

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL



**FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE MATEMÁTICAS**

PROYECTO DE GRADUACIÓN

PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:

**“MAGÍSTER EN CONTROL DE OPERACIONES Y GESTION
LOGÍSTICA”**

TEMA

DISEÑO DE UN MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA
EJECUCIÓN, ASIGNACIÓN DE RECURSOS Y
PLANIFICACIÓN DE SUMINISTRO DE MATERIALES EN
PROYECTOS DE LA INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN

AUTOR

GRACE CAROLINA PALACIOS SÁNCHEZ

Guayaquil - Ecuador

2016

DEDICATORIA

A mis padres, quienes en todo momento me han brindado su apoyo incondicional.

Grace

AGRADECIMIENTO

A Dios por darme la sabiduría, fortaleza y perseverancia necesarias para cada acción en la vida.

A todos los catedráticos, en especial al M.Sc. Carlos Cepeda De La Torre, que han transmitido sus conocimientos de tal forma que he podido desarrollar las destrezas indispensables para el desarrollo del presente proyecto.

A aquellas personas que de alguna u otra forma me apoyaron durante este nuevo reto.

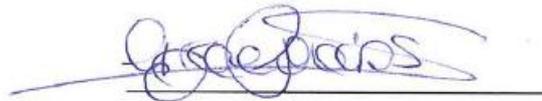
A todos,

Muchas gracias

Grace

DECLARACIÓN EXPRESA

La responsabilidad por los hechos y doctrinas expuestas en este Proyecto de Graduación, así como el Patrimonio Intelectual del mismo, corresponde exclusivamente a la Escuela Superior Politécnica del Litoral.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Grace Palacios", is written over a horizontal line.

Ing. Grace Palacios Sánchez

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN



M.Sc. Alfredo Armijos De La Cruz
PRESIDENTE DE TRIBUNAL



M.Sc. Carlos Cepeda De La Torre
DIRECTOR DE TESIS



M.Sc. David Pinzón Ulloa
VOCAL DE TRIBUNAL

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	II
AGRADECIMIENTO.....	III
DECLARACIÓN EXPRESA	IV
TRIBUNAL DE GRADUACIÓN	V
ÍNDICE GENERAL.....	VI
ÍNDICE DE TABLAS	VIII
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	IX
ÍNDICE DE ABREVIATURAS	X
CAPÍTULO 1.....	1
1.1 JUSTIFICACIÓN.....	1
1.2 PROBLEMÁTICA	2
1.3 OBJETIVOS	3
1.3.1 Objetivo General	3
1.3.2. Objetivos Específicos.....	3
1.4 METODOLOGÍA	4
CAPÍTULO 2.....	5
2.1 MARCO TEÓRICO	5
2.1.1 Sector de la Construcción - Definición e importancia.....	5
2.1.2 Etapas de la construcción de un edificio	6
2.2 PROGRAMACIÓN MATEMÁTICA	9
2.2.1 Definición	9
2.2.2 Planteamiento.....	9
2.2.3 Importancia	10
2.2.4 Programación Lineal Entera Mixta	11
2.3 ESTADO DE ARTE	12
2.3.1 Multiproject Scheduling in Construction Industry, Y. Gholipour, 2013.	13
2.3.2 Project overload: An exploratory study of work and management in multi-project settings, A. Zika-Viktorsson, P. Sundström & M. Engwall, 2006.	14

2.3.3 Optimal Scheduling for Repetitive Construction Projects with Multiple Resource Crews, Sanjay Bhoyar & Dr. Dhananjay K. Parbar, 2014	15
2.3.4 A Simulation Model For Resource Constrained Scheduling of Multiple Project, B. Kanagasabapath and K. Ananthanarayanan, 2005.....	16
2.3.5 The effectiveness in managing a group of multiple projects: Factors of influence and measurements criteria, Peerasit Patankul, Dragan Milosevic, 2008	17
CAPÍTULO 3.....	19
3.1 Introducción	19
3.2 Información utilizada	21
3.3 Diseño del Modelo Matemático	38
3.4 Implementación y Resultados en GAMS	45
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	60
Conclusiones	60
Recomendaciones	61
BIBLIOGRAFÍA	62
ANEXO 1	64
ANEXO 2	77

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 – Actividades de la Obra Nro. 1	22
Tabla 3.2 – Actividades de la Obra Nro. 2	25
Tabla 3.3 – Actividades de la Obra Nro. 3	28
Tabla 3.4 – Actividades del Proyecto Nro. 4.....	31
Tabla 3.5 – Detalle de Recursos utilizados en los proyectos	21
Tabla 3.6 – Detalle de los materiales más importantes utilizados en las obras	33
Tabla 3.7 - Diagrama de Gantt Obra 1	34
Tabla 3.8 - Diagrama de Gantt Obra 2	35
Tabla 3.9 - Diagrama de Gantt Obra 3	36
Tabla 3.10 - Diagrama de Gantt Obra 4	37
Tabla 3.11 – Diagrama de Gantt del Resultado de la Obra 1	46
Tabla 3.12 – Diagrama de Gantt del Resultado de la Obra 2	49
Tabla 3.13 – Diagrama de Gantt del Resultado de la Obra 3	52
Tabla 3.14 – Diagrama de Gantt del Resultado de la Obra 4	55
Tabla 3.15 – Tabla comparativa de costos por recurso adicional entre Plan Real Ejecutada y Plan Modelizado.	59

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 3.1 – Modelo de obra: Edificio Residencial de 3 pisos.	19
Ilustración 3. 2 - Detalle de actividades principales en construcción de obra por edificio.	20
Ilustración 3.3 – Cuadro comparativo de la Obra 1	48
Ilustración 3.4 – Cuadro comparativo de la Obra 2.....	51
Ilustración 3.5 – Cuadro comparativo de la Obra 3.....	54
Ilustración 3.6 – Cuadro comparativo de la Obra 4.....	57

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

CPM:	Critical Path Method, Método de la Ruta Crítica
GAMS:	General Algebraic Modeling System, Sistema general de modelización algebraica
MGMP:	Management of a Group of Multiple Projects
MTO:	Make to order, sistema de manufactura en donde una empresa produce determinado producto sólo bajo pedido.
MIP:	Mixed Integer Programming, programación entera mixta
PERT:	Program Evaluation and review Technique, Técnica de Revisión y Evaluación de Programas

CAPÍTULO 1

1.1 JUSTIFICACIÓN

En la actualidad, la industria de la construcción es un eje muy importante para el desarrollo de la sociedad ya que por medio de este se obtiene bienes de capital fijo que intervienen en el crecimiento de la economía. La necesidad de cumplir con la demanda de las personas de tener su propio hogar o tener una mejor calidad de vida, influye a muchas empresas del sector ofrezcan proyectos inmobiliarios para todo rango económico-social. Una de las características más importante de las empresas dentro de la industria, es el manejo de un mismo personal para varios proyectos inmobiliario al mismo tiempo en distintos lugares y con distintas fechas de entrega.

En estas empresas inmobiliarias, uno de los grandes problemas que tienen es el cumplimiento de los diversos plazos o fases dentro del proceso de diseño, construcción y entrega de proyectos. Esto normalmente implica la necesidad de una mejor administración y control de recursos para poder cumplir con los varios proyectos de forma simultánea, lo que resulta complejo si no se cuenta con las herramientas que puedan ayudar o contribuir de forma eficiente y efectiva.

El uso de los modelos matemáticos nos ayuda a recrear lo que sucede y mejorar. Estos modelos nos ayudan a observar donde está la falla o que está causando el bajo rendimiento o los costos elevados y un sinnúmero de falencias que podríamos tener dentro de una situación, con la finalidad de desglosar conclusiones y plantear las posibles soluciones para optimizar, mejorar y construir una mejor situación en base a los que se requiere optimizar o mejorar.

El enfoque de este proyecto es optimizar el recurso humano y material, con el fin de alcanzar los plazos de entrega y mantener un stock de acuerdo a la demanda de los proyectos vigentes.

1.2 PROBLEMÁTICA

En las diferentes industrias que trabajan bajo ambiente de multi-proyectos, pueden encontrarse con diferentes factores, ya sea interno o externo, que causan retrasos o demoras en el cumplimiento de los mismos. Se toman medidas para evitar estos atrasos como un plan de cumplimiento de tareas y una proyección de abastecimiento, los cuales crean cierta seguridad en el equipo de trabajo hasta la ejecución, ya que en ese momento se puede conocer si se cuentan con todos los recursos necesarios para la construcción y si efectivamente se puede cumplir con las fechas determinadas en el plan de actividades.

En la empresa objeto de estudio, actualmente el cumplimiento de los proyectos inmobiliarios sufre retrasos por los siguientes motivos:

- Falta de recurso humano para terminar el proyecto debido a que se trabaja en múltiples proyectos al mismo tiempo.
- La empresa no cuenta con suficientes grupos de trabajos para completar proyectos.
- Compras locales de último momento debido a falta de suministro de material por parte del proveedor.
- Costos altos por transporte y almacenamiento por exceso de material en la construcción.
- Errores durante el proceso.

Las consecuencias de las demoras son multas monetarias por contratos no cumplidos y que a su vez conlleva al retraso en recepción de pagos por la venta de los diferentes proyectos habitacionales. Estas demoras

también afecta el grado de satisfacción de los clientes, quienes tienen que esperar para poder recibir su bien inmueble y ocuparlo.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo General

Mejorar la asignación actual de recurso humano y la correcta planificación de suministro de material mediante el diseño de un modelo matemático para cumplir con los tiempos establecidos y disminuir costos en los que se incurre actualmente por los retrasos en los proyectos de construcción.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Diseñar un modelo matemático que permita asignar el recurso humano con los que cuentan todos los proyectos de construcción, con la finalidad que se cumplan con los plazos establecidos.
- Plantear un modelo matemático (make to order¹) que nos proporcione la forma adecuada de planificar la entrega de material para abastecer los proyectos de construcción y evitar retrasos.
- Disminuir el exceso de inventario mediante el efectivo abastecimiento bajo el modelo make to order.
- Reducir las multas por atrasos y demoras mediante la aplicación de la solución óptima del modelo diseñado.
- Presentar los resultados con los modelos diseñados y compararlos con los resultados actuales.

¹ Make To Order (MTO) – Sistema de manufactura en donde una empresa produce determinado producto sólo bajo pedido.

1.4 METODOLOGÍA

En el presente estudio se describirá en breve el proceso de construcción de un bien inmueble desde su planeamiento hasta entrega final al cliente.

Adicionalmente, se revisará la problemática de las empresas multi-proyectos y la confusa asignación de recursos entre varios proyectos y se estudiará diferentes modelos matemáticos que pretenden dar la mejor solución.

Se recolectará información del proceso que actualmente se realiza, se tomarán cuatro proyectos similares como ejemplo que fueron desarrollados por una empresa de la industria.

Se diseñará un modelo matemático que describa el proceso de distribución de recursos y planificación de pedido, con la finalidad de mejorar los tiempos de construcción y cumplir con los plazos de entrega al cliente.

Se evaluarán los resultados obtenidos del modelo diseñado y se compararán con el proceso existente.

CAPÍTULO 2

2.1 MARCO TEÓRICO

2.1.1 Sector de la Construcción - Definición e importancia

Se define a la construcción el proceso en el cual se fabrica edificaciones e infraestructuras, esta definición incluye ya sea obras nuevas, reparaciones, ampliaciones y reformas. Varios ejemplos pueden ser: la construcción de bienes inmuebles para vivienda, edificios de oficinas o la construcción de obras de ingeniería civil, como autopistas, carreteras, puentes, puertos, alcantarillado, tuberías y demás.

El sector de la construcción es muy importante para el desarrollo de un país, ya que beneficia a la sociedad en brindar bienes básicos para su desarrollo, como escuelas, hospitales, carreteras y demás. También proporciona bienes de capital fijo, lo cual es muy importante para la economía y su crecimiento.

Tipos de construcción

La industria de la construcción se puede dividir en cuatro grupos importantes:

- Industrial,
- Comercial/Institucional,
- Infraestructura Civil y
- Residencial

Sector industrial.- Este sector incluye construcción de edificios, facilidades y equipamiento para ejercer una actividad económica, ya sea

esta de producción, explotación de recursos naturales como minerales o petróleo.

Sector comercial/institucional.- Este sector incluye la construcción de edificios para uso comercial y públicos, como oficinas, escuelas, hospitales y demás que no están incluidas en los otros sectores mencionados.

Sector infraestructura civil.- Este sector incluye la construcción de obras de interés y uso público, como construcción de calles y carreteras, tuberías, puentes, túneles, líneas eléctricas y servicios básicos.

Sector residencial.- Este sector incluye la construcción de casas y demás edificaciones cuyo uso sea únicamente para la vivienda. La empresa en estudio, se decide a la construcción de bienes inmuebles de uso residencial.

2.1.2 Etapas de la construcción de un edificio

Dentro de la industria de la construcción de bienes inmueble para uso residencial, las empresas manejan diferentes proyectos de construcción inmobiliaria. Estos proyectos constan de varias tareas que en mayoría de los casos mantienen un mismo proceso, aunque pueden cambiar los tiempos de ejecución dependiendo del caso.

A continuación se detalla paso a paso el proceso para construir un bien inmueble:

1. Estudios y planificación inicial.- En esta etapa los topógrafos realizan trabajo de campo, haciendo mediciones y elaborando planos de cortes

en base al tipo de terreno que se proyecta construir. Adicionalmente, el ingeniero geotécnico evalúa características del suelo para que pueda soportar el bien inmueble.

Posterior a la evaluación del suelo, se elabora los planos arquitectónicos, estructurales y de instalaciones de servicios de agua, luz, teléfono y demás.

2. Costos y Presupuesto.- Ingenieros y Arquitectos especialistas realizan presupuesto en base a los costos estimados en construcción y materiales necesarios, como también costo en mano de obra y maquinaria. Esta parte es muy importante en la planificación del recurso humano a utilizar y la cantidad de material que se necesitaría para cada tarea de la construcción.

3. Construcción.- Dentro de este numeral se especificará las tareas principales que realizan los obreros en la construcción de un bien inmueble:

3.1. Cerramiento de obra y construcción de casetas temporales: Como parte procedente de la construcción en el terreno, que se utilizará para dicho proyecto se deberá realizar un cerramiento de obra e implementación de casetas provisionales para que los obreros puedan ejecutar su trabajo, así como también servirá para almacenar parte del material que se utilizará en la obra.

3.2. Preparación del terreno: Se procede a limpiar el terreno y a nivelarlo para que se encuentre listo para realizar las excavaciones para colocar las bases del inmueble y su estructura.

3.3. Cimentaciones (estructura): En este proceso se procede a excavar las zanjas de cimentación, para encontrar zona de dureza aceptable para la construcción del edificio. Esto con el fin de proceder a encofrar y colocar concreto en la cimentación y pilares.

3.4. Instalaciones: Después de la cimentación, se procede con la instalación de tuberías y cañerías para el agua potable, del cableado eléctrico, saneamiento, telecomunicaciones, gas, aire acondicionado, sistema contra incendios y de seguridad. También se consideran como instalación los ascensores, transformadores de electricidad, maquinaria de bombeo de agua, conductos para basura.

3.5. Cubierta: En esta etapa, se realiza la construcción del techo o tejados de la edificación, mismos que pueden ser de concreto, cubiertas de madera o tejados.

3.6. Mampostería: Después de la cubierta, se levanta los muros de fachada y los medianeros, las paredes internas y divisiones.

3.7. Impermeabilizaciones y aislamientos: En esta parte, con la finalidad de evitar filtraciones que puedan ocurrir y afecten la edificación, se procede a impermeabilizar las losas y cubiertas, como también los muros, tanques y cisternas de agua.

3.8. Acabados interiores: Se procede con el revestimiento o enlucido de las paredes, colocación de cerámicas, porcelanatos en pisos y demás. También se procede a pintar los interiores, colocación de gypsum para realizar cielo raso drywall, etc.

3.9. Instalación de puertas, ventanas, closets y sanitarios: Se colocan puertas y ventanas en toda la edificación. También se instala los

muebles de baño, closets, cocinas, sanitarios, lavamanos, jacuzzis, grifería, etc.

3.10. Aseo y entrega: Culminado el proceso de construcción se realiza el aseo y limpieza en toda la edificación como último proceso, previo a la entrega a los futuros dueños y habitantes del inmueble.

2.2 PROGRAMACIÓN MATEMÁTICA

2.2.1 Definición

Programación matemática u optimización matemática es un procedimiento en el cual se pretende resolver un problema determinado con el uso de ecuaciones, optimizando la función objetivo (maximizando o minimizando), sujeta a restricciones que están expresadas mediante un sistema de inecuaciones.

En general, estos modelos cuentan con las siguientes características principales:

- Decisiones o Variables a calcular
- Función o funciones objetivo
- Ecuaciones de restricción o limitantes del problema

2.2.2 Planteamiento

El planteamiento básico comienza con una función objetiva, representando matemáticamente el objetivo del problema que se trata resolver.

A continuación se indica el planteamiento básico de un problema de programación matemática:

$$\begin{aligned} & \text{Optimizar } f(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ & \text{sujeto a: } g_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq b_1 \\ & \quad g_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq b_2 \\ & \quad \dots \\ & \quad g_m(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq b_m \end{aligned}$$

$$\text{donde } f: R^n \rightarrow R, \quad x \in R^n, \quad g: R^n \rightarrow R^m \quad b \in R^m$$

La función f , o función objetivo, es una función delimitada de un dominio de R^n sobre R .

El vector x es el vector de variables, mismo que se trata de conseguir con la finalidad de facilitar el valor óptimo para resolver la función objetivo. Se puede conseguir uno o varios valores.

Conjunto de oportunidades es el conjunto de variables o puntos x_n que pertenecen al dominio R^n , y que también verifican todas las restricciones. Este conjunto, al mismo tiempo, deben pertenecer al dominio de definición de la función objetivo.

El objeto de la programación matemática es conseguir aquel o aquellos valores de las variables dentro del conjunto de oportunidades, que puedan minimizar o maximizar el valor de la función objetivo.

2.2.3 Importancia

Uno de los motivos por el cual se considera muy importante la programación matemática, es que muchos de los problemas prácticos de la investigación de operaciones pueden plantearse como problemas de programación matemática, tales como problema de flujos de redes o/y de mercancías. También se utiliza como técnica financiera o logística, como soporte en la toma de decisiones en cualquier compañía ya sea de transporte, producción o almacenamiento.

Algunos ejemplos en que se usa la programación matemática tales como la composición de alimentos, control de inventarios, en las finanzas, la asignación del recurso humano y uso de maquinaria, distribución, etc.

Otros ejemplos en el cual la programación ha sido de suma importancia son:

- LA PLANIFICACIÓN TÁCTICA.-

El problema fundamental a resolver es la asignación efectiva de los recursos para satisfacer la demanda y los requisitos tecnológicos, teniendo en cuenta los costes e ingresos derivados de la explotación de los recursos disponibles en la empresa. Las decisiones más frecuentes que aparecen en este ámbito son la asignación de los recursos globales de capacidad, la creación de horarios, la definición de los canales de distribución, selección de alternativas de transporte y transbordo, asignaciones de los presupuestos de publicidad y promoción, etc.

- EL CONTROL DE OPERACIONES.-

Una vez elaborada una asignación global de los recursos de la empresa, es necesario hacer frente al día a día tomando decisiones de planificación operativa. Las decisiones típicas en este nivel son la asignación de pedidos de los clientes, la mejor secuenciación de órdenes en los talleres, las actividades de control de inventario y la contabilidad del inventario, el envío, expedición y procesamiento de pedidos, programación de vehículos de transporte, etc.

2.2.4 Programación Lineal Entera Mixta

Programación lineal entera mixta o programación entera mixta (MIP) es la maximización o minimización de una función lineal que está sujeta a

restricciones lineales y en las cuales una o varias variables deben ser enteras y otras no.

Cuando todas las variables deben ser enteras, el modelo se lo conoce como programación lineal entera pura.

Cuando todas las variables solo pueden tomar valores de 0 o 1 (toma de decisión), se llama programación lineal binaria.

Al incluir variables enteras en un modelo, incrementa su complejidad, debido a que no siempre los vértices de la solución factible pueden ser números enteros y redondear los posibles resultados no obligatoriamente cumple con las restricciones o pueda ser la mejor respuesta.

Para poder resolver este tipo de problemas existen algunos métodos matemáticos, uno de los más utilizados es el Branch and Bound en el cual busca la solución óptima a la “relajación” del problema. Otros métodos relacionados son con heurísticas y meta-heurísticas, dependiendo de la complejidad del problema, aunque en la actualidad existen solvers o programas en que tratan de solucionar problemas complejos o de muchas variables.

2.3 ESTADO DE ARTE

A continuación se detallarán cinco extractos publicados por varios autores, los mismos que utilizan métodos ya sean prácticos o matemáticos para resolver la problemática de la asignación de los recursos en empresas que manejan multi-proyectos y de igual manera se encuentran en la industria de la construcción.

2.3.1 Multiproject Scheduling in Construction Industry, Y. Gholipour, 2013.

Este artículo trata sobre como la mayoría de las empresas manejan varios proyectos simultáneos en vez de uno, motivando que cada proyecto tenga sus propias necesidades y tiempos de cumplimiento. Por lo cual el autor plantea la utilización de un método para reducir riesgos y costos por el uso de almacenamiento y transporte para los recursos compartidos y no compartidos entre proyectos simultáneos.

Dentro de la metodología, primero se separa cada proyecto y se lo planifica usando herramientas tecnológicas como MSP o PRIMAVERA. Luego se define intervalo de tiempo y divide el período máximo esperado de la ejecución del proyecto. También se procede a estimar la demanda de recurso necesaria para cada actividad de cada proyecto en diferentes intervalos de tiempo.

Después de evaluar mediante análisis de sensibilidad la influencia de la falta de recurso en la entrega del proyecto para identificar los recursos más vulnerables. Luego de esto se procede a analizar los factores y distinguir cuales están más influenciados por el transporte y almacenamiento.

Luego se procede a estimar la cantidad necesaria de los recursos seleccionados con precisión para cumplir la demanda en los intervalos de tiempo, siendo como variable la cantidad de recurso durante el intervalo de tiempo. Se procede a identificar los límites superior e inferior de cada recurso lo cuales servirán como restricción en programa de optimización. También se utiliza la capacidad y costos directos e indirectos de almacenamiento y transporte como restricción. Después se utiliza programa de optimización para encontrar las variables en un costo mínimo.

2.3.2 Project overload: An exploratory study of work and management in multi-project settings, A. Zika-Viktorsson, P. Sundström & M. Engwall, 2006.

En este trabajo el autor investiga aspectos psicológicos dentro de empresas con multi-proyectos dado a que involucra tareas realizadas en el mismo tiempo, con el mismo personal, trabajando paralelamente en los proyectos para que sean cumplidos. Como referencia, se indica que en la mayor parte de la planificación de proyectos, se busca optimizar ya sea el recurso humano, el material y los tiempos; pero poco o nada se estudia el impacto del trabajo en el recurso humano, mismo que puede afectar la eficiencia del trabajo realizado.

En este artículo el autor da como referencia al exceso de trabajo como sobrecarga del proyecto mismo que es afectado por los siguientes factores:

- Número de proyectos
- Rutina
- Formalización
- Semejanza de tareas
- Oportunidades de recuperación
- Desafíos
- Autoridad
- Retroalimentación

Estos factores pueden en buena o mala manera afectar la sobrecarga en los proyectos, mismo que tiene consecuencias como la poca adherencia a los tiempos planificados, bajo desarrollo de habilidades, baja actividad para mejorar y alto nivel de stress.

Para poder analizar, los autores proporcionan cuatro hipótesis entre la relación de la sobrecarga de trabajo con cada una de las consecuencias mencionadas. Se realizaron encuestas a trabajadores del medio, mismo que en sus resultados concuerdan que la mayoría de las consecuencias están relacionadas con la sobrecarga de trabajo a excepción de la baja actividad para mejorar.

Por lo cual, se concluye que los trabajadores que trabajan en proyectos paralelos en un ambiente limitado de recurso de tiempo, pocas oportunidades y rutinas inadecuadas, pueden tomar el riesgo de sobrecargarse, mismo que puede afectar su bienestar personal, como también afectar a largo plazo su eficiencia y calidad en el trabajo.

2.3.3 Optimal Scheduling for Repetitive Construction Projects with Multiple Resource Crews, Sanjay Bhojar & Dr. Dhananjay K. Parbar, 2014

En este artículo se hace referencia que los proyectos repetitivos son muy comunes en la industria de la construcción, mismos que se caracterizan por actividades repetitivas en el cual los trabajadores van de proyecto a proyecto, realizando tareas repetitivas.

Maximizar la continuidad del trabajo de estos trabajadores aumenta la productividad y reduce costos, pero puede lograr que el tiempo de entrega se extienda. Los administradores deben manejar una programación que pueda tener un balance óptimo en el cual minimizan la duración del proyecto y maximiza la continuidad del trabajo, dado a que el modelo CPM² se basa más en la duración y no considera la continuidad del trabajo en los proyectos repetitivos.

² CPM: Critical Path Method (Método de la Ruta Crítica)

Este trabajo presenta un nuevo modelo para programar proyectos de construcción repetitivos. Para cada tarea repetitiva el modelo determina un tiempo de comienzo y tiempo final, la asignación del personal y la duración en dos etapas. En la primera etapa el modelo programa todas las tareas en cada unidad asignando personal para cada tarea para que se complete lo más pronto posible. En la segunda etapa, se logra que la continuidad del trabajo sea maximizada para cada personal en la primera etapa.

2.3.4 A Simulation Model For Resource Constrained Scheduling of Multiple Project, B. Kanagasabapath and K. Ananthanarayanan, 2005

En este artículo los autores detallan que los planificadores en la construcción, usualmente usan técnicas de programación para conocer las secuencias de tareas en un proyecto. Las más comunes siendo los modelos PERT³ y CPM son unas de las más utilizadas, pero ambas presentan el mismo inconveniente, que toman la suposición que los recursos son ilimitados. Es decir que la ruta crítica de las tareas se basan en requerimiento de tiempo, más no los recursos, por lo cual no puede decidir cuál actividad tiene prioridad cuando hay restricciones y se complica aún más cuando se maneja varios proyectos o multiproyectos.

Debido a lo antes indicado, los autores diseñan un modelo de simulación para programar actividades en multiproyectos cuando los recursos están limitados. El modelo de simulación se basa en reglas de programación basado en heurísticas que pueden ser clasificadas en base a tiempo en proceso, fecha de vencimiento, recursos, costos o en penalidad.

³ PERT: Program Evaluation and review Technique (Técnica de Eevisión y Evaluación de Pprogramas)

Son varios pasos involucrados en la simulación: Primero se lista las actividades y sus requerimientos de recursos por cada proyecto, se procede a programar usando el método tradicional de ruta crítica sin considerar la restricción de recursos. Se realizan simulaciones a actividades precedentes, que son organizadas mediante una lista de prioridad en cuanto a la regla de programación escogida. Si hay recursos disponibles para iniciar actividades se procede a realizar actividades utilizando recurso hasta que no hay disponibilidad. Estos recursos quedan bloqueados hasta que termine la actividad y puedan ser utilizados. Esto se vuelve a repetir hasta que no haya actividades y termine la simulación.

2.3.5 The effectiveness in managing a group of multiple projects: Factors of influence and measurements criteria, Peerasit Patankul, Dragan Milosevic, 2008

En este artículo, los autores hacen mención que para mejorar la eficiencia en la administración, algunas organizaciones usan prácticas de manejo de multi-proyectos (MGMP⁴), es decir contratan un gerente para el control de varios proyectos al mismo tiempo. Aun cuando hay alta tendencia en manejarse de esta forma, no hay muchos estudios sobre esta forma de manejo, por lo cual, los autores proponen factores de influencia que afectan el manejo de multi-proyectos, mismo que lo indican cinco proposiciones:

1. La importancia de asignación de tareas afecta la eficacia en MGMP. Aunque no hay muchos estudios, los autores proponen que si hay mejores herramientas para el manejo de tareas y la administración, en especial si es con MGMP.

⁴ MGMP: Management of a Group of Multiple Projects

2. El impacto de los recursos suficientes y sostenibles y su eficacia en el MGMP. La eficiencia en el manejo de los recursos limitados en los proyectos y las herramientas utilizadas afectan en buena forma el MGMP.
3. La organización cultural debe recalcar el compromiso, comunicación, trabajo en equipo y premiar por el desempeño por la eficacia en MGMP.
4. La importancia de manejar un buen proceso en el manejo del trabajo para gerencia de multi-proyectos.
5. La importancia de la capacidad de los gerentes que manejan multi-proyectos de liderar proyectos como también coordinar los mismos.

En base a las proposiciones antes indicadas, los autores promueven para la práctica y buen control, de igual manera para futuro análisis de mejoras.

CAPÍTULO 3

DISEÑO Y APLICACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO

3.1 Introducción

La empresa de estudio de esta tesis es una empresa dedicada a la construcción de bienes inmuebles de uso residencial y generalmente mantiene varios proyectos al mismo tiempo.

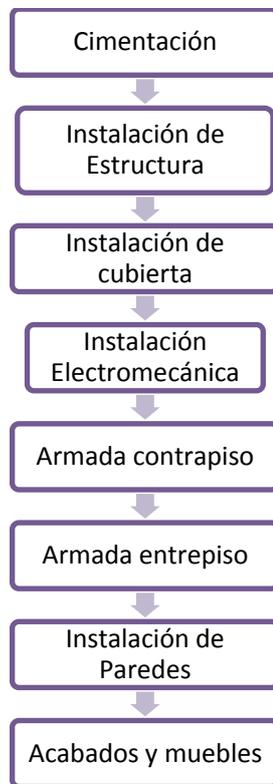
En el caso de estudio, se utilizará 4 obras de construcción de edificios de apartamentos ubicados en distintos lugares de ciudadelas residenciales conocidas en la ciudad de Guayaquil. Cada obra cuenta con 2 edificaciones de 3 a 2 pisos cada una. A continuación se muestra un modelo de obra de un edificio de residencias.

Ilustración 3.1 – Modelo de obra: Edificio Residencial de 3 pisos.



Todos estos proyectos suelen mantener la siguiente estructura respecto a las actividades a realizar al momento de la programación de la obra luego de que la misma sea planificada y diseñada, es decir el proceso de construcción en sí, mismos que pueden variar dependiendo del tipo de proyecto:

Ilustración 3. 2 - Detalle de actividades principales en construcción de obra por edificio.



En base a las tareas a realizar, el personal se divide en grupos de trabajo, los mismos que son responsables en el cumplimiento de las tareas de los proyectos a los que son asignados.

El Departamento de Obras pocas veces comunica con anticipación a Compras el material a utilizarse y fechas en que se los requiere para la ejecución de actividad dentro del proyecto y de esta forma cumplir con las fechas determinadas de entrega.

Notar que la empresa mide la realización de cada actividad en días laborables, de igual forma la entrega de los materiales a sitio.

Para este proyecto, no se consideran las actividades de Estudio y planificación inicial, como tampoco las actividades de Costos y Presupuestos; dado a que ambos son realizados por la Gerencia. Este proyecto estudiará actividades dentro del proceso de construcción en sí.

3.2 Información utilizada

Dado el problema planteado, se toma como ejemplo de estudio 4 proyectos de obra inmobiliaria. Cada uno contiene una lista de actividades por realizar que varían por proyecto. Cada actividad utiliza un tipo de recurso en un plazo de tiempo dado.

Hemos tomado para este estudio 4 tipos de recursos, que son los distintos grupos de trabajo que tiene la empresa para llevar a cabo las distintas instalaciones. Se debe recalcar que al inicio de cualquier proyecto no se considera en el plan de instalación los recursos adicionales que posiblemente se contraten en la ejecución.

Tabla 3.1 – Detalle de Recursos utilizados en los proyectos

Nombre Recurso	Cod.	Cantidad disponible	Costo semanal por recurso adicional
Trasporte	h1	16	\$ 90
Grupo 1	h2	16	\$ 90
Grupo 2	h3	16	\$ 90
Grupo 3	h4	16	\$ 90

Notar a continuación las siguientes tablas, mismas que detallan las actividades por cada proyecto, cantidad de recurso usado y el tiempo de días que toma ser efectuadas:

Tabla 3.2 – Actividades de la Obra Nro. 1

PROYECTO INMOBILIARIO 1 - 2 EDIF. CON 4 APARTAMENTOS C/U

ACTIVIDAD	COD ACT.	ACT. PRED.	TIPO RECURSO	CANTIDAD RECURSO	TIEMPO (SEM)	MATERIAL REQUERIDO
Entrega material para cimentación	act1	-	T	4	1	CEMENTO*400, HIERRO*350
Armadura Parte 1	act2	act1	G1	5	2	
Concreto Parte 1	act3	act2	G2	5	5	
Armadura Parte 2	act4	act1	G3	5	2	
Concreto Parte 2	act5	act4	G2	5	5	
Entrega material para estructura metálica	act6	act5	T	4	1	HIERRO*1000
Instalación columnas Parte 1	act7	act6	G1	5	4	
Instalación vigas Parte 1 P.1	act8	act7	G2	5	3	
Instalación vigas Parte 1 P.2	act9	act8	G2	5	3	
Instalación vigas Parte 1 P.3	act10	act9	G3	5	3	
Instalación vigas Parte 1 P.4	act11	act10	G3	5	3	
Instalación columnas Parte 2	act12	act7	G3	5	1	
Instalación vigas Parte 2 P.1	act13	act12	G1	5	3	
Instalación vigas Parte 2 P.2	act14	act13	G1	5	3	
Instalación vigas Parte 2 P.3	act15	act14	G2	5	3	
Instalación vigas Parte 2 P.4	act16	act15	G2	5	3	
Entrega Material para cubierta	act17	act16	T	4	1	CEMENTO*20, HIERRO*10

Instalación estructura Parte 1	act18	act17	G1	5	1	
Instalación cubierta Parte 1	act19	act18	G2	5	2	
Instalación estructura Parte 2	act20	act17	G3	5	1	
Instalación cubierta Parte 2	act21	act20	G2	5	2	
Entrega Material para Instalación Mecan. Electr.	act22	act21	T	4	1	TUBERIAS*300, CABLES*600
Instalación mecánica Parte 1	act23	act22	G1	5	2	
Instalación mecánica Parte 2	act24	act23	G2	5	2	
Instalación Eléctrica Parte 1	act25	act24	G3	5	2	
Instalación Eléctrica Parte 2	act26	act25	G3	5	2	
Entrega Material para Colado Concreto	act27	act22	T	4	1	CEMENTO*300, HIERRO*15, BLOQUES*1000
Armado contrapiso Parte 1	act28	act27	G1	5	3	
Armado entrepiso Parte 1 P.2	act29	act28	G2	5	3	
Armado entrepiso Parte 1 P.3	act30	act29	G2	5	3	
Armado entrepiso Parte 1 P.4	act31	act30	G3	5	3	
Armado contrapiso Parte 2	act32	act27	G3	5	3	
Armado entrepiso Parte 2 P.2	act33	act32	G1	5	3	
Armado entrepiso Parte 2 P.3	act34	act33	G1	5	3	
Armado entrepiso Parte21 P.4	act35	act34	G2	5	3	

Entrega Material Paredes	act36	act35	T	4	1	BLOQUES*8000 CEMENTO*100
Instalación paredes Parte 1 P.1	act37	act36	G1	5	2	
Instalación paredes Parte 1 P.2	act38	act37	G1	5	1	
Instalación paredes Parte 1 P.3	act39	act38	G2	5	1	
Instalación paredes Parte 1 P.4	act40	act39	G2	5	1	
Instalación paredes Parte 2 P.1	act41	act36	G3	5	1	
Instalación paredes Parte 2 P.2	act42	act41	G3	5	1	
Instalación paredes Parte 2 P.3	act43	act42	G1	5	1	
Instalación paredes Parte 2 P.4	act44	act43	G1	5	1	
Entrega Material Acabados	act45	act44	T	4	1	PINTURA*1000, CERAMIC*1500, CEMENTO*80
Acabado Parte 1	act46	act45	G1	5	3	
Acabado Parte 2	act47	act45	G2	5	3	
Limpieza y Entega Parte 1	act48	act46	G3	5	2	
Limpieza y Entega Parte 2	act49	act47	G2	5	2	

Tabla 3.3 – Actividades de la Obra Nro. 2

PROYECTO INMOBILIARIO 2 - 2 EDIF. CON 4 APARTAMENTOS C/U

ACTIVIDAD	COD ACT.	ACT. PRED.	TIPO RECURSO	CANTIDAD RECURSO	TIEMPO (SEM)	MATERIAL REQUERIDO
Entrega material para cimentación	act1	-	T	4	1	CEMENTO*400, HIERRO*350
Armadura Parte 1	act2	act1	G1	5	3	
Concreto Parte 1	act3	act2	G2	5	5	
Armadura Parte 2	act4	act1	G3	5	3	
Concreto Parte 2	act5	act4	G2	5	5	
Entrega material para estructura metálica	act6	act5	T	4	1	HIERRO*1000
Instalación columnas Parte 1	act7	act6	G1	5	3	
Instalación vigas Parte 1 P.1	act8	act7	G2	5	2	
Instalación vigas Parte 1 P.2	act9	act8	G2	5	2	
Instalación vigas Parte 1 P.3	act10	act9	G3	5	2	
Instalación vigas Parte 1 P.4	act11	act10	G3	5	3	
Instalación columnas Parte 2	act12	act7	G3	5	4	
Instalación vigas Parte 2 P.1	act13	act12	G1	5	2	
Instalación vigas Parte 2 P.2	act14	act13	G1	5	2	
Instalación vigas Parte 2 P.3	act15	act14	G2	5	2	
Instalación vigas Parte 2 P.4	act16	act15	G2	5	3	
Entrega Material para cubierta	act17	act16	T	4	2	CEMENTO*20, HIERRO*10

Instalación estructura Parte 1	act18	act17	G1	5	1	
Instalación cubierta Parte 1	act19	act18	G2	5	2	
Instalación estructura Parte 2	act20	act17	G3	5	2	
Instalación cubierta Parte 2	act21	act20	G2	5	1	
Entrega Material para Instalación Mecan. Electr.	act22	act21	T	4	1	TUBERIAS*300, CABLES*600
Instalación mecánica Parte 1	act23	act22	G1	5	2	
Instalación mecánica Parte 2	act24	act23	G2	5	2	
Instalación Eléctrica Parte 1	act25	act24	G3	5	3	
Instalación Eléctrica Parte 2	act26	act25	G3	5	3	
Entrega Material para Colado Concreto	act27	act22	T	4	1	CEMENTO*300, HIERRO*15, BLOQUES*1000
Armado contrapiso Parte 1	act28	act27	G1	5	4	
Armado entrepiso Parte 1 P.2	act29	act28	G2	5	2	
Armado entrepiso Parte 1 P.3	act30	act29	G2	5	2	
Armado entrepiso Parte 1 P.4	act31	act30	G3	5	2	
Armado contrapiso Parte 2	act32	act27	G3	5	4	
Armado entrepiso Parte 2 P.2	act33	act32	G1	5	2	
Armado entrepiso Parte 2 P.3	act34	act33	G1	5	2	
Armado entrepiso Parte21 P.4	act35	act34	G2	5	2	

Entrega Material Paredes	act36	act35	T	4	1	BLOQUES*8000 CEMENTO*100
Instalación paredes Parte 1 P.1	act37	act36	G1	5	2	
Instalación paredes Parte 1 P.2	act38	act37	G1	5	2	
Instalación paredes Parte 1 P.3	act39	act38	G2	5	2	
Instalación paredes Parte 1 P.4	act40	act39	G2	5	2	
Instalación paredes Parte 2 P.1	act41	act36	G3	5	3	
Instalación paredes Parte 2 P.2	act42	act41	G3	5	2	
Instalación paredes Parte 2 P.3	act43	act42	G1	5	2	
Instalación paredes Parte 2 P.4	act44	act43	G1	5	1	
Entrega Material Acabados	act45	act44	T	4	1	PINTURA*1000, CERAMIC*1500, CEMENTO*80
Acabado Parte 1	act46	act45	G1	5	2	
Acabado Parte 2	act47	act45	G2	5	2	
Limpieza y Entega Parte 1	act48	act46	G3	5	1	
Limpieza y Entega Parte 2	act49	act47	G2	5	1	

Tabla 3.4 – Actividades de la Obra Nro. 3

PROYECTO INMOBILIARIO 3 - 2 EDIF. CON 3 APARTAMENTOS C/U

ACTIVIDAD	COD ACT.	ACT. PRED.	TIPO RECURSO	CANTIDAD RECURSO	TIEMPO (SEM)	MATERIAL REQUERIDO
Entrega material para cimentación	act50	-	T	4	1	CEMENTO*400, HIERRO*350
Armadura Parte 1	act51	act50	G1	5	3	
Concreto Parte 1	act52	act51	G2	5	5	
Armadura Parte 2	act53	act50	G3	5	3	
Concreto Parte 2	act54	act53	G2	5	5	
Entrega material para estructura metálica	act55	act54	T	4	1	HIERRO*1000
Instalación columnas Parte 1	act56	act55	G2	5	2	
Instalación vigas Parte 1 P.1	act57	act56	G2	5	3	
Instalación vigas Parte 1 P.2	act58	act57	G3	5	3	
Instalación vigas Parte 1 P.3	act59	act58	G3	5	3	
Instalación columnas Parte 2	act60	act55	G1	5	2	
Instalación vigas Parte 2 P.1	act61	act60	G2	5	3	
Instalación vigas Parte 2 P.2	act62	act61	G3	5	3	
Instalación vigas Parte 2 P.3	act63	act62	G2	5	3	
Entrega Material para cubierta	act64	act63	T	4	1	CEMENTO*20, HIERRO*10
Instalación estructura Parte 1	act65	act64	G1	5	2	
Instalación cubierta Parte 1	act66	act65	G1	5	1	

Instalación estructura Parte 2	act67	act64	G3	5	2	
Instalación cubierta Parte 2	act68	act67	G3	5	1	
Entrega Material para Instalación Mecan. Electr.	act69	act68	T	4	1	TUBERIAS*300, CABLES*600
Instalación mecánica Parte 1	act70	act69	G2	5	2	
Instalación mecánica Parte 2	act71	act69	G1	5	2	
Instalación Eléctrica Parte 1	act72	act70	G2	5	2	
Instalación Eléctrica Parte 2	act73	act71	G1	5	2	
Entrega Material para Colado Concreto	act74	act73	T	4	1	CEMENTO*300, HIERRO*15, BLOQUES*1000
Armado contrapiso Parte 1	act75	act74	G3	5	2	
Armado entrepiso Parte 1 P.2	act76	act75	G3	5	3	
Armado entrepiso Parte 1 P.3	act77	act76	G2	5	3	
Armado contrapiso Parte 2	act78	act77	G1	5	2	
Armado entrepiso Parte 2 P.2	act79	act78	G2	5	3	
Armado entrepiso Parte 2 P.3	act80	act79	G2	5	3	
Entrega Material Paredes	act81	act80	T	4	1	BLOQUES*8000 CEMENTO*100
Instalación paredes Parte 1 P.1	act82	act81	G2	5	2	
Instalación paredes Parte 1 P.2	act83	act82	G2	5	2	

Instalación paredes Parte 1 P.3	act84	act83	G3	5	2	
Instalación paredes Parte 2 P.1	act85	act81	G3	5	2	
Instalación paredes Parte 2 P.2	act86	act81	G1	5	2	
Instalación paredes Parte 2 P.3	act87	act86	G1	5	2	
Entrega Material Acabados	act88	act87	T	4	1	PINTURA*1000, CERAMIC*1500, CEMENTO*80
Acabado Parte 1	act89	act88	G3	5	1	
Acabado Parte 2	act90	act88	G2	5	1	
Limpieza y Entega Parte 1	act91	act89	G3	5	1	
Limpieza y Entega Parte 2	act92	act90	G2	5	1	

Tabla 3.5 – Actividades del Proyecto Nro. 4

PROYECTO INMOBILIARIO 4 - 2 EDIF. CON 3 APARTAMENTOS C/U

ACTIVIDAD	COD ACT.	ACT. PRED.	TIPO RECURSO	CANTIDAD RECURSO	TIEMPO (SEM)	MATERIAL REQUERIDO
Entrega material para cimentación	act50	-	T	4	1	CEMENTO*400 HIERRO*350
Armadura Parte 1	act51	act50	G1	5	3	
Concreto Parte 1	act52	act51	G2	5	5	
Armadura Parte 2	act53	act50	G3	5	3	
Concreto Parte 2	act54	act53	G2	5	5	
Entrega material para estructura metálica	act55	act54	T	4	1	HIERRO*1000
Instalación columnas Parte 1	act56	act55	G2	5	2	
Instalación vigas Parte 1 P.1	act57	act56	G2	5	3	
Instalación vigas Parte 1 P.2	act58	act57	G3	5	3	
Instalación vigas Parte 1 P.3	act59	act58	G3	5	3	
Instalación columnas Parte 2	act60	act55	G1	5	2	
Instalación vigas Parte 2 P.1	act61	act60	G2	5	3	
Instalación vigas Parte 2 P.2	act62	act61	G3	5	3	
Instalación vigas Parte 2 P.3	act63	act62	G2	5	3	
Entrega Material para cubierta	act64	act63	T	4	1	CEMENTO*20, HIERRO*10
Instalación estructura Parte 1	act65	act64	G1	5	2	
Instalación cubierta Parte 1	act66	act65	G1	5	1	
Instalación estructura	act67	act64	G3	5	2	

Parte 2						
Instalación cubierta Parte 2	act68	act67	G3	5	1	
Entrega Material para Instalación Mecn. Electr.	act69	act68	T	4	1	TUBERIAS*300, CABLES*600
Instalación mecánica Parte 1	act70	act69	G2	5	2	
Instalación mecánica Parte 2	act71	act69	G1	5	2	
Instalación Eléctrica Parte 1	act72	act70	G2	5	2	
Instalación Eléctrica Parte 2	act73	act71	G1	5	2	
Entrega Material para Colado Concreto	act74	act73	T	4	1	CEMENTO*300, HIERRO*15, BLOQUES*1000
Armado contrapiso Parte 1	act75	act74	G3	5	2	
Armado entrepiso Parte 1 P.2	act76	act75	G3	5	3	
Armado entrepiso Parte 1 P.3	act77	act76	G2	5	3	
Armado contrapiso Parte 2	act78	act77	G1	5	2	
Armado entrepiso Parte 2 P.2	act79	act78	G2	5	3	
Armado entrepiso Parte 2 P.3	act80	act79	G2	5	3	
Entrega Material Paredes	act81	act80	T	4	1	BLOQUES*8000 CEMENTO*100
Instalación paredes Parte 1 P.1	act82	act81	G2	5	2	
Instalación paredes Parte 1 P.2	act83	act82	G2	5	2	
Instalación paredes Parte 1 P.3	act84	act83	G3	5	2	
Instalación paredes Parte 2 P.1	act85	act81	G3	5	2	

Instalación paredes Parte 2 P.2	act86	act81	G1	5	2	
Instalación paredes Parte 2 P.3	act87	act86	G1	5	2	
Entrega Material Acabados	act88	act87	T	4	1	PINTURA*1000, CERAMIC*1500, CEMENTO*80
Acabado Parte 1	act89	act88	G3	5	1	
Acabado Parte 2	act90	act88	G2	5	1	
Limpieza y Entrega Parte 1	act91	act89	G3	5	1	
Limpieza y Entrega Parte 2	act92	act90	G2	5	1	

Adicionalmente, para la realización de las actividades se toma 7 tipos de materiales importantes que se detallan a continuación con su lead time respectivo:

Tabla 3.6 – Detalle de los materiales más importantes utilizados en las obras

Equipo	Código	Lead Time (semanas)
Cemento	m1	3
Hierro	m2	4
Tuberías	m3	6
Cables	m4	4
Bloques	m5	7
Pintura	m6	8
Cerámica	m7	10

En base a las tablas de datos, se procede a realizar diagramas de Gantt por cada proyecto como normalmente el líder del proyecto lo planifica previamente al inicio del mismo.

3.3 Diseño del Modelo Matemático

En base a la problemática de no cumplir con el tiempo de ejecución en la instalación de los distintos proyectos que maneja la empresa, se plantea un modelo MIP⁵ que tiene como objetivos:

- Minimizar el uso del recurso humano.
- Minimizar el tiempo de ejecución de los proyectos.

Se plantea el siguiente modelo, mismo que se plantea usando herramienta GAMS⁶ para su ejecución:

Índices:

A continuación se detallan los índices del proyecto:

o: Representa cada obra a ser planificado. De acuerdo a la información, se estudiará 4 obras a la vez. En GAMS, se lo indica de la siguiente forma:

`o obra /o1*o4/`

i: Representa las distintas actividades que se ejecutan en la instalación de un proyecto. Notar que existen proyectos que comparten las mismas actividades. En base a las obras, se catalogan en total 92 actividades, misma que en programa se la indica de la siguiente forma:

`i actividad /act1*act92/`

j: Alias de *i* para efectos del programa:

`alias (i,j)`

h: Representa el recurso humano utilizado para cada tarea o actividad en la obra. Debido a que cada actividad se asigna un grupo de albañiles

⁵ MIP: Mixed Integer Programming – Programación Entera Mixta

⁶ GAMS: General Algebraic Modeling System – Sistema General de Modelización Algebraica

y obreros para su realización. Este índice, en base a los datos, se cataloga por 4 grupos:

h recurso tipo /h1,h2,h3,h4/

t : Representa el periodo de tiempo. En este proyecto el tiempo será catalogado en semanas. Mismo que se tomará desde semana 1 hasta las semana 70:

t tiempo /t0*t70/

q : Alias de t en el programa:

alias (t,q)

m : Representa los materiales requeridos para realizar actividades en cada obra. En base a los datos, se tomará 7 tipos de materiales importantes:

m materiales /m1*m7/

Conjuntos:

A continuación se detalla la relación entre los índices:

$tini_t$: Indica el tiempo t en que inicia el periodo de construcción de cada obra. Para todas las obras, se inicia en el tiempo 0.

tini(t) /t0/

$actini_{i,o}$: Indica la actividad i con la que inicia la obra o . Para las obras o1 y o2, la actividad inicial es la act1 y para las obras o3 y o4, la actividad inicial es la act50:

actini(i,o) /act1.o1, act1.o2, act50.o3, act50.o4/;

$actobr_{i,o}$: Representa la relación entre cada actividad i con cada obra o . En base a la información las obras o1 y o2 cuentan con las actividades

desde act1 a act50 y las obras o3 y o4 cuentan con las actividades desde act50 a act92.

$actobr(i,o) / (act1*act49) . (o1*o2) , (act50*act92) . (o3*o4) /$

$actpredec_{i,j,o}$: Representa la relación entre las actividades, indicando la actividad predecesora a la actividad que se está realizando en ese momento, lo cual indica el orden de las actividades a ejecutarse. Como ejemplo se puede denotar de la siguiente forma en GAMS que en la obra o1 la actividad act2 va luego de la actividad act1:

$actpredec(i,j,o) /act2.act1.o1/$, y así sucesivamente por cada actividad en cada obra.

$actrec_{h,i}$: Representa la relación entre el recurso h con la actividad i . Como ejemplo, se denota de la siguiente forma que se utiliza el recurso h1 para la actividad act1:

$actrec(h,i) /h1.act1/$, y así sucesivamente por cada recurso en cada actividad.

Parámetros:

$Par1_{i,o}$: Es el número de periodos (semanas) requeridos para la actividad i en el proyecto o . Como ejemplo, detallamos para el programa que dura 1 semana en realizar act1 en la obra o1:

$par1(i,o) /act1.o1 \quad 1/$, y así sucesivamente para cada actividad en cada obra.

$Par2_{i,h}$: Es el número de recursos tipo h requerido para realizar la actividad i . Como ejemplo, denotamos que se necesitan 4 recursos h1 para la actividad act1:

$par1(i,h) /act1.h1 \quad 4/$, y así sucesivamente para cada actividad.

$Par3_h$: Es la cantidad disponible del recurso h .

$Par4_h$: Es el costo por semana de un recurso h contratado externamente (recurso adicional) para suplir la falta de recurso interno.

$Par5_t$: Es la penalidad en el tiempo, mientras mayor es el tiempo usado, más costoso es el proyecto.

$Par6_{m,i,o}$: Son los materiales m requeridos en la obra o para la actividad i . Como ejemplo se toma que para la actividad $act1$ de la obra $o1$, se necesita 400 unidades de material $m1$:

$par6(m, i, o) / m1.act1.o1 \quad 400/$, y así sucesivamente para cada actividad.

$Par7_m$: Es el lead time (en semanas) para la adquisición del material m .

N : 999, el cual está dado por el equivalente o multa por no cumplimiento de una actividad.

S : 10, el cual permitirá ajustar los tiempos de semanas de las obras dentro de la función objetivo con el fin de que al momento de simular, se realicen las obras en el menor tiempo posible..

Variables positivas:

Z : Representación de la función objetivo.

$hsub_h$: Cantidad de recurso h adicional subcontratado.

$Inv_{m,t}$: Inventario del material m en el tiempo t .

$C_{t,m}$: Cantidad del material m cuya compra se efectúa en un tiempo t

Variables binarias:

$x_{t,i,o}$: Toma el valor de 1 si la actividad i del proyecto o inicia en el tiempo t ; 0 si no.

$y_{t,i,o}$: Toma valor de 1 si la actividad i del proyecto o se realiza en el tiempo t ; 0 si no

$w_{t,i,o}$: Toma valor de 1 si la actividad i del proyecto o culmina en el tiempo t ; 0 si no.

(1) Función Objetivo:

$$\text{Min } Z = \sum_{i,t,o} \text{Par}5_t * S * (w_{t,i,o} + x_{t,i,o}) + \sum_h \text{Par}4_h * h_{\text{sub}h}$$

Donde S es un valor utilizado con el fin de ajustar los tiempos dentro de las obras.

Para efectos de programación en GAMS, la función objetivo se la identifica de la siguiente forma:

$$\text{obj}.. \text{z}=\text{e}=\text{sum}((i,t,o),\text{par}5(t)*S*(w(t,i,o)+x(t,i,o))) + \text{sum}(h,\text{par}4(h)*h_{\text{sub}}(h));$$

Sujeto a las siguientes restricciones:

(2) Cantidad máxima de recurso h disponible por periodo de tiempo t

$$\sum_{i,o} y_{t,i,o} * \text{Par}2_{i,h} \leq \text{Par}3_h + h_{\text{sub}h} , \\ \forall t,h, (i,o) \in \text{actobr}_{i,o}$$

En el programa, la restricción se la denota de la siguiente forma:

$$\text{res}1(t,h).. \text{sum}((i,o)\$ \text{actobr}(i,o),y(t,i,o)*\text{par}2(i,h)) \\ =\text{l}=(\text{par}3(h)+h_{\text{sub}}(h));$$

(3) Determina el orden de las actividades predecesoras

$$\sum_{q < t} \sum_{j \in \text{actpredec}_{i,j,o}} w_{q,j,o} \geq y_{t,i,o} ,$$

$$\forall i, o, t, (i, o) \in \text{actobr}_{i,o}$$

$$i, o \neq \text{actini}_{i,o}, \quad t \neq \text{tini}_t$$

En el programa, la restricción se la denota de la siguiente forma:

$$\text{res2}(i, o, t) \$ (\text{actobr}(i, o) \text{ and not}(\text{actini}(i, o)) \text{ and not}(\text{tini}(t))) \dots \text{sum}((q, j) \$ ((\text{ord}(q) < \text{ord}(t)) \text{ and } \text{actpredec}(i, j, o)), w(q, j, o)) = g = y(t, i, o);$$

(4) Tiempo t que dura la actividad i de la obra o

$$\sum_t y_{t,i,o} = \text{Par1}_{i,o} ,$$

$$\forall i, o$$

En el programa, la restricción se la denota de la siguiente forma:

$$\text{res3}(i, o) \dots \text{sum}(t, y(t, i, o)) = e = \text{par1}(i, o);$$

(5) Tiempo t en que se completa la actividad i de la obra o

$$\sum_{q < t} y_{q,i,o} \geq \text{Par1}_{i,o} * w_{t,i,o} ,$$

$$\forall i, o, t, (i, o) \in \text{actobr}_{i,o}$$

En el programa, la restricción se la denota de la siguiente forma:

$$\text{res4}(i, o, t) \$ \text{actobr}(i, o) \dots \text{sum}(q \$ (\text{ord}(q) \leq \text{ord}(t)), y(q, i, o)) = g = \text{par1}(i, o) * w(t, i, o);$$

(6) Toda actividad i debe completarse

$$\sum_t w_{t,i,o} = 1 ,$$

$$\forall i, o$$

En el programa, la restricción se la denota de la siguiente forma:

$$\text{res5}(i, o) \dots \sum(t, w(t, i, o)) = e = 1;$$

(7) Ninguna actividad i puede realizarse en $t = 0$

$$y_{t,i,o} = 0, \\ \forall i, o, t, (i, o) \in \text{actobr}_{i,o}, t \in \text{tini}_t$$

En el programa, la restricción se la denota de la siguiente forma:

$$\text{res6}(t, i, o) \$(\text{tini}(t) \text{ and } \text{actobr}(i, o)) \dots y(t, i, o) = e = 0;$$

(8) Determina el inicio de cada obra o

$$x_{t,i,o} \leq y_{t,i,o}, \\ \forall t, i, o$$

$$\sum_t x_{t,i,o} = 1,$$

$$\forall i, o, (i, o) \in \text{actobr}_{i,o}$$

En el programa, la restricción se la denota de la siguiente forma:

$$\text{res7}(t, i, o) \dots x(t, i, o) = 1 = y(t, i, o);$$

$$\text{res8}(i, o) \$(\text{actobr}(i, o)) \dots \sum(t, x(t, i, o)) = e = 1;$$

(9) Balance de inventario de material m . Al modelo de asignación de recursos se integró una ecuación que representa la solicitud de materiales a utilizarse en la instalación del proyecto en base al sistema de inventario Make to Order, que es con el cual se trabaja en la empresa estudio de esta tesis, ya que la compañía compra los materiales de acuerdo a una obra específico. De esta forma el programa es capaz de calcular cuándo realizar los pedidos, es decir en qué día específico antes de la instalación del sitio se debe realizar la solicitud de los materiales a utilizarse.

$$Inv_{m,t} = Inv_{m,t-1} + C_{t-Par7(m),m} - \sum_{i,o} x_{t,i,o} * Par6_{m,i,o},$$
$$\forall t, m$$

En el programa, la restricción se la denota de la siguiente forma:

$$\text{res9}(t, m) \dots \text{inv}(m, t) = \text{inv}(m, t-1) + c(t-\text{par7}(m), m) - \text{sum}(i, o, x(t, i, o) * \text{par6}(m, i, o));$$

3.4 Implementación y Resultados en GAMS

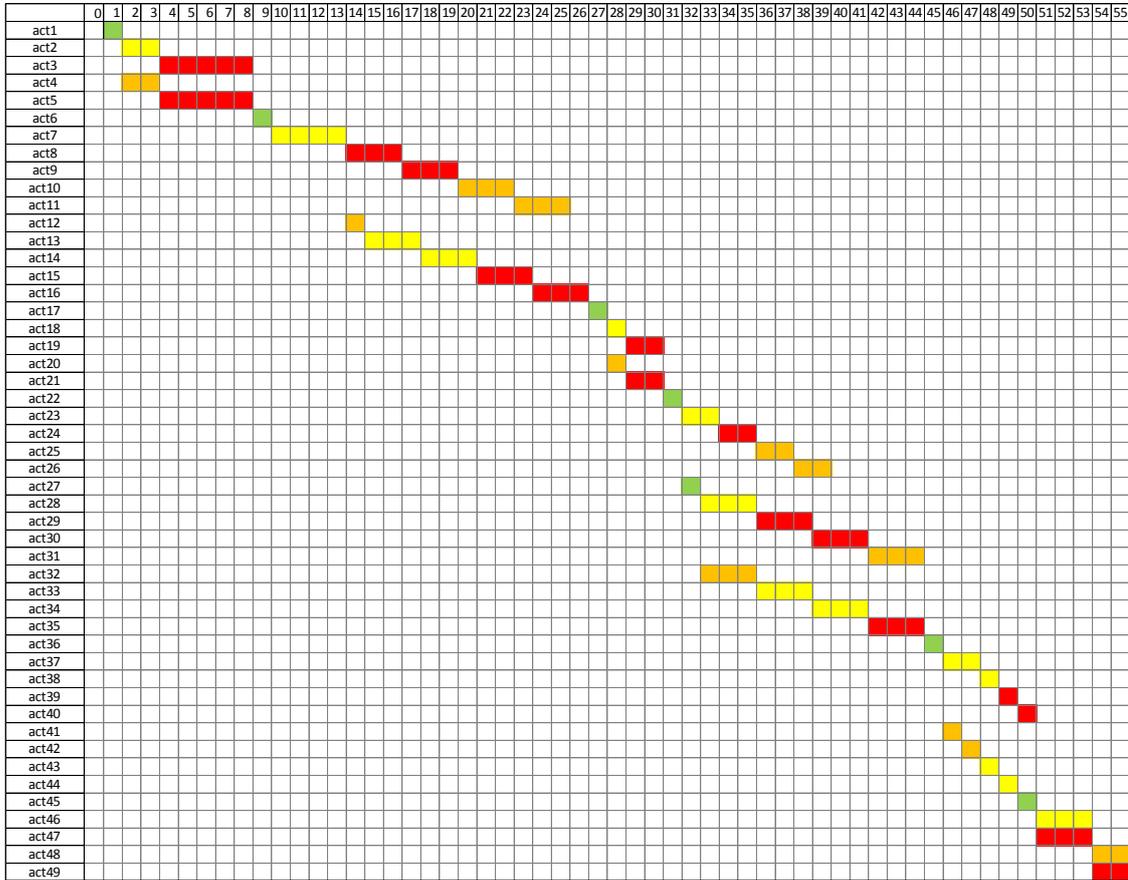
En base a la información obtenida y el costo de los recursos, se ingresan los datos en GAMS de tal manera que el programa encuentra una solución óptima para asignar los recursos en las actividades y se pueda planificar las obras en el menor tiempo posible.

Normalmente, al inicio de los proyectos no se analiza cuántos recursos adicionales se deben contratar para realizar las obras, más bien el gerente durante la ejecución de las actividades y en su necesidad va contratando personal adicional para poder cumplir las fechas de entrega de las obras.

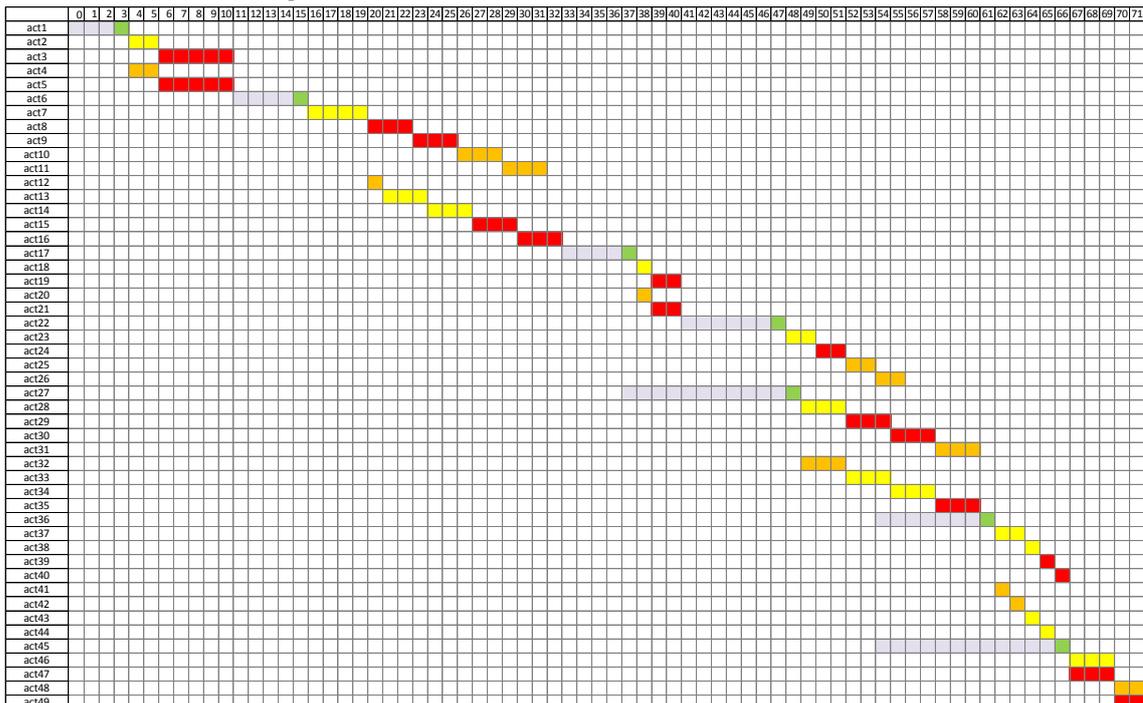
A continuación detallamos cuadros comparativos por obra de plan de construcción programado por el gerente, el real ejecutado y finalmente el modelizado, como también se mencionará las diferencias por cada uno:

Tabla 3.11 – Diagrama de Gantt del Resultado de la Obra 1

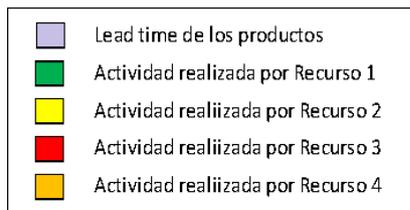
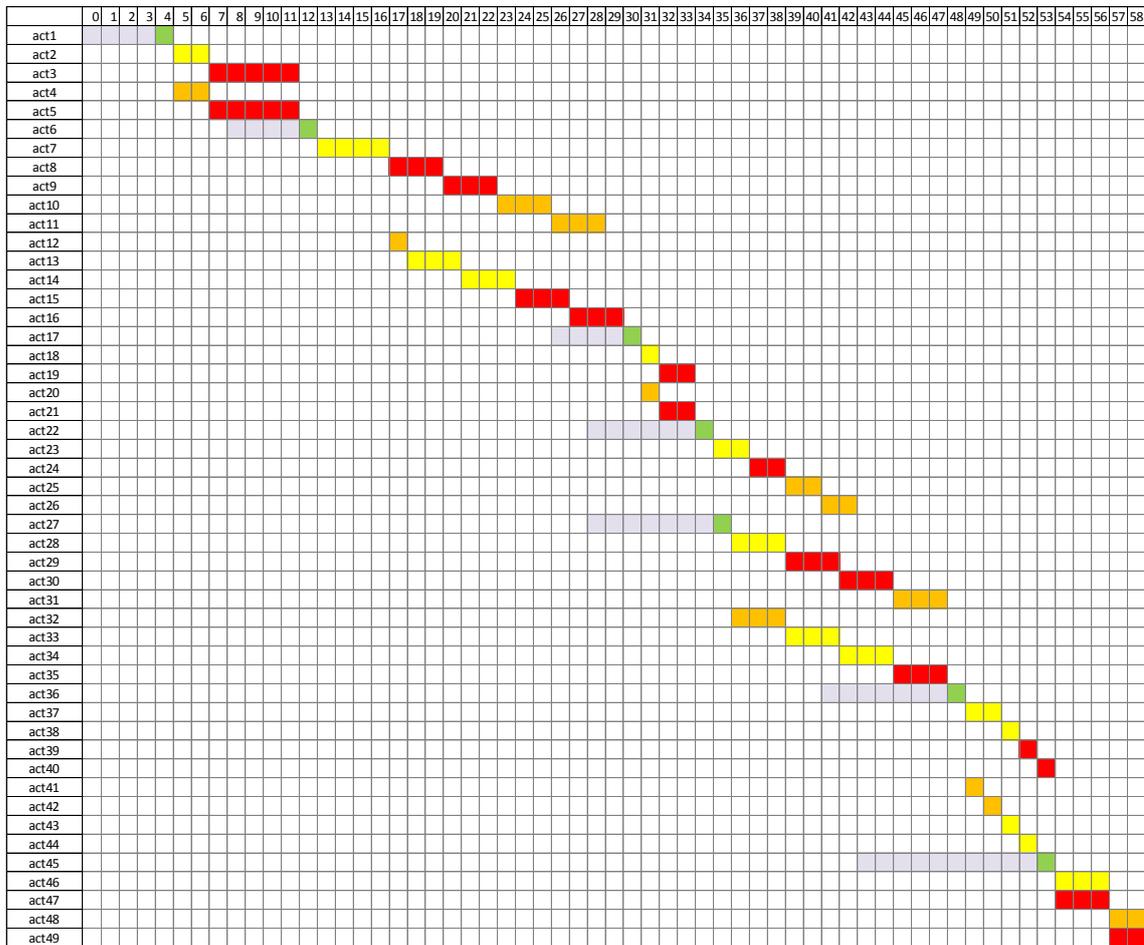
Plan real planificado Obra 1 – Duración estimada: 55 semanas



Plan real ejecutado Obra 1 – Duración real: 71 semanas



Plan Modelizado Obra 1 – Duración estimada: 58 semanas



De acuerdo al diagrama presentado anteriormente se puede efectuar la siguiente comparación de los resultados obtenidos:

Ilustración 3.3 – Cuadro comparativo de la Obra 1

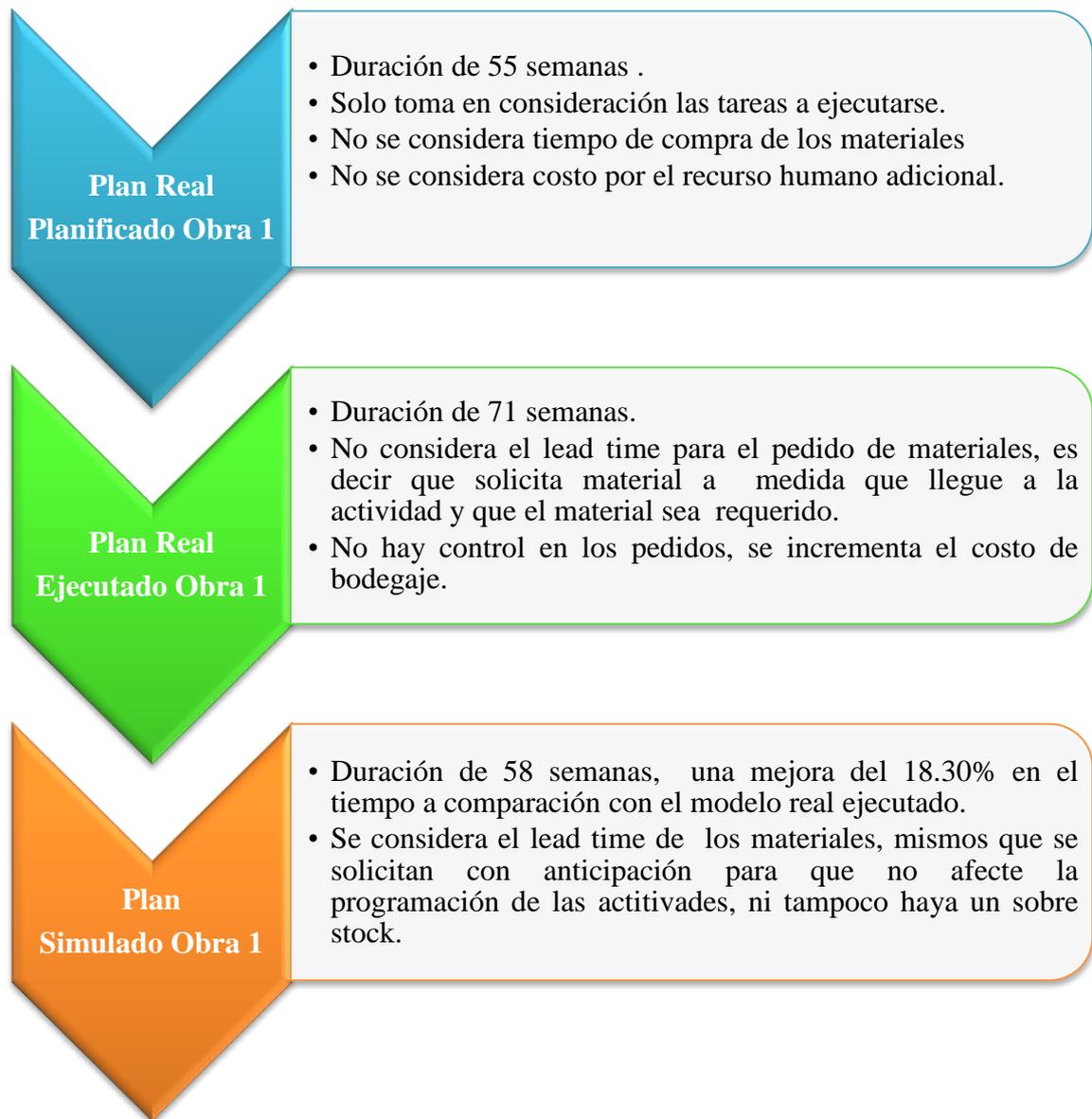
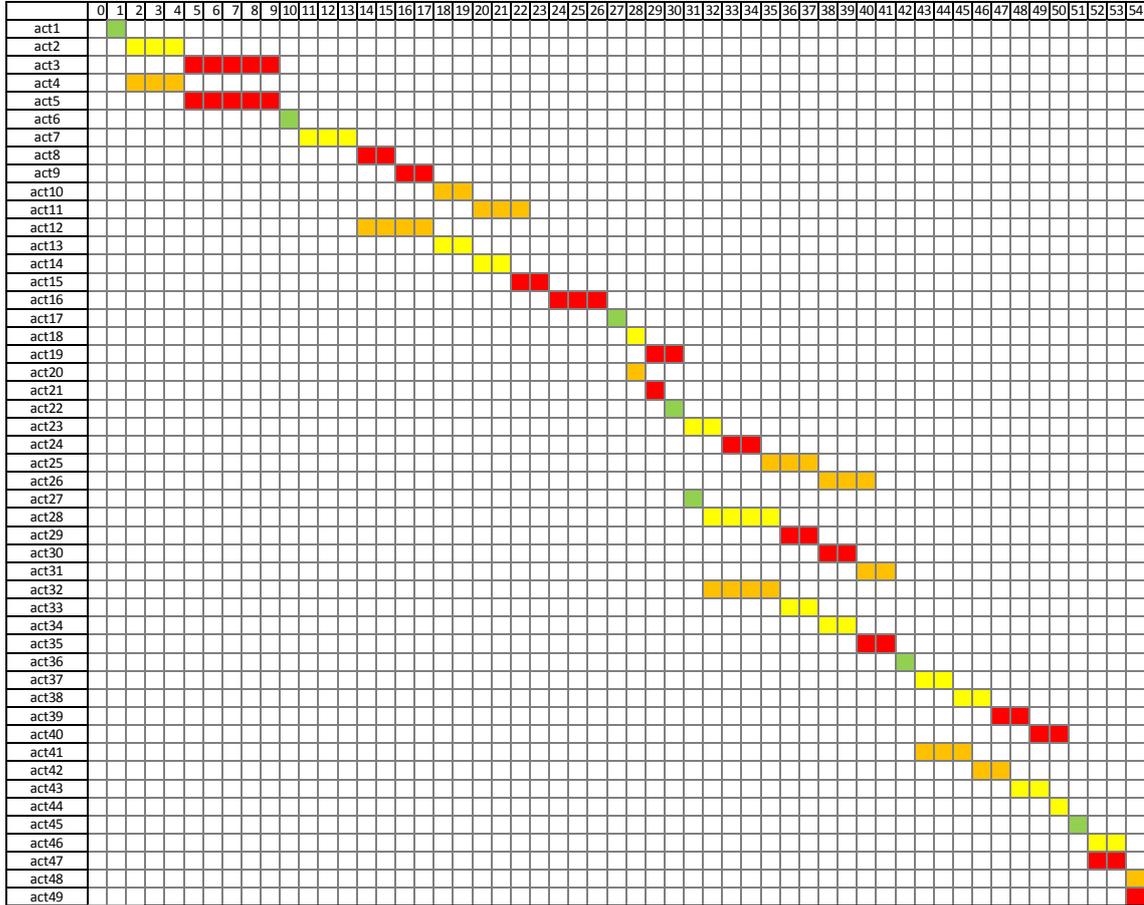
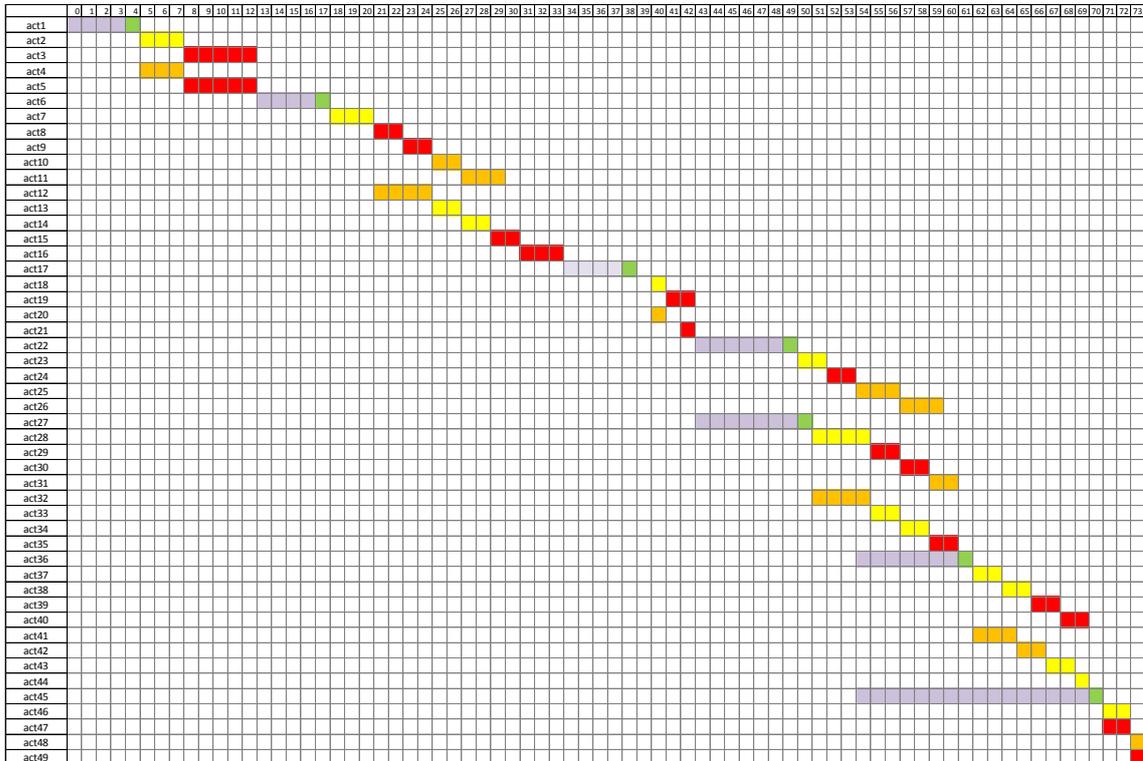


Tabla 3.12 – Diagrama de Gantt del Resultado de la Obra 2

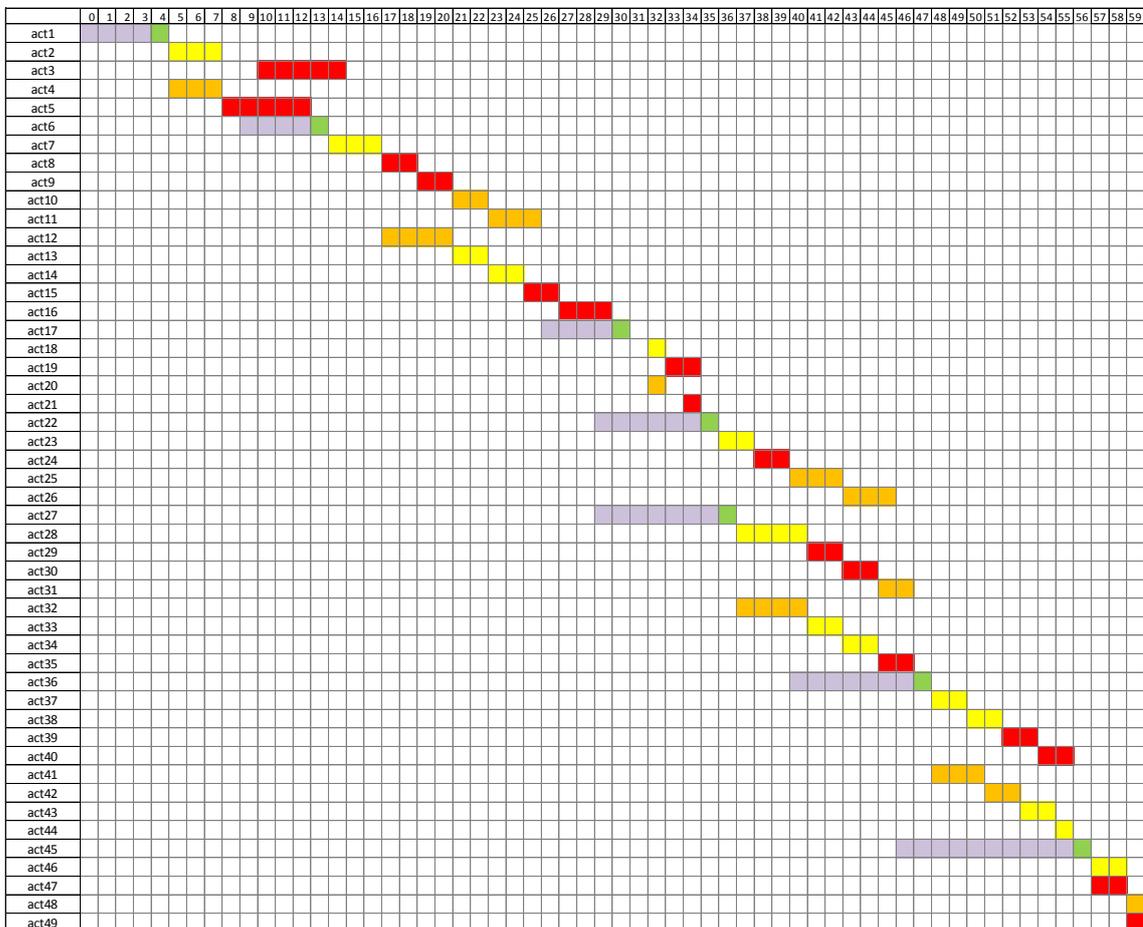
Plan real planificado Obra 2 – Duración estimada: 54 semanas

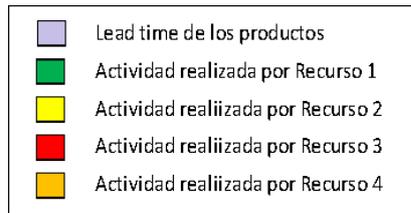


Plan real ejecutado Obra 2 – Duración real: 73 semanas



Plan Modelizado Obra 2 – Duración estimada: 59 semanas





De acuerdo al diagrama presentado anteriormente se puede efectuar la siguiente comparación:

Ilustración 3.4 – Cuadro comparativo de la Obra 2

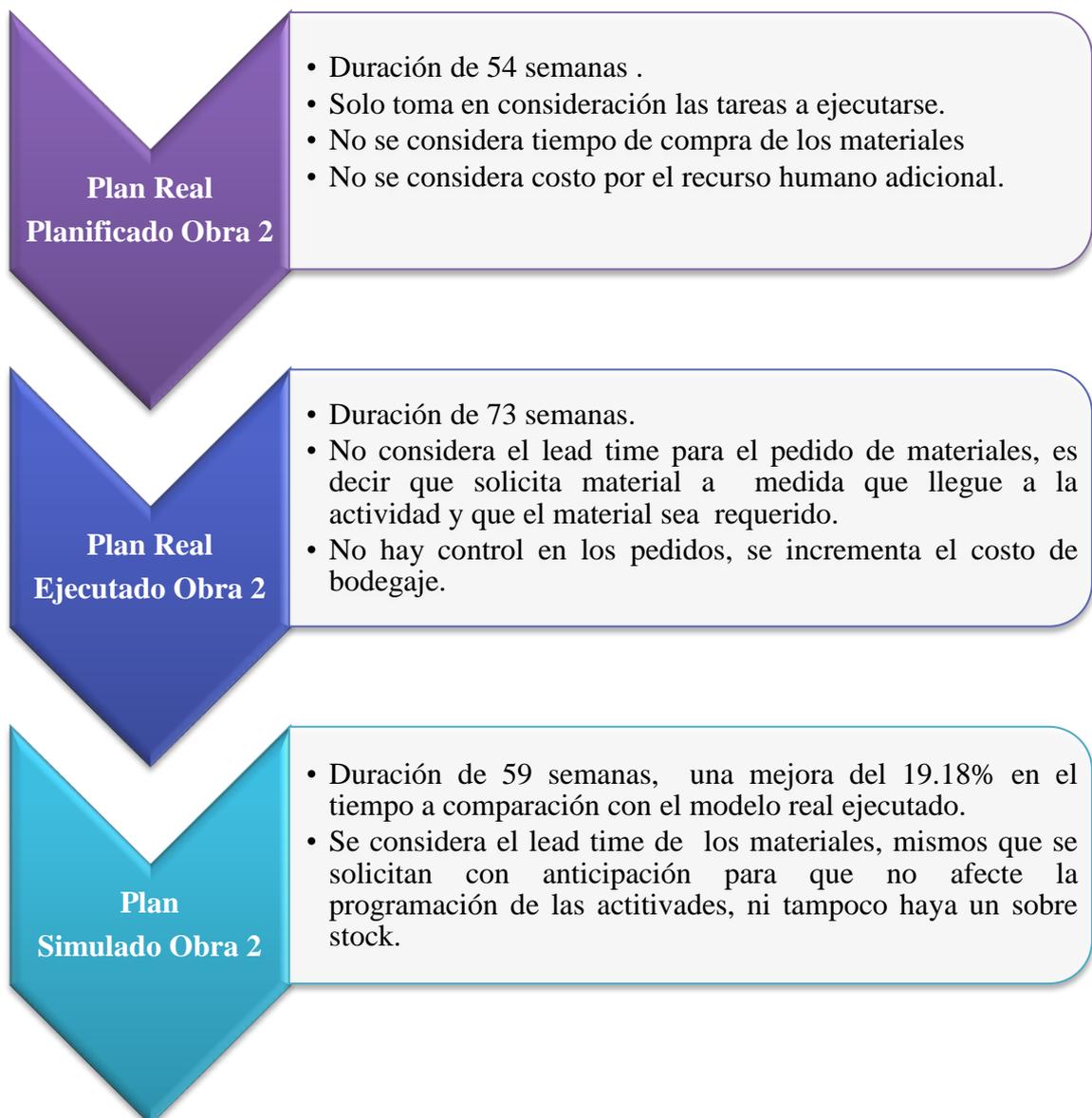
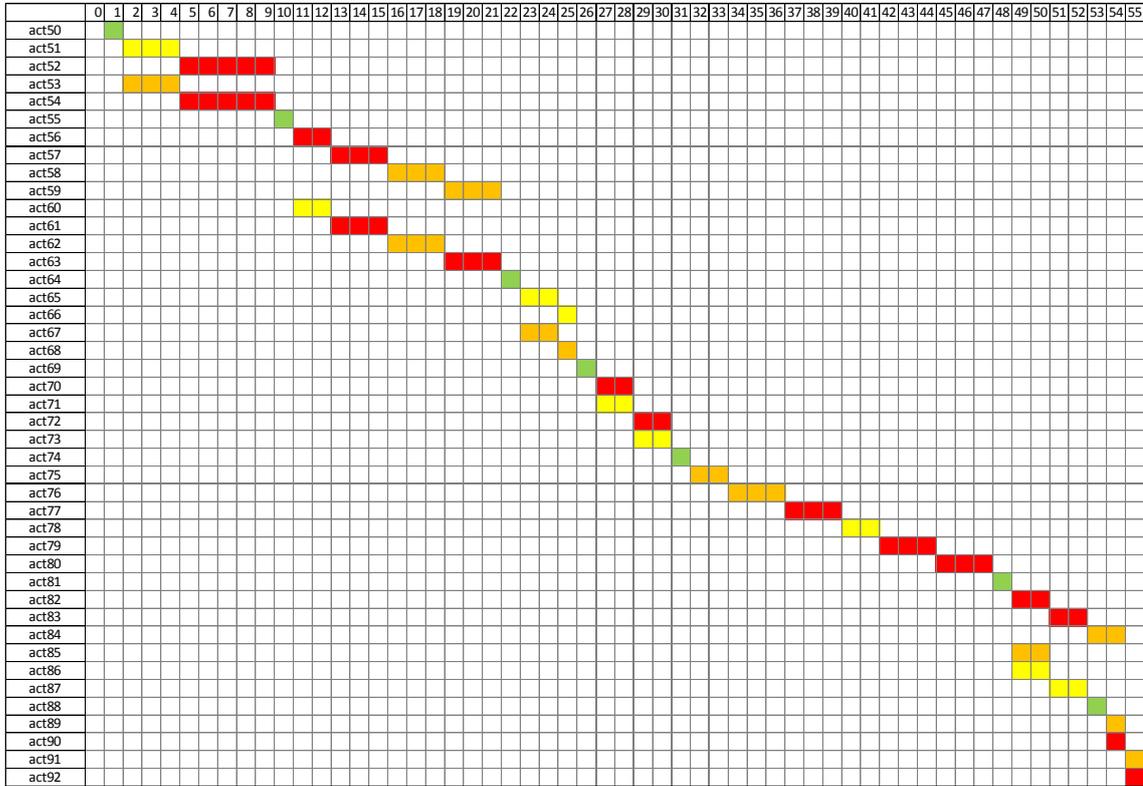
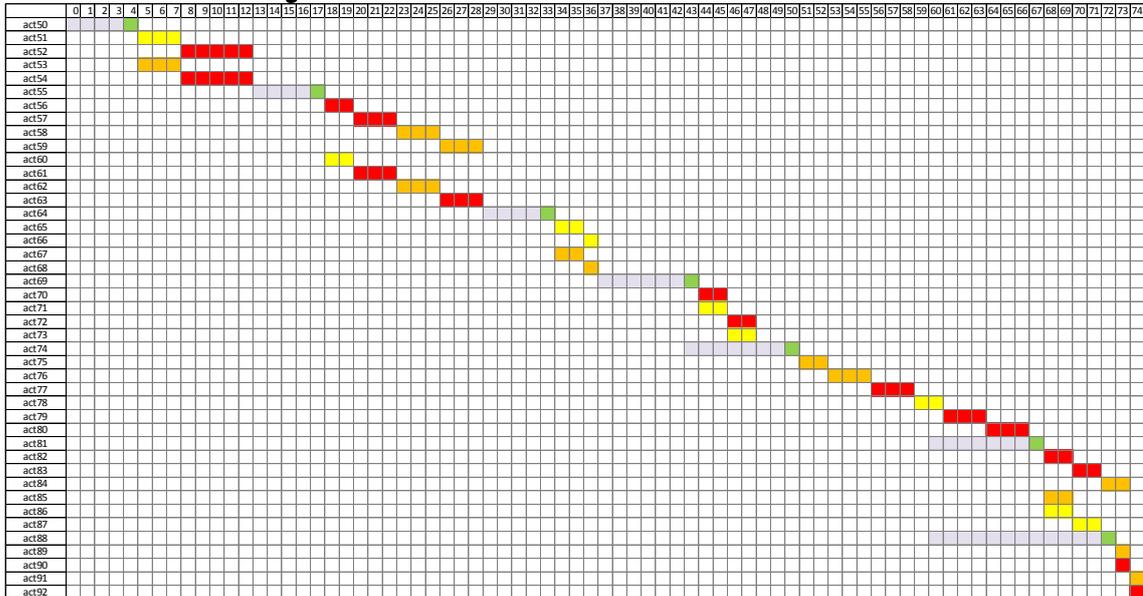


Tabla 3.13 – Diagrama de Gantt del Resultado de la Obra 3

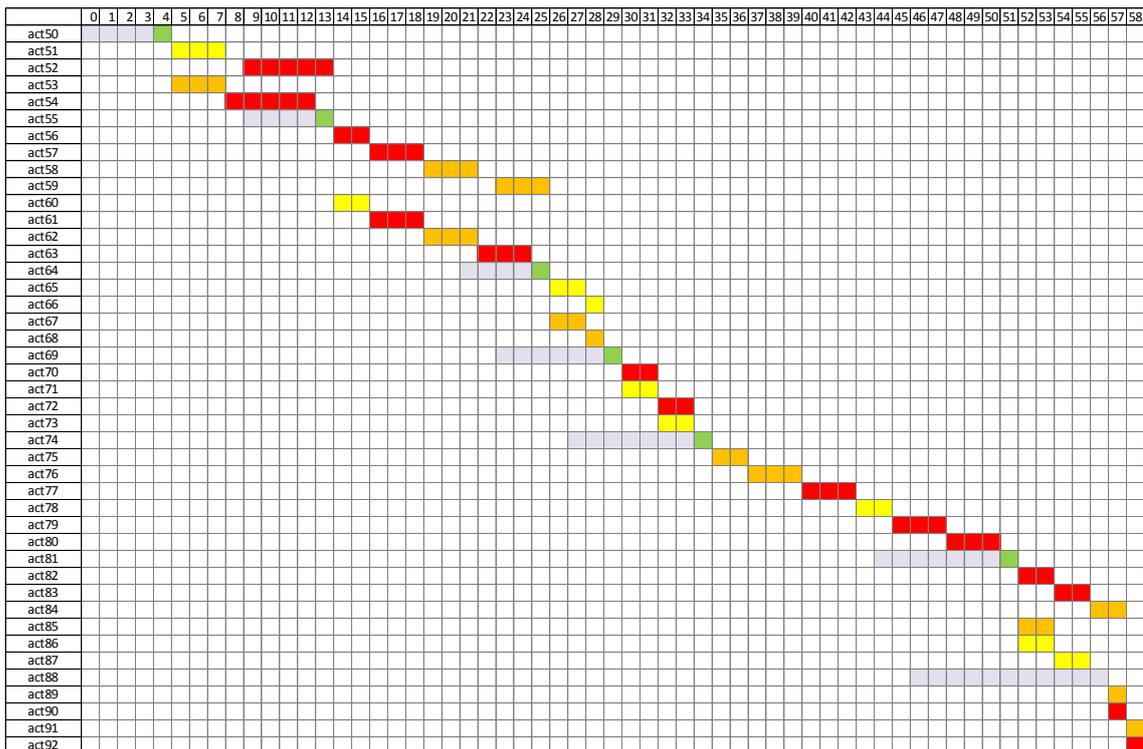
Plan real planificado Obra 3 – Duración estimada: 55 semanas

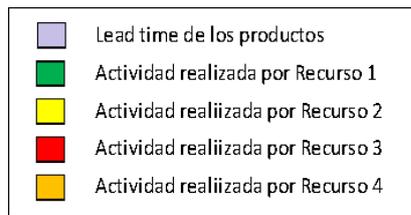


Plan real ejecutado Obra 3 – Duración real: 74 semanas



Plan Modelizado Obra 3 – Duración estimada: 58 semanas





De acuerdo al diagrama presentado anteriormente se puede efectuar la siguiente comparación:

Ilustración 3.5 – Cuadro comparativo de la Obra 3

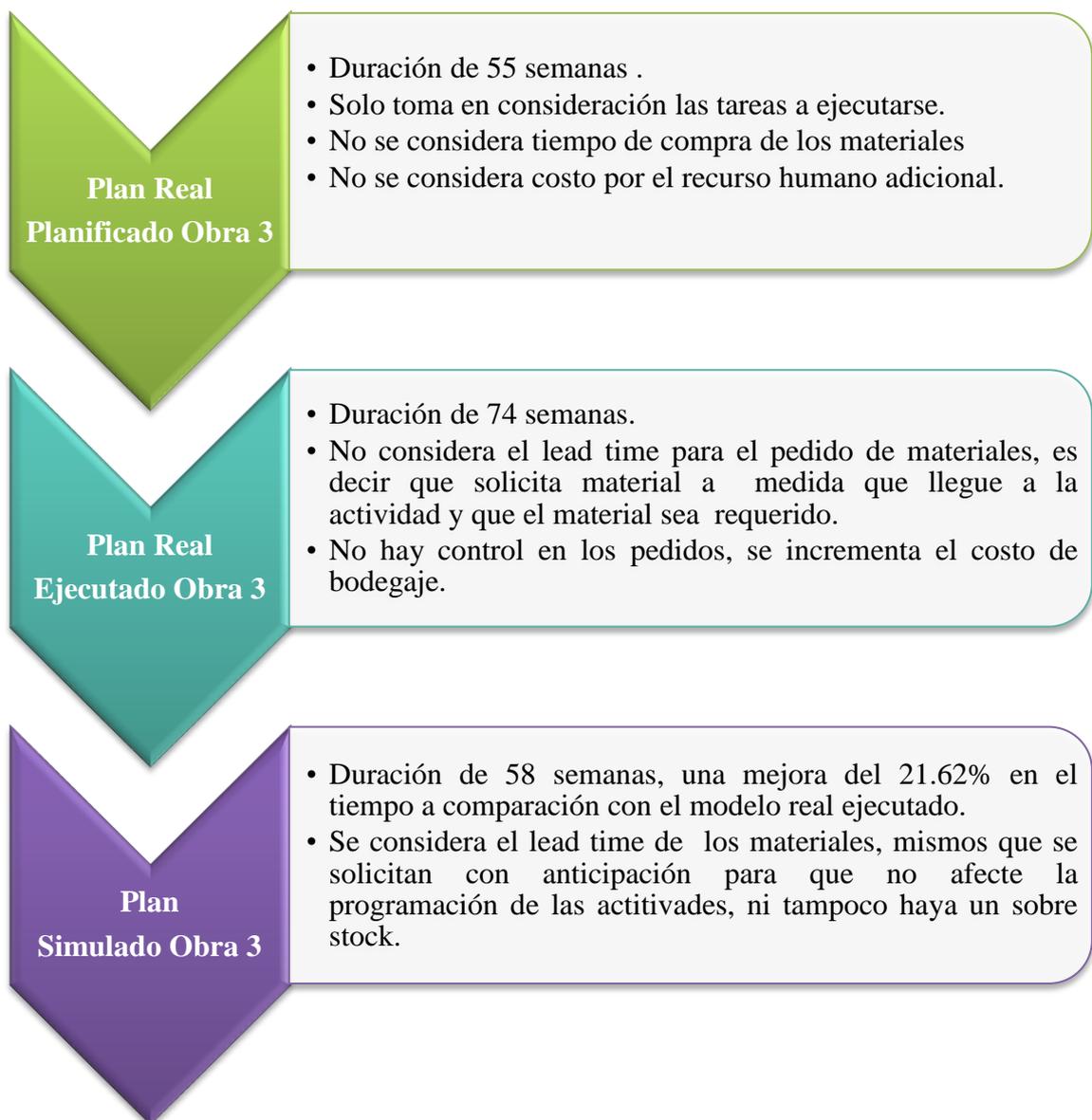
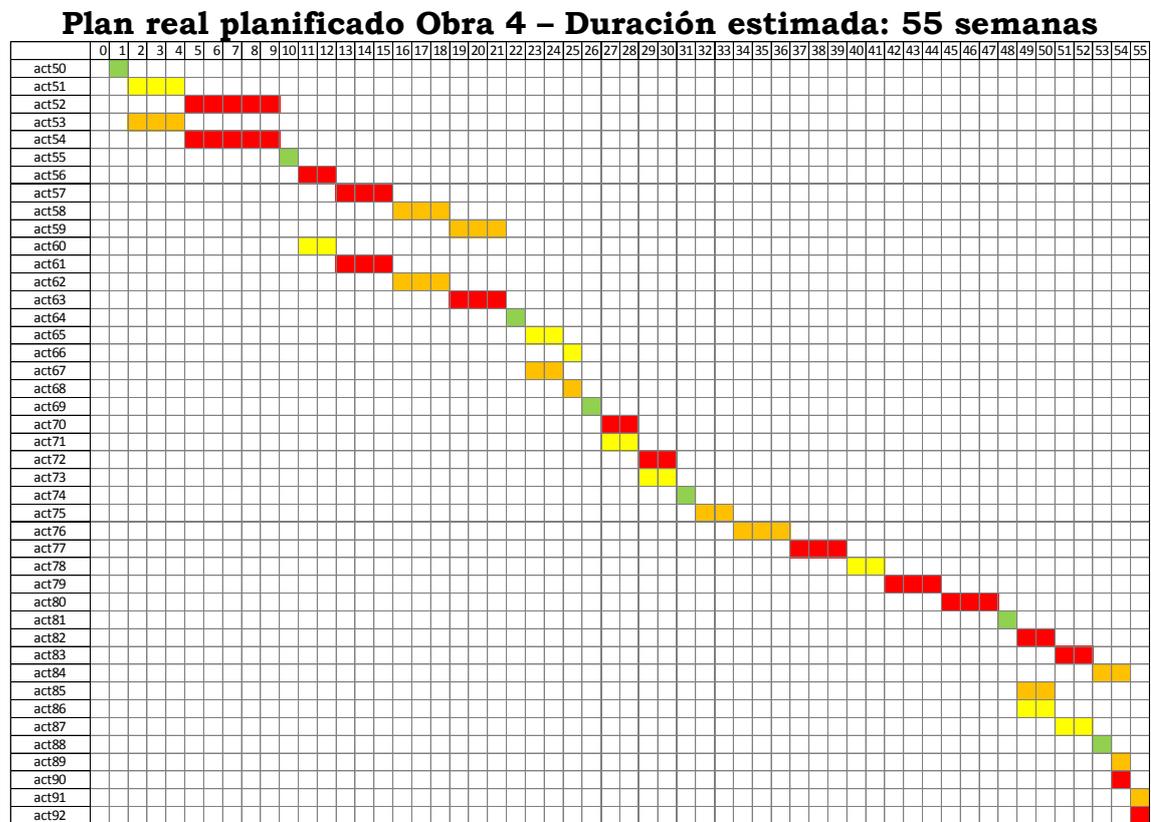
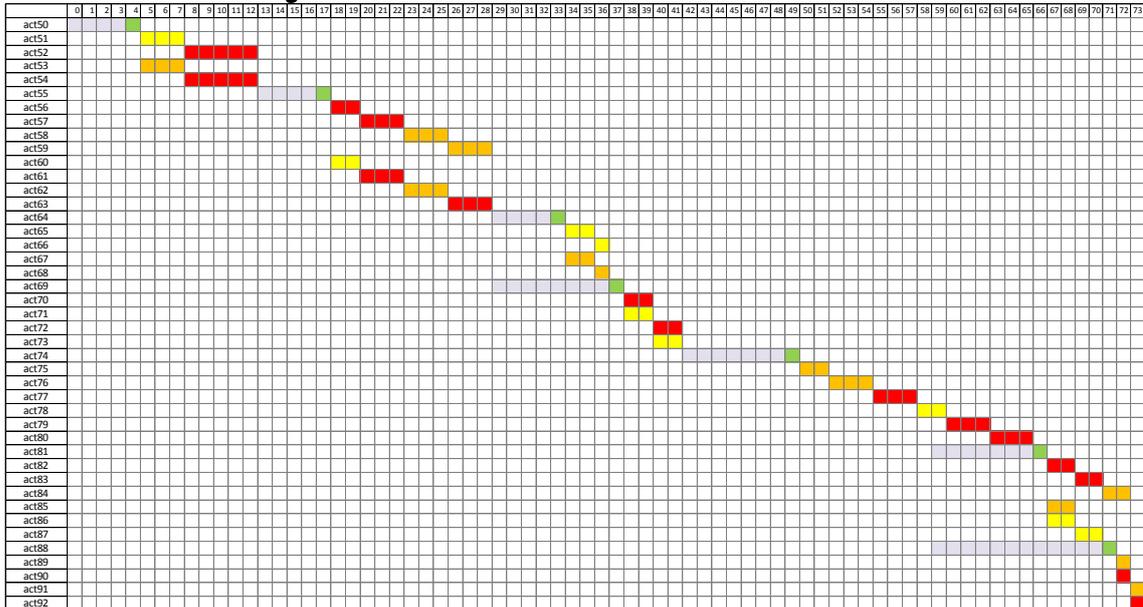


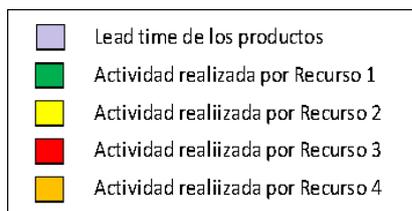
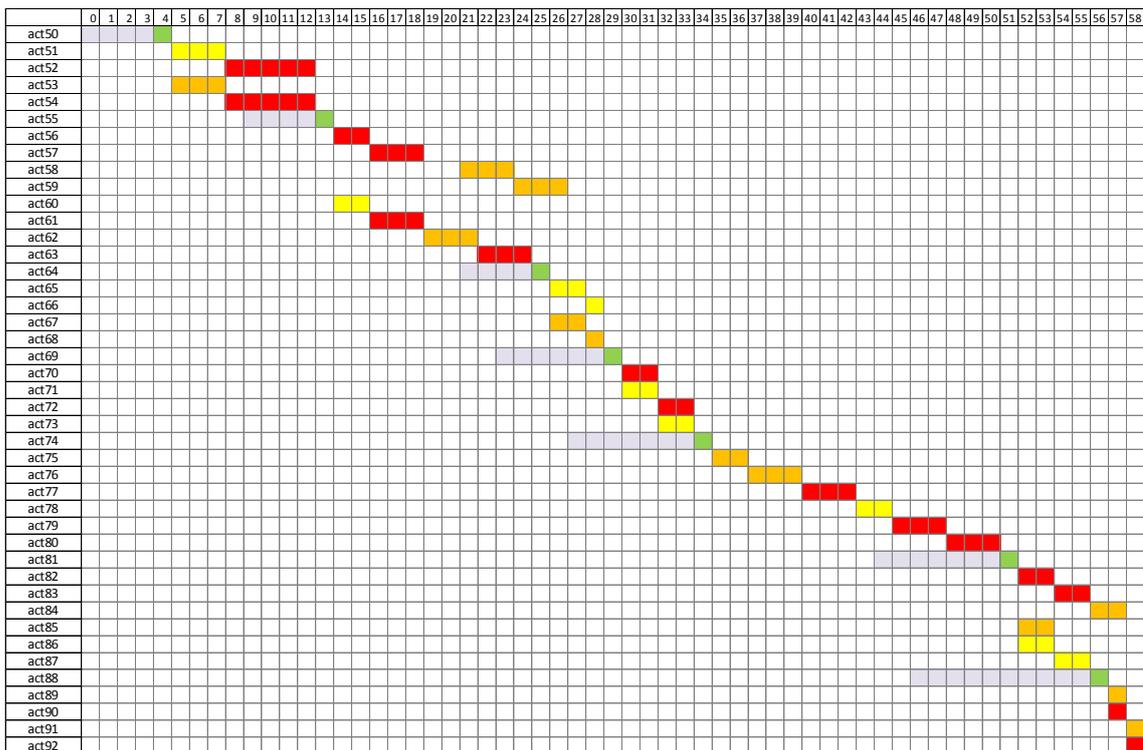
Tabla 3.14 – Diagrama de Gantt del Resultado de la Obra 4



Plan real ejecutado Obra 4 – Duración real: 73 semanas

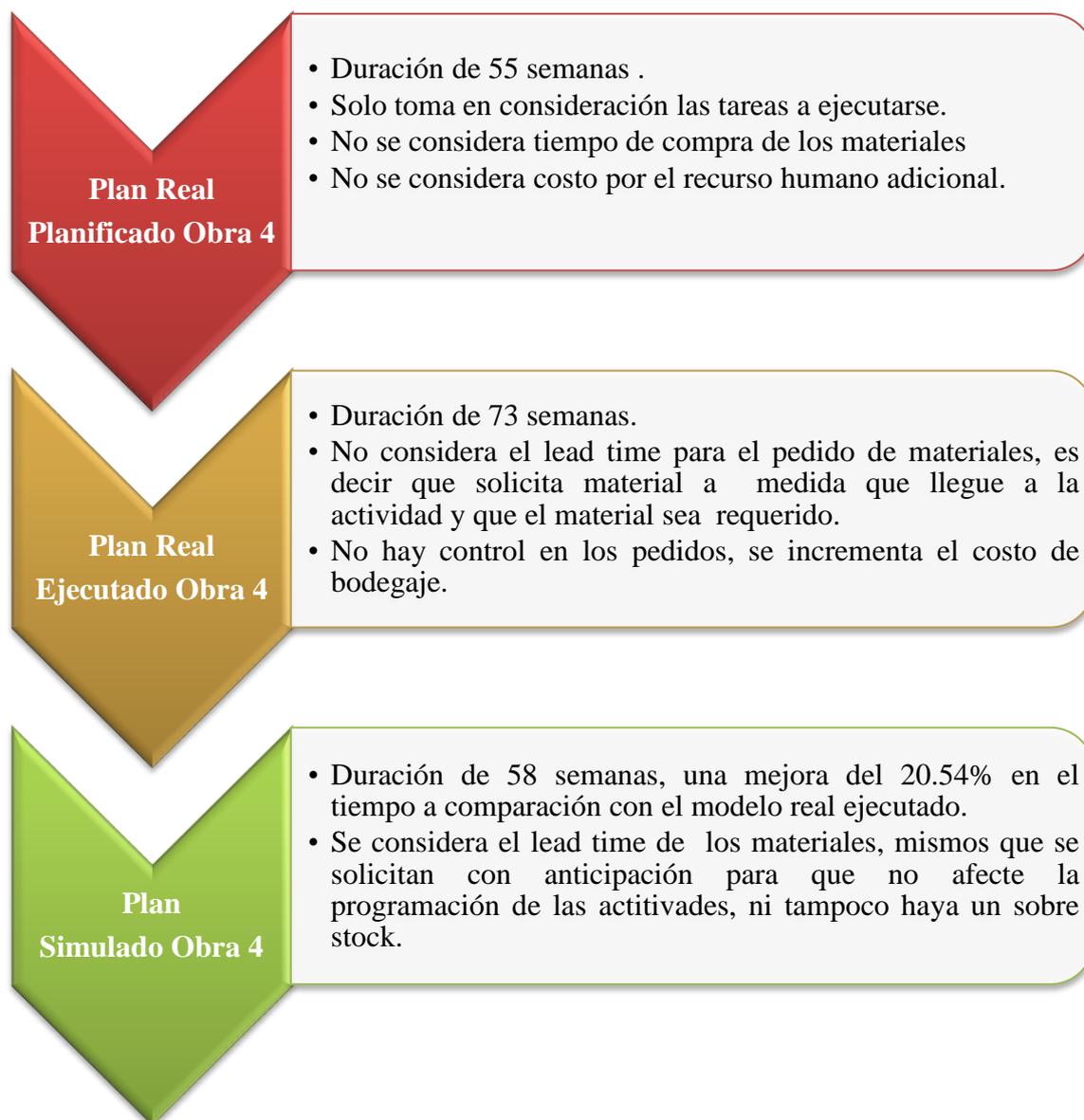


Plan Modelizado Obra 4 – Duración estimada: 58 semanas



De acuerdo al diagrama presentado anteriormente se puede efectuar la siguiente comparación:

Ilustración 3.6 – Cuadro comparativo de la Obra 4



En base a los resultados obtenidos, se puede constatar que el modelo aplicado es de utilidad en la planificación de actividades de proyectos simultáneos. En el plan inicial de las cuatro obras, no se consideran el material a requerir para poder desarrollar las actividades y tampoco toma en consideración que existe recurso humano limitado y que al momento de ejecutar las cuatro obras ocasiona demoras por falta de material, mismo que conlleva a que las tareas sea desplazadas.

Con el plan simulado, se considera no solo la necesidad del material en el tiempo requerido, sino también considera el recurso humano en las cuatro obras y canaliza las tareas con el fin de que se realicen en el menor tiempo posible. Cabe recalcar que el modelo no considera variables externas que puedan afectar al cumplimiento de las actividades, tales como demoras en entrega por parte de los proveedores que afecta al lead time inicial planificado.

En referencia al recurso adicional contratado, mismo que en la planificación real y ejecución real, no fue previamente considerada y se tuvo que contratar personal a un costo mayor. El gerente de obra indicó que se contrató un total de 24 obreros adicionales entre todas las obras para poder cubrir faltantes para cumplir con la programación de actividades. Para este costo adicional, es necesaria la contratación de una empresa externa para que provea el personal a un costo de \$90 por obrero semanal.

Una vez ejecutado el modelo matemático, el mismo dio como resultado que para poder cumplir con el plan en el menor tiempo posible, se debe contratar el siguiente personal adicional para cada grupo de trabajo:

$$h_2 \ 4.000, \quad h_3 \ 9.000, \quad h_4 \ 4.000$$

Mismo que sumarían 17 personas que deberán ser contratadas a un costo de \$90 semanal por trabajador adicional. El costo es menor dado

a que no sería necesario solicitar a una empresa externa el recurso, el mismo puede ser contratado por cuenta de la inmobiliaria.

A continuación se detalla el beneficio económico al utilizar el modelo a comparación con el plan real ejecutado:

Tabla 3.15 – Tabla comparativa de costos por recurso adicional entre Plan Real Ejecutada y Plan Modelizado.

Costo por recurso adicional en Plan Real Ejecutado					
	Obra 1	Obra 2	Obra 3	Obra 4	Total
Costo por recurso humano adicional	6 obreros x 16 semanas x \$90	6 obreros x 19 semanas x \$90	6 obreros x 19 semanas x \$90	6 obreros x 18 semanas x \$90	24 obreros subcontratados
	\$ 8.640,00	\$ 10.260,00	\$ 10.260,00	\$ 9.720,00	\$ 38.880,00

Costo por recurso adicional en Plan Modelizado					
	Recurso H1	Recurso H2	Recurso H3	Recurso H4	Total
Costo por recurso humano adicional	-	4 obreros x 11 semanas x \$90	9 obreros x 11 semanas x \$90	4 obreros x 11 semanas x \$90	17 obreros subcontratados
	\$ -	\$ 3.900,00	\$ 8.900,00	\$ 3.900,00	\$ 16.700,00

Ahorro del 32,97% en costos

En base a los resultados, el modelo ayuda a brindar una herramienta a los gerentes para incluir en su planificación de tareas, su plan de abastecimiento y administración del personal en las obras con el fin de mejorar los tiempos y ahorros en costos.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Para finalizar este proyecto de tesis, se detallarán las conclusiones del mismo y las recomendaciones que se proponen para el uso del modelo y que pueda el mismo ser una ayuda al momento de planificar una obra o proyecto.

Conclusiones

A continuación se ponen a consideración las siguientes conclusiones alcanzadas en los resultados del modelo ejecutado:

1. Se propuso un modelo matemático con el fin de optimizar el recurso humano disponible. En el mismo modelo se logra cuantificar los recursos adicionales que se necesita contratar para culminar las obras al tiempo requerido para su entrega.
2. Se planteó y complementó al modelo de distribución de recursos con el sistema “Make to order” para la adecuada planificación de pedido de los materiales de construcción para uso dentro de las obras.
3. Se compararon los resultados de los nuevos modelos planteados versus el modelo inicial y se pudo demostrar los beneficios en días de cada proyecto.
4. La empresa inmobiliaria objeto de este estudio, puede realizar planes de trabajo con mayor certeza a los anteriormente usados ya que cuenta con la forma adecuada de distribuir los recursos en las actividades para alcanzar la fecha de entrega y conoce cuántos recursos adicionales utilizará, lo cual no era estimada anteriormente al inicio de los proyectos.
5. El gerente de la obras podrá ahorrar tiempo ya que se ha incluido la compra de materiales y así poder evitar demoras al momento de solicitar materiales.

Recomendaciones

Con el fin de que el modelo sea de utilidad y pueda lograr una mejor planificación; se da a continuación las siguientes recomendaciones:

1. Verificar los datos antes de ingresarlos al modelo y se encuentren correctamente codificados, para de esta forma evitar cualquier posible error involuntario en los resultados.
2. Ingresar los datos en los campos indicados en el modelo, para la adecuada ejecución del diseño.
3. Contar con un plan de obra previo indicando grupos de trabajo, tipos de equipo a utilizar y actividades a realizarse.
4. Incluir paulatinamente más obras y tipos materiales que lleven al modelo a utilizarse en mayor amplitud dentro de la inmobiliaria.
5. Agregar en la planeación al departamento de Compras ya que se debe contar con el lead time real para los materiales a usarse en la obra y utilizarlo en el modelo para que este sea asertivo.
6. Contar con proveedores asertivos y confiables al momento de estudiarlos para calcular lead time ya que cualquier demora en la entrega de materiales puede afectar el tiempo de entrega de las obras.
7. Tomar en consideración variables externas que puedan afectar directamente a las actividades con su respectivo plan contingente para evitar o mejorar los mismos.

BIBLIOGRAFÍA

1. Que es la construcción. (2012). Revista ARQHYS.com. Obtenido de: <http://www.arqhys.com/arquitectura/construccion-quees.html>
2. Tipos de Construcción. (s.f.). En Hebel. Obtenido de: http://www.hebel.mx/es/content/tipos_de_construccion_1310.php
3. Mauricio Masís Mora. (2008). Plan de gestión para la construcción de un complejo de Condominios en Manuel Antonio. En Universidad para la Cooperación Internacional (UCI). Obtenido de: <http://www.uci.ac.cr/Biblioteca/Tesis/PFGMAP462.pdf>
4. The Building Sequence. (s.f.) En HomeBuildingAnswers. Obtenido de: <http://www.home-building-answers.com/building-sequence.html#stake-lot>
5. Optimizacion (matematica). (s.f.). En Wikipedia. Obtenido de: [http://es.wikipedia.org/wiki/Optimizaci%C3%B3n_\(matem%C3%A1tica\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Optimizaci%C3%B3n_(matem%C3%A1tica))
6. Sala-Garrido Ramon. (s.f.) Introducción a la programación matemática. Obtenido de: <http://www.uv.es/~sala/C010405.pdf>
7. Programación Lineal. (s.f.) En Wordpress. Obtenido de <http://unimorencarlos.files.wordpress.com/2011/08/importancia-y-concepto-de-programacion-lineal.pdf>
8. Vivas Quimey. (s.f.) Capitulo 4 Programación Lineal Entera. Obtenido de: http://mate.dm.uba.ar/~qvivas/operativa/archivos/cap4_05.pdf
9. Y. Gholipour. (2013). Multiproject Scheduling in Construction Industry. Obtenido de: <http://waset.org/publications/4630/multiproject-scheduling-in-construction-industry>
10. Annika Zika-Viktorson, Per Sundström, Mats Engwall. (2006). Project overload: An exploratory study of work and management in multi-project settings. Obtenido de:

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263786306000329>

11. Sanjay Bhoyar, Dr. Dhananjay K. Parbat. (2014). Optimal Scheduling for Repetitive Construction Project with Multiple Resource Crews. Obtenido de: http://www.ijetae.com/files/Volume4Issue6/IJETAE_0614_46.pdf
12. Kanagasabapathi, K. Ananthanarayanan. (2005). A simulation model for resource constrained scheduling of multiple projects. Obtenido de: http://www.arcom.ac.uk/-docs/proceedings/ar2005-0823-0831_Kanagasabapathi_and_Ananthanarayanan.pdf
13. Peerasit Patanakul, Dragan Milosevic. (2008). The effectiveness in managing a group of multiple projects: Factors of influence and measurement criteria. Obtenido de: <https://web.stevens.edu/ses/documents/fileadmin/documents/pdf/MPM%20Effectiveness%20by%20Peerasit%20Patanakul%20Article%20in%20Press.pdf>

ANEXO 1

PLANTEO DEL MODELO MATEMATICO EN GAMS

```

                                OPTION OPTCR=0.0001
SETS
  o obra /o1*o4/
  i actividad /act1*act92/
  h recurso tipo /h1,h2,h3,h4/
  t tiempo /t0*t70/
  m materiales /m1*m7/
  alias (i,j)
  alias (t,q);

sets
  tini(t) tiempo inicial /t0/
;

sets
  actini(i,o) actividad inicial
/
act1.o1,
act1.o2,
act50.o3,
act50.o4
/
;

sets
  actobr(i,o) actividadobra / (act1*act49).(o1*o2), (act50*act92).(o3*o4)/
;

sets
  actpredec(i,j,o) actividades predecesoras
/
act2.act1.o1,
act3.act2.o1,
act4.act1.o1,
act5.act4.o1,
act6.act5.o1,
act7.act6.o1,
act8.act7.o1,
act9.act8.o1,
act10.act9.o1,
act11.act10.o1,
act12.act7.o1,
act13.act12.o1,
act14.act13.o1,
act15.act14.o1,
act16.act15.o1,
act17.act16.o1,
act18.act17.o1,
act19.act18.o1,
act20.act17.o1,
act21.act20.o1,
act22.act21.o1,
act23.act22.o1,
act24.act23.o1,
act25.act24.o1,
act26.act25.o1,

```

act27.act22.o1,
act28.act27.o1,
act29.act28.o1,
act30.act29.o1,
act31.act30.o1,
act32.act27.o1,
act33.act32.o1,
act34.act33.o1,
act35.act34.o1,
act36.act35.o1,
act37.act36.o1,
act38.act37.o1,
act39.act38.o1,
act40.act39.o1,
act41.act36.o1,
act42.act41.o1,
act43.act42.o1,
act44.act43.o1,
act45.act44.o1,
act46.act45.o1,
act47.act45.o1,
act48.act46.o1,
act49.act47.o1,
act2.act1.o2,
act3.act2.o2,
act4.act1.o2,
act5.act4.o2,
act6.act5.o2,
act7.act6.o2,
act8.act7.o2,
act9.act8.o2,
act10.act9.o2,
act11.act10.o2,
act12.act7.o2,
act13.act12.o2,
act14.act13.o2,
act15.act14.o2,
act16.act15.o2,
act17.act16.o2,
act18.act17.o2,
act19.act18.o2,
act20.act17.o2,
act21.act20.o2,
act22.act21.o2,
act23.act22.o2,
act24.act23.o2,
act25.act24.o2,
act26.act25.o2,
act27.act22.o2,
act28.act27.o2,
act29.act28.o2,
act30.act29.o2,
act31.act30.o2,
act32.act27.o2,
act33.act32.o2,
act34.act33.o2,
act35.act34.o2,
act36.act35.o2,
act37.act36.o2,
act38.act37.o2,
act39.act38.o2,
act40.act39.o2,
act41.act36.o2,
act42.act41.o2,

act43.act42.o2,
act44.act43.o2,
act45.act44.o2,
act46.act45.o2,
act47.act45.o2,
act48.act46.o2,
act49.act47.o2,
act51.act50.o3,
act52.act51.o3,
act53.act50.o3,
act54.act53.o3,
act55.act54.o3,
act56.act55.o3,
act57.act56.o3,
act58.act57.o3,
act59.act58.o3,
act60.act55.o3,
act61.act60.o3,
act62.act61.o3,
act63.act62.o3,
act64.act63.o3,
act65.act64.o3,
act66.act65.o3,
act67.act64.o3,
act68.act67.o3,
act69.act68.o3,
act70.act69.o3,
act71.act69.o3,
act72.act70.o3,
act73.act71.o3,
act74.act73.o3,
act75.act74.o3,
act76.act75.o3,
act77.act76.o3,
act78.act77.o3,
act79.act78.o3,
act80.act79.o3,
act81.act80.o3,
act82.act81.o3,
act83.act82.o3,
act84.act83.o3,
act85.act81.o3,
act86.act81.o3,
act87.act86.o3,
act88.act87.o3,
act89.act88.o3,
act90.act88.o3,
act91.act89.o3,
act92.act90.o3,
act51.act50.o4,
act52.act51.o4,
act53.act50.o4,
act54.act53.o4,
act55.act54.o4,
act56.act55.o4,
act57.act56.o4,
act58.act57.o4,
act59.act58.o4,
act60.act55.o4,
act61.act60.o4,
act62.act61.o4,
act63.act62.o4,
act64.act63.o4,
act65.act64.o4,

```
act66.act65.o4,  
act67.act64.o4,  
act68.act67.o4,  
act69.act68.o4,  
act70.act69.o4,  
act71.act69.o4,  
act72.act70.o4,  
act73.act71.o4,  
act74.act73.o4,  
act75.act74.o4,  
act76.act75.o4,  
act77.act76.o4,  
act78.act77.o4,  
act79.act78.o4,  
act80.act79.o4,  
act81.act80.o4,  
act82.act81.o4,  
act83.act82.o4,  
act84.act83.o4,  
act85.act81.o4,  
act86.act81.o4,  
act87.act86.o4,  
act88.act87.o4,  
act89.act88.o4,  
act90.act88.o4,  
act91.act89.o4,  
act92.act90.o4  
/  
;  
  
sets  
    actrec(h,i) actividades recursos  
/  
h1.act1,  
h1.act6,  
h1.act17,  
h1.act22,  
h1.act27,  
h1.act36,  
h1.act45,  
h1.act50,  
h1.act55,  
h1.act64,  
h1.act69,  
h1.act74,  
h1.act81,  
h1.act88,  
h2.act2,  
h2.act7,  
h2.act13,  
h2.act14,  
h2.act18,  
h2.act23,  
h2.act28,  
h2.act33,  
h2.act34,  
h2.act37,  
h2.act38,  
h2.act43,  
h2.act44,  
h2.act46,  
h2.act51,  
h2.act60,  
h2.act65,
```

h2.act66,
h2.act71,
h2.act73,
h2.act78,
h2.act86,
h2.act87,
h3.act3,
h3.act5,
h3.act8,
h3.act9,
h3.act15,
h3.act16,
h3.act19,
h3.act21,
h3.act24,
h3.act29,
h3.act30,
h3.act35,
h3.act39,
h3.act40,
h3.act47,
h3.act49,
h3.act52,
h3.act54,
h3.act56,
h3.act57,
h3.act61,
h3.act63,
h3.act70,
h3.act72,
h3.act77,
h3.act79,
h3.act80,
h3.act82,
h3.act83,
h3.act90,
h3.act92,
h4.act4,
h4.act10,
h4.act11,
h4.act12,
h4.act20,
h4.act25,
h4.act26,
h4.act31,
h4.act32,
h4.act41,
h4.act42,
h4.act48,
h4.act53,
h4.act58,
h4.act59,
h4.act62,
h4.act67,
h4.act68,
h4.act75,
h4.act76,
h4.act84,
h4.act85,
h4.act89,
h4.act91
/
;

parameter

par1(i,o) dias requeridos para la actividad i en la obra o
/

act1.o1	1
act2.o1	2
act3.o1	5
act4.o1	2
act5.o1	5
act6.o1	1
act7.o1	4
act8.o1	3
act9.o1	3
act10.o1	3
act11.o1	3
act12.o1	1
act13.o1	3
act14.o1	3
act15.o1	3
act16.o1	3
act17.o1	1
act18.o1	1
act19.o1	2
act20.o1	1
act21.o1	2
act22.o1	1
act23.o1	2
act24.o1	2
act25.o1	2
act26.o1	2
act27.o1	1
act28.o1	3
act29.o1	3
act30.o1	3
act31.o1	3
act32.o1	3
act33.o1	3
act34.o1	3
act35.o1	3
act36.o1	1
act37.o1	2
act38.o1	1
act39.o1	1
act40.o1	1
act41.o1	1
act42.o1	1
act43.o1	1
act44.o1	1
act45.o1	1
act46.o1	3
act47.o1	3
act48.o1	2
act49.o1	2
act1.o2	1
act2.o2	3
act3.o2	5
act4.o2	3
act5.o2	5
act6.o2	1
act7.o2	3
act8.o2	2
act9.o2	2
act10.o2	2
act11.o2	3

act12.o2	4
act13.o2	2
act14.o2	2
act15.o2	2
act16.o2	3
act17.o2	2
act18.o2	1
act19.o2	2
act20.o2	2
act21.o2	1
act22.o2	1
act23.o2	2
act24.o2	2
act25.o2	3
act26.o2	3
act27.o2	1
act28.o2	4
act29.o2	2
act30.o2	2
act31.o2	2
act32.o2	4
act33.o2	2
act34.o2	2
act35.o2	2
act36.o2	1
act37.o2	2
act38.o2	2
act39.o2	2
act40.o2	2
act41.o2	3
act42.o2	2
act43.o2	2
act44.o2	1
act45.o2	1
act46.o2	2
act47.o2	2
act48.o2	1
act49.o2	1
act50.o3	1
act51.o3	3
act52.o3	5
act53.o3	3
act54.o3	5
act55.o3	1
act56.o3	2
act57.o3	3
act58.o3	3
act59.o3	3
act60.o3	2
act61.o3	3
act62.o3	3
act63.o3	3
act64.o3	1
act65.o3	2
act66.o3	1
act67.o3	2
act68.o3	1
act69.o3	1
act70.o3	2
act71.o3	2
act72.o3	2
act73.o3	2
act74.o3	1
act75.o3	2

act76.o3	3
act77.o3	3
act78.o3	2
act79.o3	3
act80.o3	3
act81.o3	1
act82.o3	2
act83.o3	2
act84.o3	2
act85.o3	2
act86.o3	2
act87.o3	2
act88.o3	1
act89.o3	1
act90.o3	1
act91.o3	1
act92.o3	1
act50.o4	1
act51.o4	3
act52.o4	5
act53.o4	3
act54.o4	5
act55.o4	1
act56.o4	2
act57.o4	3
act58.o4	3
act59.o4	3
act60.o4	2
act61.o4	3
act62.o4	3
act63.o4	3
act64.o4	1
act65.o4	2
act66.o4	1
act67.o4	2
act68.o4	1
act69.o4	1
act70.o4	2
act71.o4	2
act72.o4	2
act73.o4	2
act74.o4	1
act75.o4	2
act76.o4	3
act77.o4	3
act78.o4	2
act79.o4	3
act80.o4	3
act81.o4	1
act82.o4	2
act83.o4	2
act84.o4	2
act85.o4	2
act86.o4	2
act87.o4	2
act88.o4	1
act89.o4	1
act90.o4	1
act91.o4	1
act92.o4	1
/	

par2(i,h) cantidad de recursos tipo h para la actividad i
/

act1.h1	4
act2.h2	5
act3.h3	5
act4.h4	5
act5.h3	5
act6.h1	4
act7.h2	5
act8.h3	5
act9.h3	5
act10.h4	5
act11.h4	5
act12.h4	5
act13.h2	5
act14.h2	5
act15.h3	5
act16.h3	5
act17.h1	4
act18.h2	5
act19.h3	5
act20.h4	5
act21.h3	5
act22.h1	4
act23.h2	5
act24.h3	5
act25.h4	5
act26.h4	5
act27.h1	4
act28.h2	5
act29.h3	5
act30.h3	5
act31.h4	5
act32.h4	5
act33.h2	5
act34.h2	5
act35.h3	5
act36.h1	4
act37.h2	5
act38.h2	5
act39.h3	5
act40.h3	5
act41.h4	5
act42.h4	5
act43.h2	5
act44.h2	5
act45.h1	4
act46.h2	5
act47.h3	5
act48.h4	5
act49.h3	5
act50.h1	4
act51.h2	5
act52.h3	5
act53.h4	5
act54.h3	5
act55.h1	4
act56.h3	5
act57.h3	5
act58.h4	5
act59.h4	5
act60.h2	5
act61.h3	5
act62.h4	5
act63.h3	5
act64.h1	4

act65.h2 5
act66.h2 5
act67.h4 5
act68.h4 5
act69.h1 4
act70.h3 5
act71.h2 5
act72.h3 5
act73.h2 5
act74.h1 4
act75.h4 5
act76.h4 5
act77.h3 5
act78.h2 5
act79.h3 5
act80.h3 5
act81.h1 4
act82.h3 5
act83.h3 5
act84.h4 5
act85.h4 5
act86.h2 5
act87.h2 5
act88.h1 4
act89.h4 5
act90.h3 5
act91.h4 5
act92.h3 5
/

par3(h) numero disponible de recurso h
/
h1 16
h2 16
h3 16
h4 16
/

par4(h) costo por semana de un h externo
/
h1 90
h2 90
h3 90
h4 90
/

par5(t) penalidad en el tiempo
/
t1 1
t2 2
t3 3
t4 4
t5 5
t6 6
t7 7
t8 8
t9 9
t10 10
t11 11
t12 12
t13 13
t14 14
t15 15
t16 16

t17	17
t18	18
t19	19
t20	20
t21	21
t22	22
t23	23
t24	24
t25	25
t26	26
t27	27
t28	28
t29	29
t30	30
t31	31
t32	32
t33	33
t34	34
t35	35
t36	36
t37	37
t38	38
t39	39
t40	40
t41	41
t42	42
t43	43
t44	44
t45	45
t46	46
t47	47
t48	48
t49	49
t50	50
t51	51
t52	52
t53	53
t54	54
t55	55
t56	56
t57	57
t58	58
t59	59
t60	60
t61	61
t62	62
t63	63
t64	64
t65	65
t66	66
t67	67
t68	68
t69	69
t70	70
/	

par6(m,i,o) materiales m requeridos en la obra o para la actividad i
/

m1.act1.o1	400
m2.act1.o1	350
m2.act6.o1	1000
m1.act17.o1	20
m2.act17.o1	10
m3.act22.o1	300

m4.act22.o1	600
m1.act27.o1	300
m2.act27.o1	15
m5.act27.o1	1000
m5.act36.o1	8000
m1.act36.o1	100
m6.act45.o1	1000
m7.act45.o1	1500
m1.act45.o1	80
m1.act1.o2	400
m2.act1.o2	350
m2.act6.o2	1000
m1.act17.o2	20
m2.act17.o2	10
m3.act22.o2	300
m4.act22.o2	600
m1.act27.o2	300
m2.act27.o2	15
m5.act27.o2	1000
m5.act36.o2	8000
m1.act36.o2	100
m6.act45.o2	1000
m7.act45.o2	1500
m1.act45.o2	80
m1.act50.o3	350
m2.act50.o3	300
m2.act55.o3	800
m1.act64.o3	20
m2.act64.o3	10
m3.act69.o3	270
m4.act69.o3	400
m1.act74.o3	200
m2.act74.o3	10
m5.act74.o3	800
m5.act81.o3	6000
m1.act81.o3	80
m6.act88.o3	600
m7.act88.o3	1000
m1.act88.o3	70
m1.act50.o4	350
m2.act50.o4	300
m2.act55.o4	800
m1.act64.o4	20
m2.act64.o4	10
m3.act69.o4	270
m4.act69.o4	400
m1.act74.o4	200
m2.act74.o4	10
m5.act74.o4	800
m5.act81.o4	6000
m1.act81.o4	80
m6.act88.o4	600
m7.act88.o4	1000
m1.act88.o4	70
/	

par7(m) leadtime t del material m

/	
m1	3
m2	4
m3	6
m4	4
m5	7
m6	8

```

m7          10
/

S
/
10
/
;

variables
z
positive variables
hsub(h) cantidad de recurso adicional subcontratado
inv(m,t) inventario del material m en el tiempo t
c(t,m) compra de material m en el tiempo t
;

binary variable
x(t,i,o) 1 si la actividad i de la obra o comienza en el tiempo t
y(t,i,o) 1 si la actividad i de la obra o se realiza en el tiempo t
w(t,i,o) 1 si la actividad i de la obra o termina en el tiempo t
;

equations
obj funcion objetivo
res1(t,h) maximo de recursos h por periodo de tiempo t
res2(i,o,t) determina el orden de las actividades predecesoras
res3(i,o) tiempo t que dura la actividad i de la obra o
res4(i,o,t) tiempo t en el que se completa la actividad i de la obra o
res5(i,o) toda actividad i debe completarse
res6(t,i,o) ninguna actividad puede iniciar en el tiempo "0"
res7(t,i,o) determina el inicio de la obra o
res8(i,o) determina el inicio de la obra o
res9(t,m) balance de inventario de material m
;

obj.. z=e=sum((i,t,o),par5(t)*S*(w(t,i,o)+x(t,i,o)))+sum(h,par4(h)*hsub(h));

res1(t,h).. sum((i,o)$actobr(i,o),y(t,i,o)*par2(i,h))=l=(par3(h)+hsub(h));
res2(i,o,t)$actobr(i,o) and not(actini(i,o)) and not(tini(t))..
sum((q,j)$((ord(q)<ord(t)) and actpredec(i,j,o)),w(q,j,o))=g=y(t,i,o);
res3(i,o).. sum((t),y(t,i,o))=e=par1(i,o);
res4(i,o,t)$actobr(i,o).. sum(q$(ord(q)<=ord(t)),y(q,i,o))=g=par1(i,o)*w(t,i,o);
res5(i,o).. sum(t,w(t,i,o))=e=1;
res6(t,i,o)$tini(t) and actobr(i,o).. y(t,i,o)=e=0;
res7(t,i,o).. x(t,i,o)=l=y(t,i,o);
res8(i,o)$actobr(i,o).. sum((t),x(t,i,o))=e=1;
res9(t,m).. inv(m,t)=e=inv(m,t-1)+c(t-par7(m),m)-sum((i,o),x(t,i,o)*par6(m,i,o));

model mrp /all/
solve mrp minimizing z using mip
display x.l, y.l, w.l, z.l, hsub.l
    
```

ANEXO 2

RESULTADOS OBTENIDOS EN GAMS

```
**** REPORT SUMMARY :          0      NONOPT
                                0 INFEASIBLE
                                0 UNBOUNDED
GAMS Rev 238 WEX-VS8 23.8.2 x86/MS Windows          09/20/16 21:24:21 Page 6
General Algebraic Modeling System
Execution
```

```
---- 812 VARIABLE x.L 1 si la actividad i de la obra o comienza en el tiempo
t
```

	o1	o2	o3	o4
t4 .act1	1.000	1.000		
t4 .act50			1.000	1.000
t5 .act2	1.000	1.000		
t5 .act4	1.000	1.000		
t5 .act51			1.000	1.000
t5 .act53			1.000	1.000
t7 .act3	1.000			
t7 .act5	1.000			
t8 .act5		1.000		
t8 .act52				1.000
t8 .act54			1.000	1.000
t9 .act52			1.000	
t10.act3		1.000		
t12.act6	1.000			
t13.act6		1.000		
t13.act7	1.000			
t13.act55			1.000	1.000
t14.act7		1.000		
t14.act56			1.000	1.000
t14.act60			1.000	1.000
t16.act57			1.000	1.000
t16.act61			1.000	1.000
t17.act8	1.000	1.000		
t17.act12	1.000	1.000		
t18.act13	1.000			
t19.act9		1.000		
t19.act58			1.000	
t19.act62			1.000	1.000
t20.act9	1.000			
t21.act10		1.000		
t21.act13		1.000		
t21.act14	1.000			
t21.act58				1.000
t22.act63			1.000	1.000
t23.act10	1.000			
t23.act11		1.000		
t23.act14		1.000		
t23.act59			1.000	
t24.act15	1.000			
t24.act59				1.000
t25.act15		1.000		
t25.act64			1.000	1.000
t26.act11	1.000			
t26.act65			1.000	1.000
t26.act67			1.000	1.000
t27.act16	1.000	1.000		
t28.act66			1.000	1.000
t28.act68			1.000	1.000
t29.act69			1.000	1.000
t30.act17	1.000	1.000		
t30.act70			1.000	1.000
t30.act71			1.000	1.000

t31.act18	1.000			
t31.act20	1.000			
t32.act18		1.000		
t32.act19	1.000			
t32.act20		1.000		
t32.act21	1.000			
t32.act72			1.000	1.000
t32.act73			1.000	1.000
t33.act19		1.000		
t34.act21		1.000		
t34.act22	1.000			
t34.act74			1.000	1.000
t35.act22		1.000		
t35.act23	1.000			
t35.act27	1.000			
t35.act75			1.000	1.000
t36.act23		1.000		
t36.act27		1.000		
t36.act28	1.000			
t36.act32	1.000			
t37.act24	1.000			
t37.act28		1.000		
t37.act32		1.000		
t37.act76			1.000	1.000
t38.act24		1.000		
t39.act25	1.000			
t39.act29	1.000			
t39.act33	1.000			
t40.act25		1.000		
t40.act77			1.000	1.000
t41.act26	1.000			
t41.act29		1.000		
t41.act33		1.000		
t42.act30	1.000			
t42.act34	1.000			
t43.act26		1.000		
t43.act30		1.000		
t43.act34		1.000		
t43.act78			1.000	1.000
t45.act31	1.000	1.000		
t45.act35	1.000	1.000		
t45.act79			1.000	1.000
t47.act36		1.000		
t48.act36	1.000			
t48.act37		1.000		
t48.act41		1.000		
t48.act80			1.000	1.000
t49.act37	1.000			
t49.act41	1.000			
t50.act38		1.000		
t50.act42	1.000			
t51.act38	1.000			
t51.act42		1.000		
t51.act43	1.000			
t51.act81			1.000	1.000
t52.act39	1.000	1.000		
t52.act44	1.000			
t52.act82			1.000	1.000
t52.act85			1.000	1.000
t52.act86			1.000	1.000
t53.act40	1.000			
t53.act43		1.000		
t53.act45	1.000			
t54.act40		1.000		
t54.act46	1.000			
t54.act47	1.000			
t54.act83			1.000	1.000
t54.act87			1.000	1.000
t55.act44		1.000		
t56.act45		1.000		
t56.act84			1.000	1.000
t56.act88			1.000	1.000
t57.act46		1.000		

t57.act47		1.000		
t57.act48	1.000			
t57.act49	1.000			
t57.act89			1.000	1.000
t57.act90			1.000	1.000
t58.act91			1.000	1.000
t58.act92			1.000	1.000
t59.act48		1.000		
t59.act49		1.000		

---- 812 VARIABLE y.L 1 si la actividad i de la obra o se realiza en el tiempo t

	o1	o2	o3	o4
t4 .act1	1.000	1.000		
t4 .act50			1.000	1.000
t5 .act2	1.000	1.000		
t5 .act4	1.000	1.000		
t5 .act51			1.000	1.000
t5 .act53			1.000	1.000
t6 .act2	1.000	1.000		
t6 .act4	1.000	1.000		
t6 .act51			1.000	1.000
t6 .act53			1.000	1.000
t7 .act2		1.000		
t7 .act3	1.000			
t7 .act4		1.000		
t7 .act5	1.000			
t7 .act51			1.000	1.000
t7 .act53			1.000	1.000
t8 .act5	1.000	1.000		
t8 .act52				1.000
t8 .act54			1.000	1.000
t9 .act5	1.000	1.000		
t9 .act52			1.000	
t9 .act54			1.000	1.000
t10.act3		1.000		
t10.act5	1.000	1.000		
t10.act54			1.000	1.000
t11.act3		1.000		
t11.act5	1.000	1.000		
t11.act54			1.000	1.000
t12.act3	1.000	1.000		
t12.act5		1.000		
t12.act6	1.000			
t12.act54			1.000	1.000
t13.act3	1.000	1.000		
t13.act6		1.000		
t13.act7	1.000			
t13.act52			1.000	1.000
t13.act55			1.000	1.000
t14.act3	1.000	1.000		
t14.act7	1.000	1.000		
t14.act52			1.000	
t14.act56			1.000	1.000
t14.act60			1.000	1.000
t15.act3	1.000			
t15.act7	1.000	1.000		
t15.act52			1.000	1.000
t15.act56			1.000	1.000
t15.act60			1.000	1.000
t16.act7	1.000	1.000		
t16.act52			1.000	
t16.act57			1.000	1.000
t16.act61			1.000	1.000
t17.act8	1.000	1.000		
t17.act12	1.000	1.000		
t17.act57			1.000	
t17.act61			1.000	1.000
t18.act8	1.000	1.000		
t18.act12		1.000		

t18.act13	1.000			
t18.act57			1.000	
t18.act61			1.000	1.000
t19.act8	1.000			
t19.act9		1.000		
t19.act12		1.000		
t19.act13	1.000			
t19.act52				1.000
t19.act57				1.000
t19.act58			1.000	
t19.act62			1.000	1.000
t20.act9	1.000	1.000		
t20.act12		1.000		
t20.act13	1.000			
t20.act52				1.000
t20.act57				1.000
t20.act58			1.000	
t20.act62			1.000	1.000
t21.act9	1.000			
t21.act10		1.000		
t21.act13		1.000		
t21.act14	1.000			
t21.act58				1.000
t21.act62			1.000	1.000
t22.act9	1.000			
t22.act10		1.000		
t22.act13		1.000		
t22.act14	1.000			
t22.act58			1.000	1.000
t22.act63			1.000	1.000
t23.act10	1.000			
t23.act11		1.000		
t23.act14	1.000	1.000		
t23.act58				1.000
t23.act59			1.000	
t23.act63			1.000	1.000
t24.act10	1.000			
t24.act11		1.000		
t24.act14		1.000		
t24.act15	1.000			
t24.act59			1.000	1.000
t24.act63			1.000	1.000
t25.act10	1.000			
t25.act11		1.000		
t25.act15	1.000	1.000		
t25.act59			1.000	1.000
t25.act64			1.000	1.000
t26.act11	1.000			
t26.act15	1.000	1.000		
t26.act59				1.000
t26.act65			1.000	1.000
t26.act67			1.000	1.000
t27.act11	1.000			
t27.act16	1.000	1.000		
t27.act65			1.000	1.000
t27.act67			1.000	1.000
t28.act11	1.000			
t28.act16	1.000	1.000		
t28.act66			1.000	1.000
t28.act68			1.000	1.000
t29.act16	1.000	1.000		
t29.act69			1.000	1.000
t30.act17	1.000	1.000		
t30.act70			1.000	1.000
t30.act71			1.000	1.000
t31.act17		1.000		
t31.act18	1.000			
t31.act20	1.000			
t31.act70			1.000	1.000
t31.act71			1.000	1.000
t32.act18		1.000		
t32.act19	1.000			
t32.act20		1.000		

t32.act21	1.000			
t32.act72			1.000	1.000
t32.act73			1.000	1.000
t33.act19	1.000	1.000		
t33.act20		1.000		
t33.act21	1.000			
t33.act72			1.000	1.000
t33.act73			1.000	1.000
t34.act19		1.000		
t34.act21		1.000		
t34.act22	1.000			
t34.act74			1.000	1.000
t35.act22		1.000		
t35.act23	1.000			
t35.act27	1.000			
t35.act75			1.000	1.000
t36.act23	1.000	1.000		
t36.act27		1.000		
t36.act28	1.000			
t36.act32	1.000			
t36.act75			1.000	1.000
t37.act23		1.000		
t37.act24	1.000			
t37.act28	1.000	1.000		
t37.act32	1.000	1.000		
t37.act76			1.000	1.000
t38.act24	1.000	1.000		
t38.act28	1.000	1.000		
t38.act32	1.000	1.000		
t38.act76			1.000	1.000
t39.act24		1.000		
t39.act25	1.000			
t39.act28		1.000		
t39.act29	1.000			
t39.act32		1.000		
t39.act33	1.000			
t39.act76			1.000	1.000
t40.act25	1.000	1.000		
t40.act28		1.000		
t40.act29	1.000			
t40.act32		1.000		
t40.act33	1.000			
t40.act77			1.000	1.000
t41.act25		1.000		
t41.act26	1.000			
t41.act29	1.000	1.000		
t41.act33	1.000	1.000		
t41.act77			1.000	1.000
t42.act25		1.000		
t42.act26	1.000			
t42.act29		1.000		
t42.act30	1.000			
t42.act33		1.000		
t42.act34	1.000			
t42.act77			1.000	1.000
t43.act26		1.000		
t43.act30	1.000	1.000		
t43.act34	1.000	1.000		
t43.act78			1.000	1.000
t44.act26		1.000		
t44.act30	1.000	1.000		
t44.act34	1.000	1.000		
t44.act78			1.000	1.000
t45.act26		1.000		
t45.act31	1.000	1.000		
t45.act35	1.000	1.000		
t45.act79			1.000	1.000
t46.act31	1.000	1.000		
t46.act35	1.000	1.000		
t46.act79			1.000	1.000
t47.act31	1.000			
t47.act35	1.000			
t47.act36		1.000		

t47.act79			1.000	1.000
t48.act36	1.000			
t48.act37		1.000		
t48.act41		1.000		
t48.act80			1.000	1.000
t49.act37	1.000	1.000		
t49.act41	1.000	1.000		
t49.act80			1.000	1.000
t50.act37	1.000			
t50.act38		1.000		
t50.act41		1.000		
t50.act42	1.000			
t50.act80			1.000	1.000
t51.act38	1.000	1.000		
t51.act42		1.000		
t51.act43	1.000			
t51.act81			1.000	1.000
t52.act39	1.000	1.000		
t52.act42		1.000		
t52.act44	1.000			
t52.act82			1.000	1.000
t52.act85			1.000	1.000
t52.act86			1.000	1.000
t53.act39		1.000		
t53.act40	1.000			
t53.act43		1.000		
t53.act45	1.000			
t53.act82			1.000	1.000
t53.act85			1.000	1.000
t53.act86			1.000	1.000
t54.act40		1.000		
t54.act43		1.000		
t54.act46	1.000			
t54.act47	1.000			
t54.act83			1.000	1.000
t54.act87			1.000	1.000
t55.act40		1.000		
t55.act44		1.000		
t55.act46	1.000			
t55.act47	1.000			
t55.act83			1.000	1.000
t55.act87			1.000	1.000
t56.act45		1.000		
t56.act46	1.000			
t56.act47	1.000			
t56.act84			1.000	1.000
t56.act88			1.000	1.000
t57.act46		1.000		
t57.act47		1.000		
t57.act48	1.000			
t57.act49	1.000			
t57.act84			1.000	
t57.act89			1.000	1.000
t57.act90			1.000	1.000
t58.act46		1.000		
t58.act47		1.000		
t58.act48	1.000			
t58.act49	1.000			
t58.act84				1.000
t58.act91			1.000	1.000
t58.act92			1.000	1.000
t59.act48		1.000		
t59.act49		1.000		

---- 812 VARIABLE w.L 1 si la actividad i de la obra o termina en el tiempo t

	o1	o2	o3	o4
t0 .act1			1.000	1.000
t0 .act2			1.000	1.000
t0 .act3			1.000	1.000

t0 .act4			1.000	1.000
t0 .act5			1.000	1.000
t0 .act6			1.000	1.000
t0 .act7			1.000	1.000
t0 .act8			1.000	1.000
t0 .act9			1.000	1.000
t0 .act10			1.000	1.000
t0 .act11			1.000	1.000
t0 .act12			1.000	1.000
t0 .act13			1.000	1.000
t0 .act14			1.000	1.000
t0 .act15			1.000	1.000
t0 .act16			1.000	1.000
t0 .act17			1.000	1.000
t0 .act18			1.000	1.000
t0 .act19			1.000	1.000
t0 .act20			1.000	1.000
t0 .act21			1.000	1.000
t0 .act22			1.000	1.000
t0 .act23			1.000	1.000
t0 .act24			1.000	1.000
t0 .act25			1.000	1.000
t0 .act26			1.000	1.000
t0 .act27			1.000	1.000
t0 .act28			1.000	1.000
t0 .act29			1.000	1.000
t0 .act30			1.000	1.000
t0 .act31			1.000	1.000
t0 .act32			1.000	1.000
t0 .act33			1.000	1.000
t0 .act34			1.000	1.000
t0 .act35			1.000	1.000
t0 .act36			1.000	1.000
t0 .act37			1.000	1.000
t0 .act38			1.000	1.000
t0 .act39			1.000	1.000
t0 .act40			1.000	1.000
t0 .act41			1.000	1.000
t0 .act42			1.000	1.000
t0 .act43			1.000	1.000
t0 .act44			1.000	1.000
t0 .act45			1.000	1.000
t0 .act46			1.000	1.000
t0 .act47			1.000	1.000
t0 .act48			1.000	1.000
t0 .act49			1.000	1.000
t0 .act50	1.000	1.000		
t0 .act51	1.000	1.000		
t0 .act52	1.000	1.000		
t0 .act53	1.000	1.000		
t0 .act54	1.000	1.000		
t0 .act55	1.000	1.000		
t0 .act56	1.000	1.000		
t0 .act57	1.000	1.000		
t0 .act58	1.000	1.000		
t0 .act59	1.000	1.000		
t0 .act60	1.000	1.000		
t0 .act61	1.000	1.000		
t0 .act62	1.000	1.000		
t0 .act63	1.000	1.000		
t0 .act64	1.000	1.000		
t0 .act65	1.000	1.000		
t0 .act66	1.000	1.000		
t0 .act67	1.000	1.000		
t0 .act68	1.000	1.000		
t0 .act69	1.000	1.000		
t0 .act70	1.000	1.000		
t0 .act71	1.000	1.000		
t0 .act72	1.000	1.000		
t0 .act73	1.000	1.000		
t0 .act74	1.000	1.000		
t0 .act75	1.000	1.000		
t0 .act76	1.000	1.000		

t0 .act77	1.000	1.000		
t0 .act78	1.000	1.000		
t0 .act79	1.000	1.000		
t0 .act80	1.000	1.000		
t0 .act81	1.000	1.000		
t0 .act82	1.000	1.000		
t0 .act83	1.000	1.000		
t0 .act84	1.000	1.000		
t0 .act85	1.000	1.000		
t0 .act86	1.000	1.000		
t0 .act87	1.000	1.000		
t0 .act88	1.000	1.000		
t0 .act89	1.000	1.000		
t0 .act90	1.000	1.000		
t0 .act91	1.000	1.000		
t0 .act92	1.000	1.000		
t4 .act1	1.000	1.000		
t4 .act50			1.000	1.000
t6 .act2	1.000			
t6 .act4	1.000			
t7 .act2		1.000		
t7 .act4		1.000		
t7 .act51			1.000	1.000
t7 .act53			1.000	1.000
t11.act5	1.000			
t12.act5		1.000		
t12.act6	1.000			
t12.act54			1.000	1.000
t13.act6		1.000		
t13.act55			1.000	1.000
t14.act3		1.000		
t15.act3	1.000			
t15.act56			1.000	1.000
t15.act60			1.000	1.000
t16.act7	1.000	1.000		
t16.act52			1.000	
t17.act12	1.000			
t18.act8		1.000		
t18.act57			1.000	
t18.act61			1.000	1.000
t19.act8	1.000			
t20.act9		1.000		
t20.act12		1.000		
t20.act13	1.000			
t20.act52				1.000
t20.act57				1.000
t21.act62			1.000	1.000
t22.act9	1.000			
t22.act10		1.000		
t22.act13		1.000		
t22.act58			1.000	
t23.act14	1.000			
t23.act58				1.000
t24.act14		1.000		
t24.act63			1.000	1.000
t25.act10	1.000			
t25.act11		1.000		
t25.act59			1.000	
t25.act64			1.000	1.000
t26.act15	1.000	1.000		
t26.act59				1.000
t27.act65			1.000	1.000
t27.act67			1.000	1.000
t28.act11	1.000			
t28.act66			1.000	1.000
t28.act68			1.000	1.000
t29.act16	1.000	1.000		
t29.act69			1.000	1.000
t30.act17	1.000			
t31.act17		1.000		
t31.act18	1.000			
t31.act20	1.000			
t31.act70			1.000	1.000

t31.act71			1.000	1.000
t32.act18		1.000		
t33.act19	1.000			
t33.act20		1.000		
t33.act21	1.000			
t33.act72			1.000	1.000
t33.act73			1.000	1.000
t34.act19		1.000		
t34.act21		1.000		
t34.act22	1.000			
t34.act74			1.000	1.000
t35.act22		1.000		
t35.act27	1.000			
t36.act23	1.000			
t36.act27		1.000		
t36.act75			1.000	1.000
t37.act23		1.000		
t38.act24	1.000			
t38.act28	1.000			
t38.act32	1.000			
t39.act24		1.000		
t39.act76			1.000	1.000
t40.act25	1.000			
t40.act28		1.000		
t40.act32		1.000		
t41.act29	1.000			
t41.act33	1.000			
t42.act25		1.000		
t42.act26	1.000			
t42.act29		1.000		
t42.act33		1.000		
t42.act77			1.000	1.000
t44.act30	1.000	1.000		
t44.act34	1.000	1.000		
t44.act78			1.000	1.000
t45.act26		1.000		
t46.act31		1.000		
t46.act35		1.000		
t47.act31	1.000			
t47.act35	1.000			
t47.act36		1.000		
t47.act79			1.000	1.000
t48.act36	1.000			
t49.act37		1.000		
t49.act41	1.000			
t50.act37	1.000			
t50.act41		1.000		
t50.act42	1.000			
t50.act80			1.000	1.000
t51.act38	1.000	1.000		
t51.act43	1.000			
t51.act81			1.000	1.000
t52.act39	1.000			
t52.act42		1.000		
t52.act44	1.000			
t53.act39		1.000		
t53.act40	1.000			
t53.act45	1.000			
t53.act82			1.000	1.000
t53.act85			1.000	1.000
t53.act86			1.000	1.000
t54.act43		1.000		
t55.act40		1.000		
t55.act44		1.000		
t55.act83			1.000	1.000
t55.act87			1.000	1.000
t56.act45		1.000		
t56.act46	1.000			
t56.act47	1.000			
t56.act88			1.000	1.000
t57.act84			1.000	
t57.act89			1.000	1.000
t57.act90			1.000	1.000

```
t58.act46          1.000
t58.act47          1.000
t58.act48      1.000
t58.act49      1.000
t58.act84                1.000
t58.act91                1.000  1.000
t58.act92                1.000  1.000
t59.act48          1.000
t59.act49          1.000
```

```
---- 812 VARIABLE z.L = 128280.000
```

```
---- 812 VARIABLE hsub.L cantidad de recurso adicional subcontratado
```

```
h2 4.000, h3 9.000, h4 4.000
```

```
EXECUTION TIME = 1.201 SECONDS 11 Mb WIN238-238 Apr 3, 2012
```