personal propuesto para cada una de las actividades incluidas en la simulación:

Tabla 53. Personal propuesto Escenario 9

EJECUCIÓN DE ACTIVIDAD	CUADRILLA	RECURSOS REQUERIDOS	
		# OFICIAL	# AYUDANTE
AMARRE COLUMNAS	HERRERO	1	2
FORMALETA COLUMNAS	COLUMNAS	2	2
CONCRETO COLUMNAS	COLUMNAS	1	2
RETIRO FORMALETA COLUMNAS	COLUMNAS	1	3
INSTALACIÓN PARALES	PARALES-CAMILLAS	1	2
INSTALACIÓN CERCHAS	PARALES-CAMILLAS	1	2
INSTALACIÓN CAMILLAS	PARALES-CAMILLAS	1	1
AMARRE VIGAS	HERRERO	3	2
FORMALETA VIGAS	VIGAS	2	3
CONCRETO VIGAS	VIGAS	3	5
RETIRO FORMALETA VIGAS	VIGAS	1	5
DISPOSICIÓN LÁMINAS METALDECK	VIGAS	1	4

DISPOSICIÓN MALLA Y RECUBRIMIENTO	VIGAS	3	4
AMARRE ESCALERA	HERRERO	2	2
AMARRE ASCENSOR	HERRERO	2	2
FORMALETA ASCENSOR	COLUMNAS	3	2
FORMALETA ESCALERA	COLUMNAS	3	2
CONCRETO ASCENSOR	COLUMNAS	1	3
CONCRETO ESCALERA	COLUMNAS	1	3
RETIRO FORMALETA ASCENSOR	COLUMNAS	1	2
RETIRO FORMALETA ESCALERA	COLUMNAS	1	2

En la Tabla 54 se muestran la comparación entre este escenario y el modelo original en términos de cantidad de recursos, uso de los mismos y duración total de ejecución.

Tabla 54. Resultados Escenario 9

PARÁMETRO	ORIGINAL	ESCENARIO 9
CANTIDAD OFICIAL CAMILLAS (Unidades)	4.0	3.0
CANTIDAD AYUDANTE CAMILLAS (Unidades)	5.0	4.0
CANTIDAD OFICIAL COLUMNAS (Unidades)	3.0	3.0
CANTIDAD AYUDANTE COLUMNAS (Unidades)	2.0	3.0
CANTIDAD OFICIAL HERREROS (Unidades)	9.0	8.0
CANTIDAD AYUDANTE HERREROS (Unidades)	4.0	6.0
CANTIDAD OFICIAL VIGAS (Unidades)	12.0	12.0
CANTIDAD AYUDANTE VIGAS (Unidades)	13.0	11.0
% USO PROMEDIO OFICIAL CAMILLAS (%)	11.60%	15.23%
% USO PROMEDIO AYUDANTE CAMILLAS (%)	18.53%	18.69%
% USO PROMEDIO OFICIAL COLUMNAS (%)	11.60%	28.23%
% USO PROMEDIO AYUDANTE COLUMNAS (%)	18.53%	34.81%
% USO PROMEDIO OFICIAL HERREROS (%)	11.60%	15.98%
% USO PROMEDIO AYUDANTE HERREROS (%)	18.53%	20.10%
% USO PROMEDIO OFICIAL VIGAS (%)	11.60%	11.65%
% USO PROMEDIO AYUDANTE VIGAS (%)	18.53%	24.60%
DURACIÓN TOTAL PROMEDIO (Días)	203.1548	204.7166

La comparación económica del escenario 9 y el modelo original se presenta en la Tabla 55.

Tabla 55. Comparación económica Escenario 9

PARÁMETRO	ORIGINAL	COSTO (\$)	ESCENARIO 9	COSTO (\$)
DURACIÓN TOTAL PROMEDIO (Días)	203.1548		204.7166	
CANTIDAD OFICIAL CAMILLAS (Unidades)	4	\$ 40,630,960.00	3	\$ 30,707,490.00
CANTIDAD AYUDANTE CAMILLAS (Unidades)	5	\$ 35,552,090.00	4	\$ 28,660,324.00
CANTIDAD OFICIAL COLUMNAS (Unidades)	3	\$ 30,473,220.00	3	\$ 30,707,490.00
CANTIDAD AYUDANTE COLUMNAS (Unidades)	2	\$ 14,220,836.00	3	\$ 21,495,243.00
CANTIDAD OFICIAL HERREROS (Unidades)	9	\$ 91,419,660.00	8	\$ 81,886,640.00
CANTIDAD AYUDANTE HERREROS (Unidades)	4	\$ 28,441,672.00	6	\$ 42,990,486.00
CANTIDAD OFICIAL VIGAS (Unidades)	12	\$ 121,892,880.00	12	\$ 122,829,960.00
CANTIDAD AYUDANTE VIGAS (Unidades)	13	\$ 92,435,434.00	11	\$ 78,815,891.00
	TOTAL	\$ 455,066,752.00	TOTAL	\$ 438,093,524.00
			AHORRO	\$ 16,973,228.00

7.10.10 ESCENARIO 10 - COMBINACIÓN ESCENARIOS 7 Y 5

En este escenario se propone el mismo cambio de estrategia del escenario 7 (pasar de 3 a 6 divisiones de áreas de trabajo) con la modificación de recursos propuesta en el escenario 5. En la Tabla 56 se presenta la comparación entre el escenario propuesto y el modelo original términos de la cantidad de recursos, porcentaje de uso de los mismos y duración total.

Tabla 56. Resultados Escenario 10

PARÁMETRO	ORIGINAL	ESCENARIO 10
CANTIDAD OFICIAL CAMILLAS (Unidades)	4.0	2.0
CANTIDAD AYUDANTE CAMILLAS (Unidades)	5.0	3.0
CANTIDAD OFICIAL COLUMNAS (Unidades)	3.0	4.0
CANTIDAD AYUDANTE COLUMNAS (Unidades)	2.0	4.0
CANTIDAD OFICIAL HERREROS (Unidades)	9.0	4.0
CANTIDAD AYUDANTE HERREROS (Unidades)	4.0	4.0
CANTIDAD OFICIAL VIGAS (Unidades)	12.0	9.0
CANTIDAD AYUDANTE VIGAS (Unidades)	13.0	10.0
% USO PROMEDIO OFICIAL CAMILLAS (%)	11.60%	21.04%
% USO PROMEDIO AYUDANTE CAMILLAS (%)	18.53%	28.06%
% USO PROMEDIO OFICIAL COLUMNAS (%)	11.60%	23.80%
% USO PROMEDIO AYUDANTE COLUMNAS (%)	18.53%	21.61%
% USO PROMEDIO OFICIAL HERREROS (%)	11.60%	33.74%

% USO PROMEDIO AYUDANTE HERREROS (%)	18.53%	33.87%
% USO PROMEDIO OFICIAL VIGAS (%)	11.60%	21.41%
% USO PROMEDIO AYUDANTE VIGAS (%)	18.53%	51.21%
DURACIÓN TOTAL PROMEDIO (Días)	203.1548	182.7324

La comparación económica del escenario 10 y el modelo original se presenta en la Tabla 57.

Tabla 57. Comparación económica Escenario 10

PARÁMETRO	ORIGINAL	COSTO (\$)	ESCENARIO 10	COSTO (\$)
DURACIÓN TOTAL PROMEDIO (Días)	203.1548		182.7324	
CANTIDAD OFICIAL CAMILLAS (Unidades)	4	\$ 40,630,960.00	2	\$ 18,273,240.00
CANTIDAD AYUDANTE CAMILLAS (Unidades)	5	\$ 35,552,090.00	3	\$ 19,186,902.00
CANTIDAD OFICIAL COLUMNAS (Unidades)	3	\$ 30,473,220.00	4	\$ 36,546,480.00
CANTIDAD AYUDANTE COLUMNAS (Unidades)	2	\$ 14,220,836.00	4	\$ 25,582,536.00
CANTIDAD OFICIAL HERREROS (Unidades)	9	\$ 91,419,660.00	4	\$ 36,546,480.00
CANTIDAD AYUDANTE HERREROS (Unidades)	4	\$ 28,441,672.00	4	\$ 25,582,536.00
CANTIDAD OFICIAL VIGAS (Unidades)	12	\$ 121,892,880.00	9	\$ 82,229,580.00
CANTIDAD AYUDANTE VIGAS (Unidades)	13	\$ 92,435,434.00	10	\$ 63,956,340.00
	TOTAL	\$ 455,066,752.00	TOTAL	\$ 307,904,094.00
			AHORRO	\$ 147,162,658.00

7.10.11 ESCENARIO 11 - COMBINACIÓN ESCENARIOS 7 Y 8

Este escenario propone la combinación del cambio de estrategia de 3 a 6 zonas y la modificación de los recursos obtenida mediante la herramienta OptQuest. En la Tabla 58 se presenta la comparación entre el escenario propuesto y el modelo original en términos de la cantidad de recursos, la utilización del mismo y la duración total del proyecto.

Tabla 58. Resultados Escenario 11

PARÁMETRO	ORIGINAL	ESCENARIO 11
CANTIDAD OFICIAL CAMILLAS (Unidades)	4.0	1.0
CANTIDAD AYUDANTE CAMILLAS (Unidades)	5.0	2.0
CANTIDAD OFICIAL COLUMNAS (Unidades)	3.0	3.0
CANTIDAD AYUDANTE COLUMNAS (Unidades)	2.0	4.0
CANTIDAD OFICIAL HERREROS (Unidades)	9.0	3.0
CANTIDAD AYUDANTE HERREROS (Unidades)	4.0	5.0
CANTIDAD OFICIAL VIGAS (Unidades)	12.0	3.0

CANTIDAD AYUDANTE VIGAS (Unidades)	13.0	6.0
% USO PROMEDIO OFICIAL CAMILLAS (%)	11.60%	28.54%
% USO PROMEDIO AYUDANTE CAMILLAS (%)	18.53%	28.54%
% USO PROMEDIO OFICIAL COLUMNAS (%)	11.60%	21.87%
% USO PROMEDIO AYUDANTE COLUMNAS (%)	18.53%	14.82%
% USO PROMEDIO OFICIAL HERREROS (%)	11.60%	30.41%
% USO PROMEDIO AYUDANTE HERREROS (%)	18.53%	14.80%
% USO PROMEDIO OFICIAL VIGAS (%)	11.60%	45.84%
% USO PROMEDIO AYUDANTE VIGAS (%)	18.53%	60.43%
DURACIÓN TOTAL PROMEDIO (Días)	203.1548	265.1496

La comparación económica del escenario 11 y el modelo original se presenta en la Tabla 59.

Tabla 59. Comparación económica Escenario 11

PARÁMETRO	ORIGINAL	COSTO (\$)	ESCENARIO 11	COSTO (\$)
DURACIÓN TOTAL PROMEDIO (Días)	203.1548		265.1496	
CANTIDAD OFICIAL CAMILLAS (Unidades)	4	\$ 40,630,960.00	1	\$ 13,257,480.00
CANTIDAD AYUDANTE CAMILLAS (Unidades)	5	\$ 35,552,090.00	2	\$ 18,560,472.00
CANTIDAD OFICIAL COLUMNAS (Unidades)	3	\$ 30,473,220.00	3	\$ 39,772,440.00
CANTIDAD AYUDANTE COLUMNAS (Unidades)	2	\$ 14,220,836.00	4	\$ 37,120,944.00
CANTIDAD OFICIAL HERREROS (Unidades)	9	\$ 91,419,660.00	3	\$ 39,772,440.00
CANTIDAD AYUDANTE HERREROS (Unidades)	4	\$ 28,441,672.00	5	\$ 46,401,180.00
CANTIDAD OFICIAL VIGAS (Unidades)	12	\$ 121,892,880.00	3	\$ 39,772,440.00
CANTIDAD AYUDANTE VIGAS (Unidades)	13	\$ 92,435,434.00	6	\$ 55,681,416.00
TOTAL		\$ 455,066,752.00	TOTAL	\$ 290,338,812.00
			AHORRO	\$ 164,727,940.00

7.10.12 COMBINACIÓN ESCENARIOS 7 Y 9

Este escenario propone la combinación del cambio de estrategia de 3 a 6 zonas y la modificación de los recursos obtenida observación en obra. En la Tabla 60 se presenta la comparación entre el escenario propuesto y el modelo original en términos de la cantidad de recursos, la utilización del mismo y la duración total del proyecto.

Tabla 60. Resultados Escenario 12

PARÁMETRO	ORIGINAL	ESCENARIO 9
CANTIDAD OFICIAL CAMILLAS (Unidades)	4.0	3.0

CANTIDAD AYUDANTE CAMILLAS (Unidades)	5.0	4.0
CANTIDAD OFICIAL COLUMNAS (Unidades)	3.0	3.0
CANTIDAD AYUDANTE COLUMNAS (Unidades)	2.0	3.0
CANTIDAD OFICIAL HERREROS (Unidades)	9.0	8.0
CANTIDAD AYUDANTE HERREROS (Unidades)	4.0	6.0
CANTIDAD OFICIAL VIGAS (Unidades)	12.0	12.0
CANTIDAD AYUDANTE VIGAS (Unidades)	13.0	11.0
% USO PROMEDIO OFICIAL CAMILLAS (%)	11.60%	14.09%
% USO PROMEDIO AYUDANTE CAMILLAS (%)	18.53%	18.79%
% USO PROMEDIO OFICIAL COLUMNAS (%)	11.60%	31.68%
% USO PROMEDIO AYUDANTE COLUMNAS (%)	18.53%	39.26%
% USO PROMEDIO OFICIAL HERREROS (%)	11.60%	21.63%
% USO PROMEDIO AYUDANTE HERREROS (%)	18.53%	26.08%
% USO PROMEDIO OFICIAL VIGAS (%)	11.60%	17.45%
% USO PROMEDIO AYUDANTE VIGAS (%)	18.53%	39.60%
DURACIÓN TOTAL PROMEDIO (Días)	203.1548	183.2628

La comparación económica del escenario 12 y el modelo original se presenta en la Tabla 61.

Tabla 61. Comparación económica Escenario 12

PARÁMETRO	ORIGINAL	COSTO (\$)	ESCENARIO 12	COSTO (\$)
DURACIÓN TOTAL PROMEDIO (Días)	203.1548		183.2628	
CANTIDAD OFICIAL CAMILLAS (Unidades)	4	\$ 40,630,960.00	3	\$ 27,489,420.00
CANTIDAD AYUDANTE CAMILLAS (Unidades)	5	\$ 35,552,090.00	4	\$ 25,656,792.00
CANTIDAD OFICIAL COLUMNAS (Unidades)	3	\$ 30,473,220.00	3	\$ 27,489,420.00
CANTIDAD AYUDANTE COLUMNAS (Unidades)	2	\$ 14,220,836.00	3	\$ 19,242,594.00
CANTIDAD OFICIAL HERREROS (Unidades)	9	\$ 91,419,660.00	8	\$ 73,305,120.00
CANTIDAD AYUDANTE HERREROS (Unidades)	4	\$ 28,441,672.00	6	\$ 38,485,188.00
CANTIDAD OFICIAL VIGAS (Unidades)	12	\$ 121,892,880.00	12	\$ 109,957,680.00
CANTIDAD AYUDANTE VIGAS (Unidades)	13	\$ 92,435,434.00	11	\$ 70,556,178.00
	TOTAL	\$ 455,066,752.00	TOTAL	\$ 392,182,392.00
			AHORRO	\$ 62,884,360.00

7.10.13 COMPARACIÓN RESULTADOS

En la Tabla 62 se presenta la comparación de los resultados obtenidos de todos los escenarios estudiados:

Tabla 62. Tabla comparativa Escenarios estudiados

ESCENARIO	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD OFICIALES (Un)	CANTIDAD AYUDANTES (Un)	DURACIÓN TOTAL (Días)	VARIACIÓN DURACIÓN (Días)	AHORRO
0	MODELO ORIGINAL	28	24	203.155	0.000	\$ -
1	MODIFICACIÓN CUADRILLA PARALES Y CAMILLAS	26	22	203.539	0.384	\$ 34,457,596.0
2	MODIFICACIÓN CUADRILLA COLUMNAS	27	24	191.788	-11.367	\$(20,513,728.0)
3	MODIFICACIÓN CUADRILLA HERREROS	27	24	203.155	0.000	\$ 50,788,700.0
4	MODIFICACIÓN CUADRILLA VIGAS	24	21	204.299	1.144	\$ 50,889,434.0
5	MODIFICACIÓN TODAS LAS CUADRILLAS	19	21	198.514	-4.641	\$120,570,662.0
6	MODIFICACIÓN CANT. DE FORMALETA	28	24	206.980	3.825	\$ (3,583,688.4)
7	MODIFICACIÓN ESTRATEGIA DE 3 A 6 ZONAS	28	24	182.416	-20.739	\$ 46,454,464.0
8	MODIFICACIÓN RECURSOS POR OPTQUEST	10	17	241.262	38.107	\$190,885,300.0
9	MODIFICACIÓN DISPONIBILIDAD DE RECURSOS POR BALANCEO DE CUADRILLAS	26	24	204.717	1.562	\$ 16,973,228.0
10	COMBINACIÓN ESCENARIOS 7 Y 5	19	21	182.732	-20.422	\$147,162,658.0
11	COMBINACIÓN ESCENARIOS 7 Y 8	10	17	265.150	61.995	\$164,727,940.0
12	COMBINACIÓN ESCENARIOS 7 Y 9	26	24	183.263	-19.892	\$ 62,884,360.0

En las siguientes gráficas se puede observar gráficamente la comparación de los resultados obtenidos para cada uno de los escenarios teóricos simulados:

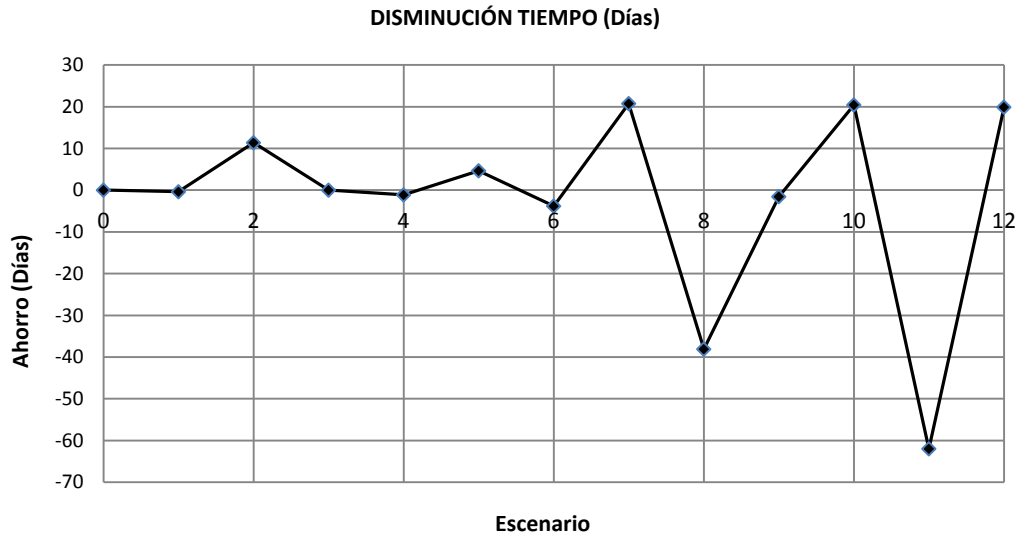


Figura 95. Ahorro Escenarios Teóricos en tiempo

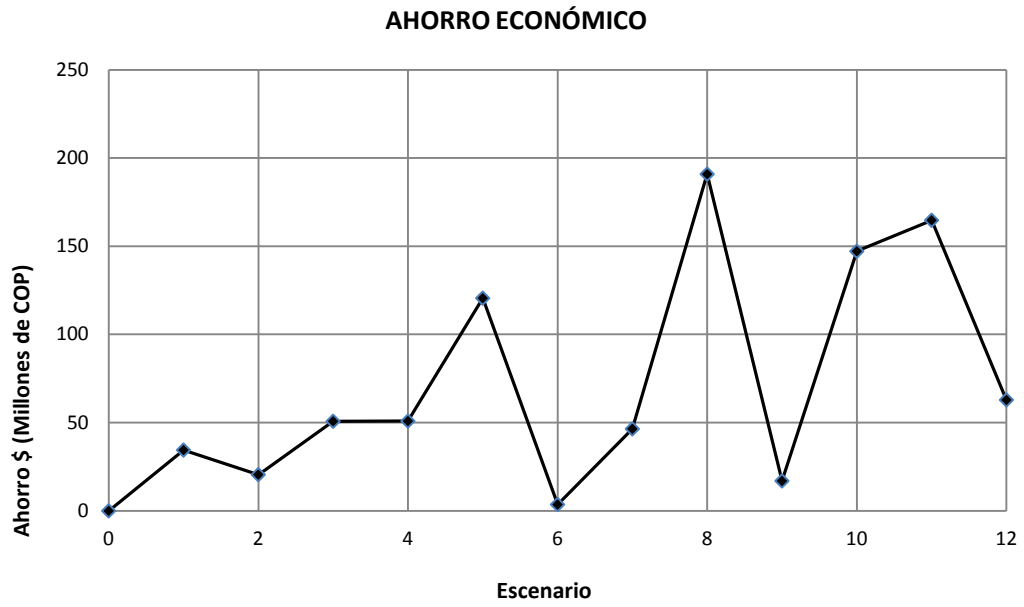


Figura 96. Ahorro económico Escenarios Teóricos

8. DISCUSIÓN

Mediante videos realizados en obra a actividades como desencofrado de muros y placa, transporte, limpieza y desmolde de formaleta, nivelación de muros y placa, y armado de formaleta de muros y placa, Céspedes (2009) clasifica los trabajos que se ejecutan para estas actividades como productivos, contributivos y no contributivos. Realizó un análisis al conjunto de tiempos tomados y obtuvo que el 28% del tiempo es utilizado en actividades productivas, el 34% en actividades contributivas, el 28% en no contributivas y el 10% de éste tiempo el personal se encontraba fuera del alcance de las cámaras.

En el estudio a cuatro obras identificadas por el sistema constructivo con las que fueron ejecutadas como mampostería estructural y sistema tipo túnel, Núñez (2006) obtuvo un valor promedio del tiempo utilizado en la ejecución de actividades productivas, contributivas y no contributivas, en donde el 57.4% de éste tiempo es productivo, el 21.5% contributivo y el 21.1% es tiempo no productivo.

En este trabajo, mediante la prueba de los 5 minutos se estudian las actividades que se deben realizar para el armado, colocación formaleta y el vaciado de concreto de vigas, columnas y placa, y clasificando los tiempos como productivos, contributivos y no contributivos se obtuvo que el 31.2% del tiempo analizado es productivo, el 46.1% es contributivo, el 12.7% es no contributivo y el 10.1% el personal se encontraba fuera del foco de la cámara.

Céspedes (2009) propone que para generar mejoras en los procesos constructivos, los principales cambios podrían ser la ubicación del material más cercano a un punto de transporte, garantizar que las actividades se entreguen de manera adecuada evitando re-procesos por malas prácticas, tener en cuenta una secuencia de actividades evitando pérdidas en el tiempo de trabajo del personal, la puntualidad y finalmente la distribución del personal de manera que se mejoren los rendimientos y se eviten pérdidas en el tiempo de ejecución de las actividades.

Núñez (2006) en su estudio, después de conocer los causantes de pérdidas en los proyectos, propuso estrategias de mejoramiento para reducir o eliminar el tiempo no contributivo, tales como tener en cuenta la planeación, brindar a los trabajadores los elementos de seguridad necesarios para evitar accidentes y riesgos de trabajo, localizar el acopio de materiales teniendo en cuenta el lugar final de llegada y evitar grandes recorridos, organizar los tiempos de trabajo y descanso del personal, y disponer de personal exclusivo para realizar actividades contributivas y organizarlo según la necesidad.

En las actividades estudiadas en este proyecto se identifican las causas de pérdida y se proponen aspectos a mejorar con el fin de aumentar los rendimientos y disminuir las pérdidas en las actividades. Algunos de los aspectos a tener en cuenta son el acopio del material en una zona

cercana a donde se realizarán trabajos, que el equipo esté disponible y no sea necesario esperar a que sea trasladado, que el traslado del personal a donde van a realizar las actividades planeadas sea de forma ágil evitando pérdida de tiempo, que se asignen tareas al personal de tal manera que no se presente tiempos de ocio o descanso cuando no es el momento, utilizar los equipos y herramientas adecuados, y finalmente tener en cuenta la calidad de los trabajos ejecutados para evitar re-procesos por malas prácticas.

En el proceso de simulación de procesos constructivos, cuando Gómez (2009) obtiene su modelo validado y verificado procede con la evaluación de escenarios teóricos buscando disminuir los tiempos de ejecución del proyecto. Se estudia la posibilidad de aumentar la cantidad de ayudantes y oficiales, mejorar la planeación de los recursos o iniciar algunas actividades prontamente. Finalmente, obtiene disminuciones en tiempo de hasta 18 días cuando realiza la combinación de aumento de recursos, materiales siempre disponibles e inicio de algunas actividades puntuales de manera temprana.

En el tema de simulación de los procesos, Céspedes (2010) partiendo de mediciones de video, propone un modelo que representa la construcción de un piso de una torre. Se propone la reorganización del personal buscando disminuir tiempos de ejecución.

Con el modelo de simulación digital desarrollado en este proyecto se representó la ejecución de toda la Torre 1 de un proyecto mediante la separación de las actividades de cada piso. Siguiendo la metodología utilizada por Gómez (2009) se propusieron escenarios buscando proponer soluciones a los problemas identificados. Se estudio la posibilidad de disminuir el personal involucrado para ahorrar recursos y el cambio de la estrategia de construcción para finalizar la primera etapa del proyecto en un tiempo más corto.

9. RECOMENDACIONES

- Al momento de llegada del material a la obra, es conveniente acopiarlo o acomodarlo en un lugar en donde cercano al sitio de trabajo para que no se presenten re-procesos por el traslado del mismo. Es recomendable que se organice el traslado de los equipos y el material a utilizar de tal manera que al momento que el trabajador inicie las labores de ejecución de las actividades tenga el material y el equipo requerido para este, evitando así que se presenten tiempos no contributivos por esperas.
- Un obrero puede realizar más de un trabajo en el desarrollo de una actividad con el fin de disminuir esperas por los trabajos que realizan otros, y así el tiempo de ejecución puede pasar de no contributivo a contributivo o productivo y se pueden adelantar labores en paralelo.
- El trabajo se puede realizar de tal manera que se aproveche al máximo el material, el equipo y el personal, dando así ahorros de tiempo en la ejecución de las actividades; por ejemplo, se pueden ejecutar las columnas por zonas de tal manera que permita armar la cama de la placa al mismo tiempo que se realizan las columnas de la zona continua.
- Se debe tener en cuenta que el tiempo invertido en recorridos del personal desde los vestidores, baños o casinos, hasta el área de trabajo puede ser clasificado como no contributivo. Se puede pensar en la posibilidad de instalar un ascensor para disminuir estos tiempos y realizar el inicio de actividades más temprano.
- En el caso del vaciado de concreto, se debe tener en cuenta la programación de llegada del material. Esto para que cuando no se estén realizando actividades de vaciado de concreto de placa, columnas o vigas; el personal especializado pueda ejecutar actividades contributivas o productivas en otras actividades.
- El personal debe ser motivado de manera que el tiempo de trabajo no se convierta en no contributivo por conversaciones o tiempos de ocio, por ejemplo, diariamente se pueden poner tareas al personal y dar un tiempo específico de ejecución de estos y el cumplimiento de dichas tareas se puede recompensar con algún tipo de incentivo como pueden ser pagos de horas extras, bonificaciones, entre otros.
- Se propone a la empresa ejecutora de las actividades de construcción que para la segunda torre se implemente la división de las zonas establecidas y garantice la programación de los recursos para obtener una reducción significativa de los tiempos de trabajo.

Adicionalmente, y con el fin de validar los trabajos realizados, se propone realizar pruebas con las distribuciones de recursos propuestos para observar los resultados e implementar la que presente los mejores resultados.

- Es importante que para realizar este tipo de trabajos que dependen de fotografías o videos digitales, no se abandonen los trabajos en campo o de visitas a obra. Con estas actividades se entiende con mayor facilidad el proceso constructivo y se pueden corroborar aspectos observados en las fotografías o los videos.
- Siguiendo esta línea de investigación, se propone como futuro trabajo realizar un análisis de otro sistema constructivo con el método implementado. Esto permitiría realizar comparaciones enfocadas a la comparación de estrategias o mejores sistemas de ejecución de trabajo.
- La empresa ejecutora de los trabajos puede realizar pruebas con la implementación de la cantidad de personal propuesto en este trabajo. Es importante tener en cuenta que el personal que aquí se propone corresponde al necesario para desarrollar los trabajos de último piso debido a que en las fotografías no se pueden observar actividades de otras zonas.
- Debido a su preparación y forma de pensamiento, puede ser útil involucrar en el proceso de simulación digital de procesos a un ingeniero industrial. Su formación enfocada a optimización de procesos repetitivos puede orientar aportes que resulten valiosos para establecer propuestas o escenarios teóricos de mejoramiento.

10. CONCLUSIONES

- Este trabajo servirá como referencia para la planeación de obras de características similares en el establecimiento de la estrategia de ejecución de los procesos constructivos y la distribución de los recursos que se dispondrán para los trabajos. Específicamente para la empresa ejecutora de la construcción le será útil para trabajos futuros de características similares a realizar con la misma firma contratista. Aunque en la finalización de la Torre 1 se decidió que para la Torre 2 se implementaría un método diferente de construcción algunos aspectos de mejora, como la división de las zonas si podrán ser implementados.
- En la ejecución de las mediciones de los 5 minutos se pudo observar que el material o los equipos no se descargan inicialmente en una zona cercana a donde se van a realizar las actividades. Por este motivo se presentan tiempos no contributivos cuando el personal encargado de ejecutar dichas actividades debe esperar a que se trasladen nuevamente dichos elementos a una zona cercana
- En algunos procesos como el vaciado de concreto de los diferentes elementos estructurales, el personal involucrado es mayor que el requerido, presentando así tiempos de espera ya que cada trabajador hace una actividad diferente y depende de lo que hagan otros trabajadores.
- En la construcción de vigas las actividades el porcentaje de tiempo en la que se llevan a cabo es en su mayoría contributivo, debido sólo se requieren personal capacitado para trabajos como cimbrado de vigas y medir la verticalidad de la formaleta. Mientras que para la construcción de columnas las actividades realizadas en su mayoría son productivas, los trabajos como la instalación de la formaleta, la revisión de la verticalidad de ésta y el vaciado de concreto requieren de personal con la experiencia necesaria para realizar estos trabajos de manera adecuada.
- Tras realizar el análisis de los resultados del modelo de simulación, es evidente que se necesita una organización de los recursos requeridos en las actividades de último piso. Esto se comprueba con los resultados de los escenarios teóricos que proponen disminución o reorganización del personal disponible (oficiales y ayudantes) porque se observa una mayor proporción de ahorros debido al bajo nivel de uso resultante. Con la propuesta de disminuir los recursos (Escenario 5) se observó un ahorro de más de 100 millones de pesos, teniendo solo en cuenta costos directos asociados a los trabajos.
- De acuerdo con los resultados de ahorro en tiempo de ejecución de la Torre 1, se concluyó que el mejor cambio a implementar es el cambio de división de las zonas de 3 a 6 zonas.

Se obtuvo una disminución de hasta 20 días, que podría incluso aumentar al realizar pruebas recursos propuestos por actividad. Adicionalmente, cuando este escenario teórico es combinado con el de reducción del personal disponible para actividades de último piso, se mantienen los ahorros en tiempos y recursos obtenidos individualmente para las propuestas. Es evidente que hay escenarios que representan mayores ahorros pero no se encuentran enmarcados en el tiempo del proyecto.

- El aumento de equipos como formaletas, no representa disminución en el tiempo de ejecución de proyecto. Por el contrario, sí representa aumento en los recursos económicos a invertir, cosa que hace que sea descartado como viable.
- Con la simulación del escenario en que se dividen las zonas en dos partes se puede observar que a mayor división de grandes actividades se hace más productivo un sistema y se pueden obtener ahorros en tiempo y dinero. De esta forma se garantiza una mayor repetitividad de las actividades que lleva a una mayor especialización del personal. Sin embargo, para el caso específico de la construcción es importante tener en cuenta aspectos como las juntas de construcción que deben ser planeadas en conjunto con el diseñador estructural.
- Un sistema de control en obra como el implementado para desarrollar este trabajo tiene ventajas sobre la contratación de personal para llevar a cabo la ejecución del proyecto. Algunas de las ventajas son el ahorro de recursos económicos debido a que para este caso solo se debe realizar una inversión inicial, mayor control de la obra por tener un campo de acción más amplio y la posibilidad de ver en varias ocasiones los sucesos.
- Este tipo de ejercicios de simulación de procesos constructivos, que parten de mediciones reales, representa una ventaja significativa para la empresa ejecutora. Los resultados de realizar este tipo de ejercicios son una mejor planeación de los recursos, una mejor organización de las actividades a ser asignadas al personal y posibles tiempos de ejecución a obtener.
- Adicional a la evaluación de propuestas teóricas de optimización de recursos o de estrategias de construcción de la edificación se debería entrar a evaluar diferentes sistemas constructivos para el entrepiso. De acuerdo a las consideraciones estructurales o constructivas, y la disponibilidad de recursos o equipo de la empresa ejecutora se pueden evaluar alternativas como la construcción de vigas, viguetas y losetas en concreto prefabricado, vigas y viguetas en estructura metálica con losas de metaldeck y vigas y losas en concreto postensado, entre otras.

11. BIBLIOGRAFÍA

ALARCON, Luis; FUSTER, Sebastián; MORA, Miguel; SOSSDORF, Daniela (2008) *Utilización de Imágenes para el Mejoramiento de la Productividad y Prevención de Riesgos en Operaciones de Construcción*. Universidad Católica de Chile

BANKS, Jerry (2000) *Introduction to Simulation*. Atlanta GA.

BOTERO, Luis Fernando (2004) *Construcción sin Pérdidas: Análisis de Procesos y Filosofía Lean Construction*. Medellín, Ed. Legis

CAMACOL-Consejo Privado de Competitividad (2007) *Competitividad de la Actividad Constructora de Edificaciones: Diagnóstico y Recomendaciones de Política*. Presidencia Nacional

CANAVOS, George (1998). *Probabilidad y Estadística*. 2 Edición. México, Mc Graw Hill. 648 p.

CÉSPEDES, Juan Diego (2010) *Mejoramiento de la Productividad en Construcción: Time-Lapse y Simulación Digital como Herramientas de Análisis*. Universidad de los Andes, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Tesis de Maestría.

FÁBREGAS, Aldo, WADNIPAR, Rodrigo, PATERNINA, Carlos, MANCILLA, Alfonso (2003) *Simulación de Sistemas Productivos con ARENA*. Ediciones Uninorte. Barranquilla, Colombia
CÓRDOBA J. E; DELGADO, M. Y. (2005) *Simulación Digital de Procesos Constructivos*. Universidad de los Andes. Tesis de Maestría.

GÓMEZ, Adriana (2009) *Simulación de Procesos Constructivos*. Universidad de los Andes, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Tesis de Maestría.

GÓMEZ, Adriana; OTÁLORA, Camilo; CANO, Martha Lucía. (2011) *Modulo Programable para Captura de Imágenes Digitales en Proyectos de Construcción*. Pontificia Universidad Javeriana. IV Encuentro Latinoamericano de Gestión y Economía de la Construcción.

GRANADOS, Juan Camilo (2005) *Modelo Computacional de Simulación de Procesos Constructivos MOCSPROC*. Universidad de los Andes. Tesis de Maestría.

KELTON, David; SADOWSKI, Randall; STURROCK, David (2008) *Simulación con software Arena*. 4 ed. México McGraw Hill

KOSKELA, Lauri (1992) *Application of the New Philosophy to Construction*. CIFE Technical Report #71. Stanford University

MORA, Miguel Alejandro (2009) *Utilización de Imágenes Digitales para el mejoramiento de la Productividad de Operaciones de Construcción*. Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil.

NÚÑEZ, C. A. (2006) *Creación de un Sistema de Referencia en Bogotá, aplicando la Construcción sin Pérdidas*. Universidad de los Andes. Tesis de Maestría.

PABÓN, M. (2005) *Documentación Time Lapse y Seguimiento Real de Proyectos*. Universidad de los Andes

ROJAS, Eddy; MUKHERJEE, Amlan (2003) *Modeling the Construction Management Process to Support Situational Simulations*. Journal of Computing in Civil Engineering ASCE / OCTOBER 2003 p. 273

VOSTOK, Project (2012) TIME-LAPSE O SOBRE LA HISTORIA NATURAL DE LA ARQUITECTURA. <http://vostokproject.com/2012/05/02/time-lapse-o-sobre-de-la-historia-natural-de-la-arquitectura/> Post 02 de Mayo de 2012

12. ANEXOS

- Modelo Arena Escenario Original
- Modelos Arena Escenarios Propuestos
- Archivos análisis de distribuciones Input Analyzer
- Videos de procesos constructivos y funcionamiento del modelo

13. GLOSARIO

ACCESS POINT: Traducido significa punto de acceso. Es un dispositivo utilizado en redes inalámbricas para ampliar la una cobertura de radio determinada, para cualquier dispositivo que solicite acceder, siempre y cuando esté configurado y tenga los permisos necesarios.

ACTIVIDADES: Son procesos de tiempo determinado y conocido. Su duración puede ser una constante, un valor aleatorio de una distribución estadística, el resultado de una ecuación, una entrada de un archivo diferente, o un valor resultado del estado de un evento.

ARENA: Es un sistema que permite construir modelos de simulación en una gran variedad de campos, en un ambiente fácilmente compresible y con ayuda de todas las herramientas requeridas (animaciones, análisis de entrada y salida de datos y verificación del modelo) (Fábregas et al. 2003). Este sistema de modelación fue desarrollado en 1993, con la introducción de ambientes gráficos e interactivos mediante el uso del lenguaje SIMAN. Con este lenguaje, se pueden crear modelos que simulen áreas específicas de los procesos como el transporte y la comunicación entre otros (Fábregas et al. 2003).

ATRIBUTOS: Son las características y/o propiedades que tiene una entidad. Entre ellas están los atributos físicos o tiempos de producción. Igualmente, los atributos considerados para un modelo de simulación son muy propios del sistema, y pueden no resultar útiles en otros casos.

CUADRILLA: Grupo de personas reunidas para el desempeño de algunos oficios o para ciertos fines.

CONVERSIONES: Se denomina conversiones a todas las actividades de transformación que convierten los materiales y la información en productos pensando en los requerimientos del cliente.

DEMORA: Es un intervalo de tiempo de duración desconocida que se da por combinaciones de las condiciones del sistema. Estas se presentan cuando una entidad queda en una cola para la utilización de un recurso.

EVENTO: Es un acontecimiento en un instante dado que cambia el estado del sistema. Existen eventos internos y externos, llamados endógenos y exógenos, respectivamente. Se pueden diseñar modelos de simulación de eventos discretos, matemáticos, descriptivos, estadísticos, entre otros. Pero para el caso de la construcción, el más adecuado es el modelo de simulación de eventos discretos porque es dinámico y el tiempo es un factor importante.

ENTIDADES: Una entidad representa un objeto que requiere una definición específica. Estas pueden ser dinámicas cuando se mueven en el sistema, o estática cuando sirve a otras entidades.

FLUJO DE TRABAJO: Es el estudio de los aspectos operacionales de una actividad de trabajo: cómo se estructuran las tareas, cómo se realizan, cuál es su orden correlativo, cómo se sincronizan, cómo fluye la información que soporta las tareas y cómo se le hace seguimiento al cumplimiento de las tareas

INPUT ANALIZER: Herramienta de Arena de Rockwell Software que permite obtener los comportamientos probabilísticos de una serie de datos o generar datos a partir de una función dada.

INVENTARIO: Asiento de los bienes y demás cosas pertenecientes a una persona o comunidad, hecho con orden y precisión.

MODELO: Es la representación de un sistema real con limitaciones conocidas que describen el proceso. El modelo debe tener una complejidad tal que pueda resolver las preguntas para las que se propone la simulación.

PAGINA HTML: siglas de HyperText Markup Language, hace referencia al lenguaje predominante para la elaboración de páginas web que se utiliza para describir la estructura y el contenido en forma de texto, así como para complementar el texto con otros objetos.

PANEL FOTOVOLTAICO: Los paneles o módulos fotovoltaicos están formados por un conjunto de celdas (células fotovoltaicas) que producen electricidad a partir de la luz que incide sobre ellos (electricidad solar)

PÉRDIDA: Se consideran todas las actividades que no agregan valor, pero que consumen tiempo, recursos y espacio, generando costos en el proceso de producción

PROCESO: Conjunto de operaciones lógicas ordenadas cuyo fin es la obtención de unos resultados determinados.

RECURSOS: Son entidades que prestan un servicio a entidades dinámicas. Los recursos pueden servir a más de una entidad dinámica en un momento dado o por otro lado, puede que una entidad requiera más de un recurso. Un recurso puede estar ocupado o libre según el estado del sistema.

RENDIMIENTO: Proporción entre el producto o el resultado obtenido y los medios utilizados.

ROUTER: Dispositivo encargado de encaminar y transmitir paquetes de información entre diferentes redes informáticas.

SIMULACIÓN: La simulación es un gran conjunto de métodos y aplicaciones que busca imitar el comportamiento de sistemas reales (Kelton et al, 2008). También se define como la imitación de la operación de un proceso real o sistema a través del tiempo (Banks, 2000).

TIME-LAPSE: Este método se basa en hacer un seguimiento en intervalos de tiempo muy cortos (menores al minuto), a todos los agentes que se ven involucrados en el proceso (Céspedes, 2010). Este seguimiento se puede hacer por medio de cámaras fotográficas o videocámaras. Por medio de los videos se puede analizar un proceso en su totalidad y se pueden reconocer las principales actividades, movimientos, ejercicios, etc.

En la construcción, este tipo de videos se puede utilizar para hacer un análisis de productividad por medio de la medición de tiempos, movimientos, utilización de recursos, distribución de cuadrillas, seguridad industrial o prevención de riesgos.

TRABAJO CONTRIBUTIVO (TC): Es el tiempo que emplean los trabajadores realizando labores de apoyo necesarias para que se ejecuten actividades productivas, como limpieza de superficies y encofrados, mediciones previas e inspección, transportes de materiales, armado de plataformas y andamios para trabajo en altura y seguridad industrial etc.

TRABAJO NO CONTRIBUTIVO (TNC): Se define como cualquier otra actividad realizada por los obreros y que no se clasifica en las anteriores categorías, por lo tanto se consideran pérdidas. Ejemplos de esta categoría son los tiempos dedicados a esperas, tiempo ocioso, re-procesos, descansos, etc.

VARIABLES DE ESTADO: Son la compilación de la información necesaria para definir lo que sucede en un momento específico del tiempo. La determinación de las variables de estado depende de los objetivos de la investigación. Las variables de estado permanecen constantes durante intervalos de tiempos y pueden cambiar sus valores cuando se den estados definidos como eventos.