



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE YUCATÁN
FACULTAD DE INGENIERÍA

UNIDAD DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

**“EFECTO DEL USO DE EQUIPOS ALTERNOS
SOBRE LA PRODUCTIVIDAD DE LA MANO DE
OBRA EMPLEADA EN LAS ACTIVIDADES DE
CONSTRUCCIÓN DE VIVIENDA”**

TESIS

PRESENTADA POR:

**I.C. ROBERTO ALEJANDRO VÁZQUEZ
ÁLVAREZ**

EN OPCIÓN AL GRADO DE

MAESTRÍA EN INGENIERÍA

OPCIÓN CONSTRUCCIÓN

MÉRIDA, YUCATÁN, MÉXICO

2021

“Aunque este trabajo hubiese servido para el Examen de Grado y hubiese sido aprobado por el sínodo, sólo el autor es responsable de las doctrinas emitidas en él.”

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por otorgarme la beca que me dio la oportunidad de completar mis estudios en un posgrado del Programa Nacional de Posgrado de Calidad (PNCP). A la Universidad Autónoma de Yucatán (UADY) por haberme brindado la oportunidad de estudiar el posgrado en esta prestigiosa universidad del sureste de México, y la Facultad de Ingeniería de la UADY por el apoyo del personal docente y operativo para la elaboración de esta tesis.

RESUMEN

La presente investigación se enfocó en determinar cuantitativamente el efecto del uso de equipos alternos sobre la productividad de la mano de obra empleada en las actividades de construcción. Empleando la técnica de simulación de eventos discretos, se analizaron diversos escenarios en los que se asumió el uso de equipos alternativos en la construcción del techo de una vivienda, a base de vigueta y bovedilla. Para cada uno de estos escenarios se estimó la cantidad de minutos-hombre que se requerirían para ejecutar dicha construcción. El análisis de los escenarios se llevó a cabo en tres etapas:

En la primera etapa se desarrolló el escenario 1.0 (base), el cual representó un proceso constructivo que asumió el uso de equipos manuales únicamente. Para los propósitos de esta investigación, dichos equipos se refieren a aquellos cuyo funcionamiento no es mecánico, sino que requieren del esfuerzo del trabajador para operarse. La cantidad de minutos-hombre estimados con este escenario fue la base de comparación para determinar el efecto de usar equipos alternativos en los escenarios subsecuentes.

En la segunda etapa se desarrollaron once escenarios, con todos los cuales, a excepción de uno, se obtuvo una reducción, con respecto al resultado en el escenario 1.0, en los minutos-hombre estimados. Los equipos que generaron dicha reducción fueron: carretilla (-7.31%), cizalla (-1.65%), revolvedora (-5.14%), concreto premezclado colado sin bomba (-19.47%), concreto premezclado colado con bomba (-31.77%), vibrador de inmersión (-1.06%), manguera (-0.70%), cabrestante (-13.53%), polín de metal (-1.89%) y andamio tubular (-2.03%). Por otro lado, la grúa empleada en la tarea de izado de viguetas fue el único equipo que generó un aumento en la cantidad de minutos-hombre estimados (+17.36%).

Para la tercera etapa se tomó como base los resultados obtenidos con los escenarios de la segunda etapa y se construyeron los escenarios 3.1 y 3.2. El propósito del escenario 3.1 fue determinar el efecto de integrar el uso de los diez equipos que generaron una reducción en los minutos-hombre estimados en los

escenarios de la segunda etapa. Con éste, la reducción fue 55.94%. Con el escenario 3.2 se estimó el efecto de utilizar únicamente aquellos dos equipos que, con respecto a lo estimado con el escenario 1.0, generaron las mayores reducciones en minutos-hombre: el cabrestante y el concreto premezclado colado con bomba, respectivamente empleados en las tareas de izado de bovedillas y el colado del concreto. Con este escenario se redujo, con respecto al escenario 1.0, 43.35% los minutos-hombre estimados.

ABSTRACT

This research focused on quantitatively determining the effect of using alternative equipment on the productivity of labor employed in construction activities. Discrete event simulation techniques were used to analyze different scenarios in which the use of alternative equipment was assumed in the construction of the roof of a dwelling based on concrete beam and block flooring. The quantity of man-minutes was estimated for such construction in each of the analyzed scenarios. The analysis of scenarios was carried out in three stages.

The first stage included the development of scenario 1.0 (Baseline), which depicted a construction process in which the use of manually operated equipment was exclusively assumed. In this research work, such equipment includes non-mechanic tools that require man force to operate them. The quantity of man-minutes estimated with this scenario was considered the baseline to determine the effect of using alternative equipment in subsequent scenarios.

The second stage included the development of eleven scenarios, with each of which, but one, a reduction on the estimated man-minutes was obtained. The equipment that delivered reduced quantities of man-minutes are wheelbarrow (-7.31%), shears (-1.65%), mixer (-5.14%), ready-mix concrete with no use of pump truck (-19.47%), ready-mix concrete with pump truck (-31.77%), concrete vibrator (-1.06%), hose (-0.70%), winch (-13.53%), metal poles (-1.89%) and standard tubular scaffolding (-2.03%). On the other hand, the crane used for lifting concrete beams was the single one equipment that delivered an increase on the quantity of estimated man-minutes (+17.36%).

The development of two scenarios (3.1 and 3.2) in the third stage was based on the outputs from the second stage scenarios. Scenario 3.1 was aimed at determining the effect of the simultaneous use of the ten units of equipment that delivered reduced quantities of man-minutes estimated with scenarios in the second stage. This scenario reduced 55.94% the quantity of estimated man-minutes. Scenario 3.2 depicted the simultaneous use of the two units of equipment that

delivered the greatest reduction of man-minutes in the second stage scenarios: the winch and the ready-mix concrete with pump truck. With this scenario reduced 43.45% the man-minutes required to complete the operation.

CONTENIDO

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1. Antecedentes | 1 |
| 1.2. Planteamiento del problema | 4 |
| 1.3. Preguntas de investigación | 6 |
| 1.4. Objetivos | 6 |
| 1.4.1. <i>Objetivo General</i> | 6 |
| 1.4.2. <i>Objetivos Específicos</i> | 7 |
| 1.5. Métodos y limitaciones | 7 |
| 2. REVISIÓN DE LA LITERATURA | 8 |
| 2.1. Definición y clasificación de equipo..... | 8 |
| 2.2. Productividad de la mano de obra en la construcción..... | 11 |
| 2.2.1. <i>Definición y unidad de medida de productividad</i> | 11 |
| 2.2.2. <i>Recolección de datos para el cálculo de la productividad</i> | 14 |
| 2.3. Estudio del trabajo | 14 |
| 2.4. Investigaciones en donde se identificó que los equipos de construcción fueron un factor que afectaba las demoras y la productividad laboral | 16 |
| 2.5. Simulación de operaciones | 27 |
| 2.5.1. <i>Definición y tipos de simulación</i> | 27 |
| 2.5.2. <i>Simulación en la construcción</i> | 29 |
| 2.5.3. <i>Herramientas de simulación para uso en la construcción</i> | 31 |
| 2.6. Conclusión de la revisión de la literatura..... | 33 |
| 3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN | 34 |
| 3.1. Tipo, alcance y diseño de la investigación | 34 |
| 3.2. Procedimiento para el desarrollo de la investigación | 34 |
| 3.2.1. <i>Identificación de equipos alternos</i> | 35 |
| 3.2.1.1. Selección de las actividades a estudiar..... | 35 |
| 3.2.1.2. Desglose de las actividades en tareas | 35 |

| | |
|---|------------|
| 3.2.1.3. Identificación de los equipos empleados en las tareas | 36 |
| 3.2.2. <i>Construcción de los modelos de simulación</i> | 36 |
| 3.2.2.1. Recolección de datos para calcular las productividades | 36 |
| 3.2.2.2. Cálculo de la productividad de la mano de obra..... | 38 |
| 3.2.2.3. Identificación de la secuencia de las tareas | 39 |
| 3.2.2.4. Representación del modelo en Symphony..... | 49 |
| 3.2.2.5. Selección del caso de estudio | 52 |
| 3.2.2.6. Cálculo de las duraciones de las tareas..... | 56 |
| 3.2.2.7. Obtención de las distribuciones de probabilidad | 56 |
| 3.2.2.8. Validación del modelo de simulación | 60 |
| 3.2.3. <i>Análisis de escenarios</i> | 63 |
| 3.2.3.1. Primera Etapa | 65 |
| 3.2.3.2. Segunda Etapa..... | 65 |
| 3.2.3.3. Tercera Etapa..... | 66 |
| 4. RESULTADOS | 70 |
| 4.1. Resultados de la identificación de equipos alternos | 70 |
| 4.2. Resultados de la construcción de los modelos de simulación | 70 |
| 4.3. Resultados del análisis de escenarios | 82 |
| 5. DISCUSIÓN | 87 |
| 5.1. Discusión de los resultados obtenidos en esta investigación..... | 88 |
| 5.2. Discusión con respecto a los resultados de otros autores | 91 |
| 6. CONCLUSIONES | 93 |
| 7. RECOMENDACIONES | 96 |
| BIBLIOGRAFIA | 97 |
| APÉNDICE..... | 105 |
| APÉNDICE A. REGISTRO DE DATOS DEL CASO DE ANÁLISIS | 106 |

| | |
|---|-----|
| APÉNDICE B. RECOLECCIÓN DE DATOS EN CAMPO DE LAS PRODUCTIVIDADES DE LAS TAREAS DE TRABE Y LOSA DE VIGUETA Y BOVEDILLA..... | 112 |
| APÉNDICE C. CÁLCULO DE LAS DURACIONES DE LAS TAREAS DE TRABE Y LOSA DE VIGUETA Y BOVEDILLA DEL CASO DE ESTUDIO / ANÁLISIS | 148 |
| APÉNDICE D. DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD DE LAS TAREAS DEL CASO DE ESTUDIO / ANÁLISIS | 168 |
| APÉNDICE E. PARÁMETROS DE ENTRADA PARA LOS MODELOS DE SIMULACIÓN DE LA PARTIDA DE TECHO | 171 |
| APÉNDICE F. MODELOS DE SIMULACIÓN | 174 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Formato 1 para la recolección de datos de productividad de las tareas (que no involucran acarrees)..... | 37 |
| Figura 2. Formato 2 para la recolección de datos de productividad de las tareas de acarreo..... | 38 |
| Figura 3. Diagrama del proceso manual..... | 44 |
| Figura 4. Diagrama del proceso manual + grúa..... | 45 |
| Figura 5. Diagrama del proceso manual + manguera..... | 46 |
| Figura 6. Diagrama del proceso con concreto premezclado colado sin bomba. ... | 47 |
| Figura 7. Diagrama del proceso con concreto premezclado colado con bomba. ... | 48 |
| Figura 8. Ejemplo de listado de datos en el software Easyfit..... | 58 |
| Figura 9. Ejemplo de ajuste de distribución de los datos en el software Easyfit.... | 58 |
| Figura 10. Ejemplo de ajuste de distribuciones de probabilidad en el software Easyfit..... | 59 |
| Figura 11. Ejemplo de prueba de bondad de ajuste en el software Easyfit..... | 59 |
| Figura 12. Ejemplo de gráfica y parámetro de las duraciones en el software Easyfit..... | 60 |
| Figura 13. Ejemplo de cómo adjuntar los parámetros de la distribución de probabilidad en el modelo de simulación de software Symphony..... | 62 |

| | |
|--|-----|
| Figura 14. Ejemplo de la duración obtenida en el modelo de simulación de software Symphony. | 62 |
| Figura 15. Ejemplo de los resultados en el programa de simulación. | 63 |
| Figura 16. Variación porcentual de los escenarios de la Segunda Etapa con respecto a la cantidad de minutos-hombre estimado para el Escenario 1.0 (Base). | 86 |
| Figura 17. Variación porcentual de los escenarios de la Tercera Etapa con respecto a la cantidad de minutos-hombre estimado para el Escenario 1.0 (Base). | 87 |
| Figura F1. Modelo de simulación del proceso manual. | 174 |
| Figura F2. Modelo de simulación del proceso manual + vibrador de inmersión. . | 175 |
| Figura F3. Modelo de simulación del proceso manual + grúa. | 176 |
| Figura F4. Modelo de simulación del proceso manual + manguera. | 177 |
| Figura F5. Modelo de simulación del proceso con concreto premezclado colado sin bomba. | 178 |
| Figura F6. Modelo de simulación del proceso con concreto premezclado colado con bomba. | 179 |
| Figura F7. Modelo de simulación del proceso con concreto premezclado colado con bomba + manguera + vibrador de inmersión..... | 180 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Simbología para los diagramas de flujo de proceso. | 42 |
| Tabla 2. Resumen de las tareas involucradas en los distintos procesos de la partida de techo..... | 43 |
| Tabla 3. Elementos para la construcción de un modelo de simulación. | 49 |
| Tabla 4. Número de trabajadores involucrados en las tareas del caso de estudio. | 53 |
| Tabla 5. Volumen de trabajo ejecutado en el caso de estudio. | 54 |
| Tabla 6. Equipo asignado para el Escenario 1.0 (Base). | 67 |
| Tabla 7. Alternativa de equipo empleado para los escenarios de la Segunda Etapa. | 68 |

| | |
|---|-----|
| Tabla 8. Alternativa de equipo empleado para los escenarios de la Tercera Etapa. | 69 |
| Tabla 9. Desglose de las actividades de trabe y losa de vigueta y bovedilla. | 71 |
| Tabla 10. Desglose de las alternativas de equipo de construcción de trabe y losa de vigueta y bovedilla. | 72 |
| Tabla 11. Datos recolectados en campo de la tarea de corte de acero de refuerzo con segueta. | 74 |
| En las Tablas 13, 14 y 15 se muestra la relación de los modelos de simulación descritos anteriormente y el escenario al que se puede aplicar: | 76 |
| Tabla 13. Relación de modelos de simulación utilizados en la Primera Etapa. | 77 |
| Tabla 14. Relación de modelos de simulación utilizados en la Segunda Etapa. ... | 78 |
| Modelo de simulación del proceso manual + vibrador. | 78 |
| Tabla 14. Relación de modelos de simulación utilizados en la Tercera Etapa. | 79 |
| Tabla 15. Ejemplo de los parámetros de entrada para la construcción del modelo de simulación. | 80 |
| Tabla 16. Ejemplo de duraciones calculadas para la tarea de vibrado de concreto con varilla. | 80 |
| Tabla 17. Ejemplo del formato de las distribuciones de probabilidad. | 81 |
| Tabla 18. Resultados de la validación de los modelos de simulación. | 81 |
| Tabla 19. Resumen de los resultados de la Primera Etapa. | 82 |
| Tabla 20. Resumen de los resultados de la Segunda Etapa. | 83 |
| Tabla 21. Resumen de resultados de la Tercera Etapa. | 84 |
| Tabla A1. Registro de número de personas involucradas en el caso de análisis. | 106 |
| Tabla A2. Registro de volumen de trabajo en el caso de análisis. | 109 |
| Tabla B1. Datos recolectados en campo de la tarea de acarreo de cimbra a mano. | 112 |
| Tabla B2. Datos recolectados en campo de la tarea de acarreo de cimbra con carretilla. | 113 |
| Tabla B3. Datos recolectados en campo de la tarea de cimbrado con martillo. ... | 114 |

| | |
|--|-----|
| Tabla B4. Datos recolectados en campo de la tarea de acarreo de varillas de acero a mano. | 115 |
| Tabla B5. Datos recolectados en campo de la tarea de corte de acero de refuerzo con segueta..... | 116 |
| Tabla B6. Datos recolectados en campo de la tarea de corte de acero de refuerzo con cizalla..... | 116 |
| Tabla B7. Datos recolectados en campo de la tarea de doblado de acero de refuerzo con dobladora..... | 117 |
| Tabla B8. Datos recolectados en campo de la tarea de habilitado de acero de refuerzo con dobladora. | 118 |
| Tabla B9. Datos recolectados en campo de la tarea de colocación de acero de refuerzo a mano. | 119 |
| Tabla B10. Datos recolectados en campo de la tarea de acarreo de agregados y agua con carretilla. | 120 |
| Tabla B11. Datos recolectados en campo de la tarea de acarreo de agregados y agua con cubeta..... | 121 |
| Tabla B12. Datos recolectados en campo de la tarea de acarreo de sacos de cemento a mano..... | 122 |
| Tabla B13. Datos recolectados en campo de la tarea de acarreo de sacos de cemento con carretilla. | 123 |
| Tabla B14. Datos recolectados en campo de la tarea de preparación de concreto con revolvedora..... | 123 |
| Tabla B15. Datos recolectados en campo de la tarea de preparación de concreto con pala..... | 124 |
| Tabla B16. Datos recolectados en campo de la tarea de acarreo de concreto con cubeta. | 125 |
| Tabla B17. Datos recolectados en campo de la tarea de colocación de concreto con llana..... | 126 |
| Tabla B18. Datos recolectados en campo de la tarea de colocación de concreto con concreto premezclado colado con bomba. | 127 |

| | |
|--|-----|
| Tabla B19. Datos recolectados en campo de la tarea de vibrado de concreto con varilla..... | 127 |
| Tabla B20. Datos recolectados en campo de la tarea de vibrado de concreto con vibrador de inmersión..... | 128 |
| Tabla B21. Datos recolectados en campo de la tarea de curado de concreto con cubeta. | 128 |
| Tabla B22. Datos recolectados en campo de la tarea de curado de concreto con cubeta. | 129 |
| Tabla B23. Datos recolectados en campo de la tarea de curado de concreto con manguera..... | 130 |
| Tabla B24. Datos recolectados en campo de la tarea de curado de concreto con manguera. | 131 |
| Tabla B25. Datos recolectados en campo de la tarea de acarreo de viguetas a mano. | 132 |
| Tabla B26. Datos recolectados en campo de la tarea de acarreo de bovedillas a mano. | 133 |
| Tabla B27 Datos recolectados en campo de la tarea de acarreo de bovedillas con carretilla..... | 134 |
| Tabla B28. Datos recolectados en campo de la tarea de izado de viguetas con escalera y sogas. | 135 |
| Tabla B29. Datos recolectados en campo de la tarea de izado de viguetas con grúa. | 136 |
| Tabla B30. Datos recolectados en campo de la tarea de izado de bovedillas con escalera..... | 137 |
| Tabla B31. Datos recolectados en campo de la tarea de izado de bovedillas con cabrestante..... | 138 |
| Tabla B32. Datos recolectados en campo de la tarea de apuntalamiento con polín de madera. | 139 |
| Tabla B33. Recolección de datos de la tarea de apuntalamiento con polín de metal. | 139 |

| | |
|--|-----|
| Tabla B34. Datos recolectados en campo de la tarea de cimbrado perimetral con martillo..... | 140 |
| Tabla B35. Datos recolectados en campo de la tarea de colocación de malla electrosoldada con martillo..... | 140 |
| Tabla B36. Datos recolectados en campo de la tarea de armado de andamio con andamio tubular estándar..... | 141 |
| Tabla B37. Datos recolectados en campo de la tarea de armado de andamio con tablas y blocks..... | 142 |
| Tabla B38. Datos recolectados en campo de la tarea de acarreo para curado con cubeta. | 143 |
| Tabla B39. Datos recolectados en campo de la tarea de acarreo de puntales a mano. | 144 |
| Tabla B40. Datos recolectados en campo de la tarea de acarreo de bovedillas sobre la losa a mano. | 145 |
| Tabla B41. Datos recolectados en campo de la tarea de acarreo de acero habilitado a mano. | 146 |
| Tabla B42. Datos recolectados en campo de la tarea de acarreo de malla electrosoldada a mano. | 147 |
| Tabla C1. Duraciones de la tarea de acarreo de cimbra a mano del caso de estudio/análisis (Trabe y Losa de vigueta y bovedilla). | 148 |
| Tabla C2. Duraciones de la tarea de acarreo de cimbra a mano del caso de estudio/análisis (Trabe y Losa de vigueta y bovedilla). | 148 |
| Tabla C3. Duraciones de la tarea de cimbrado con martillo del caso de estudio/análisis (Trabe). | 149 |
| Tabla C4. Duraciones de la tarea de acarreo de varillas de acero a mano del caso de estudio/análisis (Trabe y Losa de vigueta y bovedilla). | 149 |
| Tabla C5. Duraciones de la tarea de corte de acero de refuerzo con segueta del caso de estudio/análisis (Trabe)..... | 150 |
| Tabla C6. Duraciones de la tarea de corte de acero de refuerzo con cizalla del caso de estudio/análisis (Trabe). | 150 |

| | |
|---|-----|
| Tabla C7. Duraciones de la tarea de doblado de acero de refuerzo con dobladora del caso de estudio/análisis (Trabe)..... | 150 |
| Tabla C8. Duraciones de la tarea de habilitado de acero de refuerzo con dobladora del caso de estudio/análisis estudio (Trabe). | 151 |
| Tabla C9. Duraciones de la tarea de colocación de acero de refuerzo a mano del caso de estudio/análisis (Trabe y Losa de vigueta y bovedilla)..... | 151 |
| Tabla C10. Duraciones de la tarea de acarreo de agregados y agua con carretilla del caso de estudio/análisis (Trabe y Losa de vigueta y bovedilla)..... | 152 |
| Tabla C11. Duraciones de la tarea de acarreo de agregados y agua con cubeta del caso de estudio/análisis (Trabe y Losa de vigueta y bovedilla)..... | 152 |
| Tabla C12. Duraciones de la tarea de acarreo de sacos de cemento a mano del caso de estudio/análisis (Trabe y Losa de vigueta y bovedilla)..... | 153 |
| Tabla C13. Duraciones de la tarea de acarreo de sacos de cemento con carretilla del caso de estudio/análisis (Trabe y Losa de vigueta y bovedilla)..... | 153 |
| Tabla C14. Duraciones de la tarea de preparación de concreto con revolvedora del caso de estudio/análisis (Trabe y Losa de vigueta y bovedilla)..... | 154 |
| Tabla C15. Duraciones de la tarea de preparación de concreto con pala del caso de estudio/análisis (Trabe y Losa de vigueta y bovedilla). | 154 |
| Tabla C16. Duraciones de la tarea de acarreo de concreto con cubeta del caso de estudio/análisis (Trabe y Losa de vigueta y bovedilla). | 155 |
| Tabla C17. Duraciones de la tarea de colocación de concreto con llana del caso de estudio/análisis (Trabe y Losa de vigueta y bovedilla). | 155 |
| Tabla C18. Duraciones de la tarea de colocación de concreto con concreto premezclado colado con bomba del caso de estudio/análisis (Trabe y Losa de vigueta y bovedilla)..... | 156 |
| Tabla C19. Duraciones de la tarea de vibrado de concreto con varilla del caso de estudio/análisis (Trabe y Losa de vigueta y bovedilla). | 156 |
| Tabla C20. Duraciones de la tarea de vibrado de concreto con vibrador de inmersión del caso de estudio/análisis (Trabe y Losa de vigueta y bovedilla). | 157 |

| | |
|--|-----|
| Tabla C21. Duraciones de la tarea de curado de concreto con cubeta del caso de estudio/análisis (Trabe). | 157 |
| Tabla C22. Duraciones de la tarea de curado de concreto con cubeta del caso de estudio/análisis (Losa de vigueta y bovedilla). | 157 |
| Tabla C23. Duraciones de la tarea de curado de concreto con manguera del caso de estudio/análisis (Trabe). | 158 |
| Tabla C24. Duraciones de la tarea de curado de concreto con manguera del caso de estudio (Losa de vigueta y bovedilla). | 158 |
| Tabla C25. Duraciones de la tarea de acarreo de viguetas a mano del caso de estudio/análisis (Losa de vigueta y bovedilla). | 158 |
| Tabla C26. Duraciones de la tarea de acarreo de bovedillas a mano del caso de estudio/análisis (Losa de vigueta y bovedilla). | 159 |
| Tabla C27. Duraciones de la tarea de acarreo de bovedillas con carretilla del caso de estudio/análisis (Losa de vigueta y bovedilla). | 159 |
| Tabla C28. Duraciones de la tarea de acarreo de izado de viguetas con escalera y sogas del caso de estudio/análisis (Losa de vigueta y bovedilla). | 160 |
| Tabla C29. Duraciones de la tarea de acarreo de viguetas con grúa del caso de estudio/análisis (Losa de vigueta y bovedilla). | 160 |
| Tabla C30. Duraciones de la tarea de izado de bovedillas del caso de estudio/análisis (Losa de vigueta y bovedilla). | 161 |
| Tabla C31. Duraciones de la tarea de izado de bovedillas con cabrestante del caso de estudio/análisis (Losa de vigueta y bovedilla). | 161 |
| Tabla C32. Duraciones de la tarea de apuntalamiento con polín de madera del caso de estudio/análisis (Trabe y Losa de vigueta y bovedilla). | 162 |
| Tabla C33. Duraciones de la tarea de apuntalamiento con polín de metal del caso de estudio/análisis (Trabe y Losa de vigueta y bovedilla). | 162 |
| Tabla C34. Duraciones de la tarea de cimbrado perimetral con martillo del caso de estudio/análisis (Losa de vigueta y bovedilla). | 163 |
| Tabla C35. Duraciones de la tarea de colocación de malla electrosoldada con martillo del caso de estudio/análisis (Losa de vigueta y bovedilla)..... | 163 |

| | |
|--|-----|
| Tabla C36. Duraciones de la tarea de armado de andamio con andamio tubular estándar del caso de estudio/análisis (Trabe y Losa de vigueta y bovedilla). | 164 |
| Tabla C37. Duraciones de la tarea de armado de andamio con tablas y blocks del caso de estudio/análisis (Trabe y Losa de vigueta y bovedilla). | 164 |
| Tabla C38. Duraciones de la tarea de acarreo para curado con cubeta del caso de estudio/análisis (Trabe y Losa de vigueta y bovedilla). | 165 |
| Tabla C39. Duraciones de la tarea de acarreo de puntales a mano del caso de estudio/análisis (Trabe y Losa de vigueta y bovedilla). | 165 |
| Tabla C40. Duraciones de la tarea de acarreo de bovedillas sobre la losa a mano del caso de estudio/análisis (Losa de vigueta y bovedilla). | 166 |
| Tabla C41. Duraciones de la tarea de acarreo de acero habilitado del caso de estudio/análisis (Trabe y Losa de vigueta y bovedilla). | 166 |
| Tabla C42. Duraciones de la tarea de acarreo de malla electrosoldada a mano del caso de estudio/análisis (Trabe y Losa de vigueta y bovedilla). | 167 |
| Tabla D1. Distribuciones de probabilidad de las tareas del caso de estudio/análisis. | 168 |
| Tabla E1. Parámetros de entrada para los modelos de simulación. | 171 |

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

Ha sido ampliamente documentado que uno de los factores que afecta la productividad laboral en la industria de la construcción se refiere a la disponibilidad de los equipos empleados en la ejecución de los procesos constructivos. En el contexto local e internacional, investigaciones como las de Assaf et al. (1995)¹, Arcudia et al. (2002)², Odeh y Battaineh (2002)³, Jiménez (2002)⁴, Assaf y Al-Hejji. (2006)⁵, Sambasivan y Soon (2007)⁶, Dai et al. (2007)⁷, Alinaitwe et al. (2007)⁸, Enshassi et al. (2007)⁹, Al-Kharashi y Skitmore (2009)¹⁰, Haseeb et al. (2011)¹¹, Rivas et al. (2011)¹²,

¹Assaf, S., Al-Khalil, M., y Al-Hazmi, M. (1995). Causes of delay in large building construction projects. *Journal of Management in Engineering*, 11(2), 45-50. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0742-597X\(1995\)11:2\(45\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0742-597X(1995)11:2(45))

²Arcudia, C., Solís, R., y González, J. (2002). Nuevo enfoque para el estudio de la productividad en la construcción masiva de vivienda. *Revista Ingeniería e Investigación*, 49, 49-58.

³Odeh, A., y Battaineh, H. (2002). Causes of construction delay: Traditional contracts. *International Journal of Project Management*, 20(1), 67-73. [https://doi.org/10.1016/S0263-7863\(00\)00037-5](https://doi.org/10.1016/S0263-7863(00)00037-5)

⁴Jiménez, L. (2002). *Estudio del efecto de los factores que reducen la productividad de la mano de obra en la construcción múltiple de vivienda* [Universidad Autónoma de Yucatán]. <http://opac.uady.mx/opac/sisbiuadyOPAC.php#>

⁵Assaf, S., y Al-Hejji, S. (2006). Causes of delay in large construction projects. *International Journal of Project Management*, 24(4), 349-357. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2005.11.010>

⁶Sambasivan, M., y Soon, Y. (2007). Causes and effects of delays in Malaysian construction industry. *International Journal of Project Management*, 25(5), 517-526. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2006.11.007>

⁷Dai, J., Goodrum, P., y Maloney, W. (2007). Analysis of craft workers' and foremen's perceptions of the factors affecting construction labour productivity. *Construction Management and Economics*, 25(11), 1139-1152. <https://doi.org/10.1080/01446190701598681>

⁸Alinaitwe, H., Mwakali, J., y Hansson, B. (2007). Factors affecting the productivity of building craftsmen - studies of Uganda. *Journal of Civil Engineering and Management*, 13(3), 169-176. <https://doi.org/10.1080/13923730.2007.9636434>

⁹Enshassi, A., Mohamed, S., Mustafa, Z., y Mayer, P. (2007). Factors affecting labour productivity in building projects in the Gaza strip. *Journal of Civil Engineering and Management*, 13(4), 245-254. <https://doi.org/10.1080/13923730.2007.9636444>

¹⁰Al-Kharashi, A., y Skitmore, M. (2009). Causes of delays in Saudi Arabian public sector construction projects. *Construction Management and Economics*, 27(1), 3-23. <https://doi.org/10.1080/01446190802541457>

¹¹Haseeb, M., Bibi, A., y Rabbani, W. (2011). Causes and Effects of Delays in Large Construction Projects of Pakistan. *Kuwait Chapter of Arabian Journal of Business and Management Review*, 1(4), 18-42.

¹²Rivas, R., Borcherding, J., Gonzalez, V., y Alarcon, L. (2011). Analysis of factors influencing productivity using craftsmen questionnaires: Case study in a Chilean construction company. *Journal of Construction Engineering and Management*, 137(4), 312-320. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000274](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000274)

Soekiman et al. (2011)¹³, Wong y Vimonsatit (2012)¹⁴, Abdulaziz y Bitar (2014)¹⁵, Tiwari et al. (2016)¹⁶, Obodoh (2016)¹⁷, Montaser et al. (2018)¹⁸, Ali et al. (2020)¹⁹, concluyeron que uno de los factores que afectan de manera más relevante a la productividad es la falta de equipos adecuados para realizar los trabajos.

El uso de equipos se vuelve un tema relevante debido a que una selección adecuada de estos podría mejorar el desempeño en la realización de los trabajos. En México este tema se complica, ya que muchas de las actividades de construcción se realizan con procesos mayormente artesanales; es decir, no existe una estandarización en su ejecución (Arias, 2017).²⁰

Una de las razones posibles por las que sucede esta situación es que la mayor parte del equipo menor debe ser suministrado por los mismos trabajadores, lo cual viola el artículo 132 de la Ley Federal del Trabajo. De acuerdo a esta ley, el patrón está obligado a proporcionar oportunamente a los trabajadores los útiles, instrumentos y materiales necesarios para la ejecución del trabajo (Congreso de la Unión, 2012).²¹ Además, un inadecuado suministro y uso de los equipos de trabajo en la construcción,

¹³Soekiman, A., Pribadi, K., Soemardi, B., y Wirahadikusumah, R. (2011). Factors relating to labor productivity affecting the project schedule performance in Indonesia. *Procedia Engineering*, 14, 865-873. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.110>

¹⁴Wong, K., y Vimonsatit, V. (2012). A study of the factors affecting construction time in Western Australia. *Scientific Research and Essays*, 7(40), 3390-3398. <https://doi.org/10.5897/sre12.138>

¹⁵Abdulaziz, M., y Bitar, C. (2014). Factors affecting construction labor productivity in Kuwait. *Journal of Construction Engineering and Management*, 138(7), 811-820. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000501](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000501)

¹⁶Tiwari, A., Malik, A., y Singh, C. (2016). Identification of Critical Factors Affecting Construction Labor Productivity in India Using AHP. *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, 5, 2249-8958.

¹⁷Obodoh, D. (2016). Causes and Effects of Construction Project Delays in Nigerian Construction Industry. *IJISSET -International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*, 3(5), 65-84. www.ijiset.com

¹⁸Montaser, N., Mahdi, I., Mahdi, H., y Rashid, I. (2018). Factors Affecting Construction Labor Productivity for Construction of Pre-Stressed Concrete Bridges. *International Journal of Construction Engineering and Management*, 7(6), 193-206. <https://doi.org/10.5923/j.ijcem.20180706.01>

¹⁹Ali, T., Al-Mamlook, R., Bzizi, M., Al-Kbisbeh, M., y Almajiri, E. (2020). 24-30 Factors Affecting Labor Productivity in the Construction Industry. *American Journal of Environmental Science and Engineering*, 4(2), 24-30. <https://doi.org/10.11648/j.ajese.20200402.13>

²⁰Arias, C. (2017). *Efecto de la composición y organización de las cuadrillas sobre la productividad en actividades de construcción de vivienda*. Universidad Autónoma de Yucatán.

²¹Congreso de la Unión. (2012). *Ley Federal del trabajo*. http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/125_020719.pdf

puede traer como consecuencia problemas a la salud al trabajador, ya que, tal como concluyó Gatti et al. (2014) en su estudio, existe una relación parabólica entre la productividad y la frecuencia cardíaca de los trabajadores.²²

Por todo lo anterior se hace evidente que es necesario contar con los equipos de adecuados en las obras de construcción para la realización del trabajo. Con base en la revisión de la literatura, se puede constatar que la información registrada en fuentes confiables sobre este tema es muy escasa; siendo los manuales de usuario de los equipos suministrados por los proveedores las fuentes más confiables sobre ésta. Esto crea un conflicto debido a que distintos autores crean sus propias definiciones, adecuándose a la clasificación que mejor les parezca o por el contexto de trabajo de la región. En el contexto actual, Ovacen (2017)²³, Arqhys Decoración (2017)²⁴, Pacholok (2019)²⁵ y Edwards y Holt (2009)²⁶ son ejemplos de autores que hablan sobre este tema.

Por su parte, Alonzo (2001) menciona que la finalidad de la clasificación del equipo de construcción es básicamente contar con una identificación clara y precisa de los diferentes equipos con los que se cuenta, para el control de los costos a través de las diferentes bitácoras, lo cual es algo importante que todo propietario de maquinaria debe realizar. El McGraw-Hill Dictionary of Architecture and Construction (2003) señala que se acostumbra a clasificar los equipos de construcción de acuerdo con sus funciones, tales como la elevación, la excavación, el transporte, la nivelación, la pavimentación, la perforación o la hincas de pilotes. Durante muchos años ha habido

²²Gatti, U., Migliaccio, G., Bogus, S., & Schneider, S. (2014). An exploratory study of the relationship between construction workforce physical strain and task level productivity. *Construction Management and Economics*, 32(6), 548-564. <https://doi.org/10.1080/01446193.2013.831463>

²³Mamani, R. (2008). *Fichas maquinarias*. Universidad Mayor de San Andrés.

²⁴Arqhys Decoración. (2017). *Tipos de equipos de trabajo*. Portal de arquitectura Arqhys.com. https://www.arqhys.com/decoracion/tipos_de_equipos_de_trabajo.html

²⁵Pacholok, M. (2019). *Notice to potential proponents*. [https://wx.toronto.ca/inter/pmmd/callawards.nsf/fa687bbbf211bf4a8525791100515d51/85258049005DEA6385258463004CEFAD/\\$file/RFP No. 9119-19-7187 - Viewing Copy.pdf](https://wx.toronto.ca/inter/pmmd/callawards.nsf/fa687bbbf211bf4a8525791100515d51/85258049005DEA6385258463004CEFAD/$file/RFP%20No.%209119-19-7187%20-%20Viewing%20Copy.pdf)

²⁶Edwards, D. J., y Holt, G. D. (2009). Construction plant and equipment management research: Thematic review. *Journal of Engineering, Design and Technology*, 7(2), 186-206. <https://doi.org/10.1108/17260530910974989>

pocos cambios en los tipos básicos de máquinas disponibles para trabajos específicos.²⁷

Por todo lo anterior, se puede decir que no hay una definición estandarizada en cuanto a los equipos en la construcción. Por lo que, para esta investigación, se consideró la definición de Ramos (2012), quien argumenta que este recurso incluye los equipos mecánicos o maquinarias de construcción, herramientas de uso individual, las de uso colectivo, y a los implementos auxiliares (es decir, aquellos que no siendo maquinarias ni herramientas, participan en el proceso constructivo).²⁸ Esto con el fin de delimitar de mejor manera la investigación y para sentar una base bibliográfica para futuras investigaciones.

1.2. Planteamiento del problema

A pesar de que la falta de equipos adecuados para realizar los trabajos de construcción se ha identificado como un tema que afecta la productividad de los proyectos de construcción, no se han encontrado estudios dedicados a cuantificar su efecto. Se cree entonces pertinente investigar este factor más a fondo, con el fin de disminuir la incertidumbre que tienen los administradores al planificar e implementar medidas dirigidas a aumentar la productividad en los trabajos de construcción.

Con base en lo anterior, esta investigación se enfocó a estimar el efecto que en particular tiene el uso de los equipos sobre la productividad de la mano de obra en las actividades de construcción. Para esto se tuvo que considerar la dificultad que implica estimar el efecto que tendría un único factor en particular sobre la productividad de las actividades de construcción, ya que no es factible controlar todos los demás factores que afectan de manera simultánea la realización de estas (Corona, 1999).²⁹ Sin

²⁷McGraw-Hill Dictionary of Architecture and Construction. (2003). *Construction equipment*. <https://encyclopedia2.thefreedictionary.com/construction+equipment>

²⁸Ramos, D. (2012). *Evaluación técnica-económica en la selección de equipos de carguio y acarreo en minería a cielo abierto*. Universidad Nacional de Ingeniería.

²⁹Corona, G. (1999). *Método constructivo y administración de materiales - Factores que afectan la productividad de la mano de obra en la construcción masiva de vivienda*. Universidad Atonóma de Yucatán. <http://opac.uady.mx/opac/sisbiuadyOPAC.php#>

embargo, autores como Gonzalez et al. (1993)³⁰, Vanegas et al., 1993)³¹, Abourizk y Wales (1997)³², Bolivar y Halpin (1998)³³, Gómez et al. (2012)³⁴, Osorio (2015)³⁵ y Arias (2017)³⁶ ya han utilizado modelos de simulación para el análisis de métodos constructivos, comprobando que la técnica de simulación de eventos discretos resulta muy útil para analizar cómo un factor en particular afecta las actividades de construcción. Además, Hassan y Gruber (2008) han determinado que la simulación de eventos discretos es el enfoque más apropiado para modelar operaciones de construcción.³⁷

Por su parte, AbouRizk (2010) menciona que los modelos de simulación ofrecen oportunidades para modelar fenómenos probabilísticos que se encuentran frecuentemente en la construcción. Algunos de los procesos que se pueden modelar probabilísticamente son la duración de las actividades, la derivación aleatoria de los recursos, las fallas en los equipos, los procesos de entrega de materiales o planos y especificaciones, las incidencias del clima, la disponibilidad de cuadrillas y la calidad del trabajo completado.³⁸ Barbosa et al. (2009), también consideran que las técnicas

³⁰Gonzalez, A., Abourizk, S., Iseley, D., y Halpin, D. (1993). Comparison of two simulation methodologies in construction. *Journal of Construction Engineering and Management*, 119(3), 573-589. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(1993\)119:3\(573\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(1993)119:3(573))

³¹Vanegas, J., Bravo, E., y Halpin, D. (1993). Simulation Technologies for Planning Heavy Construction Processes. *Journal of Construction Engineering and Management*, 119(2), 336-354.

³²Abourizk, S., y Wales, R. (1997). *Combined Discrete-Event/Continuous Simulation for Project Planning*. March, 11-20.

³³Bolivar, A., y Halpin, D. (1998). Simplified Simulation System for Construction Projects. *Journal of Construction Engineering and Management*, February, 72-81.

³⁴Gómez, A., Echeverry, J., Giraldo, M., Otálora, C., y Cano, M. (2012). Mejoramiento de procesos constructivos a partir de un módulo programable para captura de imágenes y simulación digital. *Revista ingeniería de construcción*, 27(2), 35-53. <https://doi.org/10.4067/s0718-50732012000200003>

³⁵Osorio, C. (2015). *Efecto de la composición y organización de las cuadrillas sobre la productividad en actividades de construcción de vivienda*. Universidad Autónoma de Yucatán.

³⁶Arias, C. (2017). *Efecto de la composición y organización de las cuadrillas sobre la productividad en actividades de construcción de vivienda*. Universidad Autónoma de Yucatán.

³⁷Hassan, M., y Gruber, S. (2008). Simulation of concrete paving operations on interstate-74. *Journal of Construction Engineering and Management*, 134(1), 2-9. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2008\)134:1\(2\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2008)134:1(2))

³⁸AbouRizk, S. (2010). Role of simulation in construction management. *Journal of Construction Engineering and Management*, 136(10), 1140-1153. <https://doi.org/10.1080/09613219208727186>

de simulación resultan ser herramientas útiles para la identificación de los factores que influyen más fuertemente en el tiempo de terminación de un proyecto.³⁹

Debido a que para realizar un análisis de simulación se requiere una gran cantidad de datos, se consideró adecuado dirigir esta investigación al estudio de proyectos de construcción de vivienda. Esto se debe a las siguientes razones:

- Existe la disponibilidad de proyectos de construcción de vivienda en el contexto local.
- La naturaleza repetitiva de este tipo de proyectos permite la recolección de suficientes datos en el periodo disponible para la presente investigación.

1.3. Preguntas de investigación

1. ¿Cuáles son los equipos que utiliza la mano de obra en la ejecución de las actividades de construcción de vivienda?
2. ¿Cómo determinar el efecto que tienen los equipos sobre el tiempo de ejecución de las actividades de construcción de vivienda?
3. ¿Qué equipos tienen mayor relevancia en la eficiencia de las actividades de construcción de vivienda?

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Determinar el efecto del uso de equipos alternos sobre la productividad de la mano de obra empleada en las actividades de construcción de vivienda en Mérida, Yucatán.

³⁹Barbosa, V., Ferreira, F., Kling, D., Lopes, E., Protti, F., & Schmitz, E. (2009). Structured construction and simulation of nondeterministic stochastic activity networks. *European Journal of Operational Research*, 198(1), 266-274. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.06.010>

1.4.2. Objetivos Específicos

1. Identificar los equipos que usualmente se utilizan en las actividades de construcción de vivienda en Mérida, Yucatán, así como los equipos alternativos que permitan una realización más eficiente.
2. Construir modelos de simulación que permitan experimentar, en un contexto virtual, diferentes alternativas de equipos en la ejecución de actividades de construcción de vivienda.
3. Identificar los equipos que tienen mayor relevancia en la eficiencia de las actividades analizadas.

1.5. Métodos y limitaciones

Para la aplicación de esta investigación, se recolectaron datos en campo para determinar el efecto de los equipos en la mano de obra en las actividades de construcción de la partida de techo. Para esta partida se consideraron únicamente las actividades de trabe, y losa de vigueta y bovedilla. La investigación se hizo únicamente para analizar la construcción de viviendas.

Se realizó un estudio del método del trabajo para descomponer en operaciones y tareas las actividades de la partida de “techo”, resultando en cinco procesos que fueron: 1) proceso manual, 2) proceso manual + grúa, 3) proceso manual + manguera, 4) proceso con concreto premezclado colado sin bomba, y 5) proceso con concreto premezclado colado con bomba. Lo anterior sirvió como referencia para la construcción de los modelos de simulación en el software Symphony.

Adicionalmente, se realizó un análisis de simulación de escenarios para aislar el efecto del uso de los equipos en la productividad de la mano de obra en las actividades de la partida de techo. De igual manera, en este análisis sólo se consideró hasta la tarea de curado de concreto, dado que el objetivo era el análisis del efecto de los equipos y no la duración de la actividad como tal.

2. REVISIÓN DE LA LITERATURA

2.1. Definición y clasificación de equipo

En el contexto local e internacional, los equipos de construcción no tienen una delimitación clara. Ovacen (2017) define al equipo como maquinaria pesada; en esta definición entran únicamente las que disponen de grandes proporciones geométricas.⁴⁰ Complementando lo anterior, Mamani (2008) toma en cuenta en la definición al equipo liviano, que hace referencia a una máquina pequeña o un equipo especializado como: compresoras, bomba de agua, bomba de lodo, vibradoras, cortadoras de acero, rompe pavimentos, montacargas, etc.⁴¹ Debido a estas situaciones, se realizó un análisis en torno al concepto de equipo por autor, para consensuar una definición que se adapte a esta investigación.

Arqhys Decoración (2017) define al equipo como aquella máquina o aparato fabricado para regular, aprovechar o dirigir la acción de una fuerza. Estos tienden a recibir una forma de energía para luego transformarla en otro tipo, consiguiendo con ello un determinado efecto. Éstos están compuestos por un conjunto de elementos sean móviles o fijos, los cuales en conjunto llegan a realizar un determinado trabajo. Estos equipos, tomando en cuenta su fuente de energía, pueden ser manuales, los cuales necesitan la fuerza humana para poder funcionar; eléctricos, que usan la energía eléctrica y la transforma en otro tipo de energía; térmicos o hidráulicos, que usan fluidos.⁴²

Por otra parte, Pacholok (2019) indica que por equipo de construcción se entiende a las instalaciones, las herramientas, la maquinaria, los aperos y otros artículos utilizados en relación con el trabajo temporal o permanente, pero no incorporados al trabajo permanente ni consumidos en relación con el trabajo.⁴³

⁴⁰Ovacen. (2017). *Tipos de maquinaria construcción u obra y ejemplos*. Ovacen.com. <https://ovacen.com/tipos-maquinaria-construccion-obras/>

⁴¹Mamani, R. (2008). *Fichas maquinarias*. Universidad Mayor de San Andrés.

⁴²Arqhys Decoración. (2017). *Tipos de equipos de trabajo*. Portal de arquitectura Arqhys.com. https://www.arqhys.com/decoracion/tipos_de Equipos_de_trabajo.html

⁴³Pacholok, M. (2019). *Notice to potential proponents*. [https://wx.toronto.ca/inter/pmmd/callawards.nsf/fa687bbbf211bf4a8525791100515d51/85258049005DEA6385258463004CEFAD/\\$file/RFP.No.9119-19-7187-ViewingCopy.pdf](https://wx.toronto.ca/inter/pmmd/callawards.nsf/fa687bbbf211bf4a8525791100515d51/85258049005DEA6385258463004CEFAD/$file/RFP.No.9119-19-7187-ViewingCopy.pdf)

Edwards y Holt (2009) proponen a la planta de construcción como las máquinas autopropulsadas diseñadas para hacer trabajos como excavadoras (en todas sus configuraciones), rodillos de compactación y aparatos especializados, como zanjadoras o manipuladores telescópicos. Incluye máquinas capaces de acceder a la vía pública, como camiones de concreto premezclado y grúas móviles. El equipo lo definen en términos generales como todos los demás tipos de aparatos de construcción mecanizados, como grúas estáticas, atizadores de concreto, herramientas manuales y equipos especializados como pulidores de suelos.⁴⁴

Entre la importancia de los equipos en la industria de la construcción, Johannessen (2008) señala que suministrar a la obra con los equipos adecuados, juega un papel fundamental en el logro de resultados oportunos y de buena calidad. Para cada actividad de la construcción existe una combinación óptima de equipos y mano de obra. Dependiendo de la naturaleza y el contenido de los trabajos, el personal técnico debe hacer una correcta selección y utilización de los equipos para combinarlos eficazmente con el trabajo manual.⁴⁵

Según Ojeda (1990)⁴⁶ y Alonzo (2001)⁴⁷, los factores más importantes al seleccionar el equipo para un proyecto de construcción son el costo de adquisición, de operación y de mantenimiento. Es decir, se escoge el equipo que pueda hacer el trabajo al mínimo costo cuando los demás factores son iguales. Estos factores, también significativos, son principalmente: operación por ejecutar, especificación de la construcción, influencia de las condiciones atmosféricas en el funcionamiento del equipo, tiempo programado para hacer el trabajo, balanceo del equipo interdependiente, versatilidad y adaptabilidad del equipo a otras esquinas y efectividad del operador con el equipo.

⁴⁴Edwards, D. J., y Holt, G. D. (2009). Construction plant and equipment management research: Thematic review. *Journal of Engineering, Design and Technology*, 7(2), 186-206. <https://doi.org/10.1108/17260530910974989>

⁴⁵Johannessen, B. (2008). Building Rural Roads: Chapter 3-6. En *Building Rural Roads* (p. 98). International Labour Organization. https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---asia/---ro-bangkok/documents/genericdocument/wcms_101009.pdf

⁴⁶Ojeda, M. (1990). *Maquinaria para construcción* [Universidad de Sonora]. <http://www.bidi.uson.mx/TesisIndice.aspx?tesis=5199>

⁴⁷Alonzo, L. (2001). *Apuntes de Construcción Pesada 1 Maestría en Construcción*.

Por su parte, Mamani (2008) clasifica a los equipos de construcción de varias maneras, la primera clasificación es según la relación de peso/volumen, es decir, según su capacidad. En esta clasificación entran las maquinarias pesadas, las maquinarias semipesadas, los equipos livianos, los vehículos pesados, semipesados y livianos. De la misma manera, lo clasifica según la fuente de energía, tomando como referencia el tipo de motor de la máquina, definiéndose motor como: "Sistema material que transforma una determinada clase de energía (hidráulica, química, eléctrica, etc.) en energía mecánica y produce movimiento." También lo clasifica según el sistema de traslación. Esta clasificación está en función al método de transporte, las dimensiones y el peso de la maquinaria; y, por último, según las operaciones que realiza, en donde se clasifican según las operaciones comunes que realizan las máquinas.⁴⁸

McGraw-Hill Dictionary of Architecture and Construction (2003) señala que se acostumbra a clasificar los equipos de construcción de acuerdo con sus funciones, como la elevación, la excavación, el transporte, la nivelación, la pavimentación, la perforación o la hincada de pilotes. Durante muchos años ha habido pocos cambios en los tipos básicos de máquinas disponibles para trabajos específicos, y también pocos en las configuraciones básicas de las que se dispone desde hace mucho tiempo.⁴⁹

Por su parte Alonzo (2001) menciona que los equipos de construcción se pueden clasificar de muchas maneras, algunas de las más usuales son por su aplicación o su uso específico; en esta clasificación puede entrar la maquinaria de vías terrestres, edificación, entre otros. Por su mantenimiento, en esta clasificación entran el mantenimiento pesado y mantenimiento ligero. Por el tipo de combustible, en esta clasificación entra la gasolina y el diésel. Por su tracción, algunos ejemplos son los neumáticos y las orugas.⁵⁰

De acuerdo con todo lo anterior, se puede decir que no hay un consenso en cuanto a la definición y clasificación de los equipos en la construcción. Por lo que, para esta investigación, se consideró la definición de Ramos (2012), quien argumenta que

⁴⁸Mamani, R. (2008). *Fichas maquinarias*. Universidad Mayor de San Andrés.

⁴⁹McGraw-Hill Dictionary of Architecture and Construction. (2003). *Construction equipment*. <https://encyclopedia2.thefreedictionary.com/construction+equipment>

⁵⁰Alonzo, L. (2001). *Apuntes de Construcción Pesada 1 Maestría en Construcción*.

este recurso incluye los equipos mecánicos o maquinarias de construcción, herramientas de uso individual, las de uso colectivo, y a los implementos auxiliares (es decir, aquellos que no siendo maquinarias ni herramientas, participan en el proceso constructivo).⁵¹

2.2. Productividad de la mano de obra en la construcción

2.2.1. Definición y unidad de medida de productividad

Según Botero y Acevedo (2011), la productividad se presenta como la relación existente entre lo producido y los recursos gastados. Es posible medir la productividad de los diferentes recursos que intervienen en una empresa, tales como la mano de obra, materiales, herramientas y equipos.⁵²

Complementando lo anterior, Serpell (1986)⁵³ y Botero (2012)⁵⁴ indican que la productividad de la mano de obra es una de las que se consideran más imprescindibles en la industria de la construcción, debido a que es normalmente el recurso que fija el ritmo de trabajo en la construcción, y es también de la cual depende la productividad de otros recursos.

Autores como Rojas y Aramvareekul (2003)⁵⁵ y Villanueva (2005)⁵⁶ definen la productividad laboral como la salida generada por hora trabajada, indicando que, para calcular los valores de productividad de una industria, se requieren tres tipos de información: la producción de la industria, los datos de empleo de la industria, y el

⁵¹Ramos, D. (2012). *Evaluación técnica-económica en la selección de equipos de carguio y acarreo en minería a cielo abierto*. Universidad Nacional de Ingeniería.

⁵²Botero, L., y Acevedo, H. (2011). Simulación de operaciones y línea de balance: herramientas integradas para la toma de decisiones. *Ingeniería y Ciencia - ing.cienc.*, 7(13), 29-45. <http://publicaciones.eafit.edu.co/index.php/ingciencia/article/view/399>

⁵³Serpell, A. (1986). Productividad en la construcción. En *Revista Ingeniería de Construcción* (Vol. 1, pp. 53-59).

⁵⁴Botero, L. (2012). Guía de mejoramiento continuo para la productividad en la construcción de proyectos de vivienda (Lean construction como estrategia de mejoramiento). *Revista Universidad EAFIT*, 40(136), 50-64.

⁵⁵Rojas, E., y Aramvareekul, P. (2003). Is construction labor productivity really declining? *Journal of Construction Engineering and Management*, 129(1), 41-46. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2003\)129:1\(41\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2003)129:1(41))

⁵⁶Villanueva, H. (2005). *La productividad: su conceptualización, medición, planeación y mejora en las empresas*. Universidad Autónoma de Yucatán.

número medio de horas trabajadas. Por su parte Sumanth (1999) clasifica tres tipos básicos de productividad

- Productividad parcial: es la razón entre la cantidad producida y un solo tipo de insumo. Por ejemplo, la productividad de trabajo (el cociente de la producción entre la mano de obra) es una medida de productividad parcial. De manera parecida, la productividad del capital (el cociente de la producción entre el insumo de capital) y la productividad de los materiales (el cociente de la producción entre el insumo de las materias primas) son ejemplos de productividades parciales.
- Productividad de factor total: es la razón de la producción neta con la suma asociada con los insumos de mano de obra y capital; es decir, que el denominador de este cociente se compone sólo de los factores de insumo de capital y trabajo. Por “producción neta” se entiende producción total menos servicios y bienes intermedios comprados.
- Productividad total: es la razón entre la producción total y la suma de todos los factores de insumos. Así, la medida de productividad total refleja el impacto conjunto de todos los insumos al fabricar los productos.⁵⁷

Mahamid (2013) señala que la productividad es uno de los aspectos más importantes de la construcción, ya que afecta al desempeño de cualquier proyecto en cuanto al tiempo y costo.⁵⁸ De la misma manera, Tiwari et al. (2016) sugiere que los proyectos de construcción se caracterizan por un bajo margen de ganancia. El tiempo y los costos excedidos hacen que la productividad laboral sea una clave para el éxito y competitividad de la empresa.⁵⁹ Serpell (2003) define a la productividad en la construcción como “la medición de la eficiencia con que los recursos son administrados para completar un proyecto específico, dentro de un plazo establecido y con un

⁵⁷Sumanth, D. (1999). *Administración para la productividad total*. Compañía Editorial Continental.

⁵⁸Mahamid, I. (2013). Contractors perspective toward factors affecting labor productivity in building construction. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 20(4), 446-460. <https://doi.org/10.1108/ECAM-08-2011-0074>

⁵⁹Tiwari, A., Malik, A., y Singh, C. (2016). Identification of Critical Factors Affecting Construction Labor Productivity in India Using AHP. *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, 5, 2249-8958.

estándar de calidad dado”.⁶⁰ Por su parte, Sonmez y Rowings (1998) mencionan que la productividad puede ser medida de diferentes formas dependiendo del uso que se les dé a los datos. La razón entre las unidades terminadas y las horas-hombre trabajadas (tasa de producción) o la razón entre las horas-hombre trabajadas y las unidades terminadas (inverso de la tasa de producción) se utilizan comúnmente para medir la productividad en la industria de la construcción.⁶¹

Pino (2002)⁶², Alcuía et al. (2003)⁶³, Shehata y El-Gohary (2012)⁶⁴ y Project Management Institute (2004)⁶⁵ definen la productividad como la relación entre el volumen ejecutado del trabajo realizado en una determinada actividad y la cantidad de horas-hombre invertidas durante la jornada para la ejecución de ésta.

Del mismo modo, Bain (1982) menciona que la productividad no es una medida de la producción ni de la cantidad que se ha fabricado. Es una medida de lo bien que se han combinado y utilizado los recursos para cumplir los resultados específicos deseables.⁶⁶ Con respecto a la unidad de medición de la productividad diaria de una cuadrilla, Baeza et al. (2003) lo define como la razón entre la cantidad de horas-hombre utilizadas en realizar el concepto estudiado y el número de unidades (piezas, metro cúbicos, cuadrados o lineales, etc.) de los conceptos producidos en el día.⁶⁷

⁶⁰Serpell, A. (2003). *Administración De Operaciones De Construcción*. Marcombo S.A. <https://libreria.tirant.com/es/libro/administracion-de-operaciones-de-construccion-alfredo-serpell-9789701504277>

⁶¹Sonmez, R., y Rowings, J. (1998). Construction labor productivity modeling with neural networks. *Journal of Construction Engineering and Management*, 124(6), 498-504.

⁶²Pino, G. (2002). *El absentismo y la rotación de los albañiles en la construcción masiva de vivienda: Variables que afectan la productividad*. Universidad Autónoma de Yucatán.

⁶³Alcuía, C., Corona, G., y Pino, G. (2003). Absentismo y rotación en la construcción masiva de vivienda. Efecto en la productividad. *Ingeniería Industrial*, 24(2), 7 pág.

⁶⁴Shehata, M., y El-Gohary, K. (2012). Towards improving construction labor productivity and projects' performance. *Alexandria Engineering Journal*, 50(4), 321-330. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2012.02.001>

⁶⁵Project Management Institute. (2004). *A Guide to the Project Management Body of Knowledge* (Third Edition).

⁶⁶Bain, D. (1982). *Productividad, la solución a los problemas de la empresa*. McGraw-Hill Inc.

⁶⁷Baeza, J., Solís, R., y Arcudia, C. (2003). Utilizando información acerca de productividad de mano de obra y simulaciones computacionales en el salón de clase. *Revista Ingeniería de Construcción*, 18, 14-21.

2.2.2. Recolección de datos para el cálculo de la productividad

Shehata y El-Gohary (2012) en su investigación mencionan que se debe definir las unidades de productividad dependiendo del propósito que se desee darle, considerando también que la unidad de productividad debe ser medida fácilmente.⁶⁸ Halpin (2006) sugiere que también se debe establecer el periodo de tiempo que será considerado, pudiendo ser horas, días o cualquier otro según las características de la actividad.⁶⁹

Adicionalmente, a nivel local, Baeza et al. (2003) recolectó los datos de productividad en diferentes actividades de construcción mediante el seguimiento del trabajo realizado por una cuadrilla, misma que constituye la unidad básica de observación de la productividad de la mano de obra. Las cantidades de obra realizadas en el día dieron lugar a una base de datos numérica. Además, los autores observaron durante un período de tiempo definido cada una de las actividades realizadas por la cuadrilla.⁷⁰

Por su parte, en el contexto local, Pino (2002)⁷¹, Alcudia et al. (2003)⁷², registraron en una cédula las diferentes actividades realizadas durante una jornada de observación, así como las cuadrillas que se formaron para desarrollar cada una de éstas. Esta cédula fue utilizada para medir la productividad de la actividad en la jornada de la cuadrilla.

2.3. Estudio del trabajo

Thomas et al. (1991) menciona que el estudio del trabajo es el estudio sistemático de las actividades del trabajo. Tiene el fin de encontrar el método de trabajo

⁶⁸Shehata, M. y El-Gohary, K. (2012). Towards improving construction labor productivity and projects' performance. *Alexandria Eng. Journal*, 50(4), 321-330. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2012.02.001>

⁶⁹Halpin, D. (2006). *Construction Management* (Tercera ed). John Wiley & Sons, Inc.

⁷⁰Baeza, J., Solís, R., y Arcudia, C. (2003). Utilizando información acerca de productividad de mano de obra y simulaciones computacionales en el salón de clase. *Revista Ingeniería de Construcción*, 18, 14-21.

⁷¹Pino, G. (2002). *El absentismo y la rotación de los albañiles en la construcción masiva de vivienda: Variables que afectan la productividad*. Universidad Autónoma de Yucatán.

⁷²Alcudia, C., Corona, G., y Pino, G. (2003). Absentismo y rotación en la construcción masiva de vivienda. Efecto en la productividad. *Ingeniería Industrial*, 24(2), 7 pág.

que proporcione los costos mínimos y determine el tiempo estándar de producción.⁷³ March (2009) señala que el estudio del trabajo se compone del estudio de métodos y de la medición del trabajo.⁷⁴

Según Thomas et al. (1991)⁷⁵ y March (2009)⁷⁶, el estudio del método de trabajo (a veces llamado estudio de movimientos) consiste en encontrar el método predilecto de hacer el trabajo e implica la descomposición de una operación en sus diferentes tareas y su análisis sistemático, y es por lo tanto, la mejor manera de aumentar la productividad.

La medición del trabajo se utiliza para determinar el tiempo estándar para realizar una tarea determinada. En ella se establece cuánto tiempo debe tomarle a un trabajador la ejecución de diferentes actividades con un gasto razonable de esfuerzo; es decir, no se trata de llevar al trabajador al punto de agotamiento (Thomas et al., 1991).⁷⁷ Según March (2009), la medición del trabajo sirve para evaluar el rendimiento pasado o presente del trabajo, o para predecir el rendimiento futuro del mismo, y es utilizado con el fin de planificar con precisión, estimar y producir objetivos para los sistemas de incentivos. De la misma manera, resume las etapas del método de trabajo y medición del trabajo que compone el estudio del trabajo:

- Método de trabajo: seleccionar las actividades a ser estudiadas, recolectar los tiempos de ejecución de las cuadrillas de trabajo, analizar los datos a fondo y desarrollar soluciones o mejoras para los procesos, desarrollar los nuevos métodos de trabajo, implementar el nuevo método en un caso de estudio para evaluar la efectividad de los cambios propuestos, y determinar si se logró el objetivo de aumentar la productividad de los trabajos.

⁷³Thomas, H., Maloney, W., Smith, G., Handa, V., y Sanders, S. (1991). Modeling construction labor productivity. *Journal of Construction Engineering and Management Management*, 116(4), 705-726.

⁷⁴March, C. (2009). *Operation Management for Construction* (Taylor & F). Spon Press.

⁷⁵Thomas, H., Maloney, W., Smith, G., Handa, V., y Sanders, S. (1991). Modeling construction labor productivity. *Journal of Construction Engineering and Management Management*, 116(4), 705-726.

⁷⁶March, C. (2009). *Operation Management for Construction* (Taylor & F). Spon Press.

⁷⁷Thomas, H., Maloney, W., Smith, G., Handa, V., y Sanders, S. (1991). Modeling construction labor productivity. *Journal of Construction Engineering and Management Management*, 116(4), 705-726.

- Medición del trabajo: seleccionar las actividades a ser medidas, definir claramente las actividades, dividir las mismas en tareas simples, medir el tiempo de ejecución de las tareas, y calcular el tiempo estándar promedio de ejecución.⁷⁸

Thomas et al. (1991) proponen el uso de fotografías o vídeos, estudios con cronómetro, y el muestreo de trabajo para las técnicas de recolección de datos para el estudio del trabajo, así como presentar los resultados mediante gráficos de bandas y el equilibrio de la tripulación, diagramas de proceso, y diagramas de flujo y materiales.⁷⁹

2.4. Los equipos de construcción como factor que afecta la productividad laboral

La finalidad de esta sección es contextualizar cómo los equipos de construcción han sido identificados como un factor que afecta la productividad laboral y las demoras en los procesos constructivos. Esto con el fin de mostrar la importancia de los equipos en los proyectos de construcción y, de la misma manera, resaltar que, a pesar de ser un factor ya identificado de manera cualitativa por varios autores, no se ha estudiado de manera cuantitativa. Los siguientes autores, en sus investigaciones, identificaron los factores que afectan las demoras en los procesos constructivos y la productividad laboral, llegando a la conclusión de que siempre hay un factor relacionado con los equipos de construcción. A continuación, se muestra el resumen de cada una de las investigaciones:

Assaf et al. (1995) realizaron un estudio que describe las principales causas de retraso en los grandes proyectos de construcción en Arabia Saudita y su importancia relativa. Se llevó a cabo una encuesta de una muestra seleccionada al azar de 24 contratistas, 15 empresas de ingeniería arquitectónica (I/A) y nueve propietarios de la provincia oriental de Arabia Saudita. La encuesta incluyó 56 causas de retraso y se

⁷⁸March, C. (2009). *Operation Management for Construction* (Taylor & F). Spon Press.

⁷⁹Thomas, H., Maloney, W., Smith, G., Handa, V., y Sanders, S. (1991). Modeling construction labor productivity. *Journal of Construction Engineering and Management Management*, 116(4), 705-726.

pidió a los encuestados que indicaran su grado de importancia. Los factores de retraso se agruparon en nueve grupos principales (materiales, mano de obra, equipos, financiamiento, medio ambiente, cambios, relaciones gubernamentales, relaciones contractuales y técnicas de programación y control). El nivel de importancia de las causas y los grupos se midió y clasificó por su índice de importancia para contratistas, propietarios y I/A. El grupo de equipos obtuvo el séptimo puesto en la clasificación de las causas de los factores de retraso, sin embargo, es de destacar que los propietarios calificaron el factor de entrega lenta de equipos como importante, lo que es contrario a la opinión de los contratistas y los I/A.⁸⁰

Odeh y Battaineh (2002) presentaron los resultados de una encuesta dirigida a identificar las causas más importantes de retrasos en proyectos de construcción, con contratos de tipo tradicional desde el punto de vista de contratistas y consultores de construcción. Los resultados de la encuesta indican que los contratistas y consultores coincidieron en que la interferencia del propietario, la experiencia inadecuada del contratista, la financiación y los pagos, la productividad laboral, la lentitud en la toma de decisiones, la planificación inadecuada y los subcontratistas se encuentran entre los diez factores más importantes. La disponibilidad y la falla de los equipos fue clasificada por los contratistas y consultores en los puestos 7 y 16 respectivamente en la encuesta.⁸¹

Assaf y Al-Hejji. (2006) realizaron una encuesta sobre el desempeño en el tiempo de diferentes tipos de proyectos de construcción en Arabia Saudita, a fin de determinar las causas del retraso y su importancia de acuerdo con cada uno de los participantes del proyecto, es decir, el propietario, el consultor y el contratista. La encuesta de campo realizada incluyó a 23 contratistas, 19 consultores y 15 propietarios. Durante la investigación se identificaron setenta y tres causas de retraso. El 76% de los contratistas y el 56% de los consultores indicaron que el promedio de

⁸⁰Assaf, S., Al-Khalil, M., y Al-Hazmi, M. (1995). Causes of delay in large building construction projects. *Journal of Management in Engineering*, 11(2), 45-50. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0742-597X\(1995\)11:2\(45\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0742-597X(1995)11:2(45))

⁸¹Odeh, A., y Battaineh, H. (2002). Causes of construction delay: Traditional contracts. *International Journal of Project Management*, 20(1), 67-73. [https://doi.org/10.1016/S0263-7863\(00\)00037-5](https://doi.org/10.1016/S0263-7863(00)00037-5)

demora se encuentra entre el 10% y el 30% de la duración original. La causa más común de retraso identificada por las tres partes es "cambio de orden". Las encuestas concluyeron que el 70% de los proyectos experimentaron un retraso y encontraron que 45 de los 76 proyectos considerados se retrasaron. Las averías de equipos, escasez de equipo, bajo nivel de habilidad del operador de equipo, baja productividad y eficiencia de equipos, y falta de equipo mecánico de alta tecnología estuvieron englobadas en el grupo de planeación relacionada con el equipo, y éste fue clasificado en el noveno puesto por parte de los contratistas, consultores y propietarios en causas de demoras.⁸²

Sambasivan y Soon (2007) identificaron los factores de retraso y su impacto (efecto) en la finalización del proyecto. Este estudio adopta un enfoque integrado e intenta analizar el impacto de causas específicas sobre efectos específicos. Se realizó una encuesta por cuestionario para solicitar las causas y los efectos de la demora de los clientes, consultores y contratistas. Aproximadamente 150 encuestados participaron en la encuesta. Este estudio identificó las 10 causas más importantes de retraso a partir de una lista de 28 causas diferentes y 6 efectos diferentes del retraso. Las diez causas más importantes fueron: (1) planificación inadecuada del contratista, (2) mala gestión del sitio del contratista, (3) experiencia inadecuada del contratista, (4) financiación y pagos inadecuados del cliente por el trabajo terminado, (5) problemas con los subcontratistas, (6) escasez de material, (7) oferta de mano de obra, (8) disponibilidad y fallas del equipo, (9) falta de comunicación entre las partes y (10) errores durante la etapa de construcción. Seis efectos principales de la demora fueron: (1) exceso de tiempo, (2) exceso de costo, (3) disputas, (4) arbitraje, (5) litigio y (6) abandono total. Este estudio también ha establecido una relación empírica entre cada causa y efecto. La causa de la disponibilidad y falla del equipo fue clasificado en el octavo puesto, aludiendo a que muchos de los contratistas no poseen los equipos necesarios para la realización de las obras de construcción, por lo que estos alquilan los equipos cuando los requieren. Además, durante la temporada en la que hay

⁸²Assaf, S., y Al-Hejji, S. (2006). Causes of delay in large construction projects. *International Journal of Project Management*, 24(4), 349-357. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2005.11.010>

muchos proyectos de construcción, los equipos escasean y no tienen un adecuado mantenimiento. Esto conduce a fallas por parte de los equipos que dificultan el avance del proyecto.⁸³

Dai et al. (2007) realizaron una encuesta a los trabajadores especializados en todo Estados Unidos de América para cuantificar la perspectiva de la fuerza laboral sobre la productividad de la mano de obra en la construcción. Específicamente, la encuesta midió el impacto de 83 factores de productividad, que se habían identificado a través de 18 sesiones de grupos focales con trabajadores y sus supervisores inmediatos en lugares de trabajo ubicados en todo Estados Unidos. Los trabajadores brindan información detallada sobre los factores que afectan su productividad diaria, y los equipos de administración del lugar de trabajo pueden abordar la mayoría de los factores contradictorios que afectan la productividad de la mano de obra de la construcción. Los principales hallazgos indicaron que los trabajadores y los supervisores comparten una percepción general de los factores que influyen en la productividad de la construcción; sin embargo, existen diferencias. Específicamente, los supervisores informaron que los factores relacionados con la gestión de proyectos y los dibujos de ingeniería tienen un impacto más severo en su productividad en comparación con los trabajadores. Estos últimos informaron que los factores relacionados con los materiales de construcción tienen un impacto más severo.⁸⁴

Alinaitwe et al. (2007) realizó una encuesta a los directores de proyectos de construcción en Uganda para detectar las causas que afectan la productividad laboral en los proyectos de construcción. Se pidió a los encuestados que calificaran, según su experiencia, cómo 36 factores afectan la productividad con respecto al tiempo, el costo y la calidad. La encuesta se llevó a cabo mediante un cuestionario y las respuestas se recibieron durante un período de 3 meses. Los diez problemas más importantes que afectan la productividad laboral fueron: (1) supervisores incompetentes; (2) falta de

⁸³Sambasivan, M., y Soon, Y. (2007). Causes and effects of delays in Malaysian construction industry. *International Journal of Project Management*, 25(5), 517-526. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2006.11.007>

⁸⁴Dai, J., Goodrum, P., y Maloney, W. (2007). Analysis of craft workers' and foremen's perceptions of the factors affecting construction labour productivity. *Construction Management and Economics*, 25(11), 1139-1152. <https://doi.org/10.1080/01446190701598681>

habilidades de los trabajadores; (3) retrabajos; (4) falta de herramientas / equipo; (5) métodos de construcción deficientes; (6) mala comunicación; (7) dibujos inexactos; (8) paros por trabajos rechazados por consultores; (9) inseguridad política; avería de herramientas / equipos; y (10) duras condiciones climáticas. La falta de herramientas y equipos ocupó el cuarto lugar general. Entre las razones por las que se ubicó en este puesto fue que las herramientas se proporcionan principalmente a los trabajadores contratados a tiempo completo, y se espera que los trabajadores eventuales traigan los suyos, en parte porque éstos terminan llevándose las mismas herramientas que se les proporcionan. Además, algunos equipos no están disponibles en algunos lugares ni siquiera para alquilarlos, concluyendo que es necesario mejorar la disponibilidad de herramientas para que los trabajadores sean más productivos.⁸⁵

Enshassi et al. (2007) tuvo como objetivo en su investigación, identificar los factores que afectan la productividad laboral dentro de los proyectos de construcción ubicados dentro de la Franja de Gaza y clasificar estos factores de acuerdo con su importancia relativa desde el punto de vista del contratista. El análisis de 45 factores considerados en una encuesta indicaron que los 10 principales que afectan negativamente la productividad laboral son: (1) escasez de materiales; (2) falta de experiencias laborales; (3) Falta de vigilancia laboral; (4) malentendido entre trabajo y superintendentes; (5) dibujos y alteración de especificaciones durante la ejecución; (6) retraso en el pago; (7) deslealtad laboral; (8) retraso de inspección; (9) trabajar siete días a la semana sin vacaciones y (10) escasez de herramientas / equipos. Con respecto a los equipos, estos hallazgos muestran que las empresas contratantes deben prestar más atención a la calidad de los materiales y herramientas de construcción utilizados en sus proyectos, ya que el uso de materiales y herramientas adecuados reduce tanto el tiempo necesario para terminar el trabajo como el desperdicio de materiales. El uso de materiales y herramientas adecuados también tiene un efecto positivo en la calidad del trabajo, lo que, en consecuencia, mejora la productividad.⁸⁶

⁸⁵Alinaitwe, H., Mwakali, J., y Hansson, B. (2007). Factors affecting the productivity of building craftsmen - studies of Uganda. *Journal of Civil Engineering and Management*, 13(3), 169-176. <https://doi.org/10.1080/13923730.2007.9636434>

⁸⁶Enshassi, A., Mohamed, S., Mustafa, Z., y Mayer, P. (2007). Factors affecting labour productivity in

Al-Kharashi y Skitmore (2009) identificaron las principales causas de la demora que se producen en los proyectos de construcción pública en el Reino de Arabia Saudita. Esta encuesta mide tanto el grado actual de efecto sobre los retrasos como el grado en que cada uno puede mejorarse prácticamente. Estos están contenidos en siete agrupaciones: cliente, contratista, consultor, materiales, mano de obra, contrato y causas relacionadas con la relación. La encuesta cubre una muestra de 86 clientes, contratistas y consultores que trabajan en la industria de la construcción de Arabia Saudita. Se encontró que la causa actual de demora más influyente es la falta de personal calificado y experimentado, atribuida a la cantidad considerable de proyectos de construcción grandes e innovadores y la actual falta de mano de obra asociada en la industria. Con respecto a los equipos, éstos fueron englobados entre los problemas relacionados con los materiales y la mano de obra, materiales y equipos. Esto fue motivo de gran preocupación a causa de la gran demanda que requería la industria de la construcción de Arabia Saudita.⁸⁷

Haseeb et al. (2011), en su investigación, realizaron una encuesta con cuestionario para obtener datos sobre las causas del retraso y los efectos del retraso en la industria de la construcción de Pakistán. Se preguntó a los clientes, contratistas y constructores por medio de cuestionarios sobre las causas y efectos de las demoras. Al final, se sugirieron algunas soluciones para contrarrestar los retrasos, resolviendo o disminuyendo las causas y efectos de éstos mismos. Las causas más importantes de retraso relacionadas con el equipo en la industria de la construcción de Pakistán son, según su número de ranking: (8) equipo inadecuado; (25) cantidad inadecuada de equipo; (31) escasez de piezas de equipo; (28) falla en el equipo; (44) movimiento lento del equipo; (23) problemas de asignación; (30) equipo antiguo inadecuado.

Rivas et al. (2011) se centraron en identificar y comprender los factores de productividad que afectan los proyectos en una empresa constructora chilena, a partir

building projects in the Gaza strip. *Journal of Civil Engineering and Management*, 13(4), 245-254. <https://doi.org/10.1080/13923730.2007.9636444>

⁸⁷Al-Kharashi, A. y Skitmore, M. (2009). Causes of delays in Saudi Arabian public sector construction projects. *Construction Management and Economics*, 27(1), 3-23. <https://doi.org/10.1080/01446190802541457>

de cuestionarios administrados tanto a trabajadores directos como a empleados de nivel medio. El análisis de los resultados del cuestionario ayudó a determinar las debilidades organizativas y de gestión y facilitó la comparación de los resultados con estudios de productividad previos. Los resultados demostraron ser útiles para desarrollar recomendaciones para mejorar la productividad. Los principales hallazgos indican que las áreas críticas que afectan la productividad de la construcción están relacionadas con materiales, herramientas, reelaboración, equipo, disponibilidad de camiones y la dinámica de motivación de los trabajadores. Con respecto al área de los equipos, éstos se encontraron en el puesto 15 de la clasificación de los principales factores que influyen en la productividad laboral. Los trabajadores indicaron que no había equipo suficiente para mover materiales.⁸⁸

Soekiman et al. (2011) realizaron este estudio con el objetivo de obtener la información más reciente sobre los factores clave que afectan el desempeño del proyecto en términos de tiempo de finalización del proyecto y modelar las relaciones de interacción entre los factores clave que afectan la productividad. Este documento informa sobre una encuesta realizada a los encuestados que participan en la gestión de varios tipos de proyectos en una amplia zona de Indonesia. Se pidió a los encuestados que calificaran con su experiencia 113 factores de investigaciones anteriores. El resultado muestra que los diez factores principales que afectan en general son: (1) retraso del material, (2) retraso en la llegada de materiales, (3) instrucción poco clara al trabajador, (4) huelgas laborales, (5) dificultades financieras del propietario, (6) alto ausentismo laboral, (7) ningún método de supervisión, (8) ausentismo de los supervisores, (9) retraso en los cambios de equipo y diseño, y (10) no existe un horario definido. Mientras tanto, los diez factores principales que afectan a las grandes empresas son: (1) instrucción poco clara al trabajador, (2) retraso en la llegada de materiales, (3) retraso en las dificultades materiales y financieras del propietario, (4) no hay un horario definido, (5) supervisores de baja capacidad /

⁸⁸Rivas, R., Borcharding, J., Gonzalez, V., y Alarcon, L. (2011). Analysis of factors influencing productivity using craftsmen questionnaires: Case study in a Chilean construction company. *Journal of Construction Eng. and Man.*, 137(4), 312-320. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000274](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000274)

incompetencia del supervisor, (6) ningún método de supervisión, rezago del equipo y alto ausentismo laboral, (7) ausentismo de los supervisores, daño frecuente de los equipos y huelgas laborales, (8) cambios de diseño, (9) dibujo incompleto y retraso en la inspección, (10) mala comunicación en el sitio y diseño inexacto. Los equipos aparecen en la lista general en el noveno puesto de factores clave que afectan la productividad y, de igual manera, aparecen en la lista particular de factores que afectan a las grandes empresas en el sexto con el factor de ningún método de supervisión, rezago del equipo y alto ausentismo laboral.⁸⁹

Wong y Vimonsatit (2012) se propusieron a identificar las principales causas de retrasos en la industria de la construcción de Australia Occidental, mediante una revisión de la literatura y un cuestionario. Se obtuvo un total de 48 factores de retraso a partir de la revisión de la literatura y se clasificaron en ocho grupos principales que contribuyeron a las causas del retraso. El cuestionario se distribuyó a los encuestados seleccionados de una combinación de clientes, contratistas y consultores en Perth, Australia Occidental. Aproximadamente 32 encuestados participaron en la encuesta. Según los datos recibidos, aunque limitados, las diez causas más importantes identificadas fueron: (1) Escasez de habilidades; (2) Dificultades financieras; (3) Escasez de mano de obra; (4) Fechas límite poco realistas para la finalización del proyecto; (5) Condiciones imprevistas del terreno; (6) Mala organización del contratista o consultor; (7) Mala comunicación; (8) Subestimación del tiempo de finalización; (9) baja velocidad de decisión; y (10) Errores de diseño cometidos por diseñadores. Los equipos no entraron dentro de los 10 primeros puestos de manera general, pero, en los factores de retraso de los consultores, los equipos englobados dentro del factor de escasez de materiales se ubicaron en el sexto puesto de factores de retraso.⁹⁰

Abdulaziz y Bitar (2014) identificaron y clasificaron los factores que se percibe que afectan la productividad laboral en los sitios de construcción en Kuwait. Para lograr

⁸⁹Soekiman, A., Pribadi, K., Soemardi, B., y Wirahadikusumah, R. (2011). Factors relating to labor productivity affecting the project schedule performance in Indonesia. *Procedia Engineering*, 14, 865-873. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.110>

⁹⁰Wong, K., y Vimonsatit, V. (2012). A study of the factors affecting construction time in Western Australia. *Scientific Research and Essays*, 7(40), 3390-3398. <https://doi.org/10.5897/sre12.138>

este objetivo, se invitó una cantidad estadísticamente representativa de contratistas a participar en una encuesta estructurada, que comprende 45 factores de productividad clasificados en los siguientes cuatro grupos primarios: (1) gerencia; (2) tecnológico; (3) humano / trabajo; y (4) externo. Entre los factores explorados, los 10 siguientes se distinguen como los más significativos en sus efectos sobre la productividad laboral: (1) claridad de las especificaciones técnicas; (2) el alcance de las órdenes de variación / cambio durante la ejecución; (3) nivel de coordinación entre disciplinas de diseño; (4) falta de supervisión laboral; (5) proporción de trabajo subcontratado; (6) nivel de complejidad del diseño; (7) falta de esquema de incentivos; (8) falta de liderazgo del gerente de construcción; (9) inspección rigurosa por parte del ingeniero; y (10) demora en responder a las solicitudes de información. Los equipos se hacen presentes en el factor de la falta de disponibilidad de herramientas adecuadas, lo que fue clasificado en esta investigación en el puesto 34 de 45 posibles.⁹¹

Tiwari et al. (2016) identificaron los factores clave que afectan la productividad laboral en la India y los clasificaron por proceso de jerarquía analítica. Mediante la revisión de la literatura y la realización de entrevistas en profundidad con ingenieros experimentados, se identificaron veinticinco factores críticos relacionados con la productividad laboral y se categorizaron en seis grupos: (1) factores psicológicos, (2) humanos / laborales, (3) de diseño, (4) tecnológicos, (5) gerenciales y (6) externos. Con base en el enfoque del proceso de jerarquía analítica, se diseñó y entregó un cuestionario a 72 profesionales de la construcción para obtener la opinión sobre cómo podría verse afectada la productividad laboral. Se analizaron un total de 35 comentarios y los resultados indicaron que los principales factores fueron: (1) escasez de material, (2) la claridad de las especificaciones técnicas, (3) el retraso en el pago, (4) el diseño del sitio y (5) los métodos de construcción que tienen un impacto significativo en la productividad de la mano de obra en la construcción en la India. Con respecto a los equipos, se descubrió que la falta de disponibilidad de herramientas

⁹¹Abdulaziz, M., y Bitar, C. (2014). Factors affecting construction labor productivity in Kuwait. *Journal of Construction Engineering and Management*, 138(7), 811-820. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000501](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000501)

adecuadas se encontraba en el decimosegundo puesto de factores críticos que afectan la productividad laboral en la construcción por jerarquías.⁹²

Obodoh (2016) identificó las principales causas de los retrasos en los proyectos de construcción, los efectos de estos y los métodos para minimizarlos en los proyectos de construcción. Para la realización del estudio se utilizaron cuestionarios y revisiones de la literatura. Se identificaron un total de cincuenta y siete factores y ocho grupos que contribuyeron a las causas de las demoras, seis factores que afectan las demoras, y 35 métodos para minimizar estas últimas. Los cuestionarios se distribuyeron a los encuestados seleccionados en el sureste de Nigeria. Los datos recopilados se presentaron en tablas y se analizaron utilizando el coeficiente de correlación de rango de Spearman. Se hicieron los siguientes hallazgos: Los diez factores más importantes que contribuyeron a las causas de las demoras son: (1) Cantidad insuficiente de equipos; (2) estimación de tiempo inexacta; (3) dificultades de pago intermedio; (4) órdenes de cambio; (5) estimación de costos inexacta; (6) gestión y supervisión deficientes del sitio; (7) equipo moderno inadecuado; (8) escasez de materiales de construcción; (9) equipo de proyecto incompetente, y (10) planificación y programación inadecuadas del proyecto y dificultades financieras de los contratistas. Con respecto a los equipos, éstos fueron representados por el factor de la cantidad insuficiente de equipos, lo cual quedó en primer lugar en la clasificación general de los factores que causan retrasos.⁹³

Montaser et al. (2018) evaluaron y clasificaron la importancia, frecuencia y gravedad de los factores de demora en los proyectos que afectan la productividad de la mano de obra en la construcción de puentes de concreto pretensado. En este estudio se encuestó un total de 50 personas, entre propietarios, contratistas y consultores. Se pidió a los encuestados que indicaran la importancia de cada elemento de una lista de muchos factores que afectaban la productividad laboral de la mano de

⁹²Tiwari, A., Malik, A., y Singh, C. (2016). Identification of Critical Factors Affecting Construction Labor Productivity in India Using AHP. *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, 5, 2249-8958.

⁹³Obodoh, D. (2016). Causes and Effects of Construction Project Delays in Nigerian Construction Industry. *IJISSET -International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*, 3(5), 65-84. www.ijiset.com

obra en proyectos para puentes de concreto pretensado. A continuación, los datos se sometieron al cálculo de índices importantes, lo que permitió clasificar los factores. Los once factores más importantes identificados por ellos fueron: (1) factor de diseño; (2) factor de equipamiento; (3) factor de ejecución y construcción; (4) factor externo; (5) factor financiero; (6) factor de salud y seguridad; (7) factor de trabajo; (8) factor de supervisión; (9) factor de material; (10) factor de organización, y (11) otros factores del proyecto. Con respecto a los factores relacionados a los equipos, la falta de equipamiento y disponibilidad de los equipos quedó en el puesto 33 de los factores de demora en los proyectos que afectan la productividad de la mano de obra de construcción.⁹⁴

Ali et al. (2020) identificaron y clasificaron los factores que afectan la productividad laboral en la industria de la construcción en Libia. Para lograr este objetivo, se solicitó una muestra estadísticamente demostrativa de contratistas y embajadas para contribuir a una encuesta estructurada con cuestionario. El cuestionario contenía 30 factores de productividad bajo las siguientes tres categorías principales: (1) Gestión; (2) Tecnológico; (3) y Humanos / laboral. Este estudio demostró que los siguientes cinco factores, son los más significativos en sus efectos sobre la productividad laboral de la construcción: (1) falta de supervisión laboral; (2) experiencia y habilidad laboral; (3) tecnología de la construcción; (4) coordinación entre las disciplinas de la industria de la construcción; (5) errores en los dibujos de diseño. Con respecto a los factores relacionados a los equipos, la falta de disponibilidad de éstos fue clasificado en el puesto 30 principales factores clasificados que afectan la productividad y eficiencia de los operarios.⁹⁵

⁹⁴Montaser, N., Mahdi, I., Mahdi, H., y Rashid, I. (2018). Factors Affecting Construction Labor Productivity for Construction of Pre-Stressed Concrete Bridges. *International Journal of Construction Engineering and Management*, 7(6), 193-206. <https://doi.org/10.5923/j.ijcem.20180706.01>

⁹⁵Ali, T., Al-Mamlook, R., Bzizi, M., Al-Kbisbeh, M., y Almajiri, E. (2020). 24-30 Factors Affecting Labor Productivity in the Construction Industry. *American Journal of Environmental Science and Engineering*, 4(2), 24-30. <https://doi.org/10.11648/j.ajese.20200402.13>

2.5. Simulación de operaciones

2.5.1. Definición y tipos de simulación

Según AbouRizk et al. (2011), la simulación de operaciones se define como el modelado y la experimentación de un sistema de producción mediante el uso de la computación.⁹⁶ Al respecto, Zhang et al. (2012) definen la simulación basada en la computación como el diseño de un modelo matemático lógico que representa un sistema en el mundo real y la experimentación con el modelo mediante una computadora.⁹⁷

Abourizk et al. (2016)⁹⁸, Wilson (1984)⁹⁹ y Kelton (1985)¹⁰⁰ describen los tipos de simulación usados en la construcción:

- Modelo de simulación dinámica: se ocupan de modelar un sistema que cambia con el tiempo.
- Modelo de simulación de eventos discretos: es un tipo particular de modelo de simulación dinámica. Este modelo es procesado (simulado por computadora) avanzando el tiempo en segmentos discretos basados en eventos importantes que tienen lugar en el modelo. El modelo de simulación, generalmente, comienza con un evento dado que dispara otros eventos hasta que se cumple un punto de terminación.
- Modelo de cambio continuo: es un tipo de modelo dinámico que se procesa para incrementar el tiempo en pasos uniformes (iguales). El modelo se evalúa en cada uno de esos pasos. Los cambios se implementan en algunos

⁹⁶AbouRizk, S., Halpin, D., Mohamed, Y., y Hermann, U. (2011). Research in Modeling and Simulation for Improving Construction Engineering Operations. *Journal of Construction Engineering and Management*, 137(10), 843-852. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000288](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000288)

⁹⁷ Zhang, Y., AbouRizk, S., Xie, H., y Moghani, E. (2012). Design and Implementation of Loose-Coupling Visualization Components in a Distributed Construction Simulation Environment with HLA. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 26(2), 248-258. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000131](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000131)

⁹⁸Abourizk, S., Hague, S., y Ekyalimpa, R. (2016). *Construction Simulation: An Introduction Using SIMPHONY* (1.ª ed.). Hole School of Construction Engineering Department of Civil and Environmental Engineering.

⁹⁹Wilson, J. (1984). *Statistical aspects of simulation*. Elsevier Science Publishers B. V.

¹⁰⁰Kelton, W. (1985). Statical design and analysis. *Proceedings of the 18th conference on Winter simulation - WSC 86*, 45-51. <https://doi.org/10.1016/b978-0-408-03549-1.50013-3>

elementos del modelo y las observaciones se recopilan hasta que finaliza la simulación. El procesamiento del modelo se logra resolviendo sistemas de ecuaciones a lo largo del tiempo.

- Modelo de simulación determinista y simulación estocástica: en la simulación determinística, todos los aspectos del experimento son constantes y fijos a lo largo de la simulación. Sólo un número limitado de operaciones de construcción entran en esta categoría. La simulación estocástica se utiliza debido a que las operaciones de construcción suelen estar sujetas a variaciones e interrupciones, debido a la naturaleza del entorno de la construcción en sí. Para dicha simulación, la aleatoriedad suele estar dirigida por procesos de entrada aleatorios (o pseudoaleatorios).
- Modelo de simulación estocástica / Monte Carlo: es una forma de modelo estocástico en el que los objetos de simulación incluyen distribuciones probabilísticas para modelar su naturaleza aleatoria.

Macal y North (2014)¹⁰¹ mencionan otros tipos de simulación derivados de los tipos de simulación generales anteriores:

- Modelado y animaciones en 4-D: es un modelo del mundo real que está representado en gráficos en 3D, diseñado para mostrar la progresión del proyecto de construcción al agregar el cronograma del proyecto (actividades, eventos y tiempo) al modelo 3D. Dicho modelo es muy útil para identificar posibles interferencias durante la construcción, ayudar a comprender el proceso previsto para el proyecto y rastrear el progreso.
- Modelado basado en agentes: éste suele tener tres elementos: 1) agentes, con sus atributos y comportamientos, 2) relaciones entre agentes y cómo interactúan entre sí, y 3) el entorno en el que existen los agentes. Este modelo se utiliza para modelar el comportamiento de los agentes en sistemas como las cadenas de suministro y los mercados de consumo, etc.

¹⁰¹Macal, C., y North, M. (2014). Introductory tutorial: Agent-based modeling and simulation. *Proceedings of the Winter Simulation Conference 2014*.

- Modelado dinámico del sistema: muestra relaciones de causa y efecto, acción retardada y respuestas no lineales. Se utilizan para analizar sistemas industriales, económicos, sociales y medioambientales de todo tipo.

2.5.2. Simulación en la construcción

AbouRizk (2010) expresa que la simulación de la construcción es la ciencia de desarrollar y experimentar con representaciones computacionales de sistemas constructivos para entender su comportamiento. Los modelos de simulación generalmente ofrecen oportunidades para modelar fenómenos probabilísticos que se encuentran frecuentemente en la construcción. Algunos de los procesos que se pueden modelar probabilísticamente son la duración de las actividades, la derivación aleatoria de los recursos, las fallas en los equipos, los procesos de entrega de materiales o planos y especificaciones, las incidencias del clima, la disponibilidad de cuadrillas y la calidad del trabajo completado.¹⁰²

Gómez et al. (2012) indica que lo anterior logra una imitación de los procesos constructivos, lo que permite analizar diferentes escenarios respecto a cantidad, tipos de recursos e interacciones entre los mismos, lo cual puede ayudar a aumentar la productividad con el fin de balancear las variables de tiempo y costo.¹⁰³

Según Barbosa et al. (2009), las técnicas de simulación resultan ser herramientas útiles para la identificación de los factores que influyen más fuertemente en el tiempo de terminación de un proyecto.¹⁰⁴

Tavakoli (1985) menciona que la simulación es uno de los métodos adecuados para el análisis de las operaciones de construcción; sin embargo, el autor describe tanto sus ventajas como sus desventajas. Como ventajas resalta que el desarrollo de

¹⁰²AbouRizk, S. (2010). Role of simulation in construction management. *Journal of Construction Engineering and Management*, 136(10), 1140-1153. <https://doi.org/10.1080/09613219208727186>

¹⁰³Gómez, A., Echeverry, J., Giraldo, M., Otálora, C., y Cano, M. (2012). Mejoramiento de procesos constructivos a partir de un módulo programable para captura de imágenes y simulación digital. *Revista ingeniería de construcción*, 27(2), 35-53. <https://doi.org/10.4067/s0718-50732012000200003>

¹⁰⁴Barbosa, V., Ferreira, F., Kling, D., Lopes, E., Protti, F., y Schmitz, E. (2009). Structured construction and simulation of nondeterministic stochastic activity networks. *European Journal of Operational Research*, 198(1), 266-274. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.06.010>

un modelo de simulación permite examinar todos los elementos del sistema en detalle, para conducir a una mejor comprensión del sistema; además puede dar una idea de qué variables son importantes y cómo interactúan. Por lo tanto, el autor menciona que el usuario puede experimentar con diferentes estrategias sin el riesgo de perturbar el sistema real. Como desventajas, el autor menciona que la simulación no es una ciencia exacta. Otras desventajas podrían incluir costes excesivos, debido a que los parámetros del modelo pueden ser difíciles de recoger o determinar.¹⁰⁵

Hassan y Gruber (2008) proponen que la simulación de eventos discretos es el enfoque más apropiado para modelar operaciones de construcción.¹⁰⁶ Los beneficios obtenidos por el uso de la simulación basada en computación para modelar las operaciones de construcción se deben a la interacción compleja entre las diversas unidades en el lugar de trabajo. La mayoría de las actividades de la construcción pueden ser modeladas eficientemente utilizando una simulación de eventos discretos, ya que los eventos ocurren solo en puntos específicos del tiempo.

Law y Kelton (2000) señalan que la simulación de eventos discretos permite el modelado dinámico de un sistema a medida que evoluciona con el tiempo, por una representación en la que las variables de estado cambian instantáneamente en puntos separados en el tiempo.¹⁰⁷

A su vez, Rabelo et al. (2005) mencionan que la simulación de eventos discretos tiene la ventaja de ser flexible y de que no necesita de las muchas suposiciones de simplificación como en la investigación de operaciones o la inteligencia artificial. La simulación de eventos discretos es el método de simulación más ampliamente utilizado en aplicaciones de fabricación. Se utiliza a menudo en la rama de producción para evaluar la planificación, enrutamiento y las alternativas de programación. Del mismo modo, la simulación de eventos discretos puede describir los sistemas más complejos en cualquier nivel de detalle mientras se incluyan elementos estocásticos que no se

¹⁰⁵Tavakoli, A. (1985). Productivity Analysis of Construction Operations. *Journal of Construction Engineering and Management*, 111, 31-39. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(1985\)111:1\(31\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(1985)111:1(31))

¹⁰⁶Hassan, M., & Gruber, S. (2008). Simulation of concrete paving operations on interstate-74. *Journal of Construction Engineering and Management*, 134(1), 2-9. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2008\)134:1\(2\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2008)134:1(2))

¹⁰⁷Law, A., y Kelton, W. (2000). *Simulation Modeling and Analysis* (3.^a ed.). Mc Graw Hill.

pueden describir fácilmente por otros modelos analíticos. Permite realizar el seguimiento del estado de las entidades y los recursos individuales, así como estimar numerosas medidas de rendimiento en una amplia gama de condiciones.¹⁰⁸

A continuación, se explican los pasos propuestos por Martínez (2010) para la aplicación de simulación de eventos discretos en el análisis de operaciones.¹⁰⁹

- Establecer el alcance del modelo y las preguntas específicas que el modelo debe responder;
- Definir el modelo para la operación. Esto incluye establecer el nivel de detalle del modelo (recursos, actividades, y la captura de la lógica apropiada);
- Recoger y sintetizar los datos sobre la operación para adaptarse al modelo (determinar la distribución, y realizar prueba de bondad de ajuste);
- Verificación del modelo y los datos para asegurarse de que coincide con la comprensión del modelador del sistema;
- Validación del modelo para asegurarse de que coincida con el sistema real;
- Examinar los resultados obtenidos mediante una sola corrida del modelo;
- Diseño y ejecución de experimentos de simulación;
- Analizar la salida de experimentos para determinar el desempeño con diversas configuraciones del sistema;
- Documentar y presentar los resultados;
- Utilizar los resultados para la toma de decisiones.

2.5.3. Herramientas de simulación para uso en la construcción

Según Hassan y Gruber (2008), “Cyclic Operations Network” (CYCLONE) fue una de las primeras metodologías de modelación que especialmente se desarrollaron para la simulación de operaciones de construcción.¹¹⁰

¹⁰⁸ Rabelo, L., Helal, M., Jones, A., & Min, H. (2005). Enterprise simulation: A hybrid system approach. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 18(6), 498-508. <https://doi.org/10.1080/09511920400030138>

¹⁰⁹ Martínez, J. (2010). Methodology for Conducting Discrete-Event Simulation Studies in Construction Engineering and Management. *J. of Construction Engineering and Management*, 136(1), 3-16.

¹¹⁰ Hassan, M., y Gruber, S. (2008). Simulation of concrete paving operations on interstate-74. *Journal of Construction Engineering and Management*, 134(1), 2-9.

Baeza et al. (2004) señala que los modelos de los procesos son representados mediante redes Petri cíclicas. La naturaleza cíclica de las redes de CYCLONE proporciona un medio natural para describir procesos repetitivos y puede ser utilizada tanto para análisis como para estimación de niveles de productividad en construcción en general. Se han desarrollado simuladores basados en la técnica CYCLONE para mejorar y extender las capacidades de dicha técnica, por ejemplo, RESQUE, COOPS, CIPROS y AP3, DISCO y STROBOSCOPE-CPM.¹¹¹

Shi (1999) expone que, otra técnica de simulación desarrollada desde la aparición del CYCLONE en la década de los 70 es la “Activity Based Construction” (ABC), que se enfoca en la actividad de construcción para modelar el proceso de construcción.¹¹²

Hajjar y AbouRizk (1999) introdujo el Symphony como ambiente integrado para la construcción de herramientas de simulación con propósitos especiales (SPS por Special Purpose Simulation).¹¹³ Song et al. (2005) menciona que la SPS (Special Purpose Simulation) permite al practicante con conocimientos en un dominio dado, aunque no necesariamente en simulación, modelar un proyecto dentro del dominio de su conocimiento, utilizando herramientas visuales de modelado que tienen una alta semejanza con los sistemas reales.¹¹⁴ Symphony permite implementar herramientas de simulación muy flexibles que soportan modelado gráfico, jerárquico, modular e integral.¹¹⁵

¹¹¹ Baeza, J., Arcudia, C., y González, J. (2004). Simulación estocástica de rendimientos de mano de obra en procesos de construcción. *Ingeniería*, 8(2), 103-115.

¹¹² Shi, J. (1999). Activity-Based Construction (ABC) Modeling and Simulation Method. *Journal of Construction Engineering and Management*, 25(5), 354-360.

¹¹³ Hajjar, D., & AbouRizk, S. (1999). Symphony: an environment for building special purpose construction simulation tools. *Winter Simulation Conference Proceedings*, 2, 998-1006. <https://doi.org/10.1109/wsc.1999.816811>

¹¹⁴ Song, L., Al-Battaineh, H., y Abourizk, S. (2005). Modeling uncertainty with an integrated simulation system. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 32(3), 533-542.

¹¹⁵ Song, L., Al-Battaineh, H., y Abourizk, S. (2005). Modeling uncertainty with an integrated simulation system. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 32(3), 533-542.

2.6. Conclusión de la revisión de la literatura

Un gran número de investigadores han identificado los factores que afectan la productividad laboral y las demoras en los procesos constructivos, concluyendo que algunos de los factores que se mencionan con mayor frecuencia están relacionados con los equipos de construcción. Sin embargo, estos factores han sido identificados de manera cualitativa, mientras que no se encontraron estudios que hayan sustentado cuantitativamente dicha afectación.

No se encontró una definición homogénea del término equipo de construcción, pero para los propósitos de este trabajo se consideró la definición de Ramos (2012), quien consideró que este recurso incluye los equipos mecánicos o maquinarias de construcción, herramientas de uso individual, las de uso colectivo, y a los implementos auxiliares (es decir, aquellos que no siendo maquinarias ni herramientas, participan en el proceso constructivo).¹¹⁶

Por otra parte, tal como consideraron Thomas et al. (1991)¹¹⁷ y March (2009)¹¹⁸, el estudio del método de trabajo representa una herramienta valiosa para el desglose de las actividades en tareas, la recolección de datos para calcular la productividad de tareas, y la construcción del modelo de simulación de una actividad.

Por último, la simulación de eventos discretos, como mencionó Rabelo et al. (2005) anteriormente, tiene la ventaja de ser flexible y de que no necesita de muchas suposiciones de simplificación, tales como en la investigación de operaciones o la inteligencia artificial.¹¹⁹ De igual manera, existen investigaciones que reportan que el uso de las herramientas de simulación en la industria de la construcción son de utilidad para el análisis y la toma de decisiones.

¹¹⁶Ramos, D. (2012). *Evaluación técnica-económica en la selección de equipos de carguío y acarreo en minería a cielo abierto*. Universidad Nacional de Ingeniería.

¹¹⁷Thomas, H., Maloney, W., Smith, G., Handa, V., y Sanders, S. (1991). Modeling construction labor productivity. *Journal of Construction Engineering and Management*, 116(4), 705-726.

¹¹⁸March, C. (2009). *Operation Management for Construction* (Taylor & F). Spon Press.

¹¹⁹Rabelo, L., Helal, M., Jones, A., & Min, H. (2005). Enterprise simulation: A hybrid system approach. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 18(6), 498-508. <https://doi.org/10.1080/09511920400030138>

3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Tipo, alcance y diseño de la investigación

Esta investigación se enfocó en la cuantificación del efecto que tiene el uso de equipos alternos sobre la cantidad de minutos-hombre en la ejecución de las actividades de construcción de vivienda; por lo que su desarrollo tuvo un enfoque cuantitativo. Su alcance fue explicativo, ya que tuvo como propósito evaluar la relación que existe entre el uso de los equipos y el tiempo de ejecución de las actividades de construcción, así como explicar la relación de estas variables.

En cuanto al diseño del estudio planteado para esta investigación, se consideró pertinente que fuera de tipo experimental, ya que se manipuló cuando menos una variable independiente. En este caso, se tuvo control sobre los equipos que se utilizarían en la ejecución de las tareas que incluyó la actividad analizada. Para esto, esta investigación se apoyó en la técnica de simulación de eventos discretos, ya que permite experimentar, en un contexto virtual, diferentes escenarios de las condiciones o los valores de una variable independiente (equipos empleados en la realización de las actividades) y estimar la cantidad de minutos-hombre en la ejecución de las actividades analizadas sobre una variable dependiente. Una gran ventaja de esta técnica sobre otros métodos analíticos es que fue posible excluir la afectación de otras varias variables que generalmente actúan de manera sinérgica en el contexto real.

Por otro lado, ya que la intención de esta investigación fue describir y analizar el fenómeno en un único momento en el tiempo, el estudio se consideró de tipo transeccional y la recolección de los datos se llevó a cabo en un periodo puntual de tiempo.

3.2. Procedimiento para el desarrollo de la investigación

La metodología planteada para el desarrollo de esta investigación se estructuró en tres secciones secuenciales. Cada sección tuvo el propósito de cumplir con uno de los objetivos específicos.

3.2.1. Identificación de equipos alternos

En esta sección se explica cómo se cumplió el primer objetivo: “Identificar los equipos que usualmente se utilizan en las actividades de construcción de vivienda en Mérida, Yucatán, así como los equipos alternativos que permitan una realización más eficiente.” Los pasos que incluye esta sección se refieren a la selección de las actividades a estudiar, el desglose de las actividades en tareas, y la identificación de alternativas de equipos empleados en la ejecución de cada tarea.

3.2.1.1. Selección de las actividades a estudiar

Para esta investigación se decidió estudiar actividades que fueran relevantes en cuanto al tiempo de ejecución de una vivienda de tipo social en Yucatán. De acuerdo con Arias (2017)¹²⁰, las actividades de construcción de trabe y de losa de vigueta y bovedilla, ambas pertenecientes a la partida de techo, requieren en su ejecución alrededor del 22.50% del tiempo total de construcción de una vivienda de dicho tipo. Además, en dichas actividades, el uso de los equipos se pensó más relevante ya que incluyen tareas que implican gran esfuerzo físico por parte de los trabajadores. Por lo anterior, se consideró pertinente enfocar el estudio en estas actividades

3.2.1.2. Desglose de las actividades en tareas

Las actividades seleccionadas fueron desglosadas en tareas y, posteriormente se verificó, en diversos sitios de construcción de vivienda, que constituyeran el proceso de construcción completo de la partida de techo. También, con la observación de los sitios de construcción, se definieron las mediciones que se necesitarían para estimar la productividad laboral en cada una de las tareas identificadas.

Con el desglose, se procedió a elaborar una lista de las tareas, la cual posteriormente fue necesario simplificar para evitar su duplicidad. Por ejemplo, la tarea

¹²⁰Arias, C. (2017). *Efecto de la composición y organización de las cuadrillas sobre la productividad en actividades de construcción de vivienda*. Universidad Autónoma de Yucatán.

de acarreo de concreto se repetía en las actividades de construcción de la trabe y de losa de vigueta y bovedilla.

3.2.1.3. Identificación de los equipos empleados en las tareas

Posteriormente, se identificaron los equipos viables de emplear para la ejecución de cada tarea. Para esto se recurrió a tres diferentes medios:

- a. Revisión de la bibliografía existente sobre el tema.
- b. Recopilación de opiniones de expertos en procedimientos de construcción:
 - Entrevistas a los residentes de las distintas obras que se observaron.
 - Entrevistas a los contratistas en las mismas obras.
- c. Observación de otros tipos de edificación en donde se estuvieren realizando tareas similares a las identificadas en los proyectos de vivienda, pero con equipos más profesionales o especializados. Por ejemplo, en la edificación de un proyecto comercial se pudo observar el empleo de una grúa para levantar e instalar las viguetas en la construcción de la losa.

Sin embargo, con cualquiera de los medios anteriores, siempre fue necesario tener en cuenta que los equipos a considerar en este estudio fueran factibles de adquirir en la ciudad de Mérida, Yucatán. Esta medida se acordó para delimitar la investigación.

3.2.2. Construcción de los modelos de simulación

En esta segunda sección se explican los procedimientos que se siguieron para cumplir con lo establecido en el segundo objetivo: “Construir modelos de simulación que permitan experimentar, en un contexto virtual, diferentes alternativas de equipos en la ejecución de actividades de construcción de vivienda”. El principal resultado en esta sección fue el modelo de simulación validado.

3.2.2.1. Recolección de datos para calcular las productividades

En tres proyectos de vivienda social unifamiliar y uno de vivienda vertical (departamentos), se llevaron a cabo mediciones de las variables que determinan la productividad laboral en la ejecución de tareas de construcción. De esta manera, se

recolectaron los conjuntos de datos necesarios para estimar la productividad de las diferentes tareas estudiadas. Estas variables fueron: la cantidad de mano de obra (trabajadores); el volumen total de unidades de trabajo ejecutadas; la duración (minutos) de la ejecución de la tarea y, para las tareas de acarreo, se agregó la variable de distancia de acarreo del punto de carga del recurso hasta su destino de descarga. Para cada tarea estudiada se recolectó un mínimo de treinta conjuntos de datos, con cada uno de los cuales se estimó la productividad correspondiente. Es importante tener en cuenta que, para cada tarea, se debieron estimar productividades considerando cada una de sus correspondientes alternativas de equipos; por ejemplo, para la tarea de preparación de concreto, se tuvo que estimar productividades tanto para su ejecución manual con pala como para su ejecución con una revolvedora mecánica.

Para el registro de las mediciones tomadas en el sitio se utilizó un formato diseñado para tal fin (Ver Figura 1). En donde $No.$ es el número secuencial de la medición; N_i es la cantidad de mano de obra (trabajadores) asignados a la tarea; Q_i es el volumen total de unidades de trabajo ejecutadas durante la medición; $D1_i$ es la duración (minutos) de la ejecución de la tarea, y observaciones en donde se anotaron aclaraciones sobre la medición de dichas variables.

| Formato 1. Recolección de datos de productividad de las tareas (que no involucran acarreo) | | | | |
|---|-------------------------|-------------------------|--------------------------|----------------------|
| Tarea _____ | | | | |
| Equipo _____ | | | | |
| Unidad _____ | | | | |
| No. | N_i | Q_i | $D1_i$ | Observaciones |
| | | | | |
| | | | | |

Figura 1. Formato 1 para la recolección de datos de productividad de las tareas (que no involucran acarreo).

Para el caso de las actividades que involucran acarreo, se añadió la variable adicional L_i , que es la distancia de acarreo del punto de carga del recurso hasta su destino de descarga. Esta cédula de recolección de información se puede ver en la Figura 2. En el apéndice B se encuentran los registros de los datos recolectados para la estimación de las productividades de las tareas.

| Formato 2. Recolección de datos de productividad de las tareas de acarreo | | | | | |
|--|-------|-------|--------|-------|---------------|
| Tarea _____ | | | | | |
| Equipo _____ | | | | | |
| Unidad _____ | | | | | |
| No. | N_i | Q_i | $D2_i$ | L_i | Observaciones |
| | | | | | |
| | | | | | |

Figura 2. Formato 2 para la recolección de datos de productividad de las tareas de acarreo.

3.2.2.2. Cálculo de la productividad de la mano de obra

Con los datos registrados en los formatos de las Figuras 1 y 2 y empleando una hoja de cálculo en Excel, se calcularon las productividades de cada tarea. Este cálculo se basó en una fórmula paramétrica de productividad (Ver Ecuación 1) propuesta por el Project Management Institute (2017)¹²¹. En donde: $P1_i$ es la productividad de la tarea (que no involucran acarreo); Q_i es el volumen total de unidades de trabajo ejecutadas durante la medición; $D1_i$ es la duración (minutos) de la ejecución de la tarea; y N_i es la cantidad de mano de obra (trabajadores) asignados a la tarea.

¹²¹Project Management Institute. (2017). *A Guide to the Project Management Body of Knowledge* (Quinta Edición).

$$P1_i = Q_i / (D1_i \times N_i) \text{ Ecuación 1.}$$

Para las tareas de acarreo se modificó la fórmula anterior (Ver Ecuación 2). En donde: $P2_i$ es la productividad de la tarea de acarreo; Q_i es el volumen total de unidades acarreadas durante la medición; L_i es la distancia (metros) del punto de carga del recurso hasta su destino de descarga; $D2_i$ es la duración (minutos) del ciclo de acarreo; y N_i es la cantidad de mano de obra (trabajadores) asignados a la tarea.

$$P2_i = (Q_i \times L_i) / (D2_i \times N_i) \text{ Ecuación 2.}$$

En el APÉNDICE B se han reportado las productividades calculadas para las diferentes tareas estudiadas.

3.2.2.3. Identificación de la secuencia de las tareas

Se realizó un estudio del método de trabajo para las actividades correspondientes a la partida de techo (construcción de trabes de concreto y de losa de vigueta y bovedilla), mediante el cual se identificó la secuencia de las tareas en la ejecución de las actividades.

Posteriormente se elaboró el diagrama de procesos, empleando la simbología que se encuentra en la Tabla 1. Al principio, se planteó un proceso para llevar a cabo la secuencia de las tareas (proceso manual). Con este proceso se modelaron los distintos equipos empleados en esta investigación. Sin embargo, hubo algunos equipos que generaban una variación en el proceso, debido a que, para poder funcionar, éstos requerían un cierto número de trabajadores (mano de obra), o porque involucraban más de una tarea para su realización. En contraparte, los equipos como la grúa, la manguera, el concreto premezclado colado sin bomba y con bomba, por la naturaleza de su funcionamiento, conllevaron un cambio en la secuencia del proceso manual (Ver Tabla 2). Esto repercutió no solamente en el diagrama de procesos, sino que también afectó la construcción de los modelos de simulación.

Al final, se identificaron cinco procesos, en donde se observaron variaciones importantes en la secuencia de las tareas. A continuación, se explican a detalle cada uno éstos:

1. Proceso manual (Ver Figura 3). Este proceso fue la base para la construcción de los otros cuatro procesos, pues integra las veintisiete tareas identificadas en la partida de techo, e incluye todas las tareas relacionadas con la preparación y colocación del concreto. Este proceso representa la ejecución de las actividades de manera “manual”, entendiéndose por esto el uso de equipos o herramientas cuyo funcionamiento no es mecánico, sino que requiere el esfuerzo del trabajador para operarse. En caso de haber dos o más alternativas de equipo manual para la ejecución de una misma tarea, se tomó como equipo base al que obtuvo la menor productividad promedio, mientras que los otros equipos se consideraron como las alternativas; por ejemplo, en la tarea de corte de acero de refuerzo, la cizalla se consideró como una alternativa a la segueta, dado que este último se determinó que fue la que tenía menor productividad promedio.
2. Proceso manual + grúa (Ver Figura 4). Este proceso en estructura es igual al anterior, pero difiere en que el equipo para izar las viguetas (grúa) integra dentro de su proceso el acarreo e izado de viguetas, por lo que no se consideró la tarea de acarreo de viguetas en este proceso.
3. Proceso manual + manguera (Ver Figura 5). Este diagrama en estructura es igual al proceso manual, pero difiere de éste en que el equipo para curar el concreto (manguera) integra dentro su proceso el acarreo y el curado de concreto, por lo que no se consideró la tarea de acarreo de agua para realizar el curado (Acarreo para curado) en este proceso.
4. Proceso con concreto premezclado colado sin bomba (Ver Figura 6). Esta variación del proceso implica el suministro del concreto premezclado con camión revolvedora, en el cual se asumió que el concreto era vaciado en el sitio para que los trabajadores lo acarrearan manualmente (con el uso de cubetas) para el colado de la estructura. En este diagrama no se incluyeron

las tareas relativas a la preparación manual del concreto, debido a que se considera que estas tareas se realizaron de forma externa e independiente del sitio del trabajo, es decir, cuando el concreto llega a la obra, ya se han dado por finalizadas las tareas de preparación de concreto, sin tomar en cuenta su tiempo de ejecución externo. No obstante, sí se consideró la ejecución de las tareas acarreo y colocación de concreto de manera manual. Es un caso poco común, pero cuya aplicación se observó durante la ejecución de algunos de los proyectos y que, por lo tanto, representa una alternativa para realizar el proceso.

5. Proceso con concreto premezclado colado con bomba (Ver Figura 7). Esta variación del proceso implica el suministro del concreto premezclado con el empleo de camión revolvedora y su bombeo para el colado de las estructuras. Por lo tanto, en este proceso no se incluyeron todas las tareas relacionadas con la preparación y acarreo del concreto. Esto se debe a que, una vez que llega este equipo, estas tareas se suponen realizadas de forma externa e independiente del sitio del trabajo sin tomar en cuenta su tiempo de ejecución externo.

En la Tabla 2 se resume las tareas involucradas en cada uno de estos cinco procesos que se describieron anteriormente. En donde:

- P1 representa el proceso manual;
- P2 representa el proceso manual + grúa;
- P3 representa el proceso manual + manguera;
- P4 representa el proceso con concreto premezclado colado sin bomba;
- P5 representa el proceso con concreto premezclado colado con bomba.

En esta tabla también se indica con un “Sí” aquellas tareas que formaron parte del proceso correspondiente, y con un “No” en caso contrario.

Tabla 1. Simbología para los diagramas de flujo de proceso.









| Simbología diagramas de flujo de proceso | |
|---|--|
| Símbolo | Descripción |
|  | Tareas en las cuales se realiza trabajo contributivo, es decir, no hay un avance real de la actividad, pero son necesarias para la ejecución del trabajo directo. |
|  | Tareas de transporte, en las cuales, no se realiza trabajo directo, sin embargo, son necesarias puesto que contribuyen a las tareas de trabajo directo. |
|  | Tareas en las cuales se realiza una inspección o verificación. |
|  | Tareas en las cuales se realiza trabajo directo, es decir, hay un avance real de la actividad y además necesita de inspección y verificación por parte del mismo trabajador. |
|  | Tareas ficticias, es decir, solo representan un tiempo de espera. |
|  | Sirven para identificar el flujo entre las tareas para la ejecución de una actividad. |
|  | Sirven para identificar el inicio del concepto de trabajo |
|  | Denotan el fin del concepto de trabajo |

Tabla 2. Resumen de las tareas involucradas en los distintos procesos de la partida de techo.

| Procesos de la partida de techo | | | | | | |
|--|-------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| No. de Tarea | Tarea | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 |
| 1 | Acarreo de cimbra | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí |
| 2 | Cimbrado | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí |
| 3 | Acarreo de varillas de acero | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí |
| 4 | Corte de acero de refuerzo | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí |
| 5 | Doblado de acero de refuerzo | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí |
| 6 | Habilitado de acero de refuerzo | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí |
| 7 | Colocación de acero de refuerzo | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí |
| 8 | Acarreo de agregados y agua | Sí | Sí | Sí | No | No |
| 9 | Acarreo de sacos de cemento | Sí | Sí | Sí | No | No |
| 10 | Preparación de concreto | Sí | Sí | Sí | No | No |
| 11 | Acarreo de concreto | Sí | Sí | Sí | Sí | No |
| 12 | Colocación de concreto | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí |
| 13 | Vibrado de concreto | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí |
| 14 | Curado de concreto | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí |
| 15 | Acarreo de viguetas | Sí | No | Sí | Sí | Sí |
| 16 | Acarreo de bovedillas | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí |
| 17 | Izado de viguetas | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí |
| 18 | Izado de bovedillas | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí |
| 19 | Apuntalamiento | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí |
| 20 | Cimbrado perimetral | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí |
| 21 | Colocación de malla electrosoldada | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí |
| 22 | Armado de andamio | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí |
| 23 | Acarreo para curado | Sí | Sí | No | Sí | Sí |
| 24 | Acarreo de puntales | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí |
| 25 | Acarreo de bovedillas sobre la losa | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí |
| 26 | Acarreo de acero habilitado | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí |
| 27 | Acarreo de malla electrosoldada | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí |

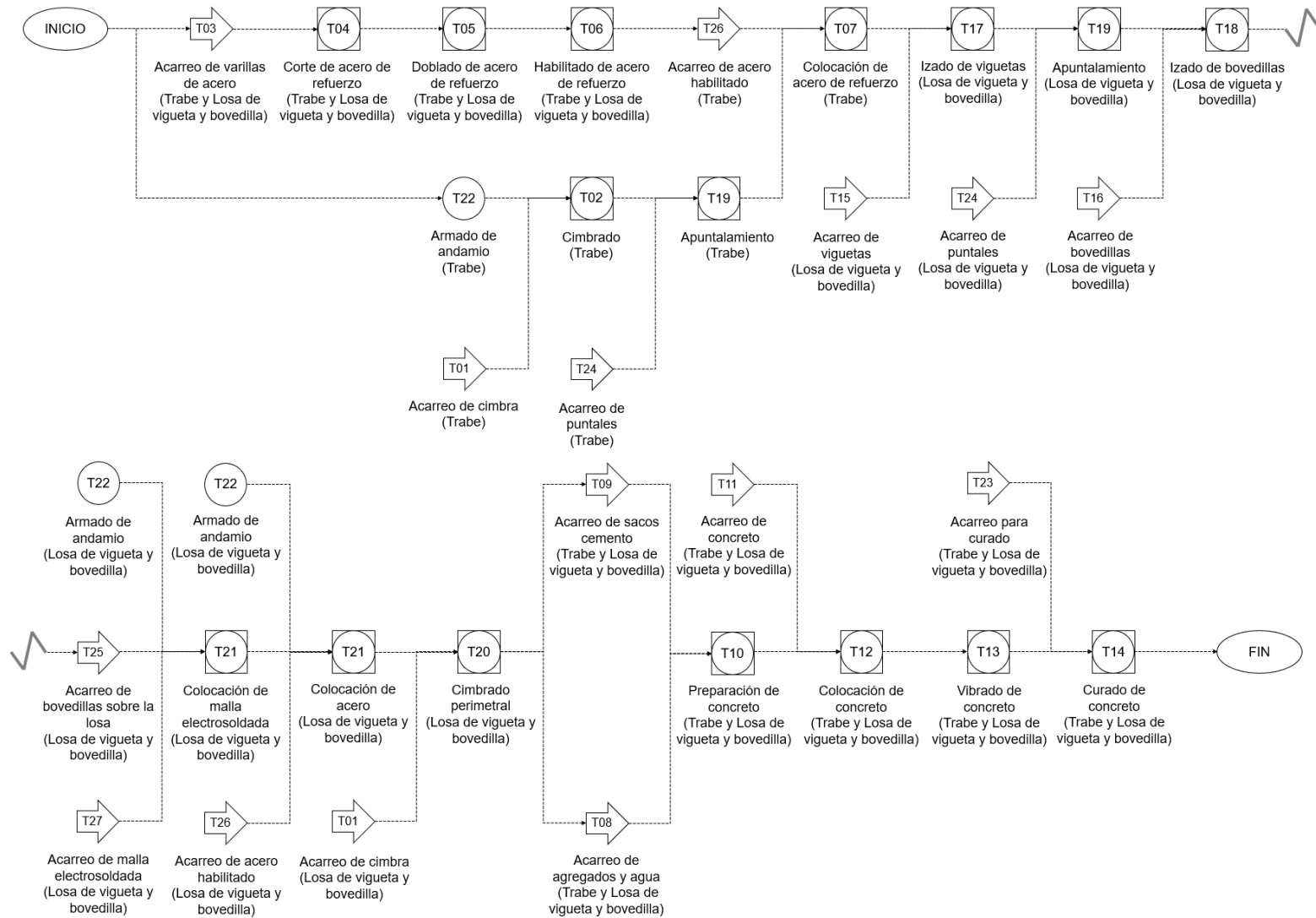


Figura 3. Diagrama del proceso manual.

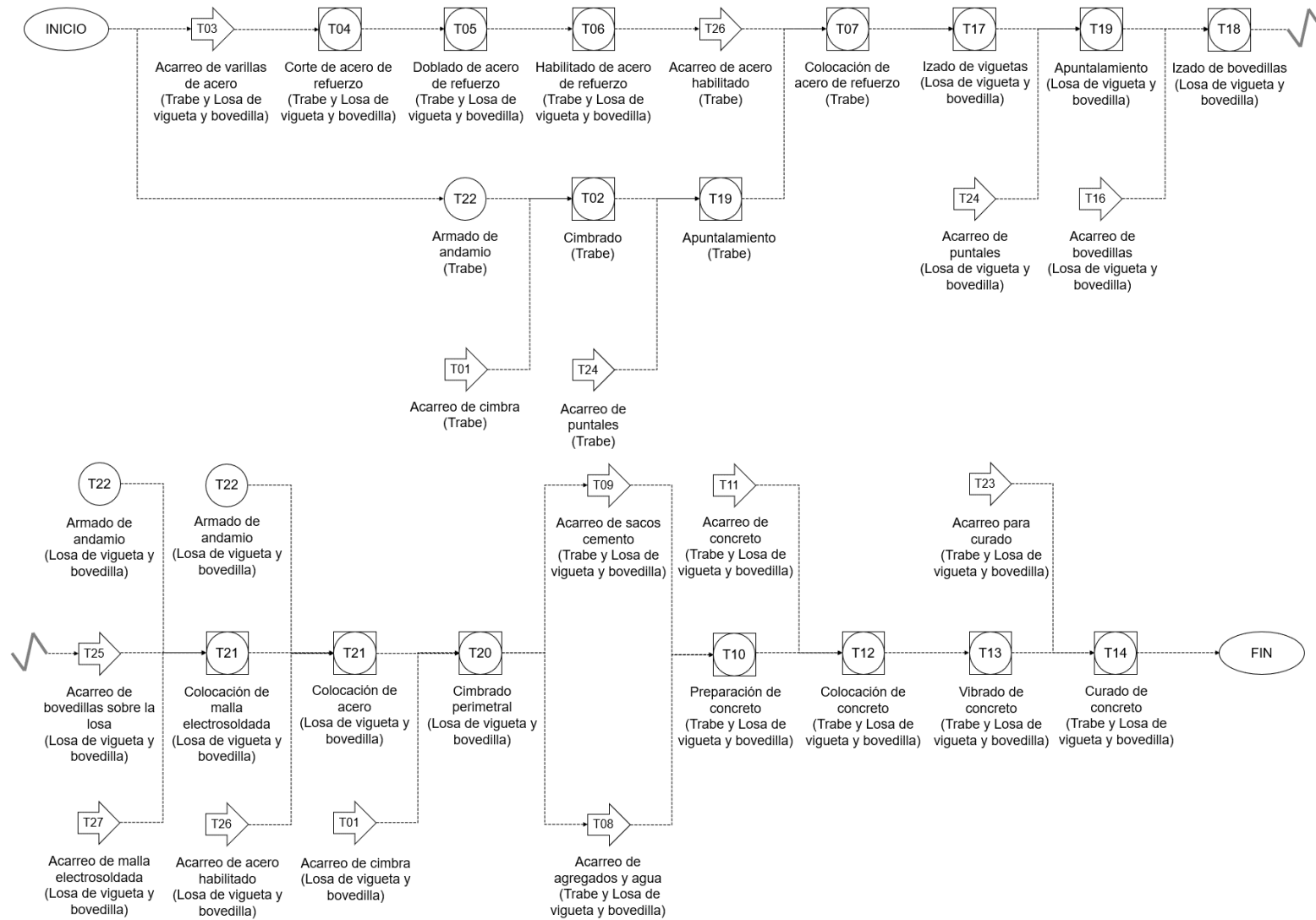


Figura 4. Diagrama del proceso manual + grúa.

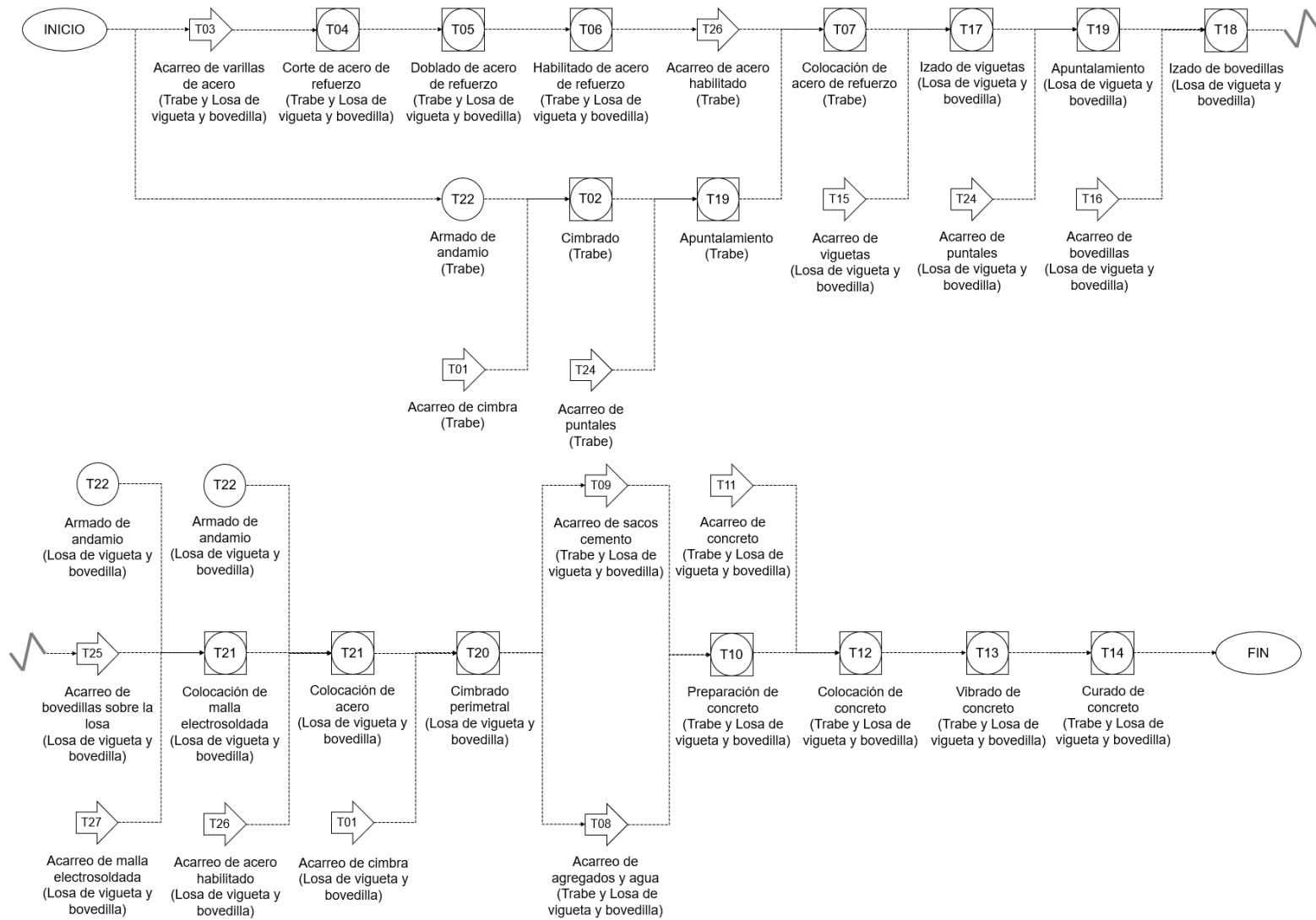


Figura 5. Diagrama del proceso manual + manguera.

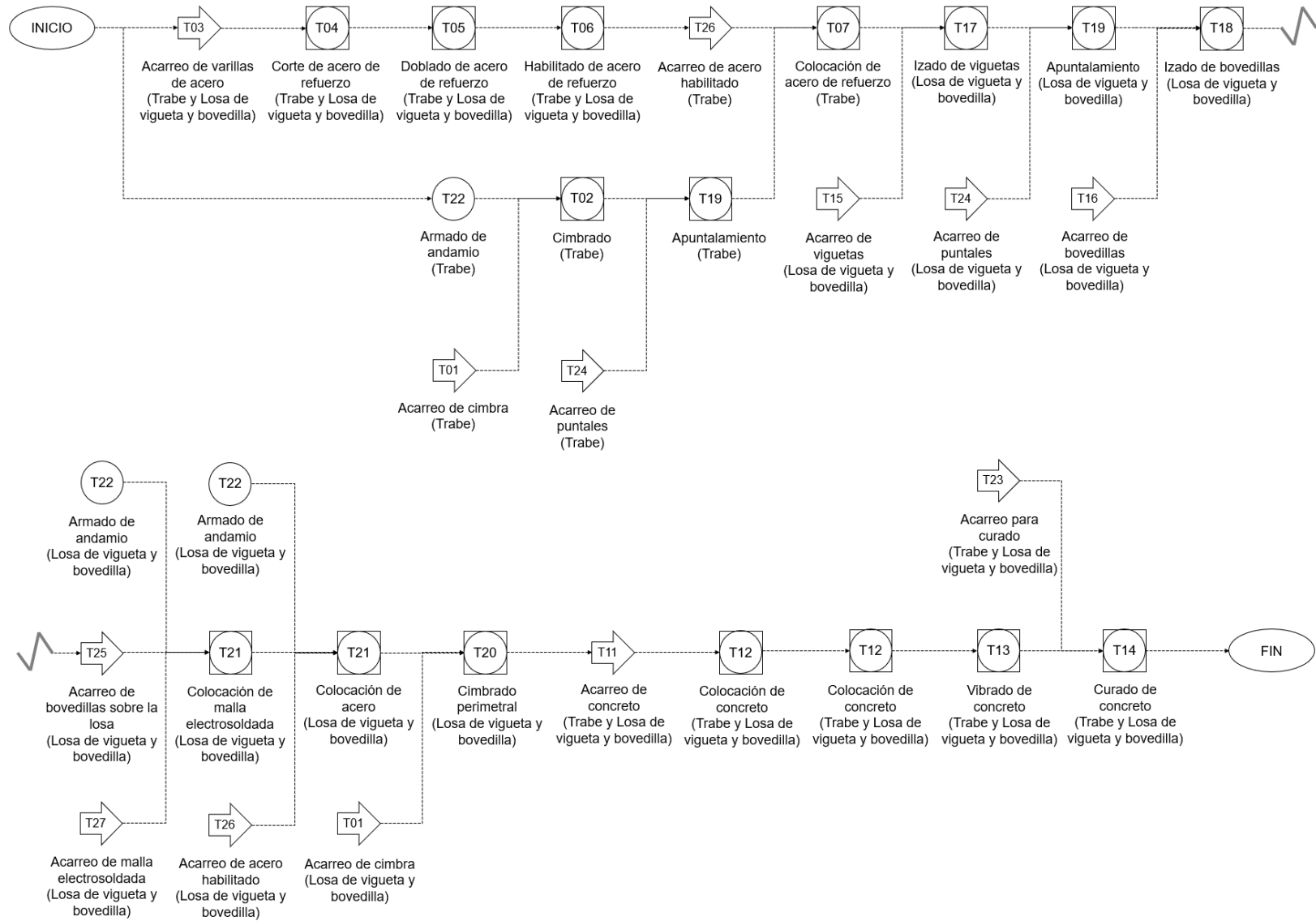


Figura 6. Diagrama del proceso con concreto premezclado colado sin bomba.

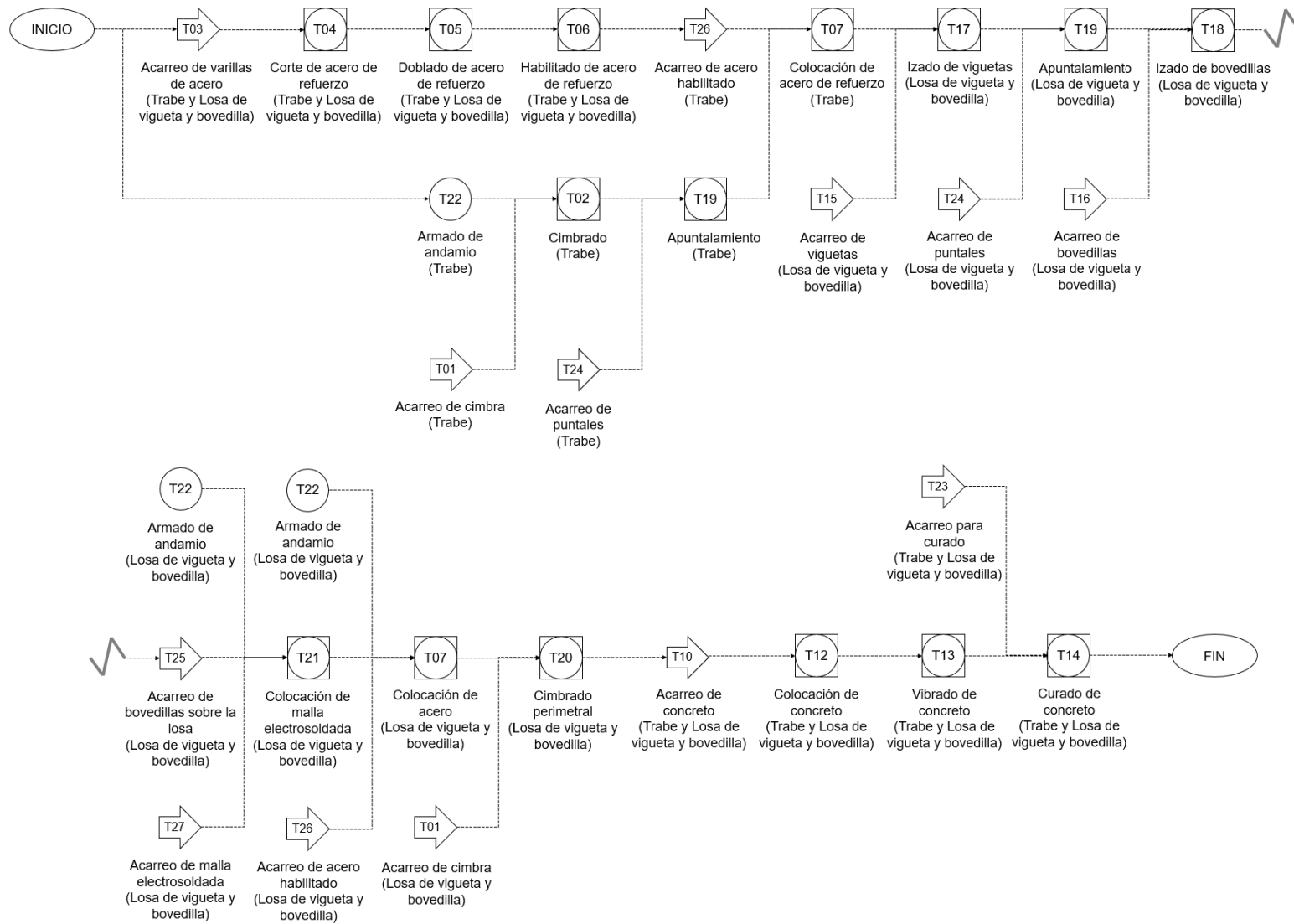





Figura 7. Diagrama del proceso con concreto premezclado colado con bomba.

3.2.2.4. Representación del modelo en Symphony




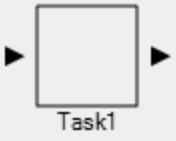

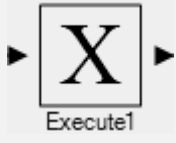
Se realizó la construcción de los modelos de simulación correspondientes a cada uno de los seis procesos de trabajo propuestos para la ejecución de la partida de techo. Estos modelos fueron elaborados con el programa de simulación Symphony (Abourizk et al., 2016).¹²² En la Tabla 3 se describe los elementos que proporciona esta plataforma para realizar diferentes funciones y que fueron utilizados en los modelos.

Tabla 3. Elementos para la construcción de un modelo de simulación.

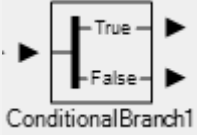
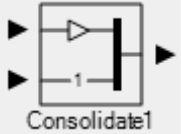
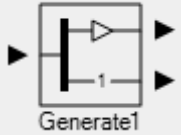

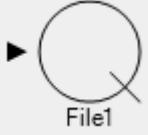
| Elementos para la construcción de un modelo de simulación | | | |
|---|---|---|--|
| Nombre del elemento | Símbolo | Descripción | Parámetros de entrada utilizados |
| Release |  | El elemento libera una cantidad especificada de recursos. | Resource: Elemento <i>Resource</i> que se libera. Servers: Número de unidades del recurso que se liberan. |
| Resource |  | Permite representar recursos. Se debe declarar junto con un elemento <i>File</i> , el cual contiene una cola que almacena entidades esperando por un recurso. | Servers: Número de recursos disponibles al inicio de la simulación. |
| Activator |  | Elemento que controla el estado del elemento <i>Valve</i> . | Action: Determina si se abre o cierra el elemento <i>Valve</i> asociado. Valve: Asocia un elemento <i>Valve</i> con el activador. |

¹²²Abourizk, S., Hague, S., y Ekyalimpa, R. (2016). *Construction Simulation: An Introduction Using SIMPHONY*.


Continuación Tabla 3.

| Elementos para la construcción de un modelo de simulación | | | |
|---|---|---|--|
| Nombre del elemento | Símbolo | Descripción | Parámetros de entrada utilizados |
| Counter |  | Su función es contar las entidades que lo atraviesan. | Limit: La cantidad de entidades para terminar la simulación. |
| Create |  | Genera una cantidad especificada de entidades y las envía en la dirección especificada en un intervalo de tiempo determinado. | Quantity: Número total de entidades que creará el elemento. |
| Destroy |  | Destruye una entidad que llega al elemento. | No tiene parámetros de entrada. |
| Task |  | Se utiliza para representar en el modelo una tarea que retrasa a las entidades que la atraviesan un tiempo determinado. | Duration: Tiempo que las entidades que lleguen al elemento serán retrasadas antes de continuar por el modelo. |
| Batch |  | Produce una entidad cada vez que una cantidad determinada de entidades llegan al elemento. | Quantity: Número de entidades que es necesario acumular antes de producir la entidad de salida. |
| Execute |  | Se usa para ejecutar una fórmula cuando una entidad pasa a través del elemento. | Expression: Fórmula a ejecutar. |

Continuación Tabla 3.

| Elementos para la construcción de un modelo de simulación | | | |
|---|---|---|--|
| Nombre del elemento | Símbolo | Descripción | Parámetros de entrada utilizados |
| Conditional Branch |  | Permite a una entidad tomar uno de dos caminos diferentes si se cumple o no determinada condición. | Condition: Puede ser True, False, o una fórmula que, al evaluarse, devuelve un valor True o False. |
| Consolidate |  | Consolida una cantidad especificada de entidades que llegan a la rama inferior con cada entidad recibida en la rama superior. | Quantity: Número de entidades que serán consolidadas para cada entidad de la rama superior. |
| Generate |  | Produce la cantidad de entidades clonadas especificada por cada entidad que llega al elemento. | Quantity: Número de entidades clonadas que se generarán por cada entidad recibida. |
| Capture |  | Cuando una entidad llega al elemento, éste la agrega al elemento <i>File</i> definido en sus parámetros. | File: Selecciona la cola de espera para enviar a las entidades cuando los recursos no estén disponibles. Resource: Recurso que se captura. Servers: Número de unidades del recurso que se capturan. |
| File |  | Define una cola de espera para las entidades. | No se utilizaron sus parámetros de entrada. |

Continuación Tabla 3.

| Elementos para la construcción de un modelo de simulación | | | |
|---|---|--|--|
| Nombre del elemento | Símbolo | Descripción | Parámetros de entrada utilizados |
| Valve |  <p>Valve1</p> | Este elemento puede detener o permitir el flujo de las entidades dependiendo de su estado. | <p>AutoClose: Número de entidades que la válvula permite atravesar antes de cerrarse.</p> <p>InitialState: Determina el estado inicial de la válvula</p> |

Fuente: Abourizk et al., 2016¹²³

3.2.2.5. Selección del caso de estudio

Para realizar el análisis de escenarios se utilizó un caso de estudio, el cual consiste en un proyecto de vivienda con las siguientes características: construcción de una losa de azotea de una vivienda residencial conformada por sala comedor, cocina, un baño y dos recámaras, correspondiendo a un área total de 76.00 m². En este caso, el tiempo total de ejecución de todos los trabajos fue 1,200.00 minutos. Este mismo caso también sirvió para realizar la validación del modelo de simulación.

Para cada equipo se registró el número de trabajadores involucrados en la tarea correspondiente (Ver Tabla 4), y el volumen de trabajo ejecutado con la misma (Ver Tabla 5). Estos datos fueron tomados en campo, y de la misma forma se observó la ejecución real del proyecto para realizar más adelante la validación del modelo de simulación.

¹²³Abourizk, S., Hague, S., y Ekyalimpa, R. (2016). *Construction Simulation: An Introduction Using SIMPHONY*.

Tabla 4. Número de trabajadores involucrados en las tareas del caso de estudio.

| Número de trabajadores involucrados en cada tarea | | | | | |
|--|------------------------------------|---------------------------------------|----------------|----------------------|------------------------------------|
| No. de Tarea | Tarea | Equipo | Unidad | Trabe | Losa de vigueta y bovedilla |
| 1 | Acarreo de cimbra | A mano | pieza | 1 peón | 1 peón |
| 2 | Cimbrado | Martillo | pieza | 1 oficial | No aplica |
| 3 | Acarreo de varillas de acero | Martillo | pieza | 1 peón | |
| 4 | Corte de acero de refuerzo | Segueta | corte | 1 oficial | |
| 5 | Doblado de acero de refuerzo | Dobladora | pieza | 1 oficial | |
| 6 | Habilitado de acero de refuerzo | Dobladora | dobles | 1 oficial | |
| 7 | Colocación de acero de refuerzo | A mano | m | 1 oficial | 1 oficial |
| 12 | Colocación de concreto | Concreto premezclado colado con bomba | cubeta | 1 oficial + 2 peones | |
| 13 | Vibrado de concreto | Vibrador de inmersión | cubeta | 1 oficial + 1 peón | |
| 14 | Curado de concreto | Cubeta | m ² | 1 peón | 1 peón |
| 15 | Acarreo de viguetas | A mano | pieza | No aplica | 2 peones |
| 16 | Acarreo de bovedillas | A mano | pieza | No aplica | 1 peón |
| 17 | Izado de viguetas | Escalera y sogá | pieza | No aplica | 1 oficial + 1 peón |
| 18 | Izado de bovedillas | Escalera | pieza | No aplica | 2 oficiales |
| 19 | Apuntalamiento | Polín de madera | pieza | 1 peón | 1 peón |
| 20 | Cimbrado perimetral | Martillo | pieza | No aplica | 1 oficial |
| 21 | Colocación de malla electrosoldada | Martillo | m ² | No aplica | 1 oficial |

Continuación Tabla 4.

| Número de trabajadores involucrados en cada tarea | | | | | |
|--|-------------------------------------|--------------------------|---------------|--------------|------------------------------------|
| No. de Tarea | Tarea | Equipo | Unidad | Trabe | Losa de vigueta y bovedilla |
| 22 | Armado de andamio | Andamio tubular estándar | pieza | 1 peón | 1 peón |
| 23 | Acarreo para curado | Cubeta | cubeta | 1 peón | 1 peón |
| 24 | Acarreo de puntales | A mano | pieza | 1 peón | 1 peón |
| 25 | Acarreo de bovedillas sobre la losa | A mano | pieza | No aplica | 1 oficial |
| 26 | Acarreo de acero habilitado | A mano | pieza | 1 peón | 1 peón |
| 27 | Acarreo de malla electrosoldada | A mano | pieza | No aplica | 1 peón |

Tabla 5. Volumen de trabajo ejecutado en el caso de estudio.

| Volumen de trabajo en cada tarea | | | | | |
|---|---------------------------------|---------------|---------------|--------------|------------------------------------|
| No. de Tarea | Tarea | Equipo | Unidad | Trabe | Losa de vigueta y bovedilla |
| 1 | Acarreo de cimbra | A mano | pieza | 4 piezas | 19 piezas |
| 2 | Cimbrado | Martillo | pieza | 4 piezas | No aplica |
| 3 | Acarreo de varillas de acero | Martillo | pieza | 7 piezas | |
| 4 | Corte de acero de refuerzo | Segueta | corte | 62 cortes | |
| 5 | Doblado de acero de refuerzo | Dobladora | pieza | 62 piezas | |
| 6 | Habilitado de acero de refuerzo | Dobladora | dobles | 170 dobleces | |
| 7 | Colocación de acero de refuerzo | A mano | m | 6.40 m | 44.29 m |

Continuación Tabla 5.

| Volumen de trabajo en cada tarea | | | | | |
|----------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|----------------|---------------------|-----------------------------|
| No. de Tarea | Tarea | Equipo | Unidad | Trabe | Losa de vigueta y bovedilla |
| 12 | Colocación de concreto | Concreto premezclado colado con bomba | cubeta | 260 cubetas | |
| 13 | Vibrado de concreto | Vibrador de inmersión | cubeta | 260 cubetas | |
| 14 | Curado de concreto | Manguera | m ² | 1.10 m ² | 76.00 m ² |
| 15 | Acarreo de viguetas | A mano | pieza | No aplica | 31 piezas |
| 16 | Acarreo de bovedillas | A mano | pieza | No aplica | 438 piezas |
| 17 | Izado de viguetas | Escalera y sogá | pieza | No aplica | 31 piezas |
| 18 | Izado de bovedillas | Escalera | pieza | No aplica | 438 piezas |
| 19 | Apuntalamiento | Polín de madera | pieza | 4 piezas | 60 piezas |
| 20 | Cimbrado perimetral | Martillo | pieza | No aplica | 19 piezas |
| 21 | Colocación de malla electrosoldada | Martillo | m ² | No aplica | 76.00 m ² |
| 22 | Armado de andamio | Andamio tubular estándar | pieza | 2 piezas | 20 piezas |
| 23 | Acarreo para curado | Cubeta | cubeta | 2 cubetas | 19 cubetas |
| 24 | Acarreo de puntales | A mano | pieza | 4 piezas | 60 piezas |
| 25 | Acarreo de bovedillas sobre la losa | A mano | pieza | No aplica | 438 piezas |
| 26 | Acarreo de acero habilitado | A mano | pieza | 9 piezas | 11 piezas |
| 27 | Acarreo de malla electrosoldada | A mano | pieza | No aplica | 1 pieza |

3.2.2.6. Cálculo de las duraciones de las tareas

La productividad calculada durante la recolección de datos en campo sirvió para calcular los tiempos de ejecución de las tareas del caso de estudio. Para las tareas convencionales (que no involucran acarreo) se utilizó la fórmula paramétrica de productividad (Ver Ecuación 3).

$$D3_j = Q_j / (N_j \times P1_i) \text{ Ecuación 3.}$$

En donde $D3_j$ es la duración teórica (minutos) para las tareas convencionales (que no involucran acarreo) asignadas a la tarea del caso de estudio; Q_j es el volumen total de unidades de trabajo ejecutadas que fueron asignadas a la tarea del caso de estudio; N_j es la cantidad de mano de obra (trabajadores) asignados a la tarea del caso de estudio; y $P1_i$ es la productividad de la tarea que se calculó en el apartado 3.2.2.2.

Para las tareas de acarreo se ajustó la fórmula paramétrica de la duración teórica (Ver Ecuación 4).

$$D4_j = (Q_j \times L_j \times U_j) / (N_j \times P2_i) \text{ Ecuación 4.}$$

En donde $D4_j$ es la duración teórica (minutos) para las tareas de acarreo del caso de estudio; Q_j es el volumen total de unidades acarreadas que fueron asignadas a la tarea del caso de estudio; L_j es la distancia (metros) del punto de carga del recurso hasta su destino de descarga en el caso de estudio (metros); U_j son las unidades transportadas por ciclo de trabajo; N_j es la cantidad de mano de obra (trabajadores) asignados a la tarea del caso de estudio; y $P2_i$ es la productividad de la tarea de acarreo que se calculó en el apartado 3.2.2.2. En el APÉNDICE C se reportan los valores calculados para estas variables.

3.2.2.7. Obtención de las distribuciones de probabilidad

Las distribuciones de probabilidad se adquirieron mediante el software estadístico Easyfit. Éste permite identificar las distribuciones de probabilidad más adecuadas y compararlas con los conjuntos de datos de las duraciones de cada tarea con 61 diferentes distribuciones de probabilidad simultáneamente, por medio de la

prueba de Kolmogorov-Smirnov, Anderson-Darling y Chi- Cuadrada. Se consiguieron los parámetros de las distribuciones de probabilidades que más se ajustaran a los datos encontrados para las duraciones de las tareas estudiadas en los casos de validación (MathWave Technologies, 2017).¹²⁴ Para alimentar los datos del modelo de simulación, los parámetros anteriores deben alinearse a una de las 23 diferentes distribuciones de probabilidad con las que cuenta el software de simulación Symphony (Abourizk et al., 2016).¹²⁵ A continuación, se describe el procedimiento realizado para obtener la distribución de probabilidad que más se ajustó a cada una de las tareas estudiadas:

1. En la opción “Nueva tabla” del software Easyfit, se introdujo el listado de datos de las duraciones de la tarea a ser analizada (Ver Figura 8).
2. En la opción de “Ajustar distribución”, se seleccionaron los datos de las duraciones de la tarea que se deseaba analizar (Ver Figura 9).
3. En la pestaña de “Bondad de ajuste” se desplegaron las diferentes distribuciones de probabilidad con las que cuenta el software Easyfit (Ver Figura 10).
4. Se identificó cuál era la distribución teórica que mejor se ajustaba a la distribución de probabilidad; esto con base en los resultados que arroja el software sobre tres diferentes pruebas de bondad de ajuste: Kolmogorov Smirnov, Anderson Darling y Chi-cuadrado (Ver Figura 11).
5. Se identificaron los parámetros de la distribución con mejor bondad de ajuste (Ver Figura 12).

¹²⁴MathWave Technologies. (2017). *EasyFit 5.0 Licencia Comercial - Programa para ajuste de distribución*. <https://www.download3k.es/Negocios-y-Finanzas/Calculadoras-y-Convertidores/Download-EasyFit.html>

¹²⁵Abourizk, S., Hague, S., y Ekyalimpa, R. (2016). *Construction Simulation: An Introduction Using SIMPHONY*.

EasyFit (Versión de evaluación) - Sin título - [Table1]

Archivo Editar Ver Analizar Opciones Herramientas Ventana Ayuda

Árbol de proyecto

- Tablas de datos
 - [Table1]
- Resultados

| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N |
|----|-------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 16.08 | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | 10.72 | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | 16.08 | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | 23.07 | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | 34.60 | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | 25.95 | | | | | | | | | | | | | |
| 7 | 31.72 | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | 31.72 | | | | | | | | | | | | | |
| 9 | 23.07 | | | | | | | | | | | | | |
| 10 | 28.83 | | | | | | | | | | | | | |
| 11 | 43.25 | | | | | | | | | | | | | |
| 12 | 34.60 | | | | | | | | | | | | | |
| 13 | 25.95 | | | | | | | | | | | | | |
| 14 | 25.95 | | | | | | | | | | | | | |
| 15 | 34.60 | | | | | | | | | | | | | |
| 16 | 34.60 | | | | | | | | | | | | | |
| 17 | 25.95 | | | | | | | | | | | | | |
| 18 | 31.72 | | | | | | | | | | | | | |
| 19 | 28.83 | | | | | | | | | | | | | |
| 20 | 28.83 | | | | | | | | | | | | | |
| 21 | 37.48 | | | | | | | | | | | | | |
| 22 | 28.83 | | | | | | | | | | | | | |
| 23 | 43.25 | | | | | | | | | | | | | |
| 24 | 31.72 | | | | | | | | | | | | | |
| 25 | 28.83 | | | | | | | | | | | | | |
| 26 | 25.95 | | | | | | | | | | | | | |
| 27 | 31.72 | | | | | | | | | | | | | |
| 28 | 40.37 | | | | | | | | | | | | | |
| 29 | 34.60 | | | | | | | | | | | | | |
| 30 | 28.83 | | | | | | | | | | | | | |
| 31 | 40.37 | | | | | | | | | | | | | |
| 32 | 31.72 | | | | | | | | | | | | | |
| 33 | 40.37 | | | | | | | | | | | | | |

Inicia el proceso de ajuste de distribuciones. NUM

Figura 8. Ejemplo de listado de datos en el software Easyfit.

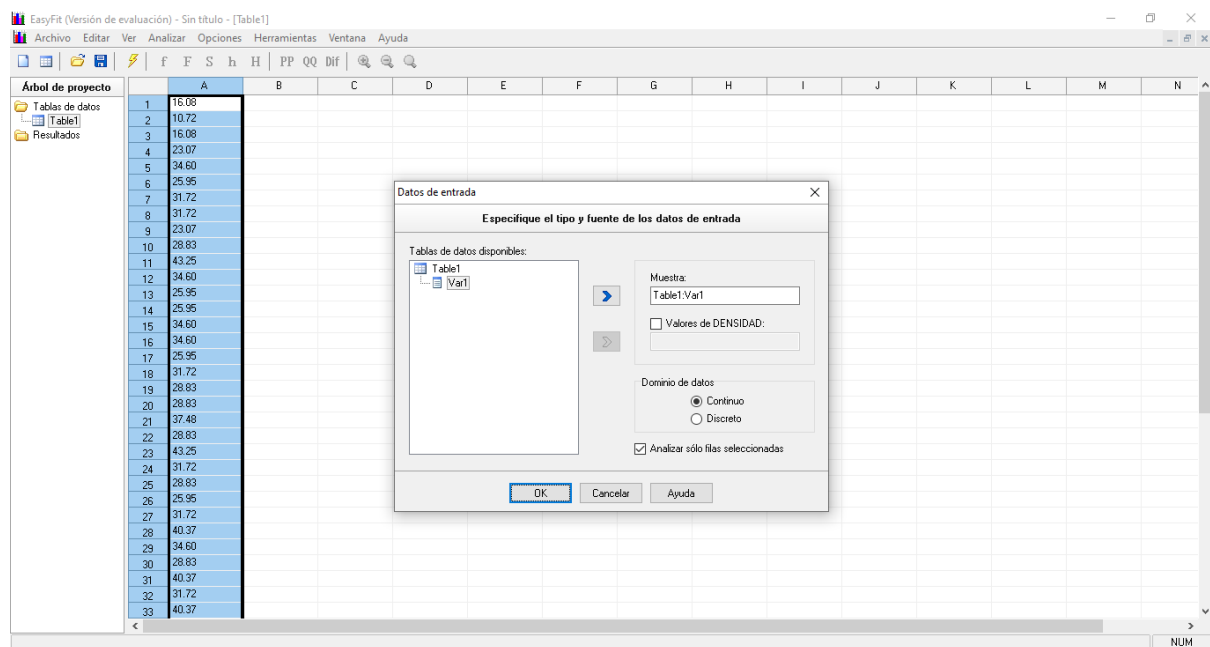


Figura 9. Ejemplo de ajuste de distribución de los datos en el software Easyfit.

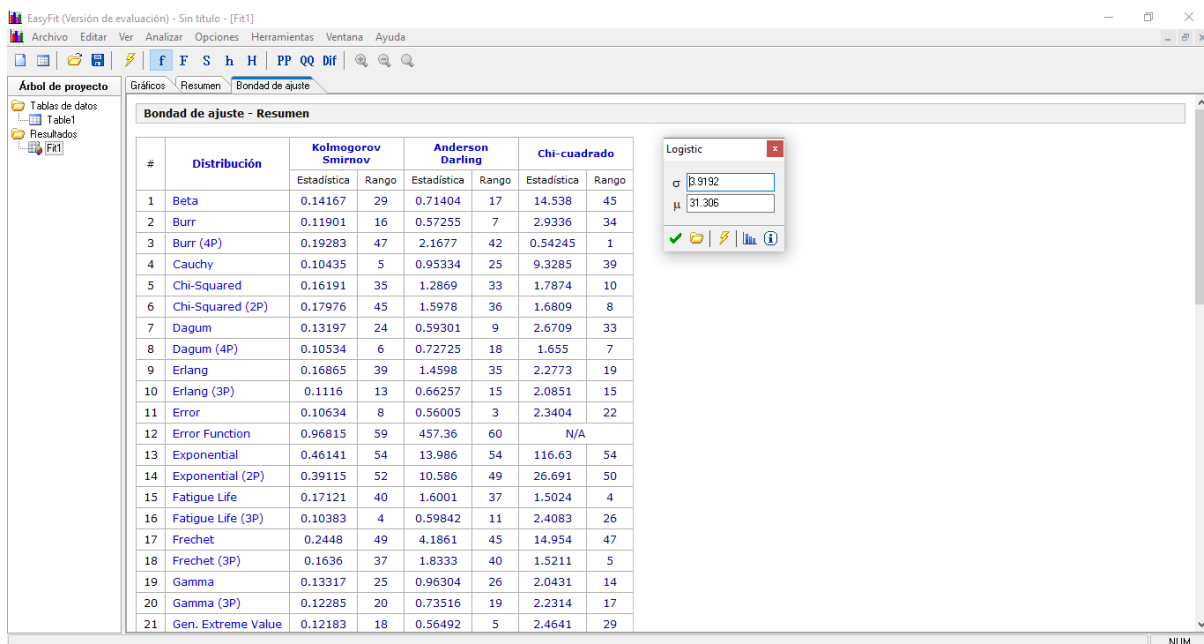


Figura 10. Ejemplo de ajuste de distribuciones de probabilidad en el software Easyfit.

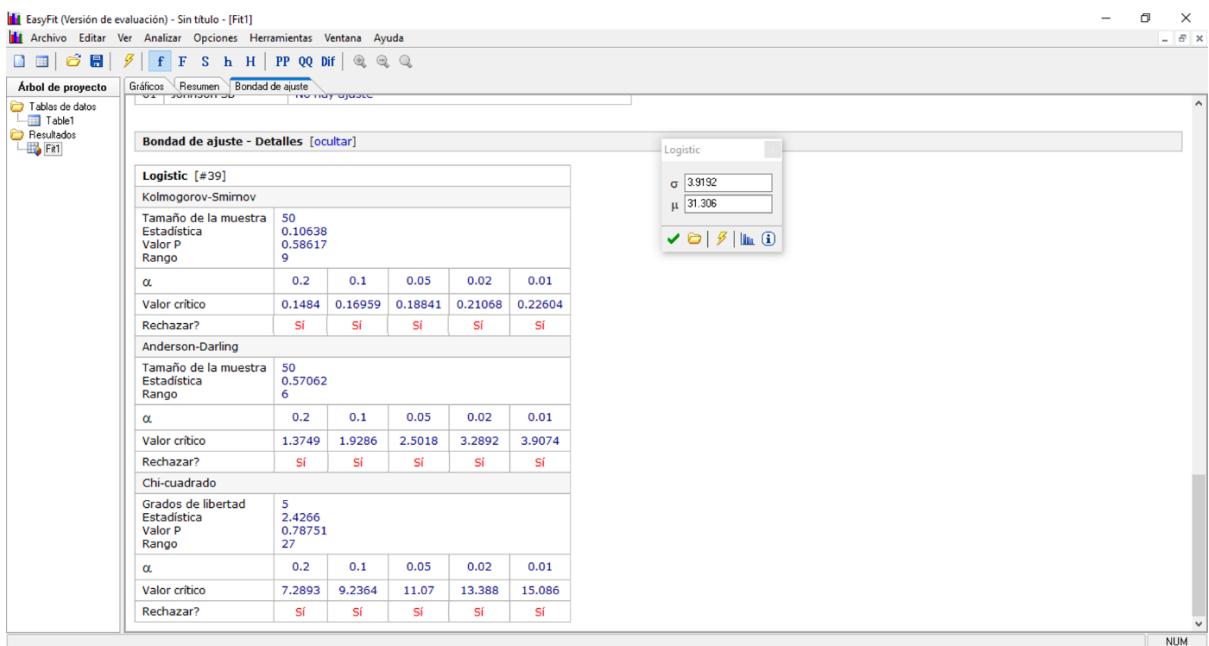


Figura 11. Ejemplo de prueba de bondad de ajuste en el software Easyfit.

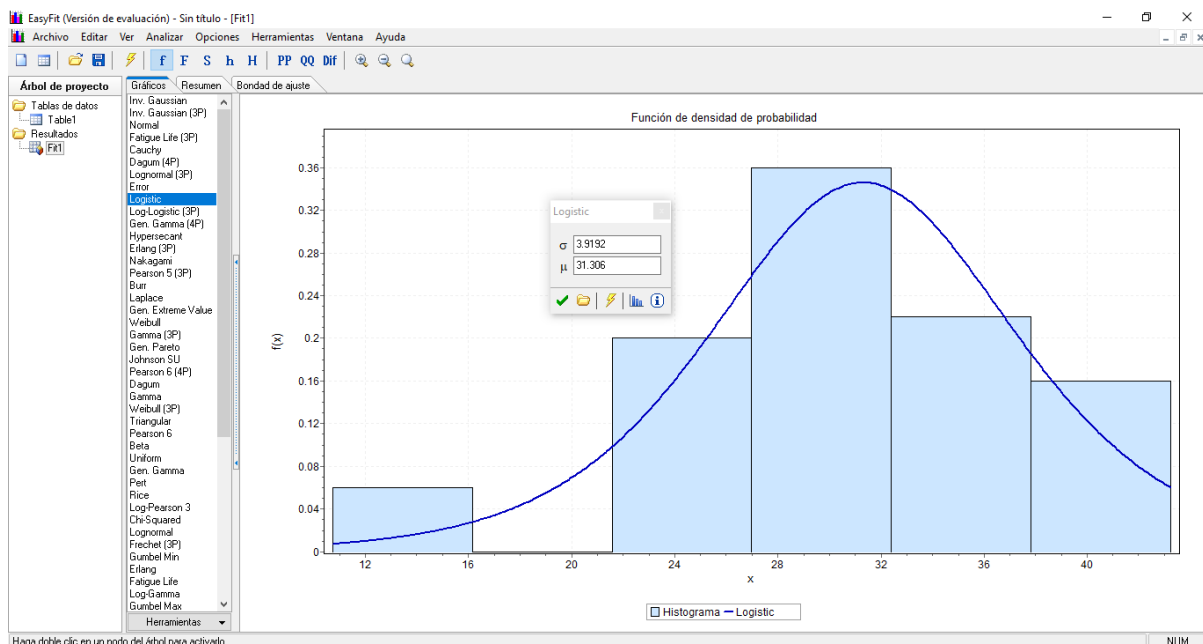


Figura 12. Ejemplo de gráfica y parámetro de las duraciones en el software Easyfit.

3.2.2.8. Validación del modelo de simulación

La validación del modelo de simulación tuvo como objetivo producir un modelo preciso y creíble con base en los parámetros del caso de estudio.

Con respecto a los modelos de simulación que se construyeron para esta investigación, sólo se pudo validar el modelo de simulación con concreto premezclado colado con bomba, dado que fue el único de todos los modelos de simulación que se adaptó al caso de estudio. Con respecto a los otros modelos, no fue posible la validación ya que era muy poco usual observar en campo el empleo de tales equipos en el proceso constructivo. Sin embargo, se asumió que esta validación fue suficiente para comprobar la efectividad de los otros modelos, ya que todos se basan en el mismo proceso constructivo. Luego, se comparó el tiempo real del caso de estudio con el tiempo estimado promedio de cien corridas del modelo de simulación. Para asegurarse de que el modelo de simulación fuera validado de acuerdo con la realidad, se determinó que la diferencia entre ambas estimaciones no superara el 20.00% del

tiempo estimado de duración real, tal y como lo proponen diversos autores como Song y Abourizk (2008)¹²⁶, Zayed y Halpin (2004)¹²⁷, Zayed y Halpin (2004)¹²⁸.

Para validar el modelo de simulación se usó el caso de estudio. Se midió en las construcciones de vivienda la duración real para cumplir con la partida de techo. De igual forma se identificaron los equipos que se utilizaron y el número de trabajadores requeridos para cada una de las tareas planificadas. Se describe brevemente el procedimiento realizado para obtener la validación del modelo de simulación:

1. Con el caso de estudio se utilizaron los parámetros correspondientes a las distribuciones de probabilidad de las duraciones de cada tarea para incorporarlo en el modelo de simulación del Symphony (Ver Figura 13).
2. Una vez incorporado los datos al modelo de simulación del Symphony, se procedió a correr el modelo de simulación. La duración estimada del proceso constructivo de la partida de techo con el modelo de simulación (Mean Value) no debía sobrepasar el 20.00% de lo observado en la duración real del caso de estudio (Ver Figura 14).

¹²⁶Song, L., & Abourizk, S. (2008). Measuring and modeling labor productivity using historical data. *Journal of Construction Engineering and Management*, 134(10), 786-794.

¹²⁷Zayed, T., y Halpin, D. (2004). Process versus data oriented techniques in pile construction productivity assessment. *Journal of Construction Engineering and Management*, 130(4), 490-499. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2004\)130:4\(490\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2004)130:4(490))

¹²⁸Zayed, T., y Halpin, D. (2004). Simulation as a Tool for Pile Productivity Assessment. *Journal of Construction Engineering and Management*, 130(June), 394-404. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2004\)130:3\(394\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2004)130:3(394))

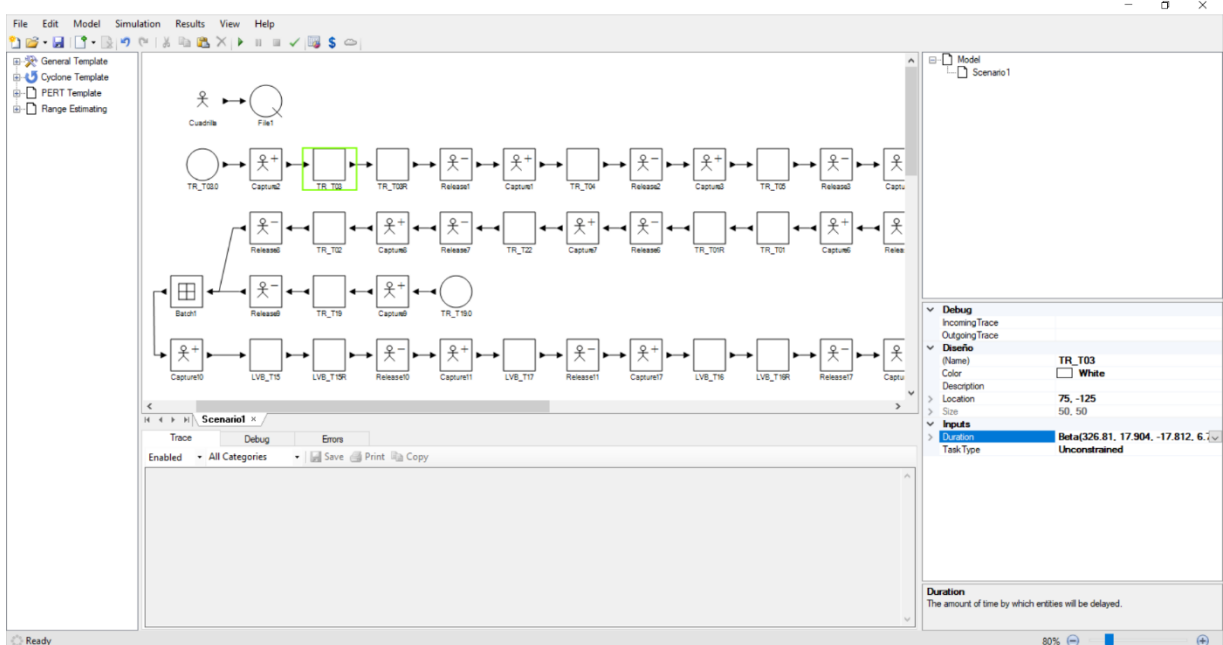


Figura 13. Ejemplo de cómo adjuntar los parámetros de la distribución de probabilidad en el modelo de simulación de software Simphony.

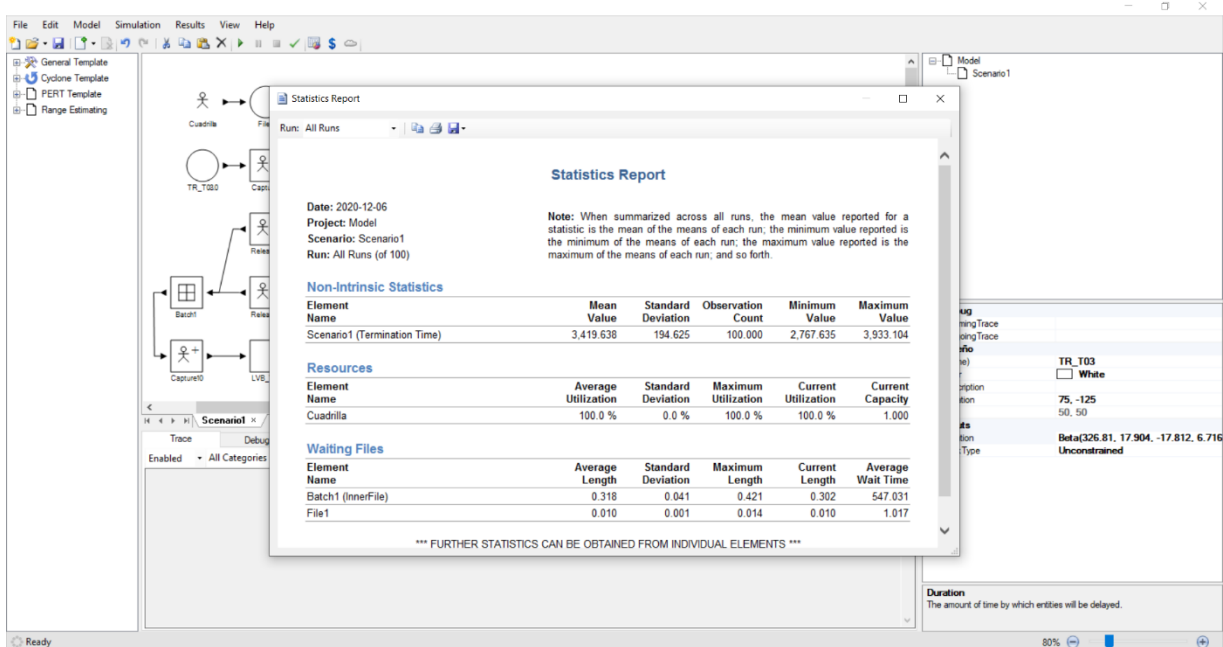


Figura 14. Ejemplo de la duración obtenida en el modelo de simulación de software Simphony.

3.2.3. Análisis de escenarios

Esta sección tiene como finalidad explicar cómo se cumplió el tercer objetivo, el cual es “Identificar qué equipos tienen mayor relevancia en la eficiencia de las actividades analizadas”. Para analizar el efecto que tienen los diferentes equipos en la eficiencia del proceso constructivo de la partida de techo, se estimó, con los modelos de simulación, el tiempo total que se empleó de recurso humano (trabajadores) en la ejecución de las actividades. Este tiempo se expresó en minutos debido a que el software utilizado reporta los resultados en dicha unidad de tiempo, por lo que la variable que sirvió para determinar este efecto se denominó minutos-hombre. En la gestión de proyectos, esta unidad de medida es comúnmente empleada para cuantificar el esfuerzo necesario para completar una actividad o tarea. Cabe aclarar que la validación del modelo de simulación se hizo con base en la duración del proceso constructivo de la partida de techo, mientras que el análisis de escenarios se basó en la cantidad de minutos-hombre. En la Figura 15 se muestra un ejemplo de los resultados en el programa de simulación, siendo el apartado de “Mean Value” el que reporta la duración de todo el proceso simulado.

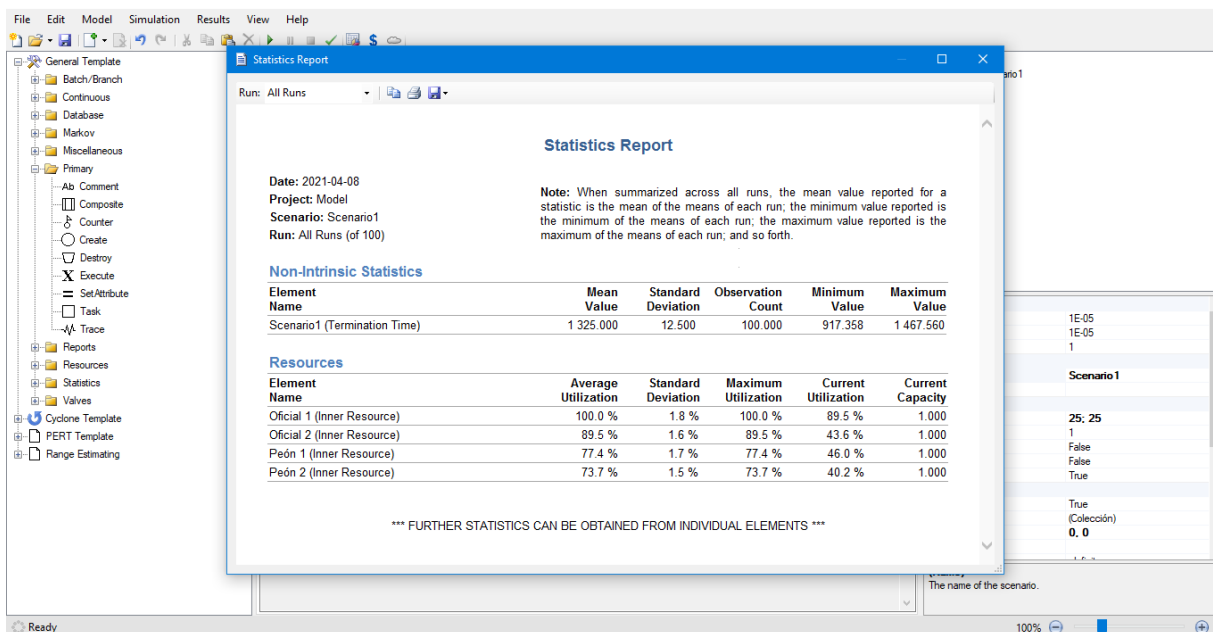


Figura 15. Ejemplo de los resultados en el programa de simulación.

Con base en la duración obtenida se estimó la cantidad total de minutos-hombre, mediante el siguiente procedimiento:

1. El promedio de utilización (“Average Utilization”) con el que resultó cada recurso se multiplicó por la duración promedio (“Mean Value”) resultante para el proceso. Por ejemplo, en la Figura 15 se observa que el Oficial 1 resultó con un promedio de 100% de utilización (Ver “Average Utilization” en la Figura 15), por lo que al multiplicarlo por la duración promedio de 1325.00 minutos (Ver “Mean Value” en la Figura 15) dio como resultado 1325.00 minutos-hombre de este recurso empleados en la ejecución del proceso.
2. Los productos de esta multiplicación se sumaron para obtener el total de minutos-hombre que se requirió de la cuadrilla asumida para ejecutar todo el proceso. Por ejemplo, de acuerdo con los resultados reportados en la Figura 15, la cantidad total de minutos-hombre que se empleó de toda la cuadrilla asumida para la ejecución del proceso fue de 4512.95 (1325.00 min [100.00% + 89.50% + 77.40% + 73.70%])

Se consideró en los diagramas de proceso que la cantidad de recurso humano (trabajadores) debía mantenerse constante. La cuadrilla estaba conformada por 4 trabajadores (2 oficiales y 2 peones), esto con el fin de tratar de mantener las mismas condiciones de los procesos. Esto no fue posible en algunos casos debido a que algunos equipos no lo permitían por las limitaciones en el número de trabajadores.

Ejemplo de lo anterior se da en el caso de los equipos para realizar la tarea de izado de viguetas, la cual requiere dos oficiales cuando se utiliza la escalera y sogas para poder realizarse, mientras que el resto de la cuadrilla (2 peones) está realizando otras tareas al mismo tiempo. Cuando se sustituye el equipo anterior por la grúa, éste requiere 4 trabajadores para poder operar, lo que provoca que no se pueda realizar otra tarea al mismo tiempo al no contar con más trabajadores. Debido a esto, es necesario cambiar la secuencia de los procesos para adecuarlo a la realidad.

El caso de estudio en esta sección se utiliza como el caso para el análisis de escenarios en los modelos de simulación o, de manera abreviada, caso de análisis. Luego, se realizó una planeación de escenarios de simulación con la finalidad de

analizar la variación con respecto a la duración de los distintos equipos en las tareas de la partida de techo. El análisis se dividió en tres etapas, las cuales se detallarán en las siguientes secciones:

3.2.3.1. Primera Etapa

En la Primera Etapa, se creó un escenario llamado Escenario 1.0 (Base), el cual surgió de la selección de los equipos que se operan de manera manual y que tienen baja eficiencia, este escenario se usó como parámetro de comparación con respecto a los otros escenarios de las etapas posteriores y se consideró en términos porcentuales como el 100.00% de la duración de la partida de techo. En la Tabla 6 se presenta un breve resumen del equipo asignado para el Escenario 1.0 (Base) en donde se describe los equipos empleados por cada una de las veintisiete tareas que conforman la partida de techo, así como la unidad establecida para su medición.

3.2.3.2. Segunda Etapa

En la Segunda Etapa, teniendo como parámetro el Escenario 1.0 (Base), se creó un escenario para cada alternativa de equipo que se hubiera utilizado en la partida de techo, quedando de la siguiente manera:

1. En el Escenario 2.1 se usó la carretilla en la realización de todas las tareas de acarreo de la actividad.
2. En el Escenario 2.2 se usó la cizalla en la realización de la tarea de corte de acero de refuerzo.
3. En el Escenario 2.3 se usó la revolvedora en la realización de la tarea de preparación de concreto.
4. En el Escenario 2.4 se usó el concreto premezclado colado sin bomba en la realización de la tarea de colocación de concreto.
5. En el Escenario 2.5 se usó el concreto premezclado colado con bomba en la realización de la tarea de colocación de concreto.
6. En el Escenario 2.6 se usó el vibrador de inmersión en la realización de la tarea de vibrado de concreto.

7. En el Escenario 2.7 se usó la manguera en la realización de la tarea de curado de concreto.
8. En el Escenario 2.8 se usó la grúa en la realización de la tarea de izado de viguetas.
9. En el Escenario 2.9 se usó el cabrestante en la realización de la tarea de izado de bovedillas.
10. En el Escenario 2.10 se usó el polín de metal en la realización de la tarea de apuntalamiento.
11. En el Escenario 2.11 se usó el andamio tubular estándar en la realización de la tarea de armado de andamio.

En la Tabla 7 incluye un breve resumen de lo descrito anteriormente, comparando el equipo asumido para el Escenario 1.0 (Base) con su respectiva alternativa en cada escenario de la Segunda Etapa.

3.2.3.3. Tercera Etapa

En la Tercera Etapa, se construyeron dos escenarios con base en los resultados obtenidos en la Segunda Etapa. El Escenario 3.1 se realizó con los equipos que impactaron con una mayor reducción en los minutos-hombre en la partida de techo. Este escenario consistió en seleccionar en el modelo de simulación los equipos que obtuvieron una mayor reducción en los minutos-hombre con respecto al Escenario 1.0 (Base). El Escenario 3.2 fue con los dos equipos que impactaron con una mayor reducción en los minutos-hombre de la partida de techo. Siendo el concreto premezclado colado con bomba y el cabrestante los dos equipos que tuvieron una mayor reducción en los minutos-hombre en la partida de techo. En la Tabla 8 se hace un breve resumen de lo descrito anteriormente para la Tercera Etapa, en donde se compara el equipo utilizado en el Escenario 1.0 (Base) y su respectiva alternativa por cada escenario planteado.

Tabla 6. Equipo asignado para el Escenario 1.0 (Base).

| Volumen de trabajo en cada tarea | | | |
|---|-------------------------------------|----------------|-----------------|
| Escenario | Tarea | Unidad | Equipo |
| Escenario 1.0 (Base) | Acarreo de cimbra | pieza | A mano |
| | Cimbrado | pieza | Martillo |
| | Acarreo de varillas de acero | pieza | Martillo |
| | Corte de acero de refuerzo | pieza | Segueta |
| | Doblado de acero de refuerzo | pieza | Dobladora |
| | Habilitado de acero de refuerzo | pieza | Dobladora |
| | Colocación de acero de refuerzo | pieza | A mano |
| | Acarreo de agregados y agua | cubeta | Cubeta |
| | Acarreo de sacos de cemento | piezas | A mano |
| | Preparación de concreto | cubeta | Pala |
| | Acarreo de concreto | cubeta | Cubeta |
| | Colocación de concreto | cubeta | Llana |
| | Vibrado de concreto | cubeta | Varilla |
| | Curado de concreto | cubeta | Cubeta |
| | Acarreo de viguetas | pieza | A mano |
| | Acarreo de bovedillas | pieza | A mano |
| | Izado de viguetas | pieza | Escalera y soga |
| | Izado de bovedillas | pieza | Escalera |
| | Apuntalamiento | pieza | Polín de madera |
| | Cimbrado perimetral | pieza | Martillo |
| | Colocación de malla electrosoldada | m ² | Martillo |
| | Armado de andamio | pieza | Tablas y blocks |
| | Acarreo para curado | pieza | Cubeta |
| | Acarreo de puntales | pieza | A mano |
| | Acarreo de bovedillas sobre la losa | pieza | A mano |
| | Acarreo de acero habilitado | pieza | A mano |
| Acarreo de malla electrosoldada | pieza | A mano | |

Tabla 7. Alternativa de equipo empleado para los escenarios de la Segunda Etapa.

| Equipos empleados en los escenarios de la Segunda Etapa | | | |
|--|-----------------------------|--|---------------------------------------|
| Escenario | Tarea | Equipo del Escenario 1.0 (Base) | Alternativa de equipo empleado |
| Escenario 2.1 | Acarreo de cimbra | A mano | Carretilla |
| | Acarreo de agregados y agua | Cubeta | Carretilla |
| | Acarreo de sacos de cemento | A mano | Carretilla |
| | Acarreo de bovedillas | A mano | Carretilla |
| Escenario 2.2 | Corte de acero de refuerzo | Segueta | Cizalla |
| Escenario 2.3 | Preparación de concreto | Pala | Revolvedora |
| Escenario 2.4 | Colocación de concreto | Llana | Concreto premezclado colado sin bomba |
| Escenario 2.5 | Colocación de concreto | Llana | Concreto premezclado colado con bomba |
| Escenario 2.6 | Vibrado de concreto | Varilla | Vibrador de inmersión |
| Escenario 2.7 | Curado de concreto | Cubeta | Manguera |
| Escenario 2.8 | Izado de viguetas | Escalera y soga | Grúa |
| Escenario 2.9 | Izado de bovedillas | Escalera | Cabrestante |
| Escenario 2.10 | Apuntalamiento | Polín de madera | Polín de metal |
| Escenario 2.11 | Armado de andamio | Tablas y blocks | Andamio tubular estándar |

Tabla 8. Alternativa de equipo empleado para los escenarios de la Tercera Etapa.

| Equipos empleados en los escenarios de la Tercera Etapa | | | |
|--|-----------------------------|--|---------------------------------------|
| Escenario | Tarea | Equipo del Escenario 1.0 (Base) | Alternativa de equipo empleado |
| Escenario 3.1 | Acarreo de cimbra | A mano | Carretilla |
| | Corte de acero de refuerzo | Segueta | Cizalla |
| | Acarreo de agregados y agua | Cubeta | Carretilla |
| | Acarreo de sacos de cemento | A mano | Carretilla |
| | Colocación de concreto | Llana | Concreto premezclado colado con bomba |
| | Vibrado de concreto | Varilla | Vibrador de inmersión |
| | Curado de concreto | Cubeta | Manguera |
| | Acarreo de bovedillas | A mano | Carretilla |
| | Izado de bovedillas | Escalera | Cabrestante |
| | Apuntalamiento | Polín de madera | Polín de metal |
| | Armado de andamio | Tablas y blocks | Andamio tubular estándar |
| Escenario 3.3 | Colocación de concreto | Llana | Concreto premezclado colado con bomba |
| | Izado de bovedillas | Escalera | Cabrestante |

4. RESULTADOS

4.1. Resultados de la identificación de equipos alternos

En la Tabla 9 se puede observar la estructura de desglose de las actividades de construcción de trabe y losa de vigueta y bovedilla, pertenecientes a la partida de techo. Las tareas marcadas con “Sí” forman parte de las tareas de trabe o losa de vigueta y bovedilla; en caso contrario, se marcaron con “No”.

En la Tabla 10 se pueden observar las distintas alternativas de equipo identificados para cada tarea de la partida de techo. Éste fue el resultado más relevante de esta sección debido a que los resultados siguientes se basan en esta tabla.

4.2. Resultados de la construcción de los modelos de simulación

En la Tabla 11 se muestra un ejemplo de los datos recolectados en campo. En el APÉNDICE B se pueden revisar con detalle los datos recolectados en campo de las de las tareas de trabe y losa de vigueta y bovedilla para el cálculo de las productividades.

Tabla 9. Desglose de las actividades de trabe y losa de vigueta y bovedilla.

| Desglose de actividades | | | | |
|--------------------------------|-------------------------------------|-----------------------|--------------|------------------------------------|
| No. de Tarea | Tarea | Unidad | Trabe | Losa de vigueta y bovedilla |
| 1 | Acarreo de cimbra | pieza | Sí | Sí |
| 2 | Cimbrado | pieza | Sí | No |
| 3 | Acarreo de varillas de acero | pieza | Sí | Sí |
| 4 | Corte de acero de refuerzo | corte | Sí | Sí |
| 5 | Doblado de acero de refuerzo | pieza | Sí | Sí |
| 6 | Habilitado de acero de refuerzo | dobles | Sí | Sí |
| 7 | Colocación de acero de refuerzo | m | Sí | Sí |
| 8 | Acarreo de agregados y agua | cubeta | Sí | Sí |
| 9 | Acarreo de sacos de cemento | pieza | Sí | Sí |
| 10 | Preparación de concreto | cubeta | Sí | Sí |
| 11 | Acarreo de concreto | cubeta | Sí | Sí |
| 12 | Colocación de concreto | cubeta | Sí | Sí |
| 13 | Vibrado de concreto | cubeta | Sí | Sí |
| 14 | Curado de concreto | cubeta | Sí | Sí |
| 15 | Acarreo de viguetas | pieza | No | Sí |
| 16 | Acarreo de bovedillas | pieza | No | Sí |
| 17 | Izado de viguetas | pieza | No | Sí |
| 18 | Izado de bovedillas | pieza | No | Sí |
| 19 | Apuntalamiento | pieza | Sí | Sí |
| 20 | Cimbrado perimetral | pieza | No | Sí |
| 21 | Colocación de malla electrosoldada | m ² | No | Sí |
| 22 | Armado de andamio | pieza | Sí | Sí |
| 23 | Acarreo para curado | cubeta/m ² | Sí | Sí |
| 24 | Acarreo de puntales | pieza | Sí | Sí |
| 25 | Acarreo de bovedillas sobre la losa | pieza | No | Sí |
| 26 | Acarreo de acero habilitado | pieza | Sí | Sí |
| 27 | Acarreo de malla electrosoldada | pieza | No | Sí |

Tabla 10. Desglose de las alternativas de equipo de construcción de trabe y losa de vigueta y bovedilla.

| Alternativas de equipos | | | |
|--------------------------------|---------------------------------|--|--|
| No. de Tarea | Tarea | Trabe | Losa de vigueta y bovedilla |
| 1 | Acarreo de cimbra | Opción 1: A mano Opción 2: Carretilla | Opción 1: A mano Opción 2: Carretilla |
| 2 | Cimbrado | Opción 1: Martillo | No aplica |
| 3 | Acarreo de varillas de acero | Opción 1: A mano | Opción 1: A mano |
| 4 | Corte de acero de refuerzo | Opción 1: Segueta Opción 2: Cizalla | Opción 1: Segueta Opción 2: Cizalla |
| 5 | Doblado de acero de refuerzo | Opción 1: Dobladora | Opción 1: Dobladora |
| 6 | Habilitado de acero de refuerzo | Opción 1: Dobladora | Opción 1: Dobladora |
| 7 | Colocación de acero de refuerzo | Opción 1: A mano | Opción 1: A mano |
| 8 | Acarreo de agregados y agua | Opción 1: Carretilla Opción 2: Cubeta | Opción 1: Carretilla Opción 2: Cubeta |
| 9 | Acarreo de sacos de cemento | Opción 1: A mano Opción 2: Carretilla | Opción 1: A mano Opción 2: Carretilla |
| 10 | Preparación de concreto | Opción 1: Revolvedora Opción 2: Pala | Opción 1: Revolvedora Opción 2: Pala |
| 11 | Acarreo de concreto | Opción 1: Cubeta | Opción 1: Cubeta |
| 12 | Colocación de concreto | Opción 1: Llana Opción 2: Concreto premezclado colado sin bomba Opción 3: Concreto premezclado colado con bomba | Opción 1: Llana Opción 2: Concreto premezclado colado sin bomba Opción 3: Concreto premezclado colado con bomba |
| 13 | Vibrado de concreto | Opción 1: Varilla Opción 2: Vibrador de inmersión | Opción 1: Varilla Opción 2: Vibrador de inmersión |
| 14 | Curado de concreto | Opción 1: Cubeta Opción 2: Manguera | Opción 1: Cubeta Opción 2: Manguera |

Continuación Tabla 10.

| Alternativas de equipos | | | |
|--------------------------------|-------------------------------------|---|---|
| No. de Tarea | Tarea | Trabe | Losa de vigueta y bovedilla |
| 15 | Acarreo de viguetas | No aplica | Opción 1: A mano |
| 16 | Acarreo de bovedillas | No aplica | Opción 1: A mano Opción 2: Carretilla |
| 17 | Izado de viguetas | No aplica | Opción 1: Escalera y sogas Opción 2: Grúa |
| 18 | Izado de bovedillas | No aplica | Opción 1: Escalera Opción 2: Cabrestante |
| 19 | Apuntalamiento | Opción 1: Polín de madera Opción 2: Polín de metal | Opción 1: Polín de madera Opción 2: Polín de metal |
| 20 | Cimbrado perimetral | No aplica | Opción 1: Martillo |
| 21 | Colocación de malla electrosoldada | No aplica | Opción 1: Martillo |
| 22 | Armado de andamio | Opción 1: Andamio tubular estándar Opción 2: Tablas y blocks | Opción 1: Andamio tubular estándar Opción 2: Tablas y blocks |
| 23 | Acarreo para curado | Opción 1: Cubeta | Opción 1: Cubeta |
| 24 | Acarreo de puntales | Opción 1: A mano | Opción 1: A mano |
| 25 | Acarreo de bovedillas sobre la losa | No aplica | Opción 1: A mano |
| 26 | Acarreo de acero habilitado | Opción 1: A mano | Opción 1: A mano |
| 27 | Acarreo de malla electrosoldada | No aplica | Opción 1: A mano |

Tabla 11. Datos recolectados en campo de la tarea de corte de acero de refuerzo con segueta.

| 1. Corte de acero de refuerzo | | | |
|--------------------------------------|---------------------------------|---|---|
| Concepto de trabajo: | | Trabe | |
| Equipo: | | Segueta | |
| Cantidad de mediciones: | | 30 mediciones | |
| Cantidad (Q_i): | Recurso (N_i): | Duración en minutos (D_{1i}): | Productividad (P_{1i}): |
| 1 corte | 1 oficial | 0.53, 0.55, 0.25, 0.55, 0.67, 0.72, 0.68, 0.70, 0.63, 0.62, 0.52, 0.58, 0.57, 0.53, 0.52, 0.57, 0.57, 0.55, 0.65, 0.57, 0.58, 0.60, 0.62, 0.52, 0.58, 0.57, 0.53, 0.53, 0.55, 0.67. | 1.88, 1.82, 1.82, 1.82, 1.50, 1.40, 1.46, 1.43, 1.58, 1.62, 1.94, 1.71, 1.76, 1.88, 1.94, 1.76, 1.76, 1.82, 1.54, 1.76, 1.71, 1.67, 1.62, 1.94, 1.71, 1.76, 1.88, 1.88, 1.82, 1.50. |

Se calculó la productividad de cada tarea para el caso de estudio y, consecuentemente, para el de análisis, aplicando los procedimientos explicados en el apartado 3.2.2.2. Con base en los diagramas de procesos, se elaboraron siete modelos de simulación:

1. El modelo de simulación del proceso manual (Ver Figura F1 en el APÉNDICE F) se realizó con base en el diagrama de proceso manual, descrito anteriormente en el apartado 3.2.2.4. Éste fue la base para la construcción de los otros seis modelos de simulación, pues integra las veintisiete tareas identificadas en la partida de techo, e incluye todas las tareas relacionadas con la preparación y acarreo del concreto
2. El modelo de simulación del proceso manual + vibrador de inmersión (Ver Figura F2 en el APÉNDICE F) es en esencia el mismo que el modelo de simulación del proceso manual, ambos basados en el diagrama de proceso manual descrito anteriormente en el apartado 3.2.2.4. La diferencia radica en que al primer modelo de simulación se le añadió un peón dentro del proceso de vibrado de concreto, puesto que era necesario que la cuadrilla

estuviera compuesta por dos personas (1 oficial y 1 peón) para manejar el vibrador de inmersión.

3. El modelo de simulación del proceso manual + grúa (Ver Figura F3 en el APÉNDICE F) se realizó con base en el diagrama de proceso manual + grúa, descrito anteriormente en el apartado 3.2.2.3. Este modelo de simulación en estructura es igual al anterior, pero difiere en que el equipo para izar las viguetas (grúa) integra dentro de su proceso el acarreo e izado de viguetas, por lo que no se consideró la tarea de acarreo de viguetas en este modelo de simulación.
4. El modelo de simulación del proceso manual + manguera (Ver Figura F4 en el APÉNDICE F) se realizó con base en al diagrama de proceso manual + manguera, descrito anteriormente en el apartado 3.2.2.3. Este modelo de simulación en estructura es igual al modelo de simulación del proceso manual, pero difiere de éste en que el equipo para curar el concreto (manguera) integra dentro su proceso el acarreo y el curado de concreto, por lo que no se consideró la tarea de acarreo de agua para realizar el curado (acarreo para curado) en este modelo de simulación.
5. El modelo de simulación del proceso con concreto premezclado colado sin bomba (Ver Figura F5 en el APÉNDICE F) se realizó con base en el diagrama de proceso con concreto premezclado colado sin bomba, descrito anteriormente en el apartado 3.2.2.3. Esta variación del modelo de simulación implica el suministro del concreto premezclado con camión revolvedora, en el cual se asumió que el concreto era vaciado en el sitio para que los trabajadores lo acarrearan manualmente (con el uso de cubetas) para el colado de la estructura. En este modelo de simulación no se incluyeron las tareas relativas a la preparación manual del concreto, debido a que se considera que estas tareas se realizaron de forma externa e independiente del sitio del trabajo, es decir, cuando el concreto llega a la obra, ya se han dado por finalizadas las tareas de preparación de concreto, sin tomar en cuenta su tiempo de ejecución externo. No obstante, sí se

consideró la ejecución de las tareas acarreo y colocación de concreto de manera manual.

6. El modelo de simulación del proceso con concreto premezclado colado con bomba (Ver Figura F6 en el APÉNDICE F) se realizó con base en el diagrama de proceso con concreto premezclado colado con bomba, descrito anteriormente en el apartado 3.2.2.3. Esta variación del modelo de simulación implica el suministro del concreto premezclado con el empleo de camión revolvedora y su bombeo para el colado de las estructuras. Por lo tanto, en este modelo de simulación no se incluyeron todas las tareas relacionadas con la preparación y el acarreo del concreto. Esto se debe a que, una vez que llega este equipo, estas tareas se suponen realizadas de forma externa e independiente del sitio del trabajo sin tomar en cuenta su tiempo de ejecución externo.
7. Por último, el modelo de simulación del proceso con concreto premezclado colado con bomba + manguera + vibrador de inmersión (Ver Figura F7 en el APÉNDICE F), se realizó con base en la combinación de los diagramas de proceso con concreto premezclado colado con bomba y el proceso manual + manguera, descritos anteriormente en el apartado 3.2.2.3. Esta variación del modelo de simulación implica el suministro del concreto premezclado con el empleo de camión revolvedora y su bombeo para el colado de las estructuras. Por lo tanto, en este modelo de simulación no se incluyeron todas las tareas relacionadas con la preparación y el acarreo del concreto; de la misma manera, el equipo para curar el concreto (manguera) integra dentro su proceso el acarreo y el curado de concreto, por lo que no se consideró la tarea de acarreo de agua para realizar el curado (acarreo para curado) en este modelo de simulación. Por último, al tener al vibrador de inmersión como parte del análisis, se incluyó en su modelado al peón faltante para que el equipo pudiera funcionar, no afectando en el resultado final.

En las Tablas 13, 14 y 15 se muestra la relación de los modelos de simulación descritos anteriormente y el escenario al que se puede aplicar:

Tabla 12. Relación de modelos de simulación utilizados en la Primera Etapa.

| Relación de modelos de simulación utilizados en la Primera Etapa | | | | |
|---|----------------------|---|------------------------------------|-----------------|
| Etapa | Escenario | Modelo de simulación utilizado | Tarea | Equipo |
| Primera Etapa | Escenario 1.0 (Base) | Modelo de simulación del proceso manual | Acarreo de cimbra | A mano |
| | | | Cimbrado | Martillo |
| | | | Acarreo de varillas de acero | Martillo |
| | | | Corte de acero de refuerzo | Segueta |
| | | | Doblado de acero de refuerzo | Dobladora |
| | | | Habilitado de acero de refuerzo | Dobladora |
| | | | Colocación de acero de refuerzo | A mano |
| | | | Acarreo de agregados y agua | Cubeta |
| | | | Acarreo de sacos de cemento | A mano |
| | | | Preparación de concreto | Pala |
| | | | Acarreo de concreto | Cubeta |
| | | | Colocación de concreto | Llana |
| | | | Vibrado de concreto | Varilla |
| | | | Curado de concreto | Cubeta |
| | | | Acarreo de viguetas | A mano |
| | | | Acarreo de bovedillas | A mano |
| | | | Izado de viguetas | Escalera y soga |
| | | | Izado de bovedillas | Escalera |
| | | | Apuntalamiento | Polín de madera |
| | | | Cimbrado perimetral | Martillo |
| | | | Colocación de malla electrosoldada | Martillo |
| | | | Armado de andamio | Tablas y blocks |
| | | | Acarreo para curado | Cubeta |
| | | | Acarreo de puntales | A mano |
| Acarreo de bovedillas sobre la losa | A mano | | | |
| Acarreo de acero habilitado | A mano | | | |
| Acarreo de malla electrosoldada | A mano | | | |

Tabla 13. Relación de modelos de simulación utilizados en la Segunda Etapa.

| Relación de modelos de simulación utilizados en la Segunda Etapa | | | | |
|---|---|--|--|---------------------------------------|
| Etapa | Escenario | Modelo de simulación utilizado | Equipo del Escenario 1.0 (Base) | Alternativa de equipo empleado |
| Segunda Etapa | Escenario 2.1 | Modelo de simulación del proceso manual | Cubeta | Carretilla |
| | | | A mano | |
| | Escenario 2.2 | Modelo de simulación del proceso manual | Segueta | Cizalla |
| | Escenario 2.3 | Modelo de simulación del proceso manual | Pala | Revolvedora |
| | Escenario 2.4 | Modelo de simulación del proceso con concreto premezclado colado sin bomba | Llana | Concreto premezclado colado sin bomba |
| | Escenario 2.5 | Modelo de simulación del proceso con concreto premezclado colado con bomba | Llana | Concreto premezclado colado con bomba |
| | Escenario 2.6 | Modelo de simulación del proceso manual + vibrador | Varilla | Vibrador de inmersión |
| | Escenario 2.7 | Modelo de simulación del proceso manual + manguera | Cubeta | Manguera |
| | Escenario 2.8 | Modelo de simulación del proceso manual + grúa | Escalera y sogá | Grúa |
| | Escenario 2.9 | Modelo de simulación del proceso manual | Escalera | Cabrestante |
| | Escenario 2.10 | Modelo de simulación del proceso manual | Polín de madera | Polín de madera |
| Escenario 2.11 | Modelo de simulación del proceso manual | Tablas y blocks | Andamio tubular estándar | |

Tabla 14. Relación de modelos de simulación utilizados en la Tercera Etapa.

| Escenarios analizados con el modelo de simulación del proceso manual + vibrador | | | | |
|--|------------------|---|--|---------------------------------------|
| Etapa | Escenario | Modelo de simulación utilizado | Equipo del Escenario 1.0 (Base) | Alternativa de equipo empleado |
| Tercera Etapa | Escenario 3.1 | Modelo de simulación del proceso con concreto premezclado colado con bomba + manguera + vibrador de inmersión | Cubeta | Carretilla |
| | | | A mano | |
| | | | Segueta | Cizalla |
| | | | Llana | Concreto premezclado colado con bomba |
| | | | Varilla | Vibrador de inmersión |
| | | | Cubeta | Manguera |
| | | | Escalera | Cabrestante |
| | | | Polín de madera | Polín de metal |
| | | | Tablas y blocks | Andamio tubular estándar |
| | Escenario 3.2 | Modelo de simulación del proceso con concreto premezclado colado con bomba | Llana | Concreto premezclado colado con bomba |
| | | | Escalera | Cabrestante |

En la Tabla 15 se muestra un ejemplo de los parámetros de entrada que se utilizaron para los siete modelos de simulación. Los elementos Task (Tareas) de los modelos fueron alimentados con los parámetros correspondientes a las distribuciones de probabilidad que mejor se ajustaron a las duraciones de las tareas estudiadas. En el APÉNDICE E se puede revisar a detalle los parámetros de entrada de los siete modelos de simulación.

Se validaron los modelos de simulación por medio del caso de estudio, para eso se calcularon las duraciones de cada caso. En el APÉNDICE C se muestran las tablas con las duraciones calculadas para todas las tareas, teniendo como ejemplo la Tabla 16.

Tabla 15. Ejemplo de los parámetros de entrada para la construcción del modelo de simulación.



| Parámetros de entrada – Modelos de simulación de la partida de techo | | |
|--|---------------|--|
| Elemento | | Parámetros de entrada |
| Símbolo | Nombre | |
|  | Resource | Name: Oficial 1; Servers: 1. |
| | | Name: Oficial 2; Servers: 1. |
| | | Name: Peón 1; Servers: 1. |
| | | Name: Peón 2; Servers: 1. |
|  | File | Name: File 1. |

Tabla 16. Ejemplo de duraciones calculadas para la tarea de vibrado de concreto con varilla.

| 12. Vibrado de concreto | |
|---|-------------------------------------|
| Concepto de trabajo: | Trabe y Losa de vigueta y bovedilla |
| Equipo: | Varilla |
| Cantidad (Q_j): | Recurso (N_j): |
| 1 cubeta | 1 oficial |
| Duración en minutos (D3_j): | |
| 0.35, 0.37, 0.23, 0.20, 0.20, 0.20, 0.22, 0.20, 0.20, 0.22, 0.22, 0.20, 0.20, 0.18, 0.20, 0.22, 0.20, 0.20, 0.20, 0.17, 0.15, 0.20, 0.20, 0.20, 0.22, 0.20, 0.22, 0.22, 0.22, 0.20, 0.20, 0.20, 0.20, 0.20. | |

Estas duraciones fueron introducidas en el software Easyfit para la identificación de la distribución de probabilidad que más se ajustara al conjunto de datos. En la Tabla 17 se muestra un ejemplo del llenado del formato de las distribuciones de probabilidad obtenidas para el caso de estudio y posteriormente, para el caso de análisis.

Tabla 17. Ejemplo del formato de las distribuciones de probabilidad.

| Distribución de probabilidad | | | | |
|------------------------------|------------------------------|------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| No. de Tarea | Tarea | Equipo | Trabe (TR) | Losa de vigueta y bovedilla (LVB) |
| 1 | Acarreo de cimbra | A mano | Beta(1.921, 2.27, 0.58, 0.73) | Beta(1.921, 2.27, 0.58, 0.73) |
| | | Carretilla | Beta(2.458, 8.101, 0.13, 0.19) | Beta(2.458, 8.101, 0.13, 0.19) |
| 2 | Cimbrado | Martillo | Beta(0.985, 4.196, 15, 65.22) | No aplica |
| 3 | Acarreo de varillas de acero | Martillo | Uniform(0.108, 0.127) | |
| 4 | Corte de acero de refuerzo | Segueta | Triangular(0.487, 0.711, 0.518) | |
| | | Cizalla | Triangular(0.05, 0.393, 0.188) | |

En el APÉNDICE D se presentan los parámetros de las distribuciones de probabilidad que mejor se ajustaron a la distribución de las duraciones de las tareas de las actividades de trabe y de losa de vigueta y bovedilla.

Se validó el modelo de simulación con las distribuciones de probabilidad del caso de estudio y con el modelo de simulación del proceso con concreto premezclado colado con bomba + manguera + vibrador de inmersión. Este último se seleccionó porque fue el que más se ajustó al proceso observado en campo. En la Tabla 18 se han resumido los resultados de la validación del modelo de simulación del proceso con concreto premezclado colado con bomba + manguera.

Tabla 18. Resultados de la validación de los modelos de simulación.

| Validación del modelo de simulación | | | | |
|-------------------------------------|-------------------------|---|----------------|------------|
| Caso de validación | Duración real (minutos) | Duración estimada con el modelo de simulación (minutos) | Validación (%) | Se aprueba |
| Caso de estudio | 1,200.00 | 1,025.23 | 14.56% | Si |

De acuerdo con lo anterior, se aprueba el modelo de simulación ya que la variación entre la duración estimada y la duración real fue menor al 20.00%, tal y como se explicó en el apartado 3.2.2.8.

4.3. Resultados del análisis de escenarios

En este apartado se ilustran los resultados con lo que se cumplió el tercer objetivo específico. En la Primera Etapa, el Escenario 1.0 (Base), el cual surgió de la selección de los equipos que se usan de manera manual o, en su caso, rudimentario, se obtuvo con el modelo de simulación la cantidad de 2,397.49 minutos-hombre. Este escenario fue la base de comparación con respecto a los otros escenarios de las etapas posteriores. En la Tabla 19, se resumen los resultados de esta etapa.

Tabla 19. Resumen de los resultados de la Primera Etapa.

| Resumen de los resultados de la Primera Etapa | | | | | |
|--|----------------------|--|---------------------------------------|--|--|
| Etapa | Escenario | Equipo del Escenario 1.0 (Base) | Alternativa de equipo empleado | Cantidad de recurso empleado (minutos-hombre) | Variación porcentual con respecto al Escenario 1.0 (Base) |
| Primera Etapa | Escenario 1.0 (Base) | Ver Tabla 13 | No aplica | 2,397.49 | No aplica |

En la Segunda Etapa, se desglosaron los equipos empleados en cada escenario de la Segunda Etapa, como alternativa al Escenario 1.0 (Base). Lo descrito anteriormente se puede ejemplificar en la Tabla 20, en donde se observa el equipo empleado en cada escenario de la Segunda Etapa como alternativas al Escenario 1.0 (Base). Por ejemplo, en las tareas de acarreo, el uso de la carretilla en el Escenario 2.1 redundó en una reducción porcentual de 7.31% con respecto a la cantidad de minutos-hombre estimado para el Escenario 1.0 (Base), mientras que en el Escenario 2.8 el uso de la grúa en el izado de las viguetas resultó en un aumento porcentual de 17.36% con respecto a la cantidad de minutos-hombre estimado para el Escenario 1.0 (Base).

Tabla 20. Resumen de los resultados de la Segunda Etapa.

| Resumen de los resultados de la Segunda Etapa | | | | | |
|---|-----------------|---------------------------------|---------------------------------------|---|---|
| Etapa | Escenario | Equipo del Escenario 1.0 (Base) | Alternativa de equipo empleado | Cantidad de recurso empleado (minutos-hombre) | Variación porcentual con respecto al Escenario 1.0 (Base) |
| Segunda Etapa | Escenario 2.1 | Cubeta | Carretilla | 2,234.11 | 7.31% (Reducción) |
| | | A mano | | | |
| | Escenario 2.2 | Segueta | Cizalla | 2,358.51 | 1.65% (Reducción) |
| | Escenario 2.3 | Pala | Revolvedora | 2,280.34 | 5.14% (Reducción) |
| | Escenario 2.4 | Llana | Concreto premezclado colado sin bomba | 2,006.72 | 19.47% (Reducción) |
| | Escenario 2.5 | Llana | Concreto premezclado colado con bomba | 1,819.39 | 31.77% (Reducción) |
| | Escenario 2.6 | Varilla | Vibrador de inmersión | 2,372.32 | 1.06% (Reducción) |
| | Escenario 2.7 | Cubeta | Manguera | 2,380.88 | 0.70% (Reducción) |
| | Escenario 2.8 | Escalera y sogas | Grúa | 2,901.14 | 17.36% (Aumento) |
| | Escenario 2.9 | Escalera | Cabrestante | 2,111.79 | 13.53% (Aumento) |
| | Escenario 2.10 | Polín de madera | Polín de madera | 2,352.97 | 1.89% (Reducción) |
| Escenario 2.11 | Tablas y blocks | Andamio tubular estándar | 2,349.75 | 2.03% (Reducción) | |

En la Tercera Etapa, se construyeron dos escenarios con base en los resultados obtenidos en la Segunda Etapa. El Escenario 3.1 se realizó con los equipos más eficientes de la partida de techo. Este escenario consistió en seleccionar en el modelo de simulación los equipos que obtuvieron una mayor reducción en los minutos-hombre con respecto al Escenario 1.0 (Base). El Escenario 3.2 fue con los dos equipos más

eficientes de la partida de techo. Siendo el concreto premezclado colado con bomba y el cabrestante los dos equipos que obtuvieron una mayor reducción en los minutos-hombre en la partida de techo.

Lo descrito anteriormente se puede ejemplificar en la Tabla 21, en donde se observa los equipos empleados en cada escenario de la Tercera Etapa como alternativas al Escenario 1.0 (Base), así, como la respectiva cantidad de recurso empleado (minutos-hombre) en la ejecución de la partida de techo y la variación porcentual de la productividad con respecto al Escenario 1.0 (Base).

Tabla 21. Resumen de resultados de la Tercera Etapa.

| Resumen de los resultados de la Tercera Etapa | | | | | |
|--|------------------|--|---------------------------------------|--|--|
| Etapa | Escenario | Equipo del Escenario 1.0 (Base) | Alternativa de equipo empleado | Cantidad de recurso empleado (minutos-hombre) | Variación porcentual con respecto al Escenario 1.0 (Base) |
| Tercera Etapa | Escenario 3.1 | Cubeta | Carretilla | 1,537.42 | 55.94% (Reducción) |
| | | A mano | | | |
| | | Segueta | Cizalla | | |
| | | Pala | Revolvedora | | |
| | | Llana | Concreto premezclado colado con bomba | | |
| | | Varilla | Vibrador de inmersión | | |
| | | Cubeta | Manguera | | |
| | | Escalera | Cabrestante | | |
| | | Polín de madera | Polín de madera | | |
| | | Tablas y blocks | Andamio tubular estándar | | |

Continuación Tabla 26.

| Resumen de los resultados de la Tercera Etapa | | | | | |
|--|------------------|--|---------------------------------------|--|--|
| Etapa | Escenario | Equipo del Escenario 1.0 (Base) | Alternativa de equipo empleado | Cantidad de recurso empleado (minutos-hombre) | Variación porcentual con respecto al Escenario 1.0 (Base) |
| Tercera Etapa | Escenario 3.2 | Llana | Concreto premezclado colado con bomba | 1,672.47 | 43.35% (Reducción) |
| | | Escalera | Cabrestante | | |

La Figura 19 y 20 se elaboraron para comparar más claramente los resultados de los escenarios de la investigación, ya que muestra el porcentaje de variación de la productividad con respecto al Escenario 1.0 (Base). Por ejemplo, el escenario con los equipos más eficientes de la partida de techo (Escenario 3.1) redundó en una reducción porcentual de 55.94% con respecto a la cantidad de minutos-hombre estimado para el Escenario 1.0 (Base), mientras que en el escenario con los dos equipos más eficientes de la partida de techo (Escenario 3.2) redundó en una reducción porcentual de 43.35% con respecto a la cantidad de minutos-hombre estimado para el Escenario 1.0 (Base).

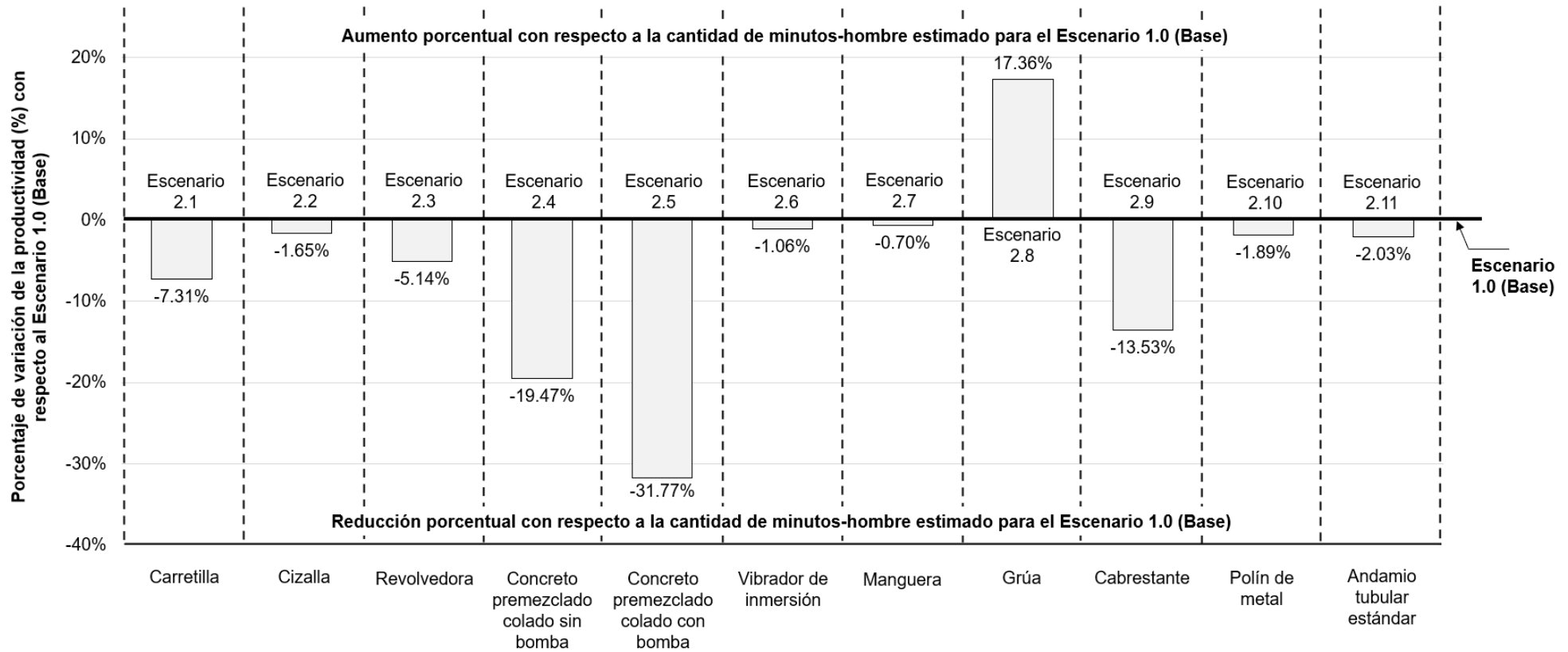


Figura 16. Variación porcentual de los escenarios de la Segunda Etapa con respecto a la cantidad de minutos-hombre estimado para el Escenario 1.0 (Base).

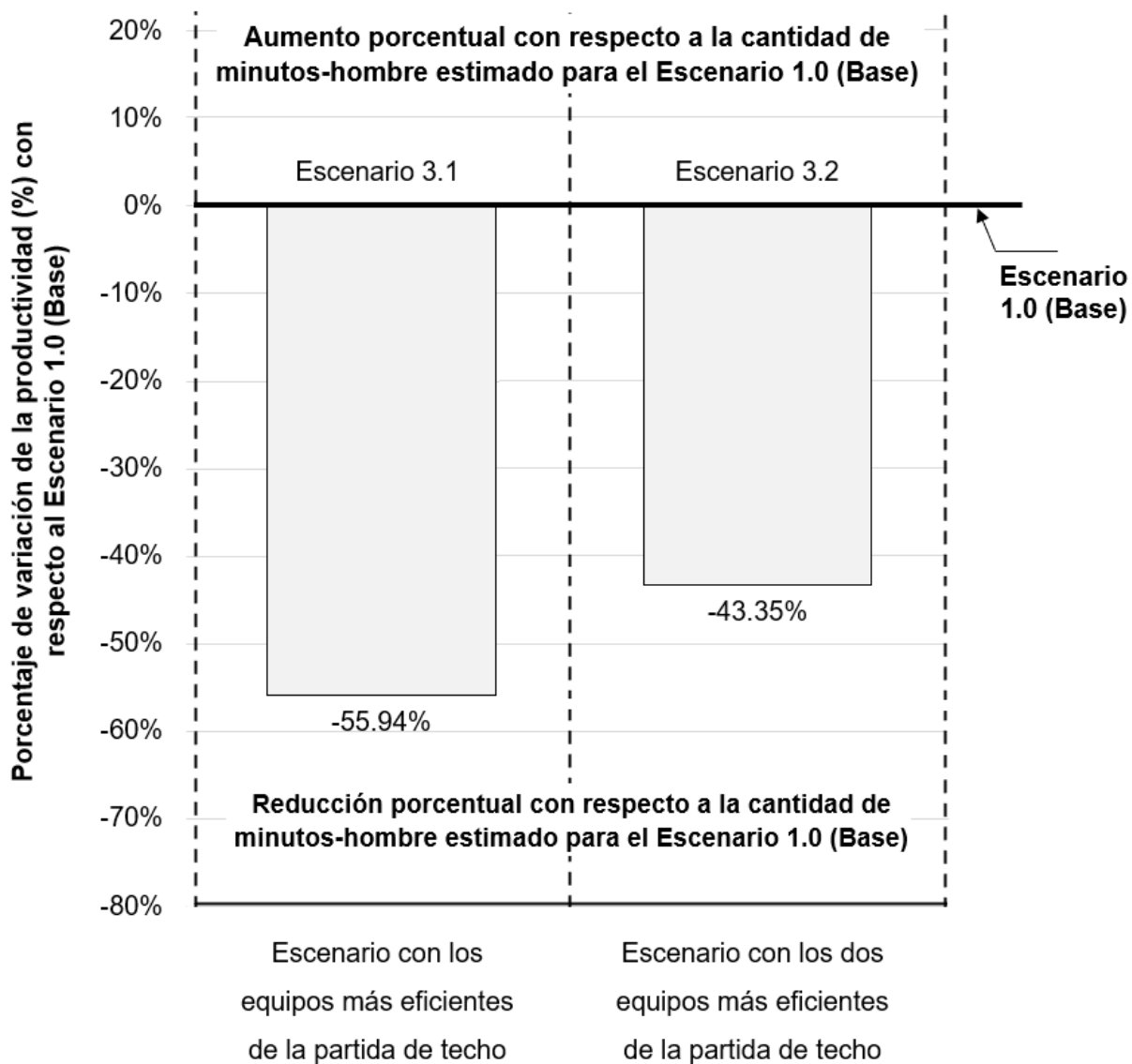


Figura 17. Variación porcentual de los escenarios de la Tercera Etapa con respecto a la cantidad de minutos-hombre estimado para el Escenario 1.0 (Base).

5. DISCUSIÓN

5.1. Discusión de los resultados obtenidos en esta investigación

En la Primera Etapa se identificó el Escenario 1.0 (Base), el cual involucró en su proceso las veintisiete tareas relacionadas con la partida de techo. Dado lo anterior, se supuso en un principio que este escenario obtendría la mayor cantidad de minutos-hombre, pero se comprobó que esa suposición no era completamente cierta al realizar las simulaciones en el modelo. Esto en parte puede deberse a que hay equipos que, a pesar de su precario o rudimentario modo de operación, siguen siendo una opción más productiva con respecto a las posibles alternativas. Por ejemplo, en la tarea de colocación de viguetas se siguen utilizando la escalera y soga pese a requerir de mucho esfuerzo, y a que la manera en la que se realiza es muy insegura ergonómicamente. En su lugar, existen alternativas más adecuadas para los trabajadores, tales como las grúas. Sin embargo, existe la creencia de que estos equipos alternos no son viables a menos que la cantidad de volumen de trabajo sea lo suficientemente grande para justificar la inversión, o porque el proyecto lo estipule desde el comienzo.

Cabe destacar que el Escenario 1.0 (Base) es la peor situación en la que se podría encontrar un trabajador con respecto al esfuerzo en campo (aunque no en productividad). Algunos de estos equipos terminan siendo obsoletos dada la modernización de los procesos constructivos para mejorar los tiempos y costos de las actividades. Lo anterior, aunado a una cultura de prevención y seguridad en el trabajo, ha hecho que los equipos se modernicen, afectando de manera positiva los procesos constructivos, la operación y el diseño ergonómico del equipo, la cantidad de trabajadores, y la productividad laboral.

Un ejemplo de lo descrito anteriormente es el concreto premezclado. Antiguamente, éste no predominaba su uso al momento de colocar el concreto porque la preparación manual con pala y cubeta era más común. Pero a medida que los procesos progresaban, y las necesidades de los clientes aumentaban, se empezaron a adoptar estos nuevos equipos para mejorar el tiempo de elaboración, y por razones prácticas, como no tener la necesidad de conseguir muchos trabajadores para el día

del colado, y sobre todo por la calidad, ya que la uniformidad en la producción manual de concreto es muy difícil de lograr. Este ejemplo ocurrió al menos en los colados en la construcción masiva de vivienda en los nuevos desarrollos de la ciudad de Mérida, Yucatán, que desde los años 90 ya no se realiza con pala y cubeta.

Con respecto a la Segunda Etapa, tal como se ilustra en la Figura 16, en diez de los once escenarios, el equipo obtuvo una reducción porcentual con respecto a la cantidad de minutos-hombre estimado para el Escenario 1.0 (Base). Los equipos con los cuales se encontró una reducción en los minutos-hombre son los siguientes: carretilla (-7.31%), cizalla (-1.65%), revolvedora (-5.14%), concreto premezclado colado sin bomba (-19.47%), concreto premezclado colado con bomba (-31.77%), vibrador de inmersión (-1.06%), manguera (-0.70%), cabrestante (-13.53%), polín de metal (-1.89%) y andamio tubular estándar (-2.03%). Sin embargo, es importante señalar que, de acuerdo con estos resultados, solamente en cuatro equipos se generó una reducción mayor al 5% con respecto a la cantidad de minutos-hombre estimado para el Escenario 1.0 (Base); mientras que en los otros siete escenarios se obtuvo una reducción menor al 5%. Los cuatro escenarios que arrojaron las mayores reducciones fueron aquellos que incluyeron el uso de la carretilla (-7.31%), concreto premezclado colado sin bomba (-19.47%), concreto premezclado colado con bomba (-31.77%), y el cabrestante (-13.53%); algunas explicaciones ante tales causas, son que, en el uso de la carretilla, al estar presente en cuatro de las veintisiete tareas que conforman las actividades de la partida de techo, genera un efecto acumulado.

Por otra parte, el concreto premezclado colado con bomba dado que integra dentro de sus procesos las tareas relacionadas con la preparación y acarreo de concreto de manera externa (que no es dentro de la obra y por lo tanto este recurso no se toma en cuenta en el análisis), hace que éste repercuta en una disminución del 31.77% de la cantidad de recurso (minutos-hombre) con respecto al Escenario 1.0 (Base); mientras que el concreto premezclado colado sin bomba, al igual que el colado con bomba, integra las tareas relacionadas a la preparación de concreto de manera externa, pero los acarreos de concretos sí se toman en cuenta en el análisis, ya que se asume que los trabajadores tienen que transportar el concreto hasta el sitio de la colocación, por lo que esta situación puede explicar por qué existe una reducción en

la cantidad de recurso (minutos-hombre) del 19.47% con respecto al Escenario 1.0 (Base). Esto es un caso muy inusual dado lo observado en la recolección de datos en campo. Lo más común en obra es que, en la colocación de concreto, éste se realice con el concreto premezclado colado con bomba.

Por otro lado, en la misma Segunda Etapa, solo se identificó un escenario en el que el equipo generó un aumento en la cantidad de minutos-hombre en la partida de techo. Este equipo fue la grúa (+17.36%), perteneciente a la tarea de izado de viguetas; este aumento llama la atención porque a pesar de que en este caso el equipo dentro de su proceso tenga integrado el acarreo e izado de viguetas, esto no generó una mejora en el desempeño en la actividad analizada. Esto implicaría que en una primera impresión se percibiera que el efecto de dicho equipo fuera irrelevante y que su empleo fuera inútil, al menos para fines de mejorar la productividad. Sin embargo, hay que tomar en cuenta que se trata de un equipo que mejora la condición laboral del sitio en donde se utilice, haciendo que el trabajador haga menos esfuerzo y repercutiendo en su productividad.

Es necesario recalcar que en este análisis no fue tomada en cuenta la curva de agotamiento de los trabajadores, que hace referencia a que a medida que el volumen de trabajo sea mayor, la productividad de los trabajadores disminuya progresivamente, es en ese análisis en donde se notaría la mejora de la productividad con respecto a los equipos manuales, ya que, al no sobrecargar al trabajador, harían que éste trabaje a un ritmo constante, mientras que en los equipos manuales, donde sí se sobrecarga al trabajador, haría que éste fuera disminuyendo su productividad progresivamente al no poder seguir un ritmo de trabajo constante.

Cabe mencionar que, en caso de incluir el agotamiento de los trabajadores en el análisis, también habría que considerar volúmenes más grandes de trabajo, pues es cuando el efecto de dicho factor sería más notable. Es también bajo dichas condiciones cuando el efecto de este equipo podría ser más relevante para la mejora de la productividad de las actividades.

Para la Tercera Etapa se analizaron los resultados obtenidos en cada uno de los equipos de la Segunda Etapa, y con base en éstos se armaron dos escenarios

(Escenario 3.1 y 3.2). El propósito del Escenario 3.1 fue determinar la integración de los equipos que pudiesen generar una reducción porcentual con respecto a la cantidad de minutos-hombre estimado para el Escenario 1.0 (Base). Lo anterior dio como resultado que el Escenario 3.1. tuviera una disminución porcentual de 55.94%. Para fines de esta investigación, se considera este escenario como la mejor opción, dado que la finalidad de esta investigación se basó únicamente en cuantificar el efecto máximo de los equipos en la productividad de las actividades de la partida de techo.

El Escenario 3.2, por su parte, surgió a partir de identificar cuáles son los dos equipos que reducen de manera significativa la cantidad de minutos-hombre con respecto al Escenario 1.0 (Base). El cabrestante y el concreto premezclado colado con bomba en las tareas de izado de bovedillas y colocación del concreto son los que generan una disminución porcentual de 43.35%. Cabe aclarar, que como se explicó en el apartado 3.2.2.3, el concreto premezclado colado con bomba implica que en su proceso no se incluyeron las tareas relacionadas con la preparación, el acarreo y la colocación del concreto, ya que, una vez llegado este equipo a la obra, estas tareas se suponen realizadas de forma externa e independiente del sitio del trabajo sin tomar en cuenta su tiempo de ejecución externo. Entre otras cuestiones, este escenario es quizás el más realista en el sentido de que, en las obras de vivienda, no siempre se cuenta con todos los equipamientos posibles, ya sea por falta de recursos o por otras razones.

5.2. Discusión con respecto a los resultados de otros autores

Los resultados en general no solo demuestran que existe un efecto en la productividad de las actividades debido al uso de los equipos alternos, sino que es uno de los primeros intentos dirigidos exclusivamente a la cuantificación de éste. Como se mencionó en el apartado 2.4, diversas investigaciones identificaron de manera cualitativa que uno de los factores más relevantes que afectan la productividad está ligado a los equipos de construcción para realizar los trabajos. Por ejemplo, en la investigación de Ali et al. (2020)¹²⁹, en Libia, el factor relacionado al equipo fue

¹²⁹Ali, T., Al-Mamlook, R., Bzizi, M., Al-Kbisbeh, M., y Almajiri, E. (2020). 24-30 Factors Affecting Labor Productivity in the Construction Industry. *American Journal of Environmental Science and*

clasificado en el puesto 30 de los factores que afectan la productividad laboral, mientras que, Enshassi et al. (2007)¹³⁰, en la Franja de Gaza, y Alinaitwe et al. (2007)¹³¹, en Uganda, lo ubicaron en el décimo y cuarto puesto respectivamente. A pesar de que se hable de un mismo factor, éste puede ser juzgado de manera muy distinta dependiendo del contexto social en el que se desenvuelva el trabajador.

La simulación de eventos discretos permitió analizar el efecto de los equipos en la productividad de la mano de obra, debido a que logra una imitación de los procesos constructivos, y permite analizar diferentes escenarios. Así mismo se piensa que, de llegar a implementarse de manera correcta lo anterior en la construcción de vivienda, podría aportar el conocimiento necesario para concientizar a los administradores de proyectos sobre la importancia de tomar medidas que traten de mejorar la productividad sin comprometer la salud de los trabajadores, así como para explorar distintas alternativas para solucionar posibles eventualidades.

Engineering, 4(2), 24-30. <https://doi.org/10.11648/j.ajese.20200402.13>

¹³⁰Enshassi, A., Mohamed, S., Mustafa, Z., y Mayer, P. (2007). Factors affecting labour productivity in building projects in the Gaza strip. *Journal of Civil Engineering and Management*, 13(4), 245-254. <https://doi.org/10.1080/13923730.2007.9636444>

¹³¹Alinaitwe, H., Mwakali, J., y Hansson, B. (2007). Factors affecting the productivity of building craftsmen - studies of Uganda. *Journal of Civil Engineering and Management*, 13(3), 169-176. <https://doi.org/10.1080/13923730.2007.9636434>

6. CONCLUSIONES

En los proyectos de construcción de vivienda en Mérida, Yucatán, se identificaron distintos equipos durante la ejecución de la partida de techo. Las similitudes que guardan los desarrollos de vivienda (o proyectos de construcción de vivienda) al realizar las actividades de construcción, aunado a que las condiciones como el entorno, costumbres y disponibilidad de equipo son las mismas, hacen que existan ciertas preferencias al uso de ciertos equipos.

Por otro lado, el desarrollo de los modelos de simulación resultó ser la parte más compleja de esta investigación. Una de las problemáticas que se suscitaron en el desarrollo de estos modelos fue el poder visualizar un proceso constructivo en campo y adaptarlo al modelo, en parte debido a que, en la secuencia constructiva de las tareas, es difícil que éstas se lleven a cabo de igual manera siempre, a causa de los distintos imprevistos que ocurren en la obra. Para solucionar lo anterior, se optó por generalizar la secuencia constructiva de las tareas de acuerdo con las que más se repetían en los proyectos.

Otras problemáticas que se suscitaron, fueron que no siempre había la disponibilidad del equipo para la recolección de datos de productividad, y que no siempre se contaba con la cantidad de repeticiones suficientes para documentar una muestra mínima de 30 mediciones. Barrera (2008) y Kleeberg y Ramos (2009) consideran que una muestra de 30 o mayor cantidad de datos es suficiente cuando el tamaño de la muestra es grande^{132,133}

Éstas fueron algunas de las razones por las que la simulación, a pesar de ser una herramienta útil para analizar situaciones en un entorno virtual y, con ello, tomar decisiones, no es una opción viable y rápida a corto plazo básicamente por la cantidad de trabajo que requiere para poder alimentar la base de datos y éste pueda generar resultados cercanos a la realidad. La simulación es redituable de mediano a largo plazo cuando ya se tiene una base de datos consolidada y solamente se requiera adaptar

¹³²Barrera, R. (2008). Prueba de Hipotesis. En *Estadística II Programa administración pública territorial*.

¹³³Kleeberg, F., y Ramos, J. (2009). Gestión de la producción. En *Revista Ingeniería Industrial* (Vol. 27).

parámetros para generar simulaciones en los nuevos proyectos de construcción que se desee analizar.

Esta investigación es uno de los primeros intentos para determinar el efecto de equipos alternos en la productividad de la mano de obra en las actividades de manera cuantitativa. Una de las razones por las que no existía un precedente se debe a que los equipos muchas veces no son valorados como instrumentos que tengan un efecto significativo en la productividad de las tareas, y por lo mismo no se invierte en su adquisición. Ejemplo de ello es que en las obras es muy común encontrar a los trabajadores con escasez de equipos para laborar, debido a que los constructores esperan que los equipos sean suministrados por los mismos trabajadores. Hay que aclarar que los trabajadores siempre se las ingenian para poder sobrellevar esas situaciones y cumplir con la tarea encomendada, pero muchas veces conlleva un esfuerzo extra o una disminución en la productividad de la tarea. Anteriormente, los constructores habían identificado de manera cualitativa que la falta de uso de equipos de construcción afectaba a la productividad, pero a pesar de esa situación, no se había investigado de manera cuantitativa. Esto puede deberse a que no se percibe el alcance del problema, lo que genera un cierto rechazo a profundizar en el tema.

Esta investigación, logró estimar de manera cuantitativa el efecto de los equipos alternos en la productividad de la mano de obra en las actividades de construcción de vivienda. En la Primera Etapa se podía concluir erróneamente, a partir de la selección de los equipos que se realizaron en el Escenario 1.0 (Base), que éste obtendría la mayor cantidad de minutos-hombre, pero se comprobaría que esta afirmación no era completamente cierta al comprobarlo en las simulaciones. Esto se debe a que algunos equipos, pese a su modo precario o rudimentario de operación, siguen siendo una opción más productiva con respecto a las posibles alternativas, ya que éstas, por su complejidad de uso o por la falta de capacitación de los trabajadores, repercute en una baja productividad. Muchos dueños de constructoras no se percatan de que la productividad es un factor involucrado directamente en los costos de los proyectos, de ahí que muchas veces la selección de equipo se basa únicamente en el costo, sin tomar en cuenta al usuario que lo va a operar y su productividad, pudiendo llegar a ser

contraproducente para el proyecto que el trabajador no esté capacitado para operar el equipo.

La contribución de esta investigación a la industria de la construcción, es que quizá se trata del primer acercamiento a un resultado cuantitativo para medir el afecto de la productividad de los equipos en una partida de trabajo; en construcciones de Mérida, Yucatán. Como contribución metodológica se tienen los análisis detallados de los parámetros de productividad de cada equipo y sus respectivas alternativas, identificando las variaciones de productividad de cada equipo para una mejor planeación de los proyectos. Por último, esta investigación podría servir como una guía para que las empresas constructoras planeen la selección de los equipos.

7. RECOMENDACIONES

Los modelos y datos proporcionados en esta investigación pueden servir de base para futuros estudios relacionados con los factores del método de trabajo que afectan las actividades de construcción. Se recomienda seguir la metodología utilizada en esta investigación para analizar cómo afecta el uso de equipos alternos en la productividad de la mano de obra en las actividades de construcción en otras partidas de trabajo como, por ejemplo, cimentación, muros y acabados. Además, se puede ampliar el efecto con nuevas alternativas de equipos que no necesariamente sean utilizados en la región. De igual manera, se puede extrapolar el efecto de los equipos a otro tipo de obra que no sea de vivienda.

La utilización de los modelos no está dirigida exclusivamente para investigaciones científicas, sino también para el campo laboral en la planeación de proyectos. La modelación desarrollada puede servir para tomar decisiones relacionadas con la selección de los equipos en las actividades, debido a que esta investigación proporciona datos relacionados al cálculo de la productividad basado en la recolección de datos en campo.

Por último, la implementación de los modelos de simulación de esta investigación está dirigida a los proyectos de vivienda, debido a que, por su naturaleza repetitiva y su baja complejidad, resulta idóneo para ir actualizando los datos de la productividad de los equipos y generar una retroalimentación sobre la manera de operar los equipos por parte de los trabajadores en las actividades. Esto ayudaría a los constructores a tener un mejor criterio en la selección de los equipos a la hora de realizar la planeación de los proyectos. Sin embargo, la implementación de los modelos de simulación de esta investigación no impide que estos tengan que ser para proyectos de vivienda únicamente, pudiendo ser utilizados en otros tipos de proyectos que tengan las mismas características.

BIBLIOGRAFIA

- AbouRizk, S. (2010). Role of simulation in construction management. *Journal of Construction Engineering and Management*, 136(10), 1140-1153. <https://doi.org/10.1080/09613219208727186>
- Abourizk, S., Hague, S., y Ekyalimpa, R. (2011). *User Guide for Cyclone Template in Symphony.Net 3.5*.
- Abourizk, S., Hague, S., y Ekyalimpa, R. (2016). *Construction Simulation: An Introduction Using SIMPHONY*.
- AbouRizk, S., Halpin, D., Mohamed, Y., y Hermann, U. (2011). Research in Modeling and Simulation for Improving Construction Engineering Operations. *Journal of Construction Engineering and Management*, 137(10), 843-852. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000288](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000288)
- Abourizk, S., y Wales, R. (1997). *Combined Discrete-Event/Continuous Simulation for Project Planning*. March, 11-20.
- Alcudia, C., Corona, G., y Pino, G. (2003). Absentismo y rotación en la construcción masiva de vivienda. Efecto en la productividad. *Ingeniería Industrial*, 24(2), 7 pág.
- Alinaitwe, H., Mwakali, J., y Hansson, B. (2007). Factors affecting the productivity of building craftsmen - studies of Uganda. *Journal of Civil Engineering and Management*, 13(3), 169-176. <https://doi.org/10.1080/13923730.2007.9636434>
- Alonzo, L. (2001). *Apuntes de Construcción Pesada 1 Maestría en Construcción*.
- Arcudia, C., Solís, R., y González, J. (2002). Nuevo enfoque para el estudio de la productividad en la construcción masiva de vivienda. *Revista Ingeniería e Investigación*, 49, 49-58.
- Arias, C. (2017). *Efecto de la composición y organización de las cuadrillas sobre la productividad en actividades de construcción de vivienda*. Universidad Autónoma de Yucatán.

- Arqhys Decoración. (2017). *Tipos de equipos de trabajo*. Portal de arquitectura Arqhys.com.
https://www.arqhys.com/decoracion/tipos_de Equipos_de_trabajo.html
- Assaf, S., y Al-Hejji, S. (2006). Causes of delay in large construction projects. *International Journal of Project Management*, 24(4), 349-357.
<https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2005.11.010>
- Assaf, S., Al-Khalil, M., y Al-Hazmi, M. (1995). Causes of delay in large building construction projects. *Journal of Management in Engineering*, 11(2), 45-50.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0742-597X\(1995\)11:2\(45\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0742-597X(1995)11:2(45))
- Baeza, J., Arcudia, C., y González, J. (2004). Simulación estocástica de rendimientos de mano de obra en procesos de construcción. *Ingeniería*, 8(2), 103-115.
- Baeza, J., Solís, R., y Arcudia, C. (2003). Utilizando información acerca de productividad de mano de obra y simulaciones computacionales en el salón de clase. *Revista Ingeniería de Construcción*, 18, 14-21.
- Bain, D. (1982). *Productividad, la solución a los problemas de la empresa*. McGraw-Hill Inc.
- Barbosa, V., Ferreira, F., Kling, D., Lopes, E., Protti, F., y Schmitz, E. (2009). Structured construction and simulation of nondeterministic stochastic activity networks. *European Journal of Operational Research*, 198(1), 266-274.
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.06.010>
- Barrera, R. (2008). Prueba de Hipotesis. En *Estadística II Programa administración pública territorial*.
- Bolivar, A., y Halpin, D. (1998). Simplified Simulation System for Construction Projects. *Journal of Construction Engineering and Management*, February, 72-81.
- Botero, L. (2012). Guía de mejoramiento continuo para la productividad en la construcción de proyectos de vivienda (Lean construction como estrategia de mejoramiento). *Revista Universidad EAFIT*, 40(136), 50-64.

- Botero, L., y Acevedo, H. (2011). Simulación de operaciones y línea de balance: herramientas integradas para la toma de decisiones. *Ingeniería y Ciencia - ing.cienc.*, 7(13), 29-45.
<http://publicaciones.eafit.edu.co/index.php/ingciencia/article/view/399>
- Congreso de la Unión. (2012). *Ley Federal del trabajo*.
http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/125_020719.pdf
- Corona, G. (1999). *Método constructivo y administración de materiales - Factores que afectan la productividad de la mano de obra en la construcción masiva de vivienda* [Universidad Atonóma de Yucatán].
<http://opac.uady.mx/opac/sisbiuadyOPAC.php#>
- Dai, J., Goodrum, P., y Maloney, W. (2007). Analysis of craft workers' and foremen's perceptions of the factors affecting construction labour productivity. *Construction Management and Economics*, 25(11), 1139-1152.
<https://doi.org/10.1080/01446190701598681>
- Edwards, D. J., y Holt, G. D. (2009). Construction plant and equipment management research: Thematic review. *Journal of Engineering, Design and Technology*, 7(2), 186-206. <https://doi.org/10.1108/17260530910974989>
- Enshassi, A., Mohamed, S., Mustafa, Z., y Mayer, P. (2007). Factors affecting labour productivity in building projects in the Gaza strip. *Journal of Civil Engineering and Management*, 13(4), 245-254. <https://doi.org/10.1080/13923730.2007.9636444>
- Gatti, U., Migliaccio, G., Bogus, S., y Schneider, S. (2014). An exploratory study of the relationship between construction workforce physical strain and task level productivity. *Construction Management and Economics*, 32(6), 548-564.
<https://doi.org/10.1080/01446193.2013.831463>
- Gómez, A., Echeverry, J., Giraldo, M., Otálora, C., y Cano, M. (2012). Mejoramiento de procesos constructivos a partir de un módulo programable para captura de imágenes y simulación digital. *Revista ingeniería de construcción*, 27(2), 35-53.
<https://doi.org/10.4067/s0718-50732012000200003>

- Gonzalez, A., Abourizk, S., Iseley, D., y Halpin, D. (1993). Comparison of two simulation methodologies in construction. *Journal of Construction Engineering and Management*, 119(3), 573-589. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(1993\)119:3\(573\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(1993)119:3(573))
- Hajjar, D., y AbouRizk, S. (1999). Symphony: an environment for building special purpose construction simulation tools. *Winter Simulation Conference Proceedings*, 32(3), 998-1006. <https://doi.org/10.1109/wsc.1999.816811>
- Halpin, D. (2006). *Construction Management* (Tercera ed). John Wiley & Sons, Inc.
- Haseeb, M., Bibi, A., y Rabbani, W. (2011). Causes and Effects of Delays in Large Construction Projects of Pakistan. *Kuwait Chapter of Arabian Journal of Business and Management Review*, 1(4), 18-42.
- Hassan, M., y Gruber, S. (2008). Simulation of concrete paving operations on interstate-74. *Journal of Construction Engineering and Management*, 134(1), 2-9. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2008\)134:1\(2\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2008)134:1(2))
- Jiménez, L. (2002). *Estudio del efecto de los factores que reducen la productividad de la mano de obra en la construcción múltiple de vivienda* [Universidad Autónoma de Yucatán]. <http://opac.uady.mx/opac/sisbiuadyOPAC.php#>
- Johannessen, B. (2008). Building Rural Roads : Chapter 3-6. En *Building Rural Roads* (p. 98). International Labour Organization. https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---asia/---ro-bangkok/documents/genericdocument/wcms_101009.pdf
- Kelton, W. (1985). Statical design and analysis. *Proceedings of the 18th conference on Winter simulation - WSC 86*, 45-51. <https://doi.org/10.1016/b978-0-408-03549-1.50013-3>
- Kleeberg, F., y Ramos, J. (2009). Gestión de la producción. En *Revista Ingeniería Industrial* (Vol. 27).
- Law, A., y Kelton, W. (2000). *Simulation Modeling and Analysis* (3.^a ed.). Mc Graw Hill.
- Macal, C., y North, M. (2014). Introductory tutorial: Agent-based modeling and simulation. *Proceedings of the winter simulation conference 2014*.

- Mahamid, I. (2013). Contractors perspective toward factors affecting labor productivity in building construction. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 20(4), 446-460. <https://doi.org/10.1108/ECAM-08-2011-0074>
- Mamani, R. (2008). *Fichas maquinarias*. Universidad Mayor de San Andrés.
- March, C. (2009). *Operation Management for Construction* (Taylor & F). Spon Press.
- MathWave Technologies. (2017). *EasyFit 5.0 Licencia Comercial - Programa para ajuste de distribución*. <https://www.download3k.es/Negocios-y-Finanzas/Calculadoras-y-Convertidores/Download-EasyFit.html>
- McGraw-Hill Dictionary of Architecture and Construction. (2003). *Construction equipment*. <https://encyclopedia2.thefreedictionary.com/construction+equipment>
- Odeh, A., y Battaineh, H. (2002). Causes of construction delay: Traditional contracts. *International Journal of Project Management*, 20(1), 67-73. [https://doi.org/10.1016/S0263-7863\(00\)00037-5](https://doi.org/10.1016/S0263-7863(00)00037-5)
- Ojeda, M. (1990). *Maquinaria para construcción* [Universidad de Sonora]. <http://www.bidi.uson.mx/TesisIndice.aspx?tesis=5199>
- Osorio, C. (2015). *Efecto de la composición y organización de las cuadrillas sobre la productividad en actividades de construcción de vivienda*. Universidad Autónoma de Yucatán.
- Ovacen. (2017). *Tipos de maquinaria construcción u obra y ejemplos*. Ovacen.com. <https://ovacen.com/tipos-maquinaria-construccion-obras/>
- Pacholok, M. (2019). *Notice to potential proponents*. [https://wx.toronto.ca/inter/pmmd/callawards.nsf/fa687bbbf211bf4a8525791100515d51/85258049005DEA6385258463004CEFAD/\\$file/RFP No. 9119-19-7187 - Viewing Copy.pdf](https://wx.toronto.ca/inter/pmmd/callawards.nsf/fa687bbbf211bf4a8525791100515d51/85258049005DEA6385258463004CEFAD/$file/RFP_No_9119-19-7187_Viewing_Copy.pdf)
- Pino, G. (2002). *El absentismo y la rotación de los albañiles en la construcción masiva de vivienda: Variables que afectan la productividad*. Universidad Autónoma de Yucatán.
- Project Management Institute. (2004). *A Guide to the Project Management Body of Knowledge* (Third Edit).

- Rabelo, L., Helal, M., Jones, A., y Min, H. (2005). Enterprise simulation: A hybrid system approach. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 18(6), 498-508. <https://doi.org/10.1080/09511920400030138>
- Ramos, D. (2012). *Evaluación técnica-económica en la selección de equipos de carguío y acarreo en minería a cielo abierto*. Universidad Nacional de Ingeniería.
- Rivas, R., Borcharding, J., Gonzalez, V., y Alarcon, L. (2011). Analysis of factors influencing productivity using craftsmen questionnaires: Case study in a Chilean construction company. *Journal of Construction Engineering and Management*, 137(4), 312-320. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000274](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000274)
- Rojas, E., y Aramvareekul, P. (2003). Is construction labor productivity really declining? *Journal of Construction Engineering and Management*, 129(1), 41-46. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2003\)129:1\(41\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2003)129:1(41))
- Sambasivan, M., y Soon, Y. (2007). Causes and effects of delays in Malaysian construction industry. *International Journal of Project Management*, 25(5), 517-526. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2006.11.007>
- Serpell, A. (1986). Productividad en la construcción. En *Revista Ingeniería de Construcción* (Vol. 1, pp. 53-59).
- Serpell, A. (2003). *Administración De Operaciones De Construcción*. Marcombo S.A. <https://libreria.tirant.com/es/libro/administracion-de-operaciones-de-construccion-alfredo-serpell-9789701504277>
- Shehata, M., y El-Gohary, K. (2012). Towards improving construction labor productivity and projects' performance. *Alexandria Engineering Journal*, 50(4), 321-330. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2012.02.001>
- Shi, J. (1999). Activity-Based Construction (ABC) Modeling and Simulation Method. *Journal of Construction Engineering and Management*, 25(5), 354-360.
- Soekiman, A., Pribadi, K., Soemardi, B., y Wirahadikusumah, R. (2011). Factors relating to labor productivity affecting the project schedule performance in Indonesia. *Procedia Engineering*, 14, 865-873. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.110>

- Song, L., y Abourizk, S. (2008). Measuring and modeling labor productivity using historical data. *Journal of Construction Engineering and Management*, 134(10), 786-794.
- Song, L., Al-Battaineh, H., y Abourizk, S. (2005). Modeling uncertainty with an integrated simulation system. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 32(3), 533-542.
- Sonmez, R., y Rowings, J. (1998). Construction labor productivity modeling with neural networks. *Journal of Construction Engineering and Management*, 124(6), 498-504.
- Sumanth, D. (1999). *Administración para la productividad total*. Compañía Editorial Continental.
- Tavakoli, A. (1985). Productivity Analysis of Construction Operations. *Journal of Construction Engineering and Management*, 111, 31-39. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(1985\)111:1\(31\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(1985)111:1(31))
- Thomas, H., Maloney, W., Smith, G., Handa, V., y Sanders, S. (1991). Modeling construction labor productivity. *Journal of Construction Engineering and Management*, 116(4), 705-726.
- Tiwari, A., Malik, A., y Singh, C. (2016). Identification of Critical Factors Affecting Construction Labor Productivity in India Using AHP. *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, 5, 2249-8958.
- Vanegas, J., Bravo, E., y Halpin, D. (1993). Simulation Technologies for Planning Heavy Construction Processes. *Journal of Construction Engineering and Management*, 119(2), 336-354.
- Villanueva, H. (2005). *La productividad: su conceptualización, medición, planeación y mejora en las empresas*. Universidad Autónoma de Yucatán.
- Wilson, J. (1984). *Statistical aspects of simulation*. Elsevier Science Publishers B. V.
- Zayed, T., y Halpin, D. (2004a). Process versus data oriented techniques in pile construction productivity assessment. *Journal of Construction Engineering and Management*, 130(4), 490-499. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2004\)130:4\(490\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2004)130:4(490))

Zayed, T., y Halpin, D. (2004b). Simulation as a Tool for Pile Productivity Assessment. *Journal of Construction Engineering and Management*, 130(June), 394-404. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2004\)130:3\(394\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2004)130:3(394))

Zhang, Y., AbouRizk, S., Xie, H., y Moghani, E. (2012). Design and Implementation of Loose-Coupling Visualization Components in a Distributed Construction Simulation Environment with HLA. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 26(2), 248-258. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000131](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000131)

APÉNDICE

APÉNDICE A. REGISTRO DE DATOS DEL CASO DE ANÁLISIS

Tabla A1. Registro de número de personas involucradas en el caso de análisis.

| Volumen de trabajo | | | | | |
|--------------------|---------------------------------|-------------|--------|-----------|-----------------------------|
| No. de Tarea | Tarea | Equipo | Unidad | Trabe | Losa de vigueta y bovedilla |
| 1 | Acarreo de cimbra | A mano | pieza | 1 peón | 1 peón |
| | | Carretilla | pieza | 1 peón | 1 peón |
| 2 | Cimbrado | Martillo | pieza | 1 oficial | No aplica |
| 3 | Acarreo de varillas de acero | Martillo | pieza | 1 peón | |
| 4 | Corte de acero de refuerzo | Segueta | corte | 1 oficial | |
| | | Cizalla | corte | 1 oficial | |
| 5 | Doblado de acero de refuerzo | Dobladora | pieza | 1 oficial | |
| 6 | Habilitado de acero de refuerzo | Dobladora | dobles | 1 oficial | |
| 7 | Colocación de acero de refuerzo | A mano | m | 1 oficial | 1 oficial |
| 8 | Acarreo de agregados y agua | Carretilla | cubeta | 1 peón | |
| | | Cubeta | cubeta | 1 peón | |
| 9 | Acarreo de sacos de cemento | A mano | pieza | 1 peón | |
| | | Carretilla | pieza | 1 peón | |
| 10 | Preparación de concreto | Revolvedora | cubeta | 1 oficial | |
| | | Pala | cubeta | 1 oficial | |
| 11 | Acarreo de concreto | Cubeta | cubeta | 1 peón | |

Continuación Tabla A1.

| Volumen de trabajo | | | | | |
|--------------------|------------------------|---------------------------------------|----------------|----------------------|-----------------------------|
| No. de Tarea | Tarea | Equipo | Unidad | Trabe | Losa de vigueta y bovedilla |
| 12 | Colocación de concreto | Llana | cubeta | 1 oficial | |
| | | Concreto premezclado colado sin bomba | cubeta | No aplica | |
| | | Concreto premezclado colado con bomba | cubeta | 1 oficial + 2 peones | |
| 13 | Vibrado de concreto | Varilla | cubeta | 1 oficial | |
| | | Vibrador de inmersión | cubeta | 1 oficial + 1 peón | |
| 14 | Curado de concreto | Cubeta | cubeta | 1 peón | 1 peón |
| | | Manguera | m ² | 1 peón | 1 peón |
| 15 | Acarreo de viguetas | A mano | pieza | No aplica | 2 peones |
| 16 | Acarreo de bovedillas | A mano | pieza | No aplica | 1 peón |
| | | Carretilla | pieza | No aplica | 1 peón |
| 17 | Izado de viguetas | Escalera y sogá | pieza | No aplica | 2 oficiales |
| | | Grúa | pieza | No aplica | 2 oficiales + 2 peones |
| 18 | Izado de bovedillas | Escalera | pieza | No aplica | 2 oficiales |
| | | Cabrestante | pieza | No aplica | 2 oficiales |
| 19 | Apuntalamiento | Polín de madera | pieza | 1 peón | 1 peón |
| | | Polín de metal | pieza | 1 peón | 1 peón |

Continuación Tabla A1.

| Volumen de trabajo | | | | | |
|---------------------------|-------------------------------------|--------------------------|----------------|--------------|------------------------------------|
| No. de Tarea | Tarea | Equipo | Unidad | Trabe | Losa de vigueta y bovedilla |
| 20 | Cimbrado perimetral | Martillo | pieza | No aplica | 1 oficial |
| 21 | Colocación de malla electrosoldada | Martillo | m ² | No aplica | 1 oficial |
| 22 | Armado de andamio | Andamio tubular estándar | pieza | 1 peón | 1 peón |
| | | Tablas y blocks | pieza | 1 peón | 1 peón |
| 23 | Acarreo para curado | Cubeta | cubeta | 1 peón | 1 peón |
| 24 | Acarreo de puntales | A mano | pieza | 1 peón | 1 peón |
| 25 | Acarreo de bovedillas sobre la losa | A mano | pieza | No aplica | 1 oficial |
| 26 | Acarreo de acero habilitado | A mano | pieza | 1 peón | 1 peón |
| 27 | Acarreo de malla electrosoldada | A mano | pieza | No aplica | 1 peón |

Tabla A2. Registro de volumen de trabajo en el caso de análisis.

| Volumen de trabajo | | | | | |
|---------------------------|---------------------------------|---------------|---------------|--------------|------------------------------------|
| No. de Tarea | Tarea | Equipo | Unidad | Trabe | Losa de vigueta y bovedilla |
| 1 | Acarreo de cimbra | A mano | pieza | 4 piezas | 19 piezas |
| | | Carretilla | pieza | 4 piezas | 19 piezas |
| 2 | Cimbrado | Martillo | pieza | 4 piezas | No aplica |
| 3 | Acarreo de varillas de acero | Martillo | pieza | 7 piezas | |
| 4 | Corte de acero de refuerzo | Segueta | corte | 62 cortes | |
| | | Cizalla | corte | 62 cortes | |
| 5 | Doblado de acero de refuerzo | Dobladora | pieza | 62 piezas | |
| 6 | Habilitado de acero de refuerzo | Dobladora | dobles | 170 dobleces | |
| 7 | Colocación de acero de refuerzo | A mano | m | 6.40 m | 44.29 m |
| 8 | Acarreo de agregados y agua | Carretilla | cubeta | 396 cubetas | |
| | | Cubeta | cubeta | 396 cubetas | |
| 9 | Acarreo de sacos de cemento | A mano | pieza | 26 piezas | |
| | | Carretilla | pieza | 26 piezas | |
| 10 | Preparación de concreto | Revolvedora | cubeta | 260 cubetas | |
| | | Pala | cubeta | 260 cubetas | |
| 11 | Acarreo de concreto | Cubeta | cubeta | 260 cubetas | |

Continuación Tabla A2.

| Volumen de trabajo | | | | | |
|--------------------|------------------------|---------------------------------------|----------------|---------------------|-----------------------------|
| No. de Tarea | Tarea | Equipo | Unidad | Trabe | Losa de vigueta y bovedilla |
| 12 | Colocación de concreto | Llana | cubeta | 260 cubetas | |
| | | Concreto premezclado colado sin bomba | cubeta | 260 cubetas | |
| | | Concreto premezclado colado con bomba | cubeta | 260 cubetas | |
| 13 | Vibrado de concreto | Varilla | cubeta | 260 cubetas | |
| | | Vibrador de inmersión | cubeta | 260 cubetas | |
| 14 | Curado de concreto | Cubeta | cubeta | 2 cubetas | 19 cubetas |
| | | Manguera | m ² | 1.10 m ² | 76.00 m ² |
| 15 | Acarreo de viguetas | A mano | pieza | No aplica | 31 piezas |
| 16 | Acarreo de bovedillas | A mano | pieza | No aplica | 438 piezas |
| | | Carretilla | pieza | No aplica | 438 piezas |
| 17 | Izado de viguetas | Escalera y soga | pieza | No aplica | 31 piezas |
| | | Grúa | pieza | No aplica | 31 piezas |
| 18 | Izado de bovedillas | Escalera | pieza | No aplica | 438 piezas |
| | | Cabrestante | pieza | No aplica | 438 piezas |
| 19 | Apuntalamiento | Polín de madera | pieza | 4 piezas | 60 piezas |
| | | Polín de metal | pieza | 4 piezas | 60 piezas |

Continuación Tabla A2.

| Volumen de trabajo | | | | | |
|---------------------------|-------------------------------------|--------------------------|----------------|--------------|------------------------------------|
| No. de Tarea | Tarea | Equipo | Unidad | Trabe | Losa de vigueta y bovedilla |
| 20 | Cimbrado perimetral | Martillo | pieza | No aplica | 19 piezas |
| 21 | Colocación de malla electrosoldada | Martillo | m ² | No aplica | 76.00 m2 |
| 22 | Armado de andamio | Andamio tubular estándar | pieza | 2 piezas | 20 piezas |
| | | Tablas y blocks | pieza | 2 piezas | 20 piezas |
| 23 | Acarreo para curado | Cubeta | cubeta | 2 cubetas | 19 cubetas |
| 24 | Acarreo de puntales | A mano | pieza | 4 piezas | 60 piezas |
| 25 | Acarreo de bovedillas sobre la losa | A mano | pieza | No aplica | 438 piezas |
| 26 | Acarreo de acero habilitado | A mano | pieza | 9 piezas | 11 piezas |
| 27 | Acarreo de malla electrosoldada | A mano | pieza | No aplica | 1 pieza |

APÉNDICE B. RECOLECCIÓN DE DATOS EN CAMPO DE LAS PRODUCTIVIDADES DE LAS TAREAS DE TRABE Y LOSA DE VIGUETA Y BOVEDILLA

Tabla B1. Datos recolectados en campo de la tarea de acarreo de cimbra a mano.

| 1. Acarreo de cimbra | | | | |
|-----------------------------|----------------------------|------------------------------|--|---|
| Concepto de trabajo: | | | Trabe y Losa de vigueta y bovedilla | |
| Equipo: | | | A mano | |
| Cantidad de mediciones: | | | 50 mediciones | |
| Cantidad (Q _i): | Recurso (N _i): | Distancia (L _i): | Duración en minutos (D _{2i}): | Productividad (P _{2i}): |
| 2 piezas | 1 peón | 13.00 m | 0.52, 0.55, 0.53, 0.50, 0.52, 0.50, 0.53, 0.52, 0.52, 0.55, 0.55, 0.58, 0.50, 0.53, 0.52, 0.55, 0.55, 0.53, 0.50, 0.58, 0.55, 0.53, 0.53, 0.57, 0.53, 0.50, 0.47, 0.50, 0.47, 0.50, 0.48, 0.50, 0.52, 0.57, 0.48, 0.48, 0.50, 0.52, 0.52, 0.52, 0.50, 0.52, 0.50, 0.53, 0.53, 0.55, 0.55, 0.57, 0.55, 0.55. | 7.74, 7.27, 7.50, 8.00, 7.74, 8.00, 7.50, 7.74, 7.74, 7.27, 7.27, 6.86, 8.00, 7.50, 7.74, 7.27, 7.27, 7.50, 8.00, 6.86, 7.27, 7.50, 7.50, 7.06, 7.50, 8.00, 8.57, 8.00, 8.57, 8.00, 8.28, 8.00, 7.74, 7.06, 8.28, 8.28, 8.00, 7.74, 7.74, 7.74, 8.00, 7.74, 8.00, 7.50, 7.50, 7.27, 7.27, 7.06, 7.27, 7.27. |

Tabla B2. Datos recolectados en campo de la tarea de acarreo de cimbra con carretilla.

| 1. Acarreo de cimbra | | | | |
|----------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|--|--|
| Concepto de trabajo: | | | Trabe y Losa de vigueta y bovedilla | |
| Equipo: | | | Carretilla | |
| Cantidad de mediciones: | | | 50 mediciones | |
| Cantidad (Q_i): | Recurso (N_i): | Distancia (L_i): | Duración en minutos (D_{2i}): | Productividad (P_{2i}): |
| 2 piezas | 1 peón | 13.00 m | 0.87, 0.97, 0.78, 0.87, 0.80, | 30.00, 26.90, 33.19, |
| | | | 0.78, 0.67, 0.73, 0.72, 0.75, | 30.00, 32.50, 33.19, |
| | | | 0.80, 0.77, 0.78, 0.78, 0.73, | 39.00, 35.45, 36.28, |
| | | | 0.78, 0.70, 0.80, 0.68, 0.78, | 34.67, 32.50, 33.91, |
| | | | 0.68, 0.77, 0.67, 0.78, 0.70, | 33.19, 33.19, 35.45, |
| | | | 0.83, 0.73, 0.75, 0.72, 0.77, | 33.19, 37.14, 32.50, |
| | | | 0.73, 0.82, 0.77, 0.82, 0.75, | 38.05, 33.19, 38.05, |
| | | | 0.75, 0.85, 0.80, 0.80, 0.78, | 33.91, 39.00, 33.19, |
| | | | 0.85, 0.80, 0.80, 0.77, 0.78, | 37.14, 31.20, 35.45, |
| | | | 0.82, 0.83, 0.80, 0.80, 0.75. | 34.67, 36.28, 33.91, |
| | | | | 35.45, 31.84, 33.91, |
| | | | | 31.84, 34.67, 34.67, |
| | | | | 30.59, 32.50, 32.50, |
| | | | | 33.19, 30.59, 32.50, |
| | | | | 32.50, 33.91, 33.19, |
| | | | | 31.84, 31.20, 32.50, |
| | | | | 32.50, 34.67. |

Tabla B3. Datos recolectados en campo de la tarea de cimbrado con martillo.

| 2. Cimbrado | | | | |
|-----------------------------|----------------------------|---|-----------------------------------|--|
| Concepto de trabajo: | | Trabe | | |
| Equipo: | | Martillo | | |
| Cantidad de mediciones: | | 96 mediciones | | |
| Cantidad (Q _i): | Recurso (N _i): | Duración en minutos (D _{1i}): | Productividad (P _{1i}): | |
| 1 pieza | 1 oficial | 40.82, 32.15, 22.22, 22.22, 26.67, | 0.02, 0.03, 0.05, 0.05, 0.04, | |
| | | 24.44, 20.00, 40.00, 42.22, 16.67, | 0.04, 0.05, 0.03, 0.02, 0.06, | |
| | | 16.67, 20.00, 15.00, 18.33, 18.33, | 0.06, 0.05, 0.07, 0.05, 0.05, | |
| | | 30.00, 23.33, 31.67, 20.00, 15.00, | 0.03, 0.04, 0.03, 0.05, 0.07, | |
| | | 25.00, 15.00, 18.33, 15.00, 18.33, | 0.04, 0.07, 0.05, 0.07, 0.05, | |
| | | 15.00, 23.33, 18.33, 28.33, 16.67, | 0.07, 0.04, 0.05, 0.04, 0.06, | |
| | | 23.33, 25.00, 16.67, 15.00, 18.33, | 0.04, 0.04, 0.06, 0.07, 0.05, | |
| | | 15.00, 15.00, 15.00, 21.67, 26.67, | 0.07, 0.07, 0.07, 0.05, 0.04, | |
| | | 21.67, 31.67, 26.67, 20.00, 21.67, | 0.05, 0.03, 0.04, 0.05, 0.05, | |
| | | 31.67, 20.00, 15.00, 18.33, 28.33, | 0.03, 0.05, 0.07, 0.05, 0.04, | |
| | | 18.33, 15.00, 21.67, 23.33, 16.67, | 0.05, 0.07, 0.05, 0.04, 0.06, | |
| | | 28.33, 28.33, 23.33, 28.33, 23.33, | 0.04, 0.04, 0.04, 0.04, 0.04, | |
| | | 28.33, 16.67, 26.67, 23.33, 31.67, | 0.04, 0.06, 0.04, 0.04, 0.03, | |
| | | 23.33, 31.67, 28.33, 31.67, 15.00, | 0.04, 0.03, 0.04, 0.03, 0.07, | |
| | | 23.33, 33.33, 26.67, 20.00, 18.33, | 0.04, 0.03, 0.04, 0.05, 0.05, | |
| | | 31.67, 26.67, 30.00, 26.67, 28.33, | 0.03, 0.04, 0.03, 0.04, 0.04, | |
| | | 23.33, 30.00, 30.00, 23.33, 26.67, | 0.04, 0.03, 0.03, 0.04, 0.04, | |
| | | 30.00, 25.00, 30.00, 20.00, 49.69, | 0.03, 0.04, 0.03, 0.05, 0.02, | |
| | | 43.48, 38.82, 51.24, 43.48, 59.01, | 0.02, 0.03, 0.02, 0.02, 0.02, | |
| | | 65.22. | 0.02. | |

Tabla B4. Datos recolectados en campo de la tarea de acarreo de varillas de acero a mano.

| 3. Acarreo de varillas de acero | | | | | |
|--|---------------------------------|-----------------------------------|--|---|--|
| Concepto de trabajo: | | | Trabe y Losa de vigueta y bovedilla | | |
| Equipo: | | | A mano | | |
| Cantidad de mediciones: | | | 50 mediciones | | |
| Cantidad (Q_i): | Recurso (N_i): | Distancia (L_i): | Duración en minutos (D_{2i}): | Productividad (P_{2i}): | |
| 2 piezas | 1 peón | 13.00 m | 0.53, 0.60, 0.57, 0.58, 0.55, 0.58, 0.62, 0.60, 0.60, 0.63, 0.63, 0.62, 0.63, 0.63, 0.60, 0.62, 0.62, 0.63, 0.63, 0.63, 0.63, 0.62, 0.65, 0.62, 0.65, 0.65, 0.65, 0.68, 0.63, 0.62, 0.68, 0.65, 0.65, 0.63, 0.67, 0.62, 0.67, 0.68, 0.67, 0.65, 0.65, 0.62, 0.67, 0.62, 0.65, 0.62, 0.65, 0.65, 0.67, 0.63. | 48.75, 43.33, 45.88, 44.57, 47.27, 44.57, 42.16, 43.33, 43.33, 41.05, 41.05, 42.16, 41.05, 41.05, 43.33, 42.16, 42.16, 41.05, 41.05, 41.05, 41.05, 42.16, 40.00, 42.16, 40.00, 40.00, 40.00, 38.05, 41.05, 42.16, 38.05, 40.00, 40.00, 41.05, 39.00, 42.16, 39.00, 38.05, 39.00, 40.00, 40.00, 42.16, 39.00, 42.16, 40.00, 42.16, 40.00, 40.00, 39.00, 41.05. | |

Tabla B5. Datos recolectados en campo de la tarea de corte de acero de refuerzo con segueta.

| 4. Corte de acero de refuerzo | | | |
|--------------------------------------|---------------------------------|---|---|
| Concepto de trabajo: | | Trabe | |
| Equipo: | | Segueta | |
| Cantidad de mediciones: | | 30 mediciones | |
| Cantidad (Q_i): | Recurso (N_i): | Duración en minutos (D1_i): | Productividad (P1_i): |
| 1 corte | 1 oficial | 0.53, 0.55, 0.25, 0.55, 0.67, 0.72, 0.68, 0.70, 0.63, 0.62, 0.52, 0.58, 0.57, 0.53, 0.52, 0.57, 0.57, 0.55, 0.65, 0.57, 0.58, 0.60, 0.62, 0.52, 0.58, 0.57, 0.53, 0.53, 0.55, 0.67. | 1.88, 1.82, 1.82, 1.82, 1.50, 1.40, 1.46, 1.43, 1.58, 1.62, 1.94, 1.71, 1.76, 1.88, 1.94, 1.76, 1.76, 1.82, 1.54, 1.76, 1.71, 1.67, 1.62, 1.94, 1.71, 1.76, 1.88, 1.88, 1.82, 1.50. |

Tabla B6. Datos recolectados en campo de la tarea de corte de acero de refuerzo con cizalla.

| 4. Corte de acero de refuerzo | | | |
|--------------------------------------|---------------------------------|---|--|
| Concepto de trabajo: | | Trabe | |
| Equipo: | | Cizalla | |
| Cantidad de mediciones: | | 45 mediciones | |
| Cantidad (Q_i): | Recurso (N_i): | Duración en minutos (D1_i): | Productividad (P1_i): |
| 1 corte | 1 oficial | 0.13, 0.10, 0.10, 0.08, 0.18, 0.12, 0.17, 0.40, 0.12, 0.22, 0.17, 0.47, 0.17, 0.22, 0.23, 0.23, 0.20, 0.27, 0.23, 0.27, 0.20, 0.38, 0.23, 0.32, 0.18, 0.23, 0.27, 0.42, 0.38, 0.17, 0.17, 0.23, 0.22, 0.28, 0.20, 0.37, 0.25, 0.20, 0.38, 0.17, 0.25, 0.18, 0.20. | 7.50, 10.00, 10.00, 12.00, 5.45, 8.57, 6.00, 2.50, 8.57, 4.62, 6.00, 2.14, 6.00, 4.62, 4.29, 4.29, 5.00, 3.75, 4.29, 3.75, 5.00, 2.61, 4.29, 3.16, 5.45, 4.29, 3.75, 2.40, 2.61, 6.00, 6.00, 4.29, 4.62, 3.53, 5.00, 2.73, 4.00, 5.00, 2.61, 6.00, 4.00, 5.45, 5.00. |

Tabla B7. Datos recolectados en campo de la tarea de doblado de acero de refuerzo con dobladora.

| 5. Doblado de acero de refuerzo | | | |
|--|---------------------------------|---|---|
| Concepto de trabajo: | | Trabe | |
| Equipo: | | Dobladora | |
| Cantidad de mediciones: | | 51 mediciones | |
| Cantidad (Q_i): | Recurso (N_i): | Duración en minutos (D_{1i}): | Productividad (P_{1i}): |
| 1 pieza | 1 oficial | 0.82, 0.75, 0.70, 0.68, 0.65, 0.75, 0.57, 0.55, 0.58, 0.80, 0.58, 0.65, 0.60, 0.72, 0.50, 0.52, 0.65, 0.53, 0.48, 0.55, 0.55, 0.67, 0.70, 0.58, 0.50, 0.50, 0.53, 0.52, 0.43, 0.53, 0.52, 0.53, 0.60, 0.55, 0.57, 0.52, 0.53, 0.73, 0.57, 0.72, 0.70, 0.57, 0.52, 0.60, 0.57, 0.58, 0.63, 0.50, 0.53, 0.60, 0.60. | 1.22, 1.33, 1.43, 1.46, 1.54, 1.33, 1.76, 1.82, 1.71, 1.25, 1.71, 1.54, 1.67, 1.40, 2.00, 1.94, 1.54, 1.88, 2.07, 1.82, 1.82, 1.50, 1.43, 1.71, 2.00, 2.00, 1.88, 1.94, 2.31, 1.88, 1.94, 1.88, 1.67, 1.82, 1.76, 1.94, 1.88, 1.36, 1.76, 1.40, 1.43, 1.76, 1.94, 1.67, 1.76, 1.71, 1.58, 2.00, 1.88, 1.67, 1.67. |

Tabla B8. Datos recolectados en campo de la tarea de habilitado de acero de refuerzo con dobladora.

| 6. Habilitado de acero de refuerzo | | | |
|---|---------------------------------|---|---|
| Concepto de trabajo: | | Trabe | |
| Equipo: | | Dobladora | |
| Cantidad de mediciones: | | 50 mediciones | |
| Cantidad (Q_i): | Recurso (N_i): | Duración en minutos (D_{1i}): | Productividad (P_{1i}): |
| 5 dobleces | 1 oficial | 0.83, 0.95, 0.78, 0.65, 0.72, 0.72, 0.82, 0.92, 0.67, 0.60, 0.65, 0.77, 0.67, 0.62, 0.58, 0.73, 0.62, 0.78, 0.70, 0.80, 0.82, 0.63, 0.82, 0.67, 0.72, 0.68, 0.62, 0.67, 0.85, 0.57, 0.62, 0.73, 0.58, 1.07, 1.07, 0.85, 0.73, 0.85, 0.85, 0.85, 0.53, 0.62, 0.68, 0.67, 0.55, 0.65, 0.68, 0.63, 0.65, 0.78. | 6.00, 5.26, 6.38, 7.69, 6.98, 6.98, 6.12, 5.45, 7.50, 8.33, 7.69, 6.52, 7.50, 8.11, 8.57, 6.82, 8.11, 6.38, 7.14, 6.25, 6.12, 7.89, 6.12, 7.50, 6.98, 7.32, 8.11, 7.50, 5.88, 8.82, 8.11, 6.82, 8.57, 4.69, 4.69, 5.88, 6.82, 5.88, 5.88, 5.88, 9.38, 8.11, 7.32, 7.50, 9.09, 7.69, 7.32, 7.89, 7.69, 6.38. |

Tabla B9. Datos recolectados en campo de la tarea de colocación de acero de refuerzo a mano.

| 7. Colocación de acero de refuerzo | | | |
|---|---------------------------------|---|--|
| Concepto de trabajo: | | Trabe | |
| Equipo: | | A mano | |
| Cantidad de mediciones: | | 70 mediciones | |
| Cantidad (Q_i): | Recurso (N_i): | Duración en minutos (D_{1i}): | Productividad (P_{1i}): |
| 1.00 m | 1 oficial | 1.00, 2.00, 1.00, 3.00, 1.00, 3.00, 1.00, 3.00, 1.00, 1.00, 3.00, 1.00, 1.00, 1.00, 3.00, 4.00, 3.00. | 1.00, 0.50, 1.00, 0.33, 1.00, 0.33, 1.00, 0.33, 1.00, 1.00, 0.33, 1.00, 1.00, 1.00, 0.33, 0.25, 0.33. |
| 1.20 m | 1 oficial | 2.00, 3.00, 3.00, 4.50. | 0.60, 0.40, 0.40, 0.27. |
| 1.60 m | 1 oficial | 5.00, 1.00, 1.00, 2.00, 2.00, 3.00, 4.00, 1.00, 5.00, 5.00, 5.00, 3.00, 3.00, 4.00, 4.00, 2.00, 4.00, 2.00, 4.00, 5.00. | 0.32, 0.80, 0.80, 0.53, 0.40, 0.32, 0.32, 0.32, 0.53, 0.53, 0.40, 0.40, 0.80, 0.40, 0.80, 0.40, 0.32. |
| 1.80 m | 1 oficial | 3.00, 4.00. | 0.60, 0.45. |
| 2.00 m | 1 oficial | 1.50, 1.20, 2.00, 3.00, 4.00, 1.00, 2.00, 2.00, 4.00, 2.00, 4.00, 2.00, 3.00, 5.00, 1.00, 1.00, 5.00, 2.00, 5.00, 4.00, 3.00, 4.00, 4.00, 1.00, 3.00, 1.00, 5.00. | 0.67, 0.50, 1.00, 1.00, 0.50, 1.00, 0.50, 1.00, 0.67, 0.40, 0.40, 1.00, 0.40, 0.50, 0.67, 0.50, 0.50, 0.67, 0.40. |

Tabla B10. Datos recolectados en campo de la tarea de acarreo de agregados y agua con carretilla.

| 8. Acarreo de agregados y agua | | | | |
|---------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|--|--|
| Concepto de trabajo: | | | Trabe y Losa de vigueta y bovedilla | |
| Equipo: | | | Carretilla | |
| Cantidad de mediciones: | | | 39 mediciones | |
| Cantidad (Q_i): | Recurso (N_i): | Distancia (L_i): | Duración en minutos (D_{2i}): | Productividad (P_{2i}): |
| 11 cubetas | 1 peón | 20.00 m | 4.27, 2.24, 1.81, 2.12, 2.15, 2.34, 4.82, 3.25, 2.33, 3.08, 3.92, 2.28, 7.61, 2.35, 4.69, 8.96, 6.34, 2.28, 1.44, 1.91, 3.20, 1.93, 1.80, 2.14, 3.40, 2.62, 1.78, 1.69, 2.78, 3.94, 2.35, 1.94, 1.66, 2.68, 2.90, 3.68, 4.50, 2.78, 2.58. | 51.50, 98.04, 121.41, 103.58, 102.42, 94.02, 45.61, 67.65, 94.50, 71.34, 56.07, 96.49, 28.92, 93.54, 46.89, 24.54, 34.72, 96.49, 152.78, 115.30, 68.66, 113.87, 122.22, 103.00, 64.78, 84.10, 123.87, 130.02, 79.02, 55.89, 93.54, 113.17, 132.85, 82.21, 75.76, 59.72, 48.89, 79.02, 85.27. |

Tabla B11. Datos recolectados en campo de la tarea de acarreo de agregados y agua con cubeta.

| 8. Acarreo de agregados y agua | | | | |
|---------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|---|---|
| Concepto de trabajo: | | | Trabe y Losa de vigueta y bovedilla | |
| Equipo: | | | Cubeta | |
| Cantidad de mediciones: | | | 37 mediciones | |
| Cantidad (Q_i): | Recurso (N_i): | Distancia (L_i): | Duración en minutos (D_{2i}): | Productividad (P_{2i}): |
| 1 cubeta | 1 peón | 3.50 m | 0.33, 0.30, 0.35. | 2.63, 2.69, 2.59. |
| 1 cubeta | 1 peón | 5.00 m | 0.58, 0.52, 0.55, 0.67, 0.73, 0.37, 0.38, 0.50, 0.55, 0.48, 0.48, 0.47, 0.57, 0.48, 0.42, 0.40, 0.55, 0.55, 0.52, 0.43. | 3.16, 3.30, 3.23, 3.00, 2.88, 3.66, 3.61, 3.33, 3.23, 3.37, 3.37, 3.41, 3.19, 3.37, 3.53, 3.57, 3.23, 3.23, 3.30, 3.49. |
| 1 cubeta | 1 peón | 7.00 m | 0.72, 0.77, 0.62, 0.77, 0.48, 0.80, 0.60, 0.58, 0.60, 0.58, 0.62, 0.65, 0.68. | 4.07, 3.95, 4.32, 3.95, 4.73, 3.89, 4.38, 4.43, 4.38, 4.43, 4.32, 4.24, 4.17. |
| 1 cubeta | 1 peón | 13.50 m | 0.95. | 6.92. |

Tabla B12. Datos recolectados en campo de la tarea de acarreo de sacos de cemento a mano.

| 9. Acarreo de sacos de cemento | | | | |
|---------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|--|--|
| Concepto de trabajo: | | | Trabe y Losa de vigueta y bovedilla | |
| Equipo: | | | A mano | |
| Cantidad de mediciones: | | | 30 mediciones | |
| Cantidad (Q_i): | Recurso (N_i): | Distancia (L_i): | Duración en minutos (D_{2i}): | Productividad (P_{2i}): |
| 1 pieza | 1 peón | 6.00 m | 0.30, 0.30. | 20.00, 20.00. |
| 1 pieza | 1 peón | 8.00 m | 0.28, 0.24, 0.24, 0.25, 0.24, 0.30, 0.32, 0.27, 0.24, 0.24, 0.30, 0.43, 0.30, 0.26, 0.28, 0.29, 0.41, 0.26, 0.26, 0.45, 0.27, 0.35, 0.25, 0.34, 0.64, 0.33, 0.24, 0.27, 0.29, 0.26. | 28.40, 32.88, 33.57, 32.21, 33.10, 27.12, 25.00, 29.63, 34.04, 33.10, 26.82, 18.46, 26.67, 30.97, 28.57, 27.75, 19.51, 30.77, 31.37, 17.84, 29.81, 23.08, 31.58, 23.53, 12.53, 24.37, 34.04, 30.19, 27.43, 30.97. |
| 1 pieza | 1 peón | 25.00 m | 1.00, 0.98. | 25.00, 25.42. |

Tabla B13. Datos recolectados en campo de la tarea de acarreo de sacos de cemento con carretilla.

| 9. Acarreo de sacos de cemento | | | | |
|---------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|--|--|
| Concepto de trabajo: | | Trabe y Losa de vigueta y bovedilla | | |
| Equipo: | | Carretilla | | |
| Cantidad de mediciones: | | 30 mediciones | | |
| Cantidad (Q_i): | Recurso (N_i): | Distancia (L_i): | Duración en minutos (D_{2i}): | Productividad (P_{2i}): |
| 5 piezas | 1 peón | 20.00 m | 4.27, 4.82, 3.25, 2.33, 3.08, 3.92, 1.52, 7.61, 4.69, 8.96, 6.34, 3.20, 2.14, 3.40, 2.62, 2.78, 3.94, 2.35, 1.94, 2.63, 2.68, 2.90, 3.68, 4.50, 2.78, 2.46, 2.58, 4.27, 4.27, 4.27. | 23.41, 20.73, 30.75, 42.96, 32.43, 25.48, 65.62, 13.14, 21.31, 11.16, 15.78, 31.21, 46.82, 29.45, 38.23, 35.92, 25.41, 42.52, 51.44, 38.05, 37.37, 34.44, 27.14, 22.22, 35.92, 40.65, 38.76, 23.41, 23.41, 23.41. |

Tabla B14. Datos recolectados en campo de la tarea de preparación de concreto con revolvedora.

| 10. Preparación de concreto | | | |
|------------------------------------|---------------------------------|---|--|
| Concepto de trabajo: | | Trabe y Losa de vigueta y bovedilla | |
| Equipo: | | Revolvedora | |
| Cantidad de mediciones: | | 37 mediciones | |
| Cantidad (Q_i): | Recurso (N_i): | Duración en minutos (D_{1i}): | Productividad (P_{1i}): |
| 13 cubetas | 1 oficial | 5.05, 4.63, 4.26, 4.80, 4.65, 3.95, 2.66, 5.15, 3.06, 3.05, 3.00, 3.77, 3.26, 2.52, 2.63, 2.66, 2.44, 3.29, 1.89, 2.57, 5.06, 2.71, 4.91, 4.71, 2.70, 3.68, 3.94, 1.98, 3.48, 4.76, 2.87, 2.85, 1.94, 3.18, 3.96, 4.69, 4.51. | 2.57, 2.81, 3.05, 2.71, 2.80, 3.29, 4.89, 2.52, 4.25, 4.26, 4.33, 3.45, 3.99, 5.16, 4.94, 4.90, 5.33, 3.95, 6.87, 5.05, 2.57, 4.80, 2.65, 2.76, 4.82, 3.53, 3.30, 6.56, 3.73, 2.73, 4.53, 4.56, 6.70, 4.09, 3.28, 2.77, 2.88. |

Tabla B15. Datos recolectados en campo de la tarea de preparación de concreto con pala.

| 10. Preparación de concreto | | | |
|------------------------------------|---------------------------------|---|---|
| Concepto de trabajo: | | Trabe y Losa de vigueta y bovedilla | |
| Equipo: | | Pala | |
| Cantidad de mediciones: | | 50 mediciones | |
| Cantidad (Q_i): | Recurso (N_i): | Duración en minutos (D_{1i}): | Productividad (P_{1i}): |
| 5 cubetas | 1 oficial | 2.49, 2.01, 3.75, 2.90, 2.72, 3.20, 4.00, 2.06, 3.07, 3.12, 3.50, 4.10, 3.50, 3.00, 3.34, 2.90, 3.50, 3.00, 2.80, 3.24, 3.36, 3.90, 4.00, 4.30, 2.50, 3.20, 2.80, 2.60, 3.10, 3.60, 3.10, 3.20, 3.10, 3.10, 3.20, 4.00, 3.90, 3.80, 3.90, 3.50, 4.00, 3.00, 2.70, 2.90, 3.00, 3.00, 3.90, 4.00, 3.65, 3.46. | 2.01, 2.49, 1.33, 1.72, 1.84, 1.56, 1.25, 2.43, 1.63, 1.60, 1.43, 1.22, 1.43, 1.67, 1.50, 1.72, 1.43, 1.67, 1.79, 1.54, 1.49, 1.28, 1.25, 1.16, 2.00, 1.56, 1.79, 1.92, 1.61, 1.39, 1.61, 1.56, 1.61, 1.61, 1.56, 1.25, 1.28, 1.32, 1.28, 1.43, 1.25, 1.67, 1.85, 1.72, 1.67, 1.67, 1.28, 1.25, 1.37, 1.45. |

Tabla B16. Datos recolectados en campo de la tarea de acarreo de concreto con cubeta.

| 11. Acarreo de concreto | | | | | | | | | | |
|----------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|--|-------|-------|--|-------|-------|-------|-------|
| Concepto de trabajo: | | | Trabe y Losa de vigueta y bovedilla | | | | | | | |
| Equipo: | | | Cubeta | | | | | | | |
| Cantidad de mediciones: | | | 50 mediciones | | | | | | | |
| Cantidad (Q_i): | Recurso (N_i): | Distancia (L_i): | Duración en minutos (D_{2i}): | | | Productividad (P_{2i}): | | | | |
| 1 cubeta | 1 peón | 3.50 m | 0.50, | 0.57, | 0.68, | 7.00, | 6.18, | 5.12, | 5.12, | 4.38, |
| | | | 0.68, | 0.80, | 0.72, | 4.88, | 4.77, | 4.67, | 4.88, | 5.00, |
| | | | 0.73, | 0.75, | 0.72, | 5.25, | 5.00, | 4.67, | 4.47, | 4.67, |
| | | | 0.70, | 0.67, | 0.70, | 7.00, | 7.50, | 6.18, | 6.77, | 6.36, |
| | | | 0.75, | 0.78, | 0.75, | 6.36, | 6.18, | 4.29, | 5.00, | 5.00, |
| | | | 0.50, | 0.47, | 0.57, | 5.12, | 5.12, | 4.88, | 5.00, | 4.88, |
| | | | 0.52, | 0.55, | 0.55, | 4.77, | 4.67, | 5.12, | 5.00, | 4.77, |
| | | | 0.57, | 0.82, | 0.70, | 5.00, | 5.12, | 5.00, | 5.12, | 4.77, |
| | | | 0.70, | 0.68, | 0.68, | 5.00, | 5.00, | 5.12, | 4.77, | 5.12, |
| | | | 0.72, | 0.70, | 0.72, | 5.12, | 5.12, | 5.00, | 4.88, | 4.77 |
| | | | 0.73, | 0.75, | 0.68, | | | | | |
| | | | 0.70, | 0.73, | 0.70, | | | | | |
| | | | 0.68, | 0.70, | 0.68, | | | | | |
| | | | 0.73, | 0.70, | 0.70, | | | | | |
| | | | 0.68, | 0.73, | 0.68, | | | | | |
| | | | 0.68, | 0.68, | 0.70, | | | | | |
| | | | 0.72, | 0.73, | | | | | | |

Tabla B17. Datos recolectados en campo de la tarea de colocación de concreto con llana.

| 12. Colocación de concreto | | | | | |
|-----------------------------------|---------------------------------|--|-------------------------------|--|--|
| Concepto de trabajo: | | Trabe y Losa de vigueta y bovedilla | | | |
| Equipo: | | Llana | | | |
| Cantidad de mediciones: | | 47 mediciones | | | |
| Cantidad (Q_i): | Recurso (N_i): | Duración en minutos (D_{1i}): | | | Productividad (P_{1i}): |
| 16 cubetas | 1 oficial | 8.00, 12.00, 9.00, 11.00, 11.00, | 2.00, 1.33, 1.78, 1.45, 1.45, | | |
| | | 8.00, 10.00, 15.00, 12.00, 9.00, | 2.00, 1.60, 1.07, 1.33, 1.78, | | |
| | | 9.00, 12.00, 12.00, 9.00, 11.00, | 1.78, 1.33, 1.33, 1.78, 1.45, | | |
| | | 10.00, 10.00, 13.00, 10.00, 15.00, | 1.60, 1.60, 1.23, 1.60, 1.07, | | |
| | | 11.00, 10.00, 9.00, 11.00, 14.00, | 1.45, 1.60, 1.78, 1.45, 1.14, | | |
| | | 12.00, 10.00, 14.00, 11.00, 14.00, | 1.33, 1.60, 1.14, 1.45, 1.14, | | |
| | | 8.00, 8.00, 11.00, 11.00, 13.00, | 2.00, 2.00, 1.45, 1.45, 1.23, | | |
| | | 11.00, 13.00, 11.00, 13.00, 14.00, | 1.45, 1.23, 1.45, 1.23, 1.14, | | |
| | | 9.00, 14.00, 15.00, 10.00, 12.00, | 1.78, 1.14, 1.07, 1.60, 1.33, | | |
| | | 13.00, 10.00. | 1.23, 1.60. | | |
| 26 cubetas | 1 oficial | 9.00, 6.00, 9.00. | 2.89, 4.33, 2.89. | | |

Tabla B18. Datos recolectados en campo de la tarea de colocación de concreto con concreto premezclado colado con bomba.

| 12. Colocación de concreto | | | |
|-----------------------------------|---------------------------------|---|---|
| Concepto de trabajo: | | Trabe y Losa de vigueta y bovedilla | |
| Equipo: | | Concreto premezclado colado con bomba | |
| Cantidad de mediciones: | | 46 mediciones | |
| Cantidad (Q_i): | Recurso (N_i): | Duración en minutos (D_{1i}): | Productividad (P_{1i}): |
| 369 cubetas | 3 oficiales | 27.33, 6.96, 13.92, 13.92, 7.01, 11.68, 8.07, 8.07, 6.05, 8.07, 6.05, 10.08, 11.18, 9.78, 8.39, 7.63, 8.91, 11.45, 8.91, 19.85, 7.01, 15.18, 25.69, 17.52, 12.84, 16.35, 9.68, 13.99, 20.44, 12.91, 16.14, 11.83, 10.76, 7.00, 7.00, 13.00, 9.00, 15.00, 7.00, 15.00, 8.00, 11.00, 6.00, 7.00, 12.00, 9.00. | 4.50, 17.67, 8.83, 8.83, 17.56, 10.53, 15.25, 15.25, 20.33, 15.25, 20.33, 12.20, 11.00, 12.57, 14.67, 16.11, 13.81, 10.74, 13.81, 6.20, 17.56, 8.10, 4.79, 7.02, 9.58, 7.52, 12.70, 8.79, 6.02, 9.53, 7.62, 10.39, 11.43, 17.57, 17.57, 9.46, 13.67, 8.20, 17.57, 8.20, 15.38, 11.18, 20.50, 17.57, 10.25, 13.67. |

Tabla B19. Datos recolectados en campo de la tarea de vibrado de concreto con varilla.

| 13. Vibrado de concreto | | | |
|----------------------------------|---------------------------------|---|---|
| Concepto de trabajo: | | Trabe y Losa de vigueta y bovedilla | |
| Equipo: | | Varilla | |
| Cantidad de mediciones: | | 35 mediciones | |
| Cantidad (Q_i): | Recurso (N_i): | Duración en minutos (D_{1i}): | Productividad (P_{1i}): |
| 1 cubeta | 1 peón | 0.35, 0.37, 0.23, 0.20, 0.20, 0.20, 0.22, 0.20, 0.20, 0.22, 0.22, 0.20, 0.20, 0.18, 0.20, 0.22, 0.20, 0.20, 0.20, 0.17, 0.15, 0.20, 0.20, 0.20, 0.22, 0.20, 0.22, 0.22, 0.22, 0.20, 0.20, 0.20, 0.20, 0.20. | 2.86, 2.73, 4.29, 5.00, 5.00, 5.00, 4.62, 5.00, 5.00, 4.62, 4.62, 5.00, 5.00, 5.45, 5.00, 4.62, 5.00, 5.00, 5.00, 6.00, 6.67, 5.00, 5.00, 5.00, 4.62, 5.00, 4.62, 4.62, 4.62, 5.00, 5.00, 5.00, 5.00, 5.00. |

Tabla B20. Datos recolectados en campo de la tarea de vibrado de concreto con vibrador de inmersión.

| 13. Vibrado de concreto | | | | |
|----------------------------------|---------------------------------|--|-------------------------------|--|
| Concepto de trabajo: | | Trabe y Losa de vigueta y bovedilla | | |
| Equipo: | | Vibrador de inmersión | | |
| Cantidad de mediciones: | | 30 mediciones | | |
| Cantidad (Q_i): | Recurso (N_i): | Duración en minutos (D_{1i}): | | Productividad (P_{1i}): |
| 369 cubetas | 1 oficial + 1 peón | 68.33, 90.51, 76.58, 72.40, | 2.70, 2.04, 2.41, 2.55, 1.76, | |
| | | 105.09, 29.92, 33.91, 73.80, | 6.17, 5.44, 2.50, 4.02, 3.56, | |
| | | 45.88, 51.86, 37.74, 32.15, 26.56, | 4.89, 5.74, 6.95, 5.80, 6.90, | |
| | | 31.81, 26.72, 50.90, 76.34, 38.17, | 3.63, 2.42, 4.83, 5.10, 3.43, | |
| | | 36.20, 53.72, 28.03, 46.71, 34.00, | 6.58, 3.95, 5.43, 7.10, 5.44, | |
| | | 26.00, 33.91, 73.80, 45.88, 51.86, | 2.50, 4.02, 3.56, 4.89, 5.74. | |
| | | 37.74, 32.15. | | |

Tabla B21. Datos recolectados en campo de la tarea de curado de concreto con cubeta.

| 14. Curado de concreto | | | | |
|----------------------------------|---------------------------------|--|-------------------------------|--|
| Concepto de trabajo: | | Trabe | | |
| Equipo: | | Cubeta | | |
| Cantidad de mediciones: | | 37 mediciones | | |
| Cantidad (Q_i): | Recurso (N_i): | Duración en minutos (D_{1i}): | | Productividad (P_{1i}): |
| 1 cubeta | 1 peón | 0.50, 0.47, 0.50, 0.50, 0.45, 0.49, | 2.00, 2.15, 2.00, 2.00, 2.23, | |
| | | 0.50, 0.51, 0.50, 0.50, 0.46, 0.45, | 2.03, 2.01, 1.96, 2.00, 1.98, | |
| | | 0.50, 0.46, 0.47, 0.49, 0.49, 0.46, | 2.16, 2.22, 2.02, 2.17, 2.13, | |
| | | 0.49, 0.49, 0.49, 0.48, 0.48, 0.48, | 2.06, 2.03, 2.16, 2.06, 2.05, | |
| | | 0.49, 0.49, 0.44, 0.50, 0.49, 0.43, | 2.06, 2.10, 2.09, 2.10, 2.02, | |
| | | 0.47, 0.50, 0.46, 0.50, 0.51, 0.51, | 2.03, 2.27, 2.01, 2.02, 2.31, | |
| | | 0.58. | 2.11, 2.02, 2.17, 2.02, 1.98, | |
| | | | 1.97, 1.72. | |

Nota: Los datos recolectados en campo de la tarea de curado de concreto se dividieron en tablas diferentes debido a que el proceso para cada concepto de trabajo (Trabe y Colado de vigueta y bovedilla) era distinto.

Tabla B22. Datos recolectados en campo de la tarea de curado de concreto con cubeta.

| 14. Curado de concreto | | | |
|----------------------------------|---------------------------------|---|--|
| Concepto de trabajo: | | Losa de vigueta y bovedilla | |
| Equipo: | | Cubeta | |
| Cantidad de mediciones: | | 39 mediciones | |
| Cantidad (Q_i): | Recurso (N_i): | Duración en minutos (D_{1i}): | Productividad (P_{1i}): |
| 1 cubeta | 1 peón | 0.25, 0.28, 0.22, 0.23, 0.23, 0.21, 0.21, 0.24, 0.20, 0.21, 0.23, 0.24, 0.25, 0.24, 0.23, 0.24, 0.23, 0.22, 0.25, 0.21, 0.23, 0.23, 0.21, 0.25, 0.25, 0.22, 0.23, 0.23, 0.25, 0.21, 0.22, 0.26, 0.22, 0.21, 0.22, 0.25, 0.25, 0.25, 0.24. | 4.00, 3.53, 4.62, 4.29, 4.29, 4.67, 4.78, 4.22, 4.90, 4.81, 4.44, 4.10, 4.08, 4.26, 4.27, 4.15, 4.44, 4.50, 3.97, 4.72, 4.33, 4.42, 4.76, 4.05, 4.02, 4.63, 4.29, 4.29, 3.95, 4.72, 4.46, 3.89, 4.50, 4.69, 4.52, 4.00, 3.94, 4.02, 4.24. |

Nota: Los datos recolectados en campo de la tarea de curado de concreto se dividieron en tablas diferentes debido a que el proceso para cada concepto de trabajo (Trabe y Colado de vigueta y bovedilla) era distinto.

Tabla B23. Datos recolectados en campo de la tarea de curado de concreto con manguera.

| 14. Curado de concreto | | | |
|-----------------------------|----------------------------|---|---|
| Concepto de trabajo: | | Trabe | |
| Equipo: | | Manguera | |
| Cantidad de mediciones: | | 39 mediciones | |
| Cantidad (Q _i): | Recurso (N _i): | Duración en minutos (D _{1i}): | Productividad (P _{1i}): |
| 4.29 m ² | 1 peón | 1.75, 1.53, 1.65, 1.56, 1.72, 1.62, 1.54, 1.54, 1.75, 1.62, 1.53, 1.74, 1.64, 1.70, 1.67, 1.75, 1.55, 1.62, 1.72, 1.55, 1.74, 1.53, 1.59, 1.53, 1.53, 1.66, 1.63, 1.75, 1.53, 1.55, 1.58, 1.55, 1.65, 1.60, 1.54, 1.54, 1.75, 1.70, 1.67. | 2.45, 2.80, 2.60, 2.75, 2.50, 2.65, 2.79, 2.79, 2.45, 2.65, 2.80, 2.47, 2.62, 2.53, 2.57, 2.45, 2.77, 2.64, 2.50, 2.78, 2.46, 2.80, 2.71, 2.80, 2.80, 2.58, 2.63, 2.45, 2.80, 2.77, 2.72, 2.76, 2.60, 2.69, 2.79, 2.79, 2.45, 2.53, 2.58. |

Nota: Los datos recolectados en campo de la tarea de curado de concreto se dividieron en tablas diferentes debido a que el proceso para cada concepto de trabajo (Trabe y Colado de vigueta y bovedilla) era distinto.

Tabla B24. Datos recolectados en campo de la tarea de curado de concreto con manguera.

| 14. Curado de concreto | | | |
|-----------------------------|----------------------------|--|---|
| Concepto de trabajo: | | Losa de vigueta y bovedilla | |
| Equipo: | | Manguera | |
| Cantidad de mediciones: | | 35 mediciones | |
| Cantidad (Q _i): | Recurso (N _i): | Duración en minutos (D _{1i}): | Productividad (P _{1i}): |
| 5.18 m ² | 1 peón | 1.83, 1.60, 1.58, 1.75, 1.55, 1.55, 1.56, 1.57, 1.55, 1.55, 1.62, 1.62, 1.55, 1.83, 1.68, 1.62, 1.78, 1.57, 1.72, 1.55, 1.57, 1.55, 1.55, 1.58, 1.55, 1.57, 1.60, 1.55, 1.57, 1.67, 1.57, 1.55, 1.56, 1.67, 1.80, | 2.82, 3.24, 3.27, 2.96, 3.34, 3.34, 3.33, 3.30, 3.34, 3.34, 3.19, 3.20, 3.34, 2.82, 3.08, 3.20, 2.91, 3.29, 3.01, 3.33, 3.30, 3.33, 3.34, 3.27, 3.34, 3.29, 3.24, 3.34, 3.30, 3.10, 3.29, 3.34, 3.31, 3.10, 2.87. |

Nota: Los datos recolectados en campo de la tarea de curado de concreto se dividieron en tablas diferentes debido a que el proceso para cada concepto de trabajo (Trabe y Colado de vigueta y bovedilla) era distinto.

Tabla B25. Datos recolectados en campo de la tarea de acarreo de viguetas a mano.

| 15. Acarreo de viguetas | | | | |
|----------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|--|---|
| Concepto de trabajo: | | | Losa de vigueta y bovedilla | |
| Equipo: | | | A mano | |
| Cantidad de mediciones: | | | 41 mediciones | |
| Cantidad (Q_i): | Recurso (N_i): | Distancia (L_i): | Duración en minutos (D_{2i}): | Productividad (P_{2i}): |
| 1 pieza | 2 peones | 15.00 m | 2.86, 2.14, 2.14, 2.14, 3.57. | 2.63, 3.50, 3.50, 3.50, 2.10. |
| 1 pieza | 2 peones | 18.00 m | 5.48, 1.43, 1.48, 1.80, 2.03, 1.40, 1.68, 1.38, 2.50, 10.71, 2.86, 2.86, 1.79, 2.50, 3.57, 2.86, 2.50, 2.14, 2.14. | 1.64, 6.28, 6.07, 5.00, 4.43, 6.43, 5.35, 6.51, 3.60, 0.84, 3.15, 3.15, 5.04, 3.60, 2.52, 3.15, 3.60, 4.20, 4.20. |
| 1 pieza | 2 peones | 20.00 m | 4.29, 4.29, 3.57, 3.71, 3.93, 3.57, 3.21, 2.86, 3.21, 4.64, 4.29. | 2.33, 2.33, 2.80, 2.69, 2.55, 2.80, 3.11, 3.50, 3.11, 2.15, 2.33. |
| 1 pieza | 2 peones | 25.00 m | 5.00. | 2.50. |
| 1 pieza | 2 peones | 30.00 m | 5.00, 3.93, 4.29, 3.93, 4.29. | 3.00, 3.82, 3.50, 3.82, 3.50. |

Tabla B26. Datos recolectados en campo de la tarea de acarreo de bovedillas a mano.

| 16. Acarreo de bovedillas | | | | | | |
|----------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|--|--|--------|--------|
| Concepto de trabajo: | | | Losa de vigueta y bovedilla | | | |
| Equipo: | | | A mano | | | |
| Cantidad de mediciones: | | | 50 mediciones | | | |
| Cantidad (Q_i): | Recurso (N_i): | Distancia (L_i): | Duración en minutos (D_{2i}): | Productividad (P_{2i}): | | |
| 2 piezas | 1 peón | 13.00 m | 0.42, 0.48, 0.48, 0.48, 0.45, | 62.40, | 53.79, | 53.79, |
| | | | 0.53, 0.55, 0.60, 0.55, 0.57, | 53.79, | 57.78, | 48.75, |
| | | | 0.57, 0.52, 0.50, 0.53, 0.52, | 47.27, | 43.33, | 47.27, |
| | | | 0.53, 0.52, 0.52, 0.53, 0.60, | 45.88, | 45.88, | 50.32, |
| | | | 0.55, 0.58, 0.53, 0.60, 0.55, | 52.00, | 48.75, | 50.32, |
| | | | 0.55, 0.52, 0.55, 0.52, 0.47, | 48.75, | 50.32, | 50.32, |
| | | | 0.45, 0.52, 0.53, 0.60, 0.50, | 48.75, | 43.33, | 47.27, |
| | | | 0.48, 0.55, 0.57, 0.57, 0.62, | 44.57, | 48.75, | 43.33, |
| | | | 0.55, 0.55, 0.53, 0.55, 0.55, | 47.27, | 47.27, | 50.32, |
| | | | 0.58, 0.55, 0.55, 0.53, 0.55. | 47.27, | 50.32, | 55.71, |
| | | | | 47.27, | 50.32, | 55.71, |
| | | | | 57.78, | 50.32, | 48.75, |
| | | | | 43.33, | 52.00, | 53.79, |
| | | | | 47.27, | 45.88, | 45.88, |
| | | | | 42.16, | 47.27, | 47.27, |
| | | | | 48.75, | 47.27, | 47.27, |
| | | | | 44.57, | 47.27, | 47.27, |
| | | | | 48.75, | 47.27, | 47.27, |

Tabla B27 Datos recolectados en campo de la tarea de acarreo de bovedillas con carretilla.

| 16. Acarreo de bovedillas | | | | |
|----------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|--|--|
| Concepto de trabajo: | | | Losa de vigueta y bovedilla | |
| Equipo: | | | Carretilla | |
| Cantidad de mediciones: | | | 50 mediciones | |
| Cantidad (Q_i): | Recurso (N_i): | Distancia (L_i): | Duración en minutos (D_{2i}): | Productividad (P_{2i}): |
| 5 piezas | 1 peón | 3.00 m | 1.42, 4.71. | 10.59, 3.18 |
| 6 piezas | 1 peón | 3.00 m | 2.50. | 7.20. |
| 7 piezas | 1 peón | 3.00 m | 2.68, 2.98. | 7.84, 7.05. |
| 10 piezas | 1 peón | 3.00 m | 1.28. | 23.38. |
| 11 piezas | 1 peón | 3.00 m | 2.47. | 13.38. |
| 2 piezas | 1 peón | 5.00 m | 2.35. | 4.26. |
| 5 piezas | 1 peón | 5.00 m | 2.30. | 10.87. |
| 6 piezas | 1 peón | 5.00 m | 2.12, 2.65, 3.58. | 14.18, 11.32, 8.37. |
| 7 piezas | 1 peón | 5.00 m | 2.00, 2.52, 3.12, 3.17, 3.23, 4.45. | 17.50, 13.91, 11.23, 11.05, 10.83, 7.87. |
| 8 piezas | 1 peón | 5.00 m | 2.70. | 14.81. |
| 9 piezas | 1 peón | 5.00 m | 2.65, 2.85, 2.87, 3.26, 3.42, 3.87, 4.45. | 16.98, 15.79, 15.70, 13.80, 13.17, 11.64, 10.11. |
| 10 piezas | 1 peón | 5.00 m | 2.95, 2.98, 4.03. | 16.95, 16.76, 12.41. |
| 11 piezas | 1 peón | 5.00 m | 1.75, 2.42, 3.26, 3.63, 3.65, 3.72, 3.87. | 31.43, 22.76, 16.87, 15.14, 15.07, 14.80, 14.23. |
| 12 piezas | 1 peón | 5.00 m | 3.03. | 19.80. |
| 13 piezas | 1 peón | 5.00 m | 3.25. | 20.00. |
| 6 piezas | 1 peón | 10.00 m | 4.52. | 13.29. |
| 7 piezas | 1 peón | 10.00 m | 6.52, 8.80. | 10.74, 7.95. |
| 8 piezas | 1 peón | 10.00 m | 3.17, 5.93. | 25.27, 13.49. |
| 11 piezas | 1 peón | 10.00 m | 6.25. | 17.60. |
| 12 piezas | 1 peón | 10.00 m | 5.47, 12.45. | 21.95, 9.64. |
| 13 piezas | 1 peón | 10.00 m | 4.28, 5.45, 6.70. | 30.37, 23.85. |
| 12 piezas | 1 peón | 15.00 m | 10.57. | 17.04. |

Tabla B28. Datos recolectados en campo de la tarea de izado de viguetas con escalera y sogá.

| 17. Izado de viguetas | | | |
|----------------------------------|---------------------------------|--|--|
| Concepto de trabajo: | | Losa de vigueta y bovedilla | |
| Equipo: | | Escalera y sogá | |
| Cantidad de mediciones: | | 41 mediciones | |
| Cantidad (Q_i): | Recurso (N_i): | Duración en minutos (D_{1i}): | Productividad (P_{1i}): |
| 1 pieza | 1 oficial + 1 peón | 2.02, 5.48, 3.17, 1.68, 1.70, 2.38, | 0.25, 0.09, 0.16, 0.30, |
| | | 1.67, 1.63, 1.38, 1.32, 2.55, 5.33, | 0.29, 0.21, 0.30, 0.31, |
| | | 4.83, 2.00, 2.33, 3.45, 2.23, 2.60, | 0.36, 0.38, 0.20, 0.09, |
| | | 1.70, 3.82, 1.22, 0.83, 0.67, 0.87, | 0.10, 0.25, 0.21, 0.14, |
| | | 0.67, 0.53, 0.60, 0.45, 0.47, 1.25, | 0.22, 0.19, 0.29, 0.13, |
| | | 0.83, 1.42, 1.43, 1.78, 0.72, 1.10, | 0.41, 0.60, 0.75, 0.58, |
| | | 1.00, 1.47, 1.38, 1.45, 1.60. | 0.75, 0.94, 0.83, 1.11, |
| | | | 1.07, 0.40, 0.60, 0.35, |
| | | | 0.35, 0.28, 0.70, 0.45, |
| | | | 0.50, 0.34, 0.36, 0.34, |
| | 0.31. | | |

Tabla B29. Datos recolectados en campo de la tarea de izado de viguetas con grúa.

| 17. Izado de viguetas | | | |
|----------------------------------|---------------------------------|---|---|
| Concepto de trabajo: | | Losa de vigueta y bovedilla | |
| Equipo: | | Grúa | |
| Cantidad de mediciones: | | 50 mediciones | |
| Cantidad (Q_i): | Recurso (N_i): | Duración en minutos (D_{1i}): | Productividad (P_{1i}): |
| 1 pieza | 2 oficiales + 2 peones | 7.15, 7.88, 7.80, 11.02, 9.03, 10.22, 7.52, 6.92, 6.70, 7.97, 9.32, 9.15, 6.27, 6.18, 8.50, 7.45, 6.72, 6.62, 7.30, 5.00, 5.35, 7.50, 6.78, 5.60, 5.33, 5.77, 4.85, 5.43, 5.68, 5.20, 4.90, 5.22, 5.65, 5.15, 5.68, 5.83, 6.50. | 0.03, 0.03, 0.03, 0.02, 0.03, 0.02, 0.03, 0.04, 0.04, 0.03, 0.03, 0.03, 0.04, 0.04, 0.03, 0.03, 0.04, 0.04, 0.03, 0.05, 0.05, 0.03, 0.04, 0.04, 0.05, 0.04, 0.05, 0.05, 0.04, 0.05, 0.05, 0.05, 0.04, 0.05, 0.04, 0.05, 0.04, 0.04, 0.04. |
| 2 piezas | 2 oficiales + 2 peones | 9.07, 9.17, 8.93, 7.53, 10.47, 10.68, 5.82, 5.37, 7.00. | 0.06, 0.05, 0.06, 0.07, 0.05, 0.05, 0.09, 0.09, 0.07. |
| 3 piezas | 2 oficiales + 2 peones | 6.80, 8.78, 8.37, 5.18. | 0.11, 0.09, 0.09, 0.14. |

Tabla B30. Datos recolectados en campo de la tarea de izado de bovedillas con escalera.

| 18. Izado de bovedillas | | | |
|----------------------------------|---------------------------------|--|---|
| Concepto de trabajo: | | Losa de vigueta y bovedilla | |
| Equipo: | | Escalera | |
| Cantidad de mediciones: | | 60 mediciones | |
| Cantidad (Q_i): | Recurso (N_i): | Duración en minutos (D_{1i}): | Productividad (P_{1i}): |
| 1 pieza | 2 oficiales | 0.75, 1.00, 0.50, 0.88, 1.13, 0.63, 0.70, 0.80, 0.80, 0.90, 0.58, 0.75, 0.67, 0.75, 0.43, 0.71, 1.00, 0.43, 0.61, 0.93, 0.43, 0.79, 0.50, 0.71, 0.86, 0.93, 0.71, 0.57, 1.00, 0.50, 0.88, 0.75, 0.44, 0.56, 0.88, 0.75, 0.88, 0.81, 0.81, 0.88, 0.88, 0.83, 0.61, 0.39, 0.78, 0.78, 0.50, 0.61, 0.72, 0.39, 0.70, 0.45, 0.60, 0.50, 0.60, 0.75, 0.75, 0.70, 0.50, 0.82. | 0.67, 0.50, 1.00, 0.57, 0.44, 0.79, 0.71, 0.63, 0.63, 0.56, 0.86, 0.67, 0.75, 0.67, 1.16, 0.70, 0.50, 1.16, 0.82, 0.54, 1.16, 0.63, 1.00, 0.70, 0.58, 0.54, 0.70, 0.88, 0.50, 1.00, 0.57, 0.67, 1.14, 0.89, 0.57, 0.67, 0.57, 0.62, 0.62, 0.57, 0.57, 0.60, 0.82, 1.28, 0.64, 0.64, 1.00, 0.82, 0.69, 1.28, 0.71, 1.11, 0.83, 1.00, 0.83, 0.67, 0.67, 0.71, 1.00, 0.61. |

Tabla B31. Datos recolectados en campo de la tarea de izado de bovedillas con cabrestante.

| 18. Izado de bovedillas | | | |
|----------------------------------|---------------------------------|---|---|
| Concepto de trabajo: | | Losa de vigueta y bovedilla | |
| Equipo: | | Cabrestante | |
| Cantidad de mediciones: | | 50 mediciones | |
| Cantidad (Q_i): | Recurso (N_i): | Duración en minutos (D_{1i}): | Productividad (P_{1i}): |
| 6 piezas | 2 oficiales | 4.16. | 0.72. |
| 10 piezas | 2 oficiales | 2.98, 2.61, 3.06, 3.03, 3.15, 3.83, 2.86, 2.75, 4.26, 3.50, 2.98, 3.78, 3.16, 3.06, 4.86, 4.53, 3.06, 3.11, 3.46, 3.75, 2.75. | 1.68, 1.92, 1.63, 1.65, 1.59, 1.31, 1.75, 1.82, 1.17, 1.43, 1.68, 1.32, 1.58, 1.63, 1.03, 1.10, 1.63, 1.61, 1.45, 1.33, 1.82. |
| 11 piezas | 2 oficiales | 2.21, 1.95, 2.03, 2.28, 2.48, 2.56, 2.46, 2.25, 2.18, 2.50, 2.50, 3.28. | 2.49, 2.82, 2.71, 2.41, 2.22, 2.15, 2.24, 2.44, 2.52, 2.20, 2.20, 1.68. |
| 12 piezas | 2 oficiales | 4.23, 3.06, 3.51, 3.18, 3.63, 2.20, 2.08. | 1.42, 1.96, 1.71, 1.89, 1.65, 2.73, 2.88. |
| 14 piezas | 2 oficiales | 2.28. | 3.07. |
| 17 piezas | 2 oficiales | 4.75, 3.33, 2.40, 2.76, 2.98, 3.06, 3.48. | 1.79, 2.55, 3.54, 3.08, 2.85, 2.78, 2.44. |
| 18 piezas | 2 oficiales | 3.05. | 2.95. |

Tabla B32. Datos recolectados en campo de la tarea de apuntalamiento con polín de madera.

| 19. Apuntalamiento | | | |
|----------------------------------|---------------------------------|---|---|
| Concepto de trabajo: | | Trabe y Losa de vigueta y bovedilla | |
| Equipo: | | Polín de madera | |
| Cantidad de mediciones: | | 32 mediciones | |
| Cantidad (Q_i): | Recurso (N_i): | Duración en minutos (D_{1i}): | Productividad (P_{1i}): |
| 1 pieza | 1 oficial | 1.76, 1.98, 2.64, 1.64, 2.45, 2.16, 1.76, 2.31, 2.38, 1.94, 1.76, 1.64, 2.01, 1.98, 2.19, 2.60, 2.56, 2.41, 2.60, 2.23, 1.83, 1.83, 2.01, 1.99, 1.74, 1.48, 2.39, 1.59, 1.69, 1.96, 2.55, 1.60. | 0.57, 0.51, 0.38, 0.61, 0.41, 0.46, 0.57, 0.43, 0.42, 0.52, 0.57, 0.61, 0.50, 0.51, 0.46, 0.38, 0.39, 0.41, 0.38, 0.45, 0.55, 0.55, 0.50, 0.50, 0.57, 0.68, 0.42, 0.63, 0.59, 0.51, 0.39, 0.63. |

Tabla B33. Recolección de datos de la tarea de apuntalamiento con polín de metal.

| 19. Apuntalamiento | | | |
|----------------------------------|---------------------------------|---|---|
| Concepto de trabajo: | | Trabe y Losa de vigueta y bovedilla | |
| Equipo: | | Polín de metal | |
| Cantidad de mediciones: | | 50 mediciones | |
| Cantidad (Q_i): | Recurso (N_i): | Duración en minutos (D_{1i}): | Productividad (P_{1i}): |
| 1 pieza | 1 oficial | 1.68, 1.70, 1.63, 1.67, 1.73, 1.67, 1.63, 1.83, 1.68, 1.67, 1.67, 1.68, 1.70, 1.68, 1.73, 1.72, 1.62, 1.67, 1.68, 1.70, 1.67, 1.67, 1.63, 1.67, 1.70, 1.72, 1.83, 1.85, 1.62, 1.70, 1.64, 1.63, 1.66, 1.70, 1.73, 1.72, 1.71, 1.67, 1.69, 1.87, 1.69, 1.63, 1.87, 1.65, 1.70, 1.74, 1.68, 1.63, 1.58, 1.69. | 0.59, 0.59, 0.61, 0.60, 0.58, 0.60, 0.61, 0.55, 0.59, 0.60, 0.60, 0.59, 0.59, 0.59, 0.58, 0.58, 0.62, 0.60, 0.59, 0.59, 0.60, 0.60, 0.61, 0.60, 0.59, 0.58, 0.55, 0.54, 0.62, 0.59, 0.61, 0.61, 0.60, 0.59, 0.58, 0.58, 0.58, 0.60, 0.59, 0.53, 0.59, 0.61, 0.53, 0.61, 0.59, 0.57, 0.60, 0.61, 0.63, 0.59. |

Tabla B34. Datos recolectados en campo de la tarea de cimbrado perimetral con martillo.

| 20. Cimbrado perimetral | | | |
|----------------------------------|---------------------------------|---|---|
| Concepto de trabajo: | | Losa de vigueta y bovedilla | |
| Equipo: | | Martillo | |
| Cantidad de mediciones: | | 31 mediciones | |
| Cantidad (Q_i): | Recurso (N_i): | Duración en minutos (D_{1i}): | Productividad (P_{1i}): |
| 1 pieza | 1 peón | 2.00, 3.00, 3.00, 4.00, 4.00, 3.00, 2.00, 1.00, 3.00, 1.50, 5.00, 2.00, 4.00, 2.00, 2.00, 4.00, 4.00, 2.00, 4.00, 3.00, 3.00, 4.00, 2.00, 2.00, 1.00, 5.00, 4.00, 2.00, 5.00, 5.00, 2.00. | 0.50, 0.33, 0.33, 0.25, 0.25, 0.33, 0.50, 1.00, 0.33, 0.67, 0.20, 0.50, 0.25, 0.50, 0.50, 0.25, 0.25, 0.50, 0.25, 0.33, 0.33, 0.25, 0.50, 0.50, 1.00, 0.20, 0.25, 0.50, 0.20, 0.20, 0.50. |

Tabla B35. Datos recolectados en campo de la tarea de colocación de malla electrosoldada con martillo.

| 21. Colocación de malla electrosoldada | | | |
|---|---------------------------------|---|---|
| Concepto de trabajo: | | Losa de vigueta y bovedilla | |
| Equipo: | | Martillo | |
| Cantidad de mediciones: | | 32 mediciones | |
| Cantidad (Q_i): | Recurso (N_i): | Duración en minutos (D_{1i}): | Productividad (P_{1i}): |
| 58.00 m ² | 1 persona | 5.60, 3.80, 6.20, 3.00, 3.40, 4.40, 5.00, 4.00, 5.20, 5.60, 4.60, 7.00, 5.40, 5.60, 5.60, 6.40, 6.20, 6.60, 6.60, 5.40. | 10.36, 15.26, 9.35, 19.33, 17.06, 13.18, 11.60, 14.50, 11.15, 10.36, 12.61, 8.29, 10.74, 10.36, 10.36, 9.06, 9.35, 8.79, 8.79, 10.74. |
| 79.00 m ² | 1 persona | 10.00, 7.00, 7.00, 9.50, 9.00, 1.30, 7.30, 10.00, 7.80, 8.00, 7.30, 8.50. | 7.90, 11.29, 11.29, 8.32, 8.78, 60.77, 10.82, 7.90, 10.13, 9.88, 10.82, 9.29. |

Tabla B36. Datos recolectados en campo de la tarea de armado de andamio con andamio tubular estándar.

| 22. Armado de andamio | | | |
|----------------------------------|---------------------------------|---|---|
| Concepto de trabajo: | | Trabe y Losa de vigueta y bovedilla | |
| Equipo: | | Andamio tubular estándar | |
| Cantidad de mediciones: | | 50 mediciones | |
| Cantidad (Q_i): | Recurso (N_i): | Duración en minutos (D_{1i}): | Productividad (P_{1i}): |
| 1 pieza | 1 peón | 1.28, 1.40, 1.45, 1.38, 1.45, 1.38, 1.42, 1.65, 1.30, 1.37, 1.20, 1.38, 1.40, 1.38, 1.27, 1.40, 1.25, 1.27, 1.22, 1.32, 1.35, 1.28, 1.22, 1.17, 1.32, 1.18, 1.18, 1.15, 1.12, 1.25, 1.25, 1.20, 1.23, 1.13, 1.12, 1.17, 1.12, 1.20, 1.17, 1.13, 1.12, 1.25, 1.18, 1.15, 1.12, 1.20, 1.37, 1.10, 1.22, 1.08. | 0.78, 0.71, 0.69, 0.72, 0.69, 0.72, 0.71, 0.61, 0.77, 0.73, 0.83, 0.72, 0.71, 0.72, 0.79, 0.71, 0.80, 0.79, 0.82, 0.76, 0.74, 0.78, 0.82, 0.86, 0.76, 0.85, 0.85, 0.87, 0.90, 0.80, 0.80, 0.83, 0.81, 0.88, 0.90, 0.86, 0.90, 0.83, 0.86, 0.88, 0.90, 0.80, 0.85, 0.87, 0.90, 0.83, 0.73, 0.91, 0.82, 0.92. |

Tabla B38. Datos recolectados en campo de la tarea de acarreo para curado con cubeta.

| 23. Acarreo para curado | | | | |
|----------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|---|---|
| Concepto de trabajo: | | | Trabe y Losa de vigueta y bovedilla | |
| Equipo: | | | Cubeta | |
| Cantidad de mediciones: | | | 37 mediciones | |
| Cantidad (Q_i): | Recurso (N_i): | Distancia (L_i): | Duración en minutos (D_{2i}): | Productividad (P_{2i}): |
| 1 cubeta | 1 peón | 3.50 m | 0.33, 0.30, 0.35. | 2.63, 2.69, 2.59. |
| 1 cubeta | 1 peón | 5.00 m | 0.58, 0.52, 0.55, 0.67, 0.73, 0.37, 0.38, 0.50, 0.55, 0.48, 0.48, 0.47, 0.57, 0.48, 0.42, 0.40, 0.55, 0.55, 0.52, 0.43. | 3.16, 3.30, 3.23, 3.00, 2.88, 3.66, 3.61, 3.33, 3.23, 3.37, 3.37, 3.41, 3.19, 3.37, 3.53, 3.57, 3.23, 3.23, 3.30, 3.49. |
| 1 cubeta | 1 peón | 7.00 m | 0.72, 0.77, 0.62, 0.77, 0.48, 0.80, 0.60, 0.58, 0.60, 0.58, 0.62, 0.65, 0.68. | 4.07, 3.95, 4.32, 3.95, 4.73, 3.89, 4.38, 4.43, 4.38, 4.43, 4.32, 4.24, 4.17. |
| 1 cubeta | 1 peón | 13.50 m | 0.95. | 6.92. |

Tabla B39. Datos recolectados en campo de la tarea de acarreo de puntales a mano.

| 24. Acarreo de puntales | | | | |
|----------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|--|---|
| Concepto de trabajo: | | | Trabe y Losa de vigueta y bovedilla | |
| Equipo: | | | A mano | |
| Cantidad de mediciones: | | | 50 mediciones | |
| Cantidad (Q_i): | Recurso (N_i): | Distancia (L_i): | Duración en minutos (D_{2i}): | Productividad (P_{2i}): |
| 2 piezas | 1 peón | 13.00 m | 0.52, 0.55, 0.53, 0.50, 0.52, 0.50, 0.53, 0.52, 0.52, 0.55, 0.55, 0.58, 0.50, 0.53, 0.52, 0.55, 0.55, 0.53, 0.50, 0.58, 0.55, 0.53, 0.53, 0.57, 0.53, 0.50, 0.47, 0.50, 0.47, 0.50, 0.48, 0.50, 0.52, 0.57, 0.48, 0.48, 0.50, 0.52, 0.52, 0.52, 0.50, 0.52, 0.50, 0.53, 0.53, 0.55, 0.55, 0.57, 0.55, 0.55. | 7.74, 7.27, 7.50, 8.00, 7.74, 8.00, 7.50, 7.74, 7.74, 7.27, 7.27, 6.86, 8.00, 7.50, 7.74, 7.27, 7.27, 7.50, 8.00, 6.86, 7.27, 7.50, 7.50, 7.06, 7.50, 8.00, 8.57, 8.00, 8.57, 8.00, 8.28, 8.00, 7.74, 7.06, 8.28, 8.28, 8.00, 7.74, 7.74, 7.74, 8.00, 7.74, 8.00, 7.50, 7.50, 7.27, 7.27, 7.06, 7.27, 7.27. |

Tabla B40. Datos recolectados en campo de la tarea de acarreo de bovedillas sobre la losa a mano.

| 25. Acarreo de bovedillas sobre la losa | | | | | | |
|--|---------------------------------|-----------------------------------|--|--|--------|--------|
| Concepto de trabajo: | | | Losa de vigueta y bovedilla | | | |
| Equipo: | | | A mano | | | |
| Cantidad de mediciones: | | | 50 mediciones | | | |
| Cantidad (Q_i): | Recurso (N_i): | Distancia (L_i): | Duración en minutos (D_{2i}): | Productividad (P_{2i}): | | |
| 2 piezas | 1 peón | 13.00 m | 0.42, 0.48, 0.48, 0.48, 0.45, | 62.40, | 53.79, | 53.79, |
| | | | 0.53, 0.55, 0.60, 0.55, 0.57, | 53.79, | 57.78, | 48.75, |
| | | | 0.57, 0.52, 0.50, 0.53, 0.52, | 47.27, | 43.33, | 47.27, |
| | | | 0.53, 0.52, 0.52, 0.53, 0.60, | 45.88, | 45.88, | 50.32, |
| | | | 0.55, 0.58, 0.53, 0.60, 0.55, | 52.00, | 48.75, | 50.32, |
| | | | 0.55, 0.52, 0.55, 0.52, 0.47, | 48.75, | 50.32, | 50.32, |
| | | | 0.45, 0.52, 0.53, 0.60, 0.50, | 48.75, | 43.33, | 47.27, |
| | | | 0.48, 0.55, 0.57, 0.57, 0.62, | 44.57, | 48.75, | 43.33, |
| | | | 0.55, 0.55, 0.53, 0.55, 0.55, | 47.27, | 47.27, | 50.32, |
| | | | 0.58, 0.55, 0.55, 0.53, 0.55. | 47.27, | 50.32, | 55.71, |
| | | | | 42.16, | 47.27, | 47.27, |
| | | | | 48.75, | 47.27, | 47.27, |
| | | | | 44.57, | 47.27, | 47.27, |
| | | | | 48.75, | 47.27, | 47.27, |

Tabla B41. Datos recolectados en campo de la tarea de acarreo de acero habilitado a mano.

| 26. Acarreo de acero habilitado | | | | | |
|--|---------------------------------|-----------------------------------|--|---|--|
| Concepto de trabajo: | | | Trabe y Losa de vigueta y bovedilla | | |
| Equipo: | | | A mano | | |
| Cantidad de mediciones: | | | 50 mediciones | | |
| Cantidad (Q_i): | Recurso (N_i): | Distancia (L_i): | Duración en minutos (D_{2i}): | Productividad (P_{2i}): | |
| 2 piezas | 1 peón | 13.00 m | 0.53, 0.60, 0.57, 0.58, 0.55, 0.58, 0.62, 0.60, 0.60, 0.63, 0.63, 0.62, 0.63, 0.63, 0.60, 0.62, 0.62, 0.63, 0.63, 0.63, 0.63, 0.62, 0.65, 0.62, 0.65, 0.65, 0.65, 0.68, 0.63, 0.62, 0.68, 0.65, 0.65, 0.63, 0.67, 0.62, 0.67, 0.68, 0.67, 0.65, 0.65, 0.62, 0.67, 0.62, 0.65, 0.62, 0.65, 0.65, 0.67, 0.63. | 48.75, 43.33, 45.88, 44.57, 47.27, 44.57, 42.16, 43.33, 43.33, 41.05, 41.05, 42.16, 41.05, 41.05, 43.33, 42.16, 42.16, 41.05, 41.05, 41.05, 41.05, 42.16, 40.00, 42.16, 40.00, 40.00, 40.00, 38.05, 41.05, 42.16, 38.05, 40.00, 40.00, 41.05, 39.00, 42.16, 39.00, 38.05, 39.00, 40.00, 40.00, 42.16, 39.00, 42.16, 40.00, 42.16, 40.00, 40.00, 39.00, 41.05. | |

Tabla B42. Datos recolectados en campo de la tarea de acarreo de malla electrosoldada a mano.

| 27. Acarreo de malla electrosoldada | | | | |
|--|---------------------------------|-----------------------------------|---|---|
| Concepto de trabajo: | | | Trabe y Losa de vigueta y bovedilla | |
| Equipo: | | | A mano | |
| Cantidad de mediciones: | | | 50 mediciones | |
| Cantidad (Q_i): | Recurso (N_i): | Distancia (L_i): | Duración en minutos (D_{2i}): | Productividad (P_{2i}): |
| 2 piezas | 1 peón | 13.00 m | 0.52, 0.55, 0.53, 0.50, 0.52, 0.50, 0.53, 0.52, 0.52, 0.55, 0.55, 0.58, 0.50, 0.53, 0.52, 0.55, 0.55, 0.53, 0.50, 0.58, 0.55, 0.53, 0.53, 0.57, 0.53, 0.50, 0.47, 0.50, 0.47, 0.50, 0.48, 0.50, 0.52, 0.57, 0.48, 0.48, 0.50, 0.52, 0.52, 0.52, 0.50, 0.52, 0.50, 0.53, 0.53, 0.55, 0.55, 0.57, 0.55, 0.55. | 7.74, 7.27, 7.50, 8.00, 7.74, 8.00, 7.50, 7.74, 7.74, 7.27, 7.27, 6.86, 8.00, 7.50, 7.74, 7.27, 7.27, 7.50, 8.00, 6.86, 7.27, 7.50, 7.50, 7.06, 7.50, 8.00, 8.57, 8.00, 8.57, 8.00, 8.28, 8.00, 7.74, 7.06, 8.28, 8.28, 8.00, 7.74, 7.74, 7.74, 8.00, 7.74, 8.00, 7.50, 7.50, 7.27, 7.27, 7.06, 7.27, 7.27. |

APÉNDICE C. CÁLCULO DE LAS DURACIONES DE LAS TAREAS DE TRABE Y LOSA DE VIGUETA Y BOVEDILLA DEL CASO DE ESTUDIO / ANÁLISIS

Tabla C1. Duraciones de la tarea de acarreo de cimbra a mano del caso de estudio/análisis (Trabe y Losa de vigueta y bovedilla).

| 1. Acarreo de cimbra | | | |
|---|---|-------------------------------------|-----------------------------------|
| Concepto de trabajo: | | Trabe y Losa de vigueta y bovedilla | |
| Equipo: | | A mano | |
| Volumen de obra (Q_j): | Unidades transportadas por ciclo (U_j) | Recurso (N_j): | Distancia (L_j): |
| 1 pieza | 2 piezas | 1 peón | 10.00 m |
| Duración en minutos (D_{4j}): | | | |
| 0.65, 0.69, 0.67, 0.63, 0.65, 0.63, 0.67, 0.65, 0.65, 0.69, 0.69, 0.73, 0.63, 0.67, 0.65, 0.69, 0.69, 0.67, 0.63, 0.73, 0.69, 0.67, 0.67, 0.71, 0.67, 0.63, 0.58, 0.63, 0.58, 0.63, 0.60, 0.63, 0.65, 0.71, 0.60, 0.60, 0.63, 0.65, 0.65, 0.65, 0.63, 0.65, 0.63, 0.67, 0.67, 0.69, 0.69, 0.71, 0.69, 0.69. | | | |

Tabla C2. Duraciones de la tarea de acarreo de cimbra a mano del caso de estudio/análisis (Trabe y Losa de vigueta y bovedilla).

| 1. Acarreo de cimbra | | | |
|---|---|-------------------------------------|-----------------------------------|
| Concepto de trabajo: | | Trabe y Losa de vigueta y bovedilla | |
| Equipo: | | Carretilla | |
| Volumen de obra (Q_j): | Unidades transportadas por ciclo (U_j) | Recurso (N_j): | Distancia (L_j): |
| 1 pieza | 2 piezas | 1 peón | 10.00 m |
| Duración en minutos (D_{4j}): | | | |
| 0.17, 0.19, 0.15, 0.17, 0.15, 0.15, 0.13, 0.14, 0.14, 0.14, 0.15, 0.15, 0.15, 0.15, 0.14, 0.15, 0.13, 0.15, 0.13, 0.15, 0.13, 0.15, 0.13, 0.15, 0.13, 0.16, 0.14, 0.14, 0.14, 0.15, 0.14, 0.16, 0.15, 0.16, 0.14, 0.14, 0.16, 0.15, 0.15, 0.15, 0.16, 0.15, 0.15, 0.15, 0.15, 0.16, 0.16, 0.15, 0.15, 0.14. | | | |

Tabla C3. Duraciones de la tarea de cimbrado con martillo del caso de estudio/análisis (Trabe).

| 2. Cimbrado | |
|---|---------------------------------|
| Concepto de trabajo: | Trabe |
| Equipo: | Martillo |
| Cantidad (Q_j): | Recurso (N_j): |
| 1 pieza | 1 oficial |
| Duración en minutos (D_{3j}): | |
| 40.82, 32.15, 22.22, 22.22, 26.67, 24.44, 20.00, 40.00, 42.22, 16.67, 16.67, 20.00, 15.00, 18.33, 18.33, 30.00, 23.33, 31.67, 20.00, 15.00, 25.00, 15.00, 18.33, 15.00, 18.33, 15.00, 23.33, 18.33, 28.33, 16.67, 23.33, 25.00, 16.67, 15.00, 18.33, 15.00, 15.00, 15.00, 21.67, 26.67, 21.67, 31.67, 26.67, 20.00, 21.67, 31.67, 20.00, 15.00, 18.33, 28.33, 18.33, 15.00, 21.67, 23.33, 16.67, 28.33, 28.33, 23.33, 28.33, 23.33, 28.33, 16.67, 26.67, 23.33, 31.67, 23.33, 31.67, 28.33, 31.67, 15.00, 23.33, 33.33, 26.67, 20.00, 18.33, 31.67, 26.67, 30.00, 26.67, 28.33, 23.33, 30.00, 30.00, 23.33, 26.67, 30.00, 25.00, 30.00, 20.00, 49.69, 43.48, 38.82, 51.24, 43.48, 59.01, 65.22. | |

Tabla C4. Duraciones de la tarea de acarreo de varillas de acero a mano del caso de estudio/análisis (Trabe y Losa de vigueta y bovedilla).

| 3. Acarreo de varillas de acero | | | |
|---|---|-------------------------------------|-----------------------------------|
| Concepto de trabajo: | | Trabe y Losa de vigueta y bovedilla | |
| Equipo: | | A mano | |
| Volumen de obra (Q_j): | Unidades transportadas por ciclo (U_j) | Recurso (N_j): | Distancia (L_j): |
| 1 pieza | 2 piezas | 1 peón | 10.00 m |
| Duración en minutos (D_{4j}): | | | |
| 0.10, 0.12, 0.11, 0.11, 0.11, 0.11, 0.12, 0.12, 0.12, 0.12, 0.12, 0.12, 0.12, 0.12, 0.12, 0.12, 0.12, 0.12, 0.12, 0.12, 0.12, 0.12, 0.12, 0.12, 0.13, 0.12, 0.13, 0.13, 0.13, 0.13, 0.12, 0.12, 0.13, 0.13, 0.13, 0.12, 0.13, 0.12, 0.13, 0.13, 0.13, 0.13, 0.13, 0.12, 0.13, 0.12, 0.13, 0.12, 0.13, 0.13, 0.13, 0.12. | | | |

Tabla C5. Duraciones de la tarea de corte de acero de refuerzo con segueta del caso de estudio/análisis (Trabe).

| 4. Corte de acero de refuerzo | |
|---|---------------------------------|
| Concepto de trabajo: | Trabe |
| Equipo: | Segueta |
| Cantidad (Q_j): | Recurso (N_j): |
| 1 corte | 1 oficial |
| Duración en minutos (D_{3j}): | |
| 0.53, 0.55, 0.55, 0.55, 0.67, 0.72, 0.68, 0.70, 0.63, 0.62, 0.52, 0.58, 0.57, 0.53, 0.52, 0.57, 0.57, 0.55, 0.65, 0.57, 0.58, 0.60, 0.62, 0.52, 0.58, 0.57, 0.53, 0.53, 0.55, 0.67. | |

Tabla C6. Duraciones de la tarea de corte de acero de refuerzo con cizalla del caso de estudio/análisis (Trabe).

| 4. Corte de acero de refuerzo | |
|---|---------------------------------|
| Concepto de trabajo: | Trabe |
| Equipo: | Cizalla |
| Cantidad (Q_j): | Recurso (N_j): |
| 1 corte | 1 oficial |
| Duración en minutos (D_{3j}): | |
| 0.13, 0.10, 0.10, 0.08, 0.18, 0.12, 0.17, 0.40, 0.12, 0.22, 0.17, 0.47, 0.17, 0.22, 0.23, 0.23, 0.20, 0.27, 0.23, 0.27, 0.20, 0.38, 0.23, 0.32, 0.18, 0.23, 0.27, 0.42, 0.38, 0.17, 0.17, 0.23, 0.22, 0.28, 0.20, 0.37, 0.25, 0.20, 0.38, 0.17, 0.25, 0.18, 0.20. | |

Tabla C7. Duraciones de la tarea de doblado de acero de refuerzo con dobladora del caso de estudio/análisis (Trabe).

| 5. Doblado de acero de refuerzo | |
|---|---------------------------------|
| Concepto de trabajo: | Trabe |
| Equipo: | Dobladora |
| Cantidad (Q_j): | Recurso (N_j): |
| 1 pieza | 1 oficial |
| Duración en minutos (D_{3j}): | |
| 0.82, 0.75, 0.70, 0.68, 0.65, 0.75, 0.57, 0.55, 0.58, 0.80, 0.58, 0.65, 0.60, 0.72, 0.50, 0.52, 0.65, 0.53, 0.48, 0.55, 0.55, 0.67, 0.70, 0.58, 0.50, 0.50, 0.53, 0.52, 0.43, 0.53, 0.52, 0.53, 0.60, 0.55, 0.57, 0.52, 0.53, 0.73, 0.57, 0.72, 0.70, 0.57, 0.52, 0.60, 0.57, 0.58, 0.63, 0.50, 0.53, 0.60, 0.60. | |

Tabla C8. Duraciones de la tarea de habilitado de acero de refuerzo con dobladora del caso de estudio/análisis estudio (Trabe).

| 6. Habilitado de acero de acero de refuerzo | |
|---|---------------------------------|
| Concepto de trabajo: | Trabe |
| Equipo: | Dobladora |
| Cantidad (Q_j): | Recurso (N_j): |
| 1 dobles | 1 oficial |
| Duración en minutos (D3_j): | |
| 0.82, 0.75, 0.70, 0.68, 0.65, 0.75, 0.57, 0.55, 0.58, 0.80, 0.58, 0.65, 0.60, 0.72, 0.50, 0.52, 0.65, 0.53, 0.48, 0.55, 0.55, 0.67, 0.70, 0.58, 0.50, 0.50, 0.53, 0.52, 0.43, 0.53, 0.52, 0.53, 0.60, 0.55, 0.57, 0.52, 0.53, 0.73, 0.57, 0.72, 0.70, 0.57, 0.52, 0.60, 0.57, 0.58, 0.63, 0.50, 0.53, 0.60, 0.60. | |

Tabla C9. Duraciones de la tarea de colocación de acero de refuerzo a mano del caso de estudio/análisis (Trabe y Losa de vigueta y bovedilla).

| 7. Colocación de acero de acero de refuerzo | |
|---|-------------------------------------|
| Concepto de trabajo: | Trabe y Losa de vigueta y bovedilla |
| Equipo: | A mano |
| Cantidad (Q_j): | Recurso (N_j): |
| 1.00 m | 1 oficial |
| Duración en minutos (D3_j): | |
| 1.00, 2.00, 1.00, 3.00, 1.00, 3.00, 1.00, 3.00, 1.00, 1.00, 3.00, 1.00, 1.00, 1.00, 3.00, 4.00, 3.00, 1.67, 2.50, 2.50, 3.75, 3.13, 0.63, 0.63, 1.25, 1.25, 1.88, 2.50, 0.63, 3.13, 3.13, 3.13, 1.88, 1.88, 2.50, 2.50, 1.25, 2.50, 1.25, 2.50, 3.13, 1.67, 2.22, 0.75, 0.60, 1.00, 1.50, 2.00, 0.50, 1.00, 1.00, 2.00, 1.00, 2.00, 1.00, 1.50, 2.50, 0.50, 0.50, 2.50, 1.00, 2.50, 2.00, 1.50, 2.00, 2.00, 0.50, 1.50, 0.50, 2.50. | |

Tabla C10. Duraciones de la tarea de acarreo de agregados y agua con carretilla del caso de estudio/análisis (Trabe y Losa de vigueta y bovedilla).

| 8. Acarreo de agregados y agua | | | |
|---|---|-------------------------------------|-----------------------------------|
| Concepto de trabajo: | | Trabe y Losa de vigueta y bovedilla | |
| Equipo: | | Carretilla | |
| Volumen de obra (Q_j): | Unidades transportadas por ciclo (U_j) | Recurso (N_j): | Distancia (L_j): |
| 1 cubeta | 11 cubetas | 1 peón | 10.00 m |
| Duración en minutos (D4_j): | | | |
| 0.19, 0.10, 0.08, 0.10, 0.10, 0.11, 0.22, 0.15, 0.11, 0.14, 0.18, 0.10, 0.35, 0.11, 0.21, 0.41, 0.29, 0.10, 0.07, 0.09, 0.15, 0.09, 0.08, 0.10, 0.15, 0.12, 0.08, 0.08, 0.13, 0.18, 0.11, 0.09, 0.08, 0.12, 0.13, 0.17, 0.20, 0.13, 0.12. | | | |

Tabla C11. Duraciones de la tarea de acarreo de agregados y agua con cubeta del caso de estudio/análisis (Trabe y Losa de vigueta y bovedilla).

| 8. Acarreo de agregados y agua | | | |
|---|---|-------------------------------------|-----------------------------------|
| Concepto de trabajo: | | Trabe y Losa de vigueta y bovedilla | |
| Equipo: | | Cubeta | |
| Volumen de obra (Q_j): | Unidades transportadas por ciclo (U_j) | Recurso (N_j): | Distancia (L_j): |
| 1 cubeta | 2 cubetas | 1 peón | 10.00 m |
| Duración en minutos (D4_j): | | | |
| 0.48, 0.43, 0.50, 0.58, 0.52, 0.55, 0.67, 0.73, 0.37, 0.38, 0.50, 0.55, 0.48, 0.48, 0.47, 0.57, 0.48, 0.42, 0.40, 0.55, 0.55, 0.52, 0.43, 0.51, 0.55, 0.44, 0.55, 0.34, 0.57, 0.43, 0.41, 0.43, 0.41, 0.44, 0.46, 0.49, 0.35. | | | |

Tabla C12. Duraciones de la tarea de acarreo de sacos de cemento a mano del caso de estudio/análisis (Trabe y Losa de vigueta y bovedilla).

| 9. Acarreo de sacos de cemento | | | |
|---|---|-------------------------------------|-----------------------------------|
| Concepto de trabajo: | | Trabe y Losa de vigueta y bovedilla | |
| Equipo: | | A mano | |
| Volumen de obra (Q_j): | Unidades transportadas por ciclo (U_j) | Recurso (N_j): | Distancia (L_j): |
| 1 pieza | 2 piezas | 1 peón | 10.00 m |
| Duración en minutos (D4_j): | | | |
| 0.25, 0.25, 0.18, 0.15, 0.15, 0.16, 0.15, 0.18, 0.20, 0.17, 0.15, 0.15, 0.19, 0.27, 0.19, 0.16, 0.18, 0.18, 0.26, 0.16, 0.16, 0.28, 0.17, 0.22, 0.16, 0.21, 0.40, 0.21, 0.15, 0.17, 0.18, 0.16, 0.20, 0.20. | | | |

Tabla C13. Duraciones de la tarea de acarreo de sacos de cemento con carretilla del caso de estudio/análisis (Trabe y Losa de vigueta y bovedilla).

| 9. Acarreo de sacos de cemento | | | |
|---|---|-------------------------------------|-----------------------------------|
| Concepto de trabajo: | | Trabe y Losa de vigueta y bovedilla | |
| Equipo: | | Carretilla | |
| Volumen de obra (Q_j): | Unidades transportadas por ciclo (U_j) | Recurso (N_j): | Distancia (L_j): |
| 1 pieza | 5 piezas | 1 peón | 10.00 m |
| Duración en minutos (D4_j): | | | |
| 0.09, 0.10, 0.07, 0.05, 0.06, 0.08, 0.03, 0.15, 0.09, 0.18, 0.13, 0.06, 0.04, 0.07, 0.05, 0.06, 0.08, 0.05, 0.04, 0.05, 0.05, 0.06, 0.07, 0.09, 0.06, 0.05, 0.05, 0.09, 0.09, 0.09. | | | |

Tabla C14. Duraciones de la tarea de preparación de concreto con revolvedora del caso de estudio/análisis (Trabe y Losa de vigueta y bovedilla).

| 10. Preparación de concreto | |
|---|-------------------------------------|
| Concepto de trabajo: | Trabe y Losa de vigueta y bovedilla |
| Equipo: | Revolvedora |
| Cantidad (Q_j): | Recurso (N_j): |
| 1 cubeta | 1 oficial |
| Duración en minutos (D_{3j}): | |
| 0.39, 0.36, 0.33, 0.37, 0.36, 0.30, 0.20, 0.40, 0.24, 0.23, 0.23, 0.29, 0.25, 0.19, 0.20, 0.20, 0.19, 0.25, 0.15, 0.20, 0.39, 0.21, 0.38, 0.36, 0.21, 0.28, 0.30, 0.15, 0.27, 0.37, 0.22, 0.22, 0.15, 0.24, 0.30, 0.36, 0.35. | |

Tabla C15. Duraciones de la tarea de preparación de concreto con pala del caso de estudio/análisis (Trabe y Losa de vigueta y bovedilla).

| 10. Preparación de concreto | |
|---|-------------------------------------|
| Concepto de trabajo: | Trabe y Losa de vigueta y bovedilla |
| Equipo: | Pala |
| Cantidad (Q_j): | Recurso (N_j): |
| 1 cubeta | 1 oficial |
| Duración en minutos (D_{3j}): | |
| 0.50, 0.40, 0.75, 0.58, 0.54, 0.64, 0.80, 0.41, 0.61, 0.62, 0.70, 0.82, 0.70, 0.60, 0.67, 0.58, 0.70, 0.60, 0.56, 0.65, 0.67, 0.78, 0.80, 0.86, 0.50, 0.64, 0.56, 0.52, 0.62, 0.72, 0.62, 0.64, 0.62, 0.62, 0.64, 0.80, 0.78, 0.76, 0.78, 0.70, 0.80, 0.60, 0.54, 0.58, 0.60, 0.60, 0.78, 0.80, 0.73, 0.69. | |

Tabla C16. Duraciones de la tarea de acarreo de concreto con cubeta del caso de estudio/análisis (Trabe y Losa de vigueta y bovedilla).

| 11. Acarreo de concreto | | | |
|---|---|-------------------------------------|-----------------------------------|
| Concepto de trabajo: | | Trabe y Losa de vigueta y bovedilla | |
| Equipo: | | Cubeta | |
| Volumen de obra (Q_j): | Unidades transportadas por ciclo (U_j) | Recurso (N_j): | Distancia (L_j): |
| 1 cubeta | 2 cubetas | 1 peón | 10.00 m |
| Duración en minutos (D4_j): | | | |
| 0.71, 0.81, 0.98, 0.98, 1.14, 1.02, 1.05, 1.07, 1.02, 1.00, 0.95, 1.00, 1.07, 1.12, 1.07, 0.71, 0.67, 0.81, 0.74, 0.79, 0.79, 0.81, 1.17, 1.00, 1.00, 0.98, 0.98, 1.02, 1.00, 1.02, 1.05, 1.07, 0.98, 1.00, 1.05, 1.00, 0.98, 1.00, 0.98, 1.05, 1.00, 1.00, 0.98, 1.05, 0.98, 0.98, 0.98, 1.00, 1.02, 1.05. | | | |

Tabla C17. Duraciones de la tarea de colocación de concreto con llana del caso de estudio/análisis (Trabe y Losa de vigueta y bovedilla).

| 12. Colocación de concreto | |
|---|-------------------------------------|
| Concepto de trabajo: | Trabe y Losa de vigueta y bovedilla |
| Equipo: | Llana |
| Cantidad (Q_j): | Recurso (N_j): |
| 1 cubeta | 1 oficial |
| Duración en minutos (D3_j): | |
| 0.35, 0.23, 0.35, 0.50, 0.75, 0.56, 0.69, 0.69, 0.50, 0.63, 0.94, 0.75, 0.56, 0.56, 0.75, 0.75, 0.56, 0.69, 0.63, 0.63, 0.81, 0.63, 0.94, 0.69, 0.63, 0.56, 0.69, 0.88, 0.75, 0.63, 0.88, 0.69, 0.88, 0.50, 0.50, 0.69, 0.69, 0.81, 0.69, 0.81, 0.69, 0.81, 0.88, 0.56, 0.88, 0.94, 0.63, 0.75, 0.81, 0.63. | |

Tabla C18. Duraciones de la tarea de colocación de concreto con concreto premezclado colado con bomba del caso de estudio/análisis (Trabe y Losa de vigueta y bovedilla).

| 12. Colocación de concreto | |
|---|---------------------------------------|
| Concepto de trabajo: | Trabe y Losa de vigueta y bovedilla |
| Equipo: | Concreto premezclado colado con bomba |
| Cantidad (Q_j): | Recurso (N_j): |
| 1 pieza | 1 oficial + 2 peones |
| Duración en minutos (D3_j): | |
| 0.07, 0.02, 0.04, 0.04, 0.02, 0.03, 0.02, 0.02, 0.02, 0.02, 0.02, 0.03, 0.03, 0.03, 0.02, 0.02, 0.02, 0.03, 0.02, 0.05, 0.02, 0.04, 0.07, 0.05, 0.03, 0.04, 0.03, 0.04, 0.06, 0.03, 0.04, 0.03, 0.03, 0.02, 0.02, 0.04, 0.02, 0.04, 0.02, 0.04, 0.02, 0.03, 0.02, 0.02, 0.03, 0.02. | |

Tabla C19. Duraciones de la tarea de vibrado de concreto con varilla del caso de estudio/análisis (Trabe y Losa de vigueta y bovedilla).

| 13. Vibrado de concreto | |
|---|-------------------------------------|
| Concepto de trabajo: | Trabe y Losa de vigueta y bovedilla |
| Equipo: | Varilla |
| Cantidad (Q_j): | Recurso (N_j): |
| 1 cubeta | 1 oficial |
| Duración en minutos (D3_j): | |
| 0.35, 0.37, 0.23, 0.20, 0.20, 0.20, 0.22, 0.20, 0.20, 0.22, 0.22, 0.20, 0.20, 0.18, 0.20, 0.22, 0.20, 0.20, 0.20, 0.17, 0.15, 0.20, 0.20, 0.20, 0.22, 0.20, 0.22, 0.22, 0.22, 0.20, 0.20, 0.20, 0.20, 0.20. | |

Tabla C20. Duraciones de la tarea de vibrado de concreto con vibrador de inmersión del caso de estudio/análisis (Trabe y Losa de vigueta y bovedilla).

| 13. Vibrado de concreto | |
|---|-------------------------------------|
| Concepto de trabajo: | Trabe y Losa de vigueta y bovedilla |
| Equipo: | Vibrador de inmersión |
| Cantidad (Q_j): | Recurso (N_j): |
| 1 cubeta | 1 oficial + 1 peón |
| Duración en minutos (D3_j): | |
| 0.19, 0.25, 0.21, 0.20, 0.28, 0.08, 0.09, 0.20, 0.12, 0.14, 0.10, 0.09, 0.07, 0.09, 0.07, 0.14, 0.21, 0.10, 0.10, 0.15, 0.08, 0.13, 0.09, 0.07, 0.09, 0.20, 0.12, 0.14, 0.10, 0.09. | |

Tabla C21. Duraciones de la tarea de curado de concreto con cubeta del caso de estudio/análisis (Trabe).

| 14. Curado de concreto | |
|---|---------------------------------|
| Concepto de trabajo: | Trabe |
| Equipo: | Cubeta |
| Cantidad (Q_j): | Recurso (N_j): |
| 1 cubeta | 1 peón |
| Duración en minutos (D3_j): | |
| 0.50, 0.47, 0.50, 0.50, 0.45, 0.49, 0.50, 0.51, 0.50, 0.50, 0.46, 0.45, 0.50, 0.46, 0.47, 0.49, 0.49, 0.46, 0.49, 0.49, 0.49, 0.48, 0.48, 0.48, 0.49, 0.49, 0.44, 0.50, 0.49, 0.43, 0.47, 0.50, 0.46, 0.50, 0.51, 0.51, 0.58. | |

Tabla C22. Duraciones de la tarea de curado de concreto con cubeta del caso de estudio/análisis (Losa de vigueta y bovedilla).

| 14. Curado de concreto | |
|---|---------------------------------|
| Concepto de trabajo: | Losa de vigueta y bovedilla |
| Equipo: | Cubeta |
| Cantidad (Q_j): | Recurso (N_j): |
| 1 cubeta | 1 peón |
| Duración en minutos (D3_j): | |
| 0.25, 0.28, 0.22, 0.23, 0.23, 0.21, 0.21, 0.24, 0.20, 0.21, 0.23, 0.24, 0.25, 0.24, 0.23, 0.24, 0.23, 0.22, 0.25, 0.21, 0.23, 0.23, 0.21, 0.25, 0.25, 0.22, 0.23, 0.23, 0.25, 0.21, 0.22, 0.26, 0.22, 0.21, 0.22, 0.25, 0.25, 0.25, 0.24. | |

Tabla C23. Duraciones de la tarea de curado de concreto con manguera del caso de estudio/análisis (Trabe).

| 14. Curado de concreto | |
|---|---------------------------------|
| Concepto de trabajo: | Trabe |
| Equipo: | Manguera |
| Cantidad (Q_j): | Recurso (N_j): |
| 1.10 m ² | 1 peón |
| Duración en minutos (D_{3j}): | |
| 0.45, 0.39, 0.42, 0.40, 0.44, 0.41, 0.39, 0.39, 0.45, 0.42, 0.39, 0.45, 0.42, 0.43, 0.43, 0.45, 0.40, 0.42, 0.44, 0.40, 0.45, 0.39, 0.41, 0.39, 0.39, 0.43, 0.42, 0.45, 0.39, 0.40, 0.40, 0.40, 0.42, 0.41, 0.39, 0.39, 0.45, 0.44, 0.43. | |

Tabla C24. Duraciones de la tarea de curado de concreto con manguera del caso de estudio (Losa de vigueta y bovedilla).

| 14. Curado de concreto | |
|--|---------------------------------|
| Concepto de trabajo: | Losa de vigueta y bovedilla |
| Equipo: | Manguera |
| Cantidad (Q_j): | Recurso (N_j): |
| 76.00 m ² | 1 peón |
| Duración en minutos (D_{3j}): | |
| 26.92, 23.49, 23.24, 25.70, 22.76, 22.76, 22.85, 23.01, 22.76, 22.76, 23.86, 23.77, 22.76, 26.93, 24.65, 23.79, 26.14, 23.08, 25.21, 22.83, 23.05, 22.80, 22.76, 23.24, 22.76, 23.08, 23.43, 22.76, 23.02, 24.54, 23.10, 22.77, 22.93, 24.48, 26.44. | |

Tabla C25. Duraciones de la tarea de acarreo de viguetas a mano del caso de estudio/análisis (Losa de vigueta y bovedilla).

| 15. Acarreo de Viguetas | | | |
|---|---|---------------------------------|-----------------------------------|
| Concepto de trabajo: | | Losa de vigueta y bovedilla | |
| Equipo: | | A mano | |
| Volumen de obra (Q_j): | Unidades transportadas por ciclo (U_j) | Recurso (N_j): | Distancia (L_j): |
| 1 pieza | 1 pieza | 2 peones | 10.00 m |
| Duración en minutos (D_{4j}): | | | |
| 1.90, 1.43, 1.43, 1.43, 2.38, 3.05, 0.80, 0.82, 1.00, 1.13, 0.78, 0.94, 0.77, 1.39, 5.95, 1.59, 1.59, 0.99, 1.39, 1.98, 1.59, 1.39, 1.19, 1.19, 2.14, 2.14, 1.79, 1.86, 1.96, 1.79, 1.61, 1.43, 1.61, 2.32, 2.14, 2.00, 1.67, 1.31, 1.43, 1.31, 1.43. | | | |

Tabla C26. Duraciones de la tarea de acarreo de bovedillas a mano del caso de estudio/análisis (Losa de vigueta y bovedilla).

| 16. Acarreo de bovedillas | | | |
|---|---|---------------------------------|-----------------------------------|
| Concepto de trabajo: | | Losa de vigueta y bovedilla | |
| Equipo: | | A mano | |
| Volumen de obra (Q_j): | Unidades transportadas por ciclo (U_j) | Recurso (N_j): | Distancia (L_j): |
| 1 pieza | 2 piezas | 1 peón | 10.00 m |
| Duración en minutos (D4_j): | | | |
| 0.08, 0.09, 0.09, 0.09, 0.09, 0.10, 0.11, 0.12, 0.11, 0.11, 0.11, 0.10, 0.10, 0.10, 0.10, 0.10, 0.10, 0.10, 0.12, 0.11, 0.11, 0.10, 0.12, 0.11, 0.11, 0.10, 0.11, 0.10, 0.09, 0.09, 0.10, 0.10, 0.12, 0.10, 0.09, 0.11, 0.11, 0.11, 0.12, 0.11, 0.11, 0.10, 0.11, 0.11, 0.11, 0.11, 0.10, 0.11. | | | |

Tabla C27. Duraciones de la tarea de acarreo de bovedillas con carretilla del caso de estudio/análisis (Losa de vigueta y bovedilla).

| 16. Acarreo de bovedillas | | | |
|---|---|---------------------------------|-----------------------------------|
| Concepto de trabajo: | | Losa de vigueta y bovedilla | |
| Equipo: | | Carretilla | |
| Volumen de obra (Q_j): | Unidades transportadas por ciclo (U_j) | Recurso (N_j): | Distancia (L_j): |
| 1 pieza | 7 piezas | 1 peón | 10.00 m |
| Duración en minutos (D4_j): | | | |
| 0.06, 0.13, 0.11, 0.20, 0.18, 0.20, 0.45, 0.05, 0.08, 0.10, 0.13, 0.34, 0.06, 0.10, 0.13, 0.08, 0.10, 0.09, 0.09, 0.08, 0.09, 0.07, 0.13, 0.13, 0.13, 0.07, 0.10, 0.08, 0.11, 0.17, 0.09, 0.09, 0.10, 0.12, 0.10, 0.12, 0.18, 0.14, 0.06, 0.05, 0.11, 0.06, 0.07, 0.11, 0.08, 0.13, 0.07, 0.18, 0.15, 0.08. | | | |

Tabla C28. Duraciones de la tarea de acarreo de izado de viguetas con escalera y sogas del caso de estudio/análisis (Losa de vigueta y bovedilla).

| 17. Izado de viguetas | |
|---|---------------------------------|
| Concepto de trabajo: | Losa de vigueta y bovedilla |
| Equipo: | Escalera y sogas |
| Cantidad (Q_j): | Recurso (N_j): |
| 1 pieza | 1 oficial + 1 peón |
| Duración en minutos (D_{3j}): | |
| 2.02, 5.48, 3.17, 1.68, 1.70, 2.38, 1.67, 1.63, 1.38, 1.32, 2.55, 5.33, 4.83, 2.00, 2.33, 3.45, 2.23, 2.60, 1.70, 3.82, 1.22, 0.83, 0.67, 0.87, 0.67, 0.53, 0.60, 0.45, 0.47, 1.25, 0.83, 1.42, 1.43, 1.78, 0.72, 1.10, 1.00, 1.47, 1.38, 1.45, 1.60. | |

Tabla C29. Duraciones de la tarea de acarreo de viguetas con grúa del caso de estudio/análisis (Losa de vigueta y bovedilla).

| 17. Izado de viguetas | |
|---|---------------------------------|
| Concepto de trabajo: | Losa de vigueta y bovedilla |
| Equipo: | Grúa |
| Cantidad (Q_j): | Recurso (N_j): |
| 1 pieza | 2 oficiales + 2 peones |
| Duración en minutos (D_{3j}): | |
| 7.15, 7.88, 7.80, 11.02, 9.03, 10.22, 7.52, 6.92, 6.70, 7.97, 9.32, 9.15, 6.27, 6.18, 8.50, 7.45, 6.72, 6.62, 7.30, 5.00, 5.35, 7.50, 6.78, 5.60, 5.33, 5.77, 4.85, 5.43, 5.68, 5.20, 4.90, 5.22, 5.65, 5.15, 5.68, 5.83, 6.50, 4.53, 4.58, 4.47, 3.77, 5.23, 5.34, 2.91, 2.68, 3.50, 2.27, 2.93, 2.79, 1.73. | |

Tabla C30. Duraciones de la tarea de izado de bovedillas del caso de estudio/análisis (Losa de vigueta y bovedilla).

| 18. Izado de bovedillas | |
|---|---------------------------------|
| Concepto de trabajo: | Losa de vigueta y bovedilla |
| Equipo: | Escalera |
| Cantidad (Q_j): | Recurso (N_j): |
| 1 pieza | 2 oficiales |
| Duración en minutos (D_{3j}): | |
| 0.75, 1.00, 0.50, 0.88, 1.13, 0.63, 0.70, 0.80, 0.80, 0.90, 0.58, 0.75, 0.67, 0.75, 0.43, 0.71, 1.00, 0.43, 0.61, 0.93, 0.43, 0.79, 0.50, 0.71, 0.86, 0.93, 0.71, 0.57, 1.00, 0.50, 0.88, 0.75, 0.44, 0.56, 0.88, 0.75, 0.88, 0.81, 0.81, 0.88, 0.88, 0.83, 0.61, 0.39, 0.78, 0.78, 0.50, 0.61, 0.72, 0.39, 0.70, 0.45, 0.60, 0.50, 0.60, 0.75, 0.75, 0.70, 0.50, 0.82. | |

Tabla C31. Duraciones de la tarea de izado de bovedillas con cabrestante del caso de estudio/análisis (Losa de vigueta y bovedilla).

| 18. Izado de bovedillas | |
|---|---------------------------------|
| Concepto de trabajo: | Losa de vigueta y bovedilla |
| Equipo: | Cabrestante |
| Cantidad (Q_j): | Recurso (N_j): |
| 1 pieza | 2 oficiales |
| Duración en minutos (D_{3j}): | |
| 0.69, 0.30, 0.26, 0.31, 0.30, 0.32, 0.38, 0.29, 0.28, 0.43, 0.35, 0.30, 0.38, 0.32, 0.31, 0.49, 0.45, 0.31, 0.31, 0.35, 0.38, 0.28, 0.20, 0.18, 0.18, 0.21, 0.23, 0.23, 0.22, 0.20, 0.20, 0.23, 0.23, 0.30, 0.35, 0.26, 0.29, 0.27, 0.30, 0.18, 0.17, 0.16, 0.28, 0.20, 0.14, 0.16, 0.18, 0.18, 0.20, 0.17. | |

Tabla C32. Duraciones de la tarea de apuntalamiento con polín de madera del caso de estudio/análisis (Trabe y Losa de vigueta y bovedilla).

| 19. Apuntalamiento | |
|---|-------------------------------------|
| Concepto de trabajo: | Trabe y Losa de vigueta y bovedilla |
| Equipo: | Polín de madera |
| Cantidad (Q_j): | Recurso (N_j): |
| 1 pieza | 1 peón |
| Duración en minutos (D_{3j}): | |
| 1.76, 1.98, 2.64, 1.64, 2.45, 2.16, 1.76, 2.31, 2.38, 1.94, 1.76, 1.64, 2.01, 1.98, 2.19, 2.60, 2.56, 2.41, 2.60, 2.23, 1.83, 1.83, 2.01, 1.99, 1.74, 1.48, 2.39, 1.59, 1.69, 1.96, 2.55, 1.60. | |

Tabla C33. Duraciones de la tarea de apuntalamiento con polín de metal del caso de estudio/análisis (Trabe y Losa de vigueta y bovedilla).

| 19. Apuntalamiento | |
|---|-------------------------------------|
| Concepto de trabajo: | Trabe y Losa de vigueta y bovedilla |
| Equipo: | Polín de metal |
| Cantidad (Q_j): | Recurso (N_j): |
| 1 pieza | 1 peón |
| Duración en minutos (D_{3j}): | |
| 1.68, 1.70, 1.63, 1.67, 1.73, 1.67, 1.63, 1.83, 1.68, 1.67, 1.67, 1.68, 1.70, 1.68, 1.73, 1.72, 1.62, 1.67, 1.68, 1.70, 1.67, 1.67, 1.63, 1.67, 1.70, 1.72, 1.83, 1.85, 1.62, 1.70, 1.64, 1.63, 1.66, 1.70, 1.73, 1.72, 1.71, 1.67, 1.69, 1.87, 1.69, 1.63, 1.87, 1.65, 1.70, 1.74, 1.68, 1.63, 1.58, 1.69. | |

Tabla C34. Duraciones de la tarea de cimbrado perimetral con martillo del caso de estudio/análisis (Losa de vigueta y bovedilla).

| 20. Cimbrado perimetral | |
|---|---------------------------------|
| Concepto de trabajo: | Losa de vigueta y bovedilla |
| Equipo: | Martillo |
| Cantidad (Q_j): | Recurso (N_j): |
| 1 pieza | 1 oficial |
| Duración en minutos (D_{3j}): | |
| 2.00, 3.00, 3.00, 4.00, 4.00, 3.00, 2.00, 1.00, 3.00, 1.50, 5.00, 2.00, 4.00, 2.00, 2.00, 4.00, 4.00, 2.00, 4.00, 3.00, 3.00, 4.00, 2.00, 2.00, 1.00, 5.00, 4.00, 2.00, 5.00, 5.00, 2.00. | |

Tabla C35. Duraciones de la tarea de colocación de malla electrosoldada con martillo del caso de estudio/análisis (Losa de vigueta y bovedilla).

| 21. Colocación de malla electrosoldada | |
|---|---------------------------------|
| Concepto de trabajo: | Losa de vigueta y bovedilla |
| Equipo: | Martillo |
| Cantidad (Q_j): | Recurso (N_j): |
| 1.00 m ² | 1 oficial |
| Duración en minutos (D_{3j}): | |
| 0.10, 0.07, 0.11, 0.05, 0.06, 0.08, 0.09, 0.07, 0.09, 0.10, 0.08, 0.12, 0.09, 0.10, 0.10, 0.11, 0.11, 0.11, 0.11, 0.09, 0.13, 0.09, 0.09, 0.12, 0.11, 0.02, 0.09, 0.13, 0.10, 0.10, 0.09, 0.11. | |

Tabla C36. Duraciones de la tarea de armado de andamio con andamio tubular estándar del caso de estudio/análisis (Trabe y Losa de vigueta y bovedilla).

| 22. Armado de andamio | |
|---|-------------------------------------|
| Concepto de trabajo: | Trabe y Losa de vigueta y bovedilla |
| Equipo: | Andamio tubular estándar |
| Cantidad (Q_j): | Recurso (N_j): |
| 1 pieza | 1 peón |
| Duración en minutos (D_{3j}): | |
| 1.28, 1.40, 1.45, 1.38, 1.45, 1.38, 1.42, 1.65, 1.30, 1.37, 1.20, 1.38, 1.40, 1.38, 1.27, 1.40, 1.25, 1.27, 1.22, 1.32, 1.35, 1.28, 1.22, 1.17, 1.32, 1.18, 1.18, 1.15, 1.12, 1.25, 1.25, 1.20, 1.23, 1.13, 1.12, 1.17, 1.12, 1.20, 1.17, 1.13, 1.12, 1.25, 1.18, 1.15, 1.12, 1.20, 1.37, 1.10, 1.22, 1.08. | |

Tabla C37. Duraciones de la tarea de armado de andamio con tablas y blocks del caso de estudio/análisis (Trabe y Losa de vigueta y bovedilla).

| 22. Armado de andamio | |
|---|-------------------------------------|
| Concepto de trabajo: | Trabe y Losa de vigueta y bovedilla |
| Equipo: | Tablas y blocks |
| Cantidad (Q_j): | Recurso (N_j): |
| 1 pieza | 1 peón |
| Duración de la tarea en minutos (Dr_j): | |
| 3.40, 3.43, 3.40, 3.40, 3.32, 3.33, 3.38, 3.37, 3.38, 3.40, 3.40, 3.37, 3.42, 3.37, 3.37, 3.35, 3.37, 3.37, 3.37, 3.32, 3.35, 3.37, 3.38, 3.35, 3.28, 3.38, 3.33, 3.38, 3.33, 3.38, 3.40, 3.38, 3.37, 3.37, 3.37, 3.40, 3.30, 3.38, 3.35, 3.32, 3.37. | |

Tabla C38. Duraciones de la tarea de acarreo para curado con cubeta del caso de estudio/análisis (Trabe y Losa de vigueta y bovedilla).

| 23. Acarreo para curado | | | |
|---|---|-------------------------------------|-----------------------------------|
| Concepto de trabajo: | | Trabe y Losa de vigueta y bovedilla | |
| Equipo: | | Cubeta | |
| Volumen de obra (Q_j): | Unidades transportadas por ciclo (U_j) | Recurso (N_j): | Distancia (L_j): |
| 1 cubeta | 1 cubeta | 1 peón | 5.00 m |
| Duración en minutos (D_{4j}): | | | |
| 1.90, 1.86, 1.93, 1.58, 1.52, 1.55, 1.67, 1.73, 1.37, 1.38, 1.50, 1.55, 1.48, 1.48, 1.47, 1.57, 1.48, 1.42, 1.40, 1.55, 1.55, 1.52, 1.43, 1.23, 1.26, 1.16, 1.26, 1.06, 1.29, 1.14, 1.13, 1.14, 1.13, 1.16, 1.18, 1.20, 0.72. | | | |

Tabla C39. Duraciones de la tarea de acarreo de puntales a mano del caso de estudio/análisis (Trabe y Losa de vigueta y bovedilla).

| 24. Acarreo de puntales | | | |
|---|---|-------------------------------------|-----------------------------------|
| Concepto de trabajo: | | Trabe y Losa de vigueta y bovedilla | |
| Equipo: | | A mano | |
| Volumen de obra (Q_j): | Unidades transportadas por ciclo (U_j) | Recurso (N_j): | Distancia (L_j): |
| 1 pieza | 1 pieza | 1 peón | 5.00 m |
| Duración en minutos (D_{4j}): | | | |
| 0.65, 0.69, 0.67, 0.63, 0.65, 0.63, 0.67, 0.65, 0.65, 0.69, 0.69, 0.73, 0.63, 0.67, 0.65, 0.69, 0.69, 0.67, 0.63, 0.73, 0.69, 0.67, 0.67, 0.71, 0.67, 0.63, 0.58, 0.63, 0.58, 0.63, 0.60, 0.63, 0.65, 0.71, 0.60, 0.60, 0.63, 0.65, 0.65, 0.65, 0.63, 0.65, 0.63, 0.67, 0.67, 0.69, 0.69, 0.71, 0.69, 0.69. | | | |

Tabla C42. Duraciones de la tarea de acarreo de malla electrosoldada a mano del caso de estudio/análisis (Trabe y Losa de vigueta y bovedilla).

| 27. Acarreo de malla electrosoldada | | | |
|---|---|-------------------------------------|-----------------------------------|
| Concepto de trabajo: | | Trabe y Losa de vigueta y bovedilla | |
| Equipo: | | A mano | |
| Volumen de obra (Q_j): | Unidades transportadas por ciclo (U_j) | Recurso (N_j): | Distancia (L_j): |
| 1 pieza | 1 pieza | 1 peón | 10.00 m |
| Duración en minutos (D_{4j}): | | | |
| 5.17, 5.50, 5.33, 5.00, 5.17, 5.00, 5.33, 5.17, 5.17, 5.50, 5.50, 5.83, 5.00, 5.33, 5.17, 5.50, 5.50, 5.33, 5.00, 5.83, 5.50, 5.33, 5.33, 5.67, 5.33, 5.00, 4.67, 5.00, 4.67, 5.00, 4.83, 5.00, 5.17, 5.67, 4.83, 4.83, 5.00, 5.17, 5.17, 5.17, 5.00, 5.17, 5.00, 5.33, 5.33, 5.50, 5.50, 5.67, 5.50, 5.50. | | | |

APÉNDICE D. DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD DE LAS TAREAS DEL CASO DE ESTUDIO / ANÁLISIS

Tabla D1. Distribuciones de probabilidad de las tareas del caso de estudio/análisis.

| Distribución de probabilidad | | | | |
|------------------------------|---------------------------------|-------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| No. de Tarea | Tarea | Equipo | Trabe (TR) | Losa de vigueta y bovedilla (LVB) |
| 1 | Acarreo de cimbra | A mano | Beta(1.921, 2.27, 0.58, 0.73) | Beta(1.921, 2.27, 0.58, 0.73) |
| | | Carretilla | Beta(2.458, 8.101, 0.13, 0.19) | Beta(2.458, 8.101, 0.13, 0.19) |
| 2 | Cimbrado | Martillo | Beta(0.985, 4.196, 15, 65.22) | No aplica |
| 3 | Acarreo de varillas de acero | Martillo | Uniform(0.108, 0.127) | |
| 4 | Corte de acero de refuerzo | Segueta | Triangular(0.487, 0.711, 0.518) | |
| | | Cizalla | Triangular(0.05, 0.393, 0.188) | |
| 5 | Doblado de acero de refuerzo | Dobladora | Triangular(0.46, 0.797, 0.489) | |
| 6 | Habilitado de acero de refuerzo | Dobladora | Triangular(0.1, 0.199, 0.115) | |
| 7 | Colocación de acero de refuerzo | A mano | Uniform(0.263, 20.265) | Uniform(1.82, 140.243) |
| 8 | Acarreo de agregados y agua | Carretilla | Beta(0.899, 4.397, 0.07, 0.41) | |
| | | Cubeta | Beta(2.087, 3.873, 0.34, 0.73) | |
| 9 | Acarreo de sacos de cemento | A mano | Triangular(0.121, 0.27, 0.147) | |
| | | Carretilla | Beta(1.384, 4.475, 0.03, 0.18) | |
| 10 | Preparación de concreto | Revolvedora | Triangular(0.099, 0.487, 0.207) | |
| | | Pala | Triangular(0.436, 0.911, 0.596) | |
| 11 | Acarreo de concreto | Cubeta | Triangular(0.888, 1.106, 0.974) | |

Continuación Tabla D1.





| Distribución de probabilidad | | | | |
|------------------------------|------------------------|---------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| No. de Tarea | Tarea | Equipo | Trabe (TR) | Losa de vigueta y bovedilla (LVB) |
| 12 | Colocación de concreto | Llana | Beta(3.255, 2.272, 0.23, 0.94) | |
| | | Concreto premezclado colado sin bomba | No aplica | |
| | | Concreto premezclado colado con bomba | Beta(0.524, 2.746, 0.02, 0.07) | |
| 13 | Vibrado de concreto | Varilla | Triangular(0.166, 0.233, 0.181) | |
| | | Vibrador de inmersión | Beta(0.475, 1.263, 0.07, 0.28) | |
| 14 | Curado de concreto | Cubeta | Triangular(0.428, 0.508, 0.502) | Triangular(0.182, 0.265, 0.229) |
| | | Manguera | Beta(0.375, 0.602, 0.39, 0.45) | Beta(0.271, 1.025, 22.76, 26.93) |
| 15 | Acarreo de viguetas | A mano | No aplica | Triangular(0.459, 2.724, 1.356) |
| 16 | Acarreo de bovedillas | A mano | No aplica | Beta(2.598, 2.675, 0.08, 0.12) |
| | | Carretilla | No aplica | Triangular(0.032, 0.201, 0.072) |
| 17 | Izado de viguetas | Escalera y sogá | No aplica | Beta(1.122, 3.519, 0.45, 5.48) |
| | | Grúa | No aplica | Triangular(1.572, 10.46, 5.61) |
| 18 | Izado de bovedillas | Escalera | No aplica | Triangular(0.2, 1.033, 0.816) |
| | | Cabrestante | No aplica | Uniform(0.131, 0.385) |
| 19 | Apuntalamiento | Polín de madera | Triangular(1.415, 3.057, 1.625) | Triangular(1.415, 3.057, 1.625) |
| | | Polín de metal | Triangular(1.574, 1.775, 1.679) | Triangular(1.574, 1.775, 1.679) |
| 20 | Cimbrado perimetral | Martillo | No aplica | Uniform(0.495, 4.486) |

Continuación Tabla D1.





| Distribución de probabilidad | | | | |
|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|---------------------------------|--|
| No. de Tarea | Tarea | Equipo | Trabe (TR) | Losa de vigueta y bovedilla (LVB) |
| 21 | Colocación de malla electrosoldada | Martillo | No aplica | Triangular(0.042, 0.127, 0.101) |
| 22 | Armado de andamio | Andamio tubular estándar | Beta(1.226, 2.948, 1.08, 1.65) | Beta(1.226, 2.948, 1.08, 1.65) |
| | | Tablas y blocks | Triangular(3.288, 3.413, 3.377) | Triangular(3.288, 3.413, 3.377) |
| 23 | Acarreo para curado | Cubeta | Triangular(0.781, 1.806, 1.53) | Triangular(0.781, 1.806, 1.53) |
| 24 | Acarreo de puntales | A mano | Beta(1.921, 2.27, 0.58, 0.73) | Beta(1.921, 2.27, 0.58, 0.73) |
| 25 | Acarreo de bovedillas sobre la losa | A mano | No aplica | Beta(2.598, 2.675, 0.08, 0.12) |
| 26 | Acarreo de acero habilitado | A mano | Uniform(0.108, 0.127) | Uniform(0.108, 0.127) |
| 27 | Acarreo de malla electrosoldada | A mano | No aplica | Triangular(4.452, 5.826, 5.174) |

APÉNDICE E. PARÁMETROS DE ENTRADA PARA LOS MODELOS DE SIMULACIÓN DE LA PARTIDA DE TECHO




Tabla E1. Parámetros de entrada para los modelos de simulación.

| Parámetros de entrada – Modelos de simulación de la partida de techo | | |
|---|------------------|---|
| Elemento | | Parámetros de entrada |
| Símbolo | Nombre | |
|  | Resource | Name: Oficial 1; Servers: 1. |
| | | Name: Oficial 2; Servers: 1. |
| | | Name: Peón 1; Servers: 1. |
| | | Name: Peón 2; Servers: 1. |
|  | File | Name: File 1. |
|  | Create | Name: ACERO-LVB-TR; Quantity: 7. |
| | | Name: CIMBRA-TR; Quantity: 4. |
| | | Name: ANDAMIO-TR; Quantity: 2. |
| | | Name: VIGUETAS-LVB; Quantity: 31. |
| | | Name: PUNTAL-LVB; Quantity: 60. |
| | | Name: BOVEDILLAS-LVB; Quantity: 438. |
| | | Name: ANDAMIO 1-LVB; Quantity: 1. |
| | | Name: MALLA-LVB; Quantity: 1. |
| | | Name: ANDAMIO 2-LVB; Quantity: 19. |
| | | Name: ACERO-LVB; Quantity: 11. |
| | | Name: CIMBRA-LVB; Quantity: 19. |
| Name: CEMENTO-TR-LVB; Quantity: 26. | | |
|  | Capture resource | Name: Oficial 1 (+) / 1-9; File: File 1; Resource: Oficial 1; Servers: 1. |
| | | Name: Oficial 1 (+) / 1-7; File: File 1; Resource: Oficial 2; Servers: 1. |
| | | Name: Peón 1 (+) / 1-13; File: File 1; Resource: Peón 1; Servers: 1. |
| | | Name: Peón 2 (+) / 1-14; File: File 1; Resource: Peón 2; Servers: 1. |

Continuación Tabla E9.

| Parámetros de entrada – Modelos de simulación de la partida de techo | | |
|---|------------------|--|
| Elemento | | Parámetros de entrada |
| Símbolo | Nombre | |
|  | Release resource | Name: Oficial 1 (+) / 1-8; Resource: 1; Servers: 1. |
| | | Name: Oficial 2 (-) / 1-8; Resource: 1; Servers: 1. |
| | | Name: Peón 1 (-) / 1-11; Resource: 1; Servers: 1. |
| | | Name: Peón 2 (-) / 1-12; Resource: 1; Servers: 1. |
|  | Task | Ver APÉNDICE D |
|  | Batch | Name: Batch1; Quantity: 7. |
| | | Name: Batch2; Quantity: 62. |
| | | Name: Batch3; Quantity: 170. |
| | | Name: Batch4; Quantity: 6. |
| | | Name: Batch5; Quantity: 8. |
| | | Name: Batch6; Quantity: 13. |
| | | Name: Batch7; Quantity: 40. |
| | | Name: Batch8; Quantity: 91. |
| | | Name: Batch9; Quantity: 498. |
| | | Name: Batch10; Quantity: 438. |
| | | Name: Batch11; Quantity: 3. |
| | | Name: Batch12; Quantity: 39. |
| | | Name: Batch13; Quantity: 30. |
| | | Name: Batch14; Quantity: 11. |
| | | Name: Batch15; Quantity: 422. |
| Name: Batch16; Quantity: 260. | | |
| Name: Batch17; Quantity: 19. | | |
|  | Generate | Name: Generate1; Quantity: 62. |
| | | Name: Generate2; Quantity: 170. |
| | | Name: Generate3; Quantity: 9. |
| | | Name: Generate4; Quantity: 4. |

Continuación Tabla E9.

| Parámetros de entrada – Modelos de simulación de la partida de techo | | |
|---|----------|--|
| Elemento | | Parámetros de entrada |
| Símbolo | Nombre | |
|  | Generate | Name: Generate5; Quantity: 4. |
| | | Name: Generate6; Quantity: 9. |
| | | Name: Generate7; Quantity: 31. |
| | | Name: Generate8; Quantity: 60. |
| | | Name: Generate9; Quantity: 438. |
| | | Name: Generate10; Quantity: 11. |
| | | Name: Generate11; Quantity: 11. |
| | | Name: Generate12; Quantity: 396. |
| | | Name: Generate13; Quantity: 422. |
| | | Name: Generate14; Quantity: 19. |
| Name: Generate15; Quantity: 2. | | |
|  | Counter | Name: Counter1-35; Limit: 1. |
|  | Destroy | Name: Destroy1-16. |

APÉNDICE F. MODELOS DE SIMULACIÓN



Figura F1. Modelo de simulación del proceso manual.

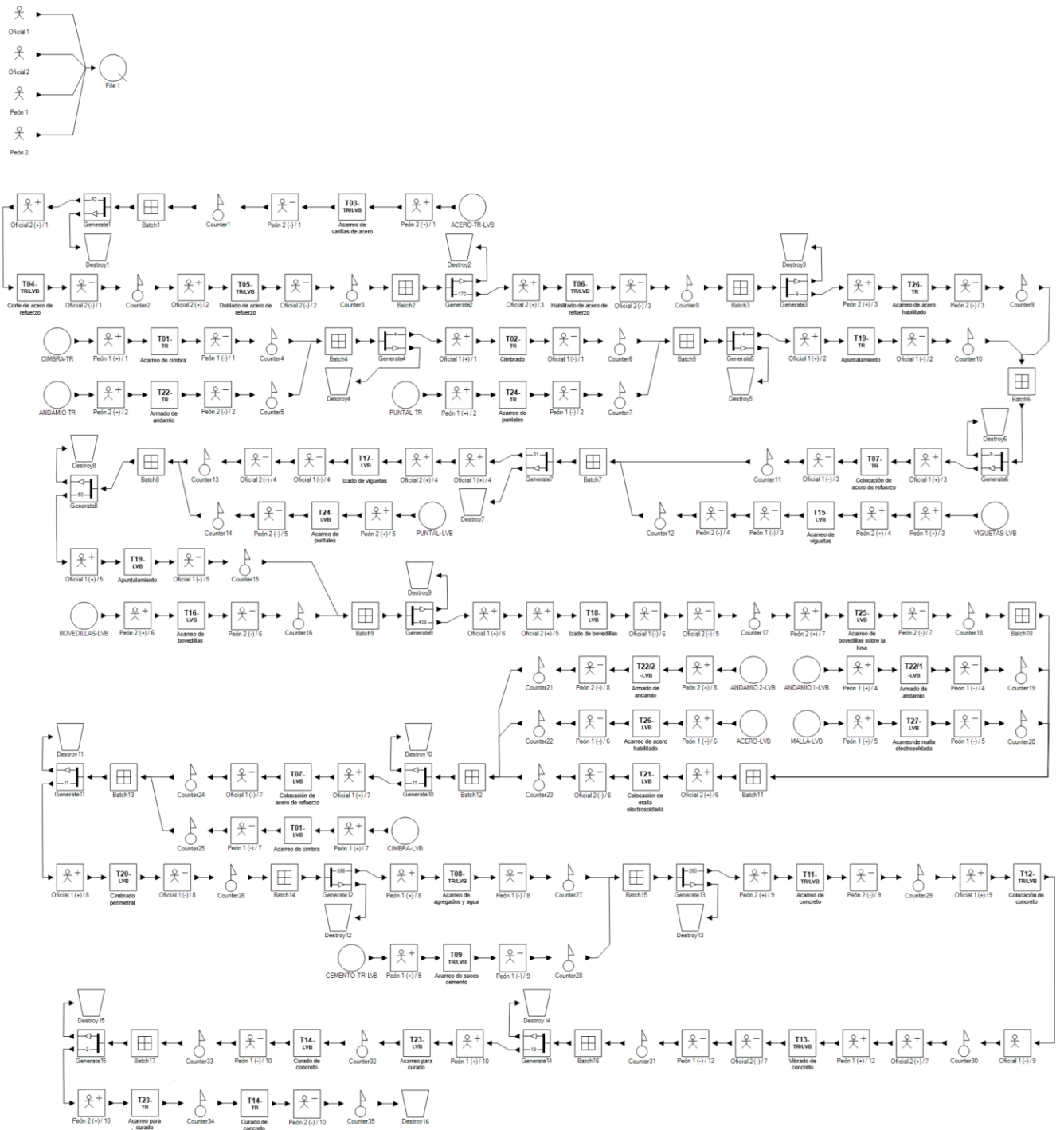


Figura F2. Modelo de simulación del proceso manual + vibrador de inmersión.

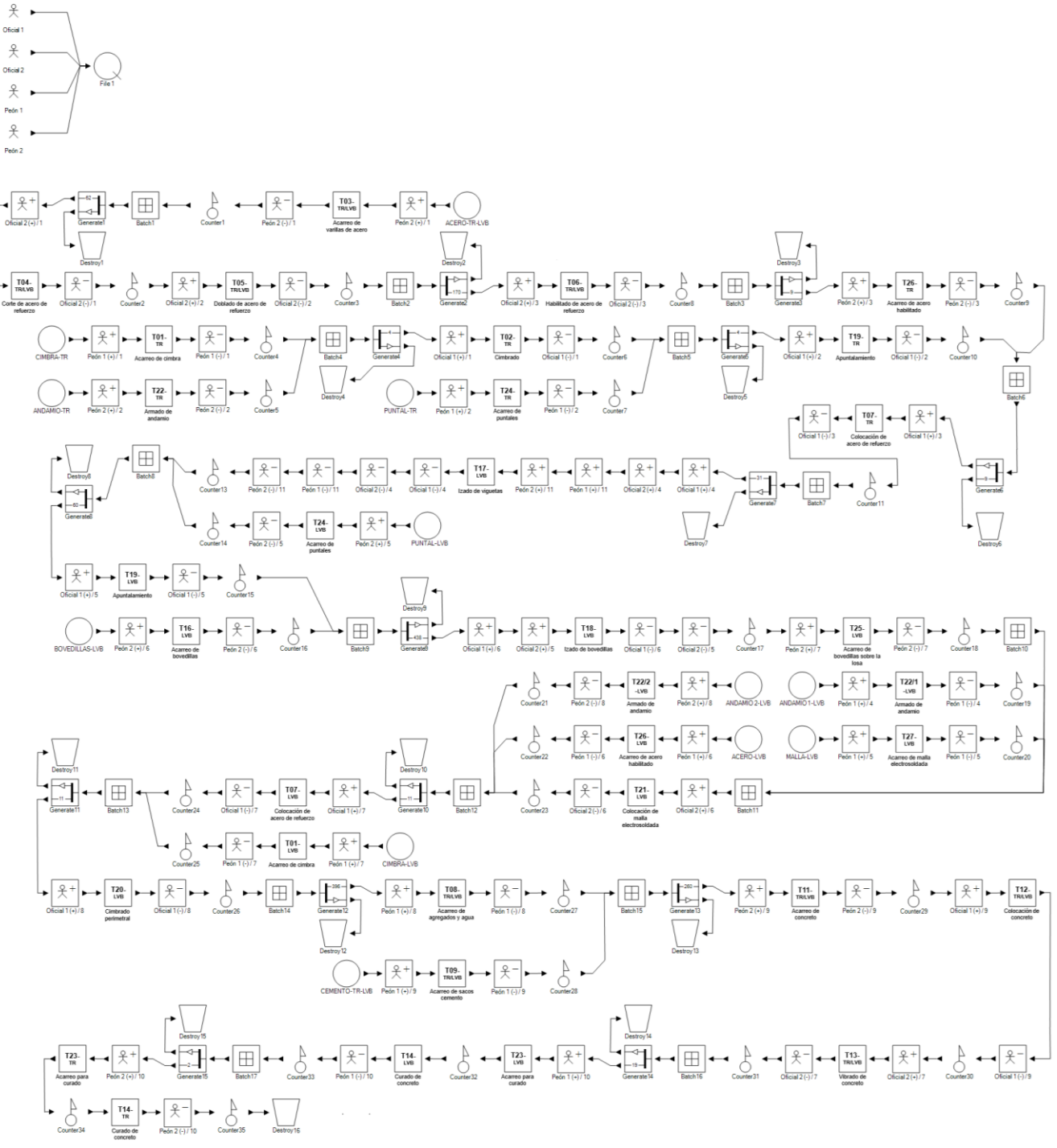


Figura F3. Modelo de simulación del proceso manual + grúa.

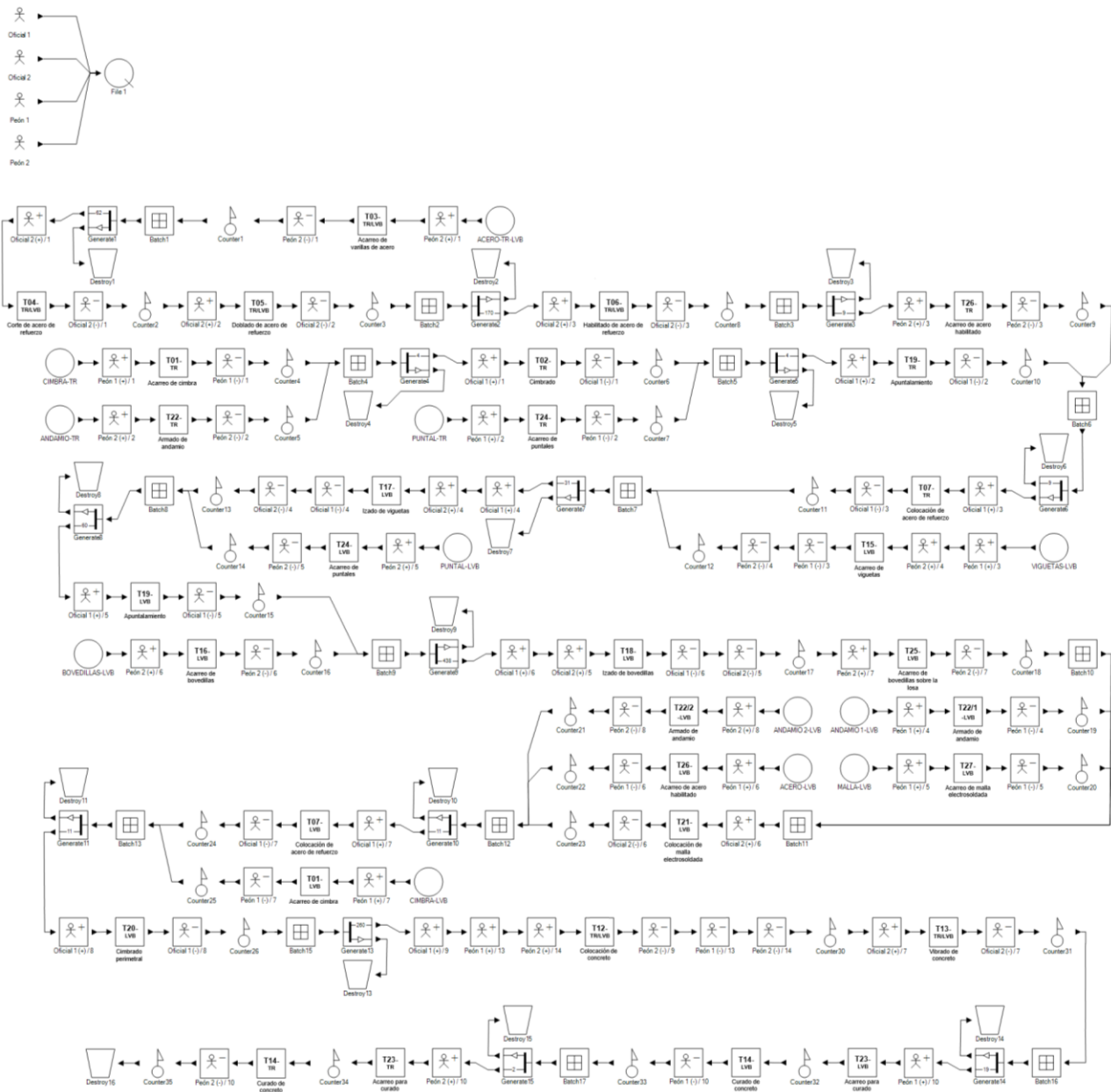


Figura F6. Modelo de simulación del proceso con concreto premezclado colado con bomba.

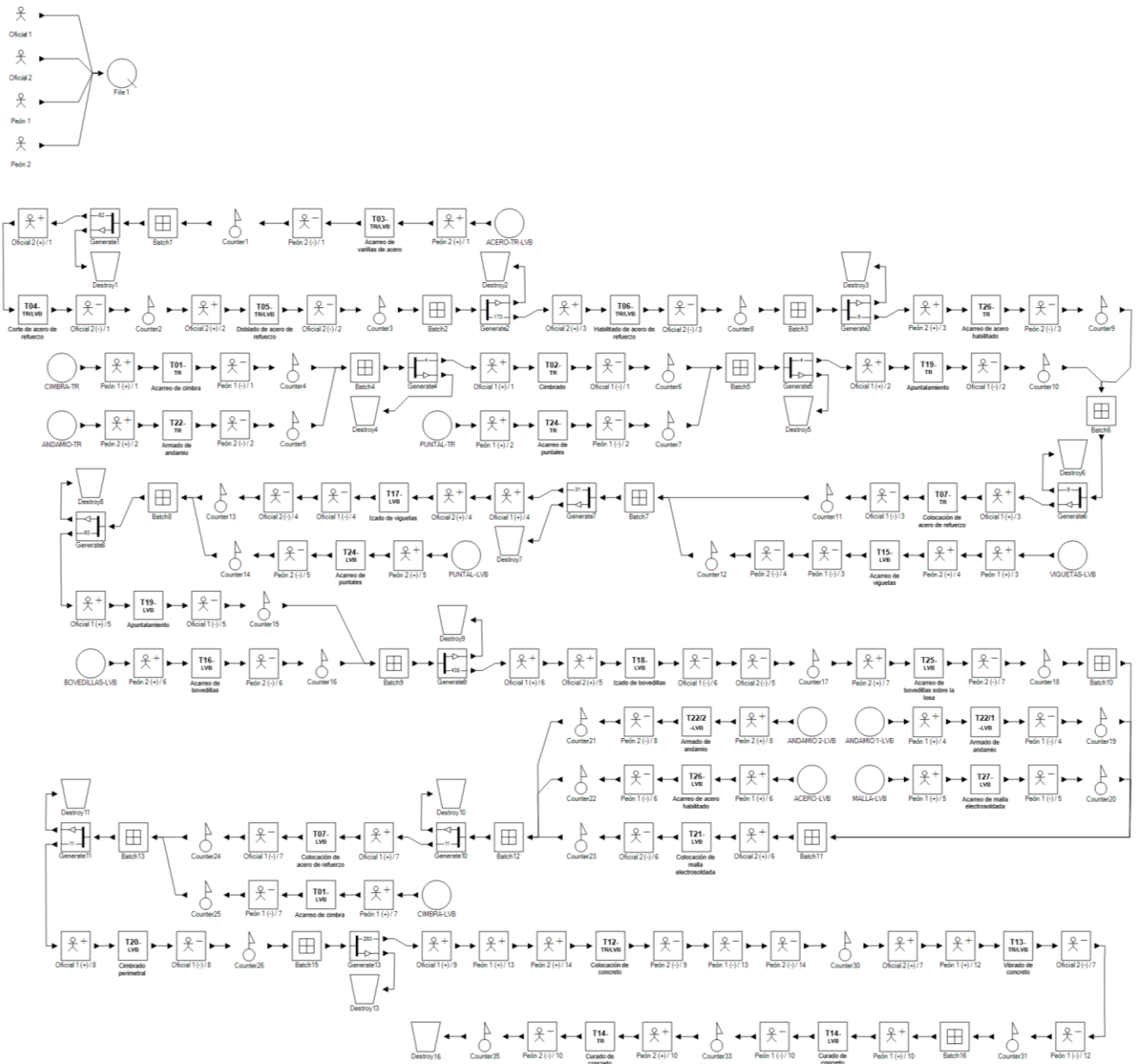


Figura F7. Modelo de simulación del proceso con concreto premezclado colado con bomba + manguera + vibrador de inmersión.