

SISTEMA BASADO EN CONOCIMIENTO PARA PROGRAMACION DE VIVIENDAS EN SERIE

Por José Gerardo Pech Pérez y José H. Loría Arcila

Resumen

Este artículo describe las funciones de un sistema experto basado en conocimiento para la programación de proyectos de construcción repetitiva usando el método de la línea de balance, aplicado a los proyectos de construcción de vivienda en gran escala. Los proyectos más grandes de construcción de vivienda usualmente están formados por un pequeño número de unidades de vivienda (modelos) que son repetidos muchas veces. El principal problema de estos proyectos es la planeación de los recursos involucrados en las actividades requeridas para la construcción. El sistema permite obtener y almacenar la información relacionada a los elementos que integran las viviendas típicas y los métodos de construcción requeridos para llevarlos a cabo. Los mecanismos de inferencia del sistema permiten la definición detallada de los modelos de un proyecto basados en la información almacenada en el sistema. Si el usuario lo desea, la información puede ser modificada. Esta definición incluye la identificación de elementos que integran el modelo, así como las cantidades de trabajo, los procedimientos constructivos y el orden en que éstos necesitan ser ejecutados. Al terminar la definición, el sistema genera los programas de construcción gráfica y numéricamente usando el método de la línea de balance. El sistema se desarrolló usando KPWIN++ versión 1.50a de Knowledge Garden Inc. y Windows 3.11 para Trabajo en Grupo de Microsoft Corporation.

1. INTRODUCCION

Actualmente, la programación en los proyectos de construcción masiva de vivienda se lleva a cabo de manera limitada, con métodos muy simples como los diagramas de barras, con un nivel de detalle muy elemental. En pocas ocasiones se usan los métodos de ruta crítica y, menos aún, el método de la línea de balance. Lógicamente la falta de una planeación adecuada se refleja en la realización deficiente de las obras, consumos excesivos y desperdicios de recursos, ritmo de avance irregular y grandes diferencias entre los tiempos planeados y los obtenidos. El método de la línea de balance proporciona un método alternativo que ha sido aplicado con éxito en la programación de proyectos de construcción en serie (Al Zarraj, 1994). Este método se basa en los mismos principios usados en las industrias para los procesos de fabricación en serie, aprovechando así las ventajas de esta forma de producción.

Para la realización de una planeación adecuada, se

deben considerar elementos muy importantes como son: personal con gran experiencia en programación y con conocimiento del tipo de obra a realizar, equipo de cómputo con los programas para realizar los cálculos numéricos y tiempo suficiente para desarrollar la planeación. Desafortunadamente estos elementos son los más escasos y caros en las empresas constructoras.

El uso de paquetes de computadora especializados en técnicas de redes, acelera y simplifica los procesos de cálculo de la programación. Sin embargo, la cantidad de información que se debe proporcionar a dichos programas es elevada y requiere que el personal utilizado tenga suficiente experiencia y habilidad para realizar los procesos intelectuales como son: la identificación de las actividades del proyecto, la determinación de la secuencia de construcción, y la asignación de recursos y duraciones. Procesos que no pueden ser realizados por los programas comerciales existentes.

Las soluciones experimentales propuestas a la fecha para resolver esta limitación se han orientado hacia el desarrollo de programas especializados de computadoras, denominados sistemas expertos, surgidos del campo de la inteligencia artificial, que ofrecen la posibilidad de realizar el proceso completo de la planeación, con una mínima intervención del personal técnico. Entre ellos se encuentran: CONSCHEG (Shaked y Warszawski, 1992), SIPE-2 (Kartam, Levitt y Wilkins, 1991), OARPLAN (Winstanley, Chacon y Levitt, 1993) y BUILDER (Cherneff, Logcher y Sriram, 1991). Estos programas se encargan de realizar tanto las tareas intelectuales como las mecánicas de la planeación de ciertos tipos específicos de proyectos, y están basados en la creación y solución de redes de actividades. De manera general, dichos programas son capaces de realizar alguna o todas las funciones siguientes: generan la lista de las actividades del proyecto, determinan sus duraciones, establecen la secuencia de construcción y realizan los cálculos de la red de actividades.

Los proyectos de construcción masiva de vivienda se pueden clasificar dentro de los proyectos de construcción en serie, pues consisten en la construcción repetitiva de un gran número de unidades de vivienda similares en un tiempo relativamente corto. La programación detallada de estos proyectos usando las herramientas tradicionales basadas en redes de actividades, se vuelve un proceso complejo y que demanda una gran cantidad de recursos humanos dado el gran número de actividades individuales que se genera.

Los sistemas expertos mencionados, han sido desarrollados para proyectos con características muy específicas, diferentes a las de proyectos de construcción en serie y sin considerar la aplicación del método de la línea de balance. El sistema que se presenta muestra un sistema experto orientado a la realización de la programación en el campo específico de la construcción en serie, en este caso particular, de la construcción masiva de viviendas, aplicando soluciones similares a las presentadas en los sistemas expertos existentes, complementándolos con la aplicación del método de la línea de balance.

2. METODOLOGIA

Considerando los requerimientos de planeación ya planteados, se seleccionó para el desarrollo del sistema, un tipo especial de sistema experto denominado "Sistema Basado en Conocimiento" (Knowledge-Based System), que se define como un sistema experto que depende de una base de conocimiento para ejecutar tareas difíciles, y que obtiene su poder del conocimiento experto que ha sido codificado en hechos, reglas, heurística y procedimientos. El conocimiento en estos sistemas es almacenado en una base de conocimientos separada de los componentes de control e inferencia. Esto hace posible que se pueda agregar nuevos conocimientos o refinar los existentes, sin que sea necesario recompilar los programas de control e inferencia (Patterson, 1990).

Los conocimientos constituyen el punto central de este tipo de sistemas, así el conocimiento puede expresar un simple hecho o atributo poseído por un objeto o persona, puede expresar una relación entre dos objetos o personas, o entre una persona y un concepto abstracto. En estos casos se habla de un conocimiento declarativo. El conocimiento puede ser también de tipo procedural o de tipo empírico, esto es, consistir en un conjunto de reglas que los expertos usan en la solución de problemas complejos. Los conocimientos que provienen de las experiencias propias de los expertos se denominan conocimiento heurístico.

El conocimiento requiere, en primer lugar, ser almacenado y posteriormente, recuperado, ordenado y apareado para producir nuevo conocimiento que conduzca a la solución del problema que se plantea. Lo anterior obliga a seleccionar cuidadosamente la forma en que se va a representar el conocimiento dentro del sistema.

Para este sistema, la representación seleccionada fue la metodología orientada a objetos. Esta forma provee ventajas considerables tanto para el manejo del conocimiento, como para el manejo de la complejidad del sistema, dado que obliga a la descomposición del sistema en pequeños componentes con comportamientos bien diferenciados y con poca dependencia entre ellos. Esto reduce la complejidad y permite que cada componente pueda ser estudiado y definido con cierta facilidad. Cada uno de estos componentes que intervienen en un problema reciben el nombre de objetos. Los objetos almacenan tanto información, como los métodos o procedimientos para realizar las tareas que le corresponden. El funcionamiento global del

sistema se obtiene mediante el paso de mensajes entre los objetos, los cuales activan sus procedimientos de solución.

Una vez definida la forma de representación del conocimiento, el siguiente paso fue proceder al diseño del sistema, que considerando la orientación a objetos ya definida, requirió de la realización de los cinco pasos que se describen a continuación.

2.1. Identificación de Abstracciones

A partir de un análisis cuidadoso de los proyectos de construcción de viviendas en serie se identificaron los elementos típicos que intervienen en un proyecto de construcción masiva de viviendas, los cuales se muestran en la Figura 1 y se describen a continuación:

- **Proyecto.** El conjunto completo de viviendas a ser construido, con la información de los modelos que intervienen.
- **Modelo.** Cada una de las unidades típicas de vivienda que se construirá un cierto número de veces en el proyecto.
- **Elemento constructivo.** Cada uno de los elementos físicos que deben ser elaborados para la construcción de una unidad de vivienda típica. Por ejemplo: cimiento, muro, cerramiento, losa, acabado de muros, ductos eléctricos, etc. Además de describir al elemento físico esta entidad tiene asociados el método de trabajo que permitirá construir el elemento físico y el cuantificador que permitirá determinar la cantidad de trabajo que es necesario realizar en la construcción del elemento físico.
- **Cuantificador.** Representa las entidades que contienen información para determinar la cantidad de trabajo que debe ser realizado para la construcción de cada uno de los elementos constructivos. Por ejemplo: área de construcción, altura de muros, área de muros, área de pisos, etc. Normalmente contienen un valor numérico o una fórmula (ver Figura 1)
- **Trabajo.** Estas entidades almacenan los conocimientos que se tienen sobre los diferentes métodos de trabajo o procedimientos constructivos existentes para la fabricación de los elementos constructivos de una vivienda. Por ejemplo, el elemento losa, puede ser realizado con el procedimiento de una losa de viga pretensada y bovedilla de concreto. También almacenan la especificación del grupo de trabajadores que debe realizar el trabajo y la velocidad a que se desarrolla el trabajo, esto es, el número de unidades de trabajo que realizan en una unidad de tiempo (rendimiento). Por último almacena la cantidad mínima de unidades de trabajo que se deben asignar a una cuadrilla en una vivienda para que se aproveche de manera adecuada el potencial del grupo de trabajo.

Adicionalmente se requieren manejar tres abstracciones más, dos para la realización de la programación y una para el almacenamiento de los conocimientos de las viviendas típicas, aunque que no se muestran en la Figura 1. Estas son:

- **Actividades.** Las actividades necesarias para la construcción de un modelo de una vivienda típica.

- **Programas de obra.** Los programas resultantes para la ejecución de una unidad de vivienda, ya sea usando redes de actividades o línea de balance.
- **Modelos base.** Recopila y almacena los conocimientos generales de los modelos típicos que pueden intervenir en los proyectos.

2.2. Identificación de Comportamientos de las Abstracciones

Los comportamientos son las tareas o procedimientos que pueden llevar a cabo las abstracciones. Para las abstracciones anteriormente mencionadas se identificaron los siguientes comportamientos:

- **Proyecto.** Crear/Editar los datos del proyecto, incluyendo la creación de los modelos que participan.
- **Modelo.** Crear/Editar los datos del modelo incluyendo los elementos constructivos y los cuantificadores. Crear la lista de actividades. Definir las actividades precedentes. Definir las precedencias de las actividades. Crear los modelos base.
- **Elemento Constructivo.** Editar la información del elemento. Leer la lista de trabajos en el sistema.
- **Cuantificadores.** Editar la fórmula que determina la cantidad de trabajo. Evaluar la fórmula. Crear cuantificadores.
- **Trabajos.** Crear/Editar los datos de los trabajos.
- **Actividad.** Editar los datos de la actividad. Calcular la duración de la actividad. Calcular las fechas de la red de actividades. Calcular los tiempos de la línea de balance.
- **Programa.** Establecer la secuencia de construcción de un modelo. Graficar la red de actividades y determinar la ruta crítica de un modelo. Calcular la línea de balance. Presentar la gráfica de la línea de balance. Calcular los programas detallados de una vivienda del proyecto.
- **Modelo base.** Crear/Editar los datos de los modelos base incluyendo los elementos constructivos y los cuantificadores que lo definen.

2.3. Identificación de Relaciones entre Clases

Una clase se define como el conjunto de objetos que comparten una estructura y un comportamiento comunes (Booch, 1991). El conjunto de abstracciones identificadas en los pasos anteriores permite la definición de las clases de objetos del sistema y de las relaciones que existen entre ellas. Las relaciones entre clases son de tres tipos: la relación de jerarquía (tipo de), la relación de agregación (parte de), y la relación de utilización (usa a). Las

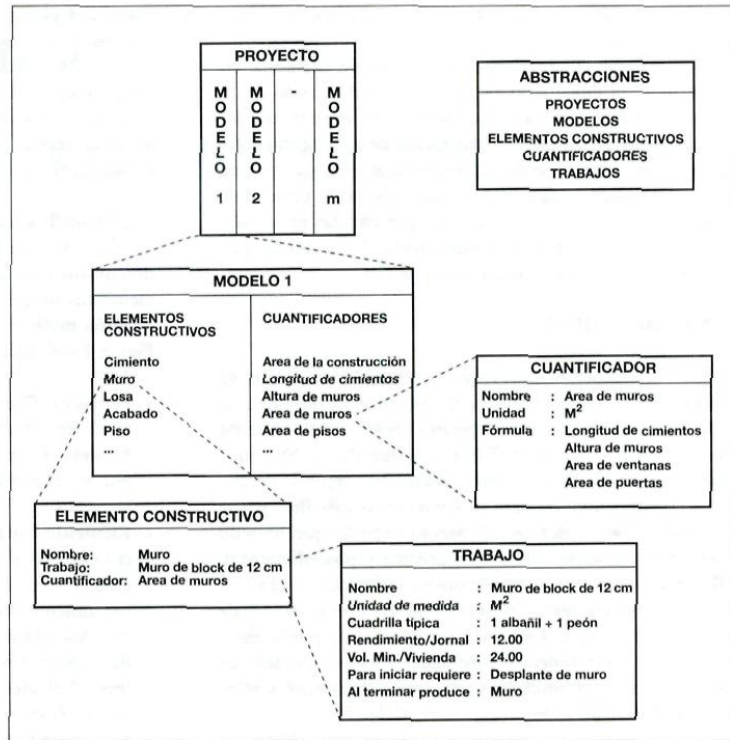


Figura. 1 Elementos relacionados con un proyecto de construcción en serie.

relaciones más importantes entre las clases del sistema son de agregación, como se muestra en la Figura 2. En esta figura se observa, que la clase proyecto usa a la clase modelo en su definición, a su vez, la clase modelo usa a las clases trabajo, elemento, cuantificador, actividad y programa.

2.4. Identificación de Relaciones entre Objetos

Durante el funcionamiento del sistema, los objetos se crean, se destruyen y se mandan mensajes entre ellos con una frecuencia bastante alta. En la Figura 3 se muestran los objetos que pueden existir en un momento dado y los mensajes que intercambian. Estos mensajes pueden ser para enviar o solicitar información, o bien, para crear o

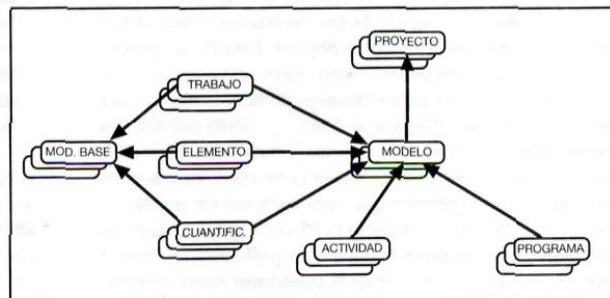


Figura 2. Relaciones entre las clases del sistema.

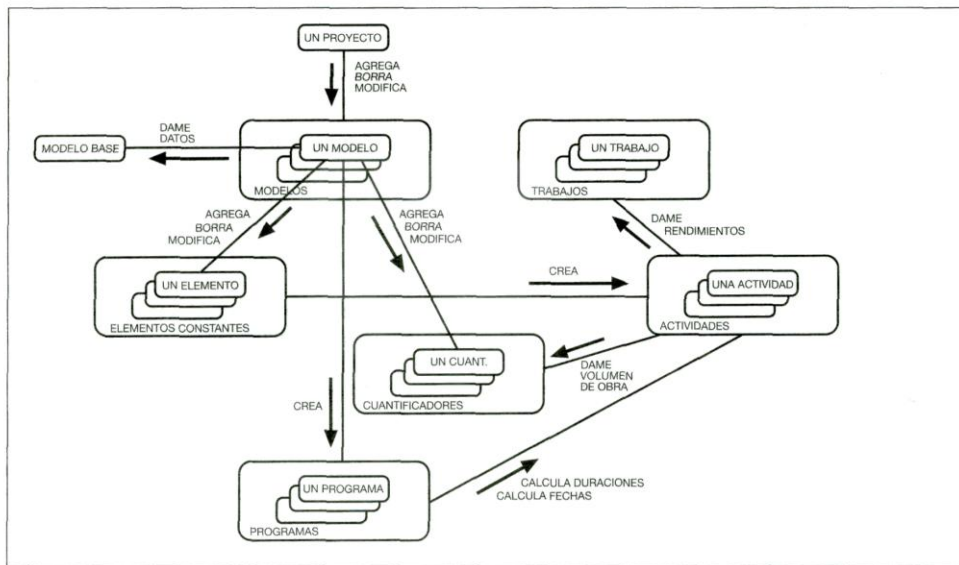


Figura 3. Relaciones entre objetos del sistema.

destruir otros objetos. En la figura puede verse que el objeto UN MODELO, manda un mensaje para crear UN PROGRAMA de un modelo de vivienda, y que el programa creado va a solicitar, el cálculo de duraciones y fechas de cada una de las actividades.

2.5. Diseño de la Estructura y Procesos del Sistema

En la Figura 4 se muestra el diagrama de la estructura general del sistema, en el que pueden observarse los componentes básicos de un sistema basado en conocimiento como son: los mecanismos de entrada y salida, los mecanismos de inferencia y control y la base de conocimientos del sistema. Las flechas del diagrama representan los principales flujos de información entre los componentes del sistema. También se muestran las dos entidades externas que interactúan con el sistema: los expertos y los usuarios.

La función de los expertos es almacenar en la base de conocimientos del sistema los denominados conocimientos básicos, compuestos por los métodos de trabajo y por los conocimientos relacionados con los modelos típicos que se presentan con cierta frecuencia en los proyectos.

Los usuarios, por su parte, utilizan el sistema para resolver problemas específicos de programación, pero pueden opcionalmente, proporcionar nuevos conocimientos básicos al sistema, derivados de su problema particular. Para definir un proyecto, el usuario puede tomar información de los modelos típicos que se encuentran almacenados en la base de conocimientos del sistema.

La información que el usuario proporciona al sistema sobre su proyecto específico es almacenada en la base de conocimientos como "conocimientos del proyecto" y

consiste en la descripción detallada de las viviendas modelo que intervienen en el proyecto. Estos conocimientos del proyecto son combinados con los conocimientos básicos de los trabajos, en el momento en que se activan los procesos de inferencia, cuando el usuario solicita los programas de obra. Los procesos de inferencia del sistema, generan nuevos conocimientos, tales como: la lista de actividades de cada vivienda modelo, el conjunto de elementos o condiciones que se obtiene al terminar cada actividad, y la secuencia de construcción de las mismas. Estos últimos conocimientos, pueden ser revisados y modificados por el usuario, antes de que se activen los procesos finales de cálculo y presentación de resultados, que son: la red de actividades y la línea de balance.

a. Procesos de inferencia y cálculo. Los procesos que realiza el sistema para la programación de un proyecto son: generación de actividades, evaluación de cuantificadores, establecimiento de dependencias, determinación de la secuencia de construcción, graficación y cálculo de la red de actividades, y aplicación del método de la línea de balance. A continuación se explica con más detalles dichos procesos.

b. Generación de actividades. Por medio de este proceso el sistema crea la lista de actividades requeridas para la construcción de un modelo de vivienda. La regla general utilizada es que cada uno de los elementos físicos requiere una actividad de construcción, de manera que el sistema generará una actividad por cada uno de los elementos constructivos que se hayan asignado al modelo. Al mismo tiempo que se crea la actividad es necesario generar la siguiente información adicional: el tipo de cuadrilla que ejecutará la actividad, la cantidad de trabajo que se debe desarrollar, el número apropiado de cuadrillas que deben laborar en una

vivienda, los elementos físicos o condiciones que deben estar presentes en la obra para que la actividad pueda realizarse y, por último, el elemento físico o condición que se producirá en la obra al terminar la actividad.

Toda la información adicional, con excepción de la cantidad de trabajo que resulta de la evaluación del cuantificador asociado al elemento constructivo, se obtiene de los hechos que están registrados en el método de trabajo que se encuentra asociado al elemento constructivo. Posteriormente se aplica una fórmula para determinar la duración de la actividad en una vivienda, y otra para determinar un tiempo de espera entre la terminación de esta actividad y el inicio de las que dependen de ella.

c. Evaluación de cuantificadores. Este proceso se efectúa activando un procedimiento de cálculo que se almacena en el cuantificador para evaluar la fórmula asociada. Este procedimiento de cálculo, basado en el encadenamiento hacia

d. Establecimiento de dependencias. Consiste en deducir las actividades que deben ejecutarse antes de una actividad seleccionada, identificando cuáles son las actividades que producen los objetos o situaciones que la actividad seleccionada requiere para iniciar. Este proceso se lleva a cabo en dos etapas, en la primera etapa se crea un conjunto de hechos que relacionan las actividades con los objetos o situaciones que producen al ser ejecutadas y otro conjunto de hechos que relacionan las actividades con los objetos o situaciones que requieren para iniciar su ejecución. Esto es:

Productos:

Actividad : A

Produce : objeto o situación B

Requerimientos:

Actividad : C

Requiere : objeto o situación D

En la segunda etapa a partir de estos dos conjuntos de hechos el sistema hace un apareamiento de los requerimientos con los productos para deducir la relaciones de precedencia. Tomando en cuenta la siguiente regla de precedencia:

Si: "la actividad x" requiere "el objeto o situación B" Y

"la actividad y" produce "el objeto o situación B"

Entonces: "la actividad y" precede a "la actividad x"

e. Determinación de la secuencia de construcción. El método utilizado para definir la secuencia, es un procedimiento recursivo conocido con el nombre de búsqueda a profundidad (Depth First Search o DFS) (Cherneck, 1990). El método parte de las dependencias que se han asignado a cada actividad para producir un ordenamiento lineal de las actividades de un modelo de vivienda, de tal manera que se respeten todas las condiciones impuestas por las dependencias. El ordenamiento de este tipo es indispensable para efectuar los cálculos y las gráficas, tanto de la red de actividades, como de la línea de balance.

f. Graficación de la red. La graficación requiere que se defina una posición en el plano para cada una de las actividades, definiendo las coordenadas del centro de un rectángulo que representa cada actividad. Para ello, primero se define su nivel de dependencia, de la siguiente manera: a las actividades que no dependen de ninguna actividad se les asigna el nivel 1, a las actividades que únicamente dependen de las actividades de nivel 1 se les asigna el nivel 2, a las actividades que únicamente dependen de actividades de nivel 1 o de nivel 2 se les asigna el nivel 3, y así sucesivamente. Este nivel determina la columna correspondiente en que se graficarán las actividades y la fila se determina de acuerdo al orden en que se presentan las actividades de un mismo nivel. Por último se define un ancho de las columnas y una altura de las filas para ubicar las coordenadas y dibujar el rectángulo de la actividad. Posteriormente se usan las dependencias para dibujar las



Figura 4. Estructura del sistema.

atrás, trabaja de la siguiente manera: si se quiere obtener el valor de "Área de muros", el procedimiento debe conocer el valor de cada cuantificador que se encuentre en la fórmula antes de realizar las operaciones aritméticas indicadas. Si no se tienen estos valores, se deben activar los procedimientos de cálculo de ellos para obtenerlos. Como a su vez, las fórmulas de estos últimos, pueden contener otros cuantificadores, será necesario activar sus procedimientos para obtener sus valores. El proceso continúa hasta llegar a un cuantificador que no involucre a otros cuantificadores, o hasta llegar a un cuantificador que no tenga ninguna fórmula asignada, en este caso se solicita el valor al usuario, o bien, se llega a un cuantificador que ya ha sido evaluado previamente, en este caso se toma directamente el valor sin aplicar la fórmula. Habiendo evaluado todos los cuantificadores se aplica la fórmula y se obtiene el valor del cuantificador, este valor se regresa al cuantificador que lo solicitó con anterioridad y así sucesivamente, hasta llegar al cuantificador que inició el proceso.

líneas de unión entre las actividades. El sistema identifica si la actividad es crítica y dibuja el rectángulo en color rojo. La línea de unión entre dos actividades críticas también se muestra en color rojo.

g. Cálculo de la red. Se basa en los algoritmos de cálculo de una red por medio del método del diagrama de precedencias, tomando en cuenta secuencia de construcción, las duraciones ya definidas y los tiempo de espera entre actividades consecutivas.

h. Aplicación del método de la línea de balance. Los mecanismos de inferencia anteriormente descritos permiten obtener la información básica para la aplicación del método de la línea de balance. Adicionalmente se requiere conocer el número total de viviendas que se va a construir de cada modelo y la tasa de producción semanal requerida, para proceder a calcular el programa. A continuación se muestran las ecuaciones que se deben utilizar para obtener el programa por medio de la línea de balance.

i. Programa general de un modelo de vivienda. Define el programa de construcción por actividades para un conjunto de viviendas, donde una actividad, por ejemplo muros, comprende la ejecución del trabajo de muros en todas las viviendas del conjunto. La fecha de inicio corresponde al inicio del muro de la primera vivienda y la fecha terminación corresponde a la terminación del muro de la última vivienda. Para el cálculo del programa se usaron las siguientes ecuaciones:

$$c_m = \text{EnteroSup} (v_u / v_m) \quad (1)$$

Dónde: c_m = número máximo de cuadrillas por vivienda (Cuadrillas/Vivienda).

v_u = unidades de trabajo que se requieren ejecutar en una vivienda (U. de Trabajo/Vivienda)

v_m = cantidad mínima de unidades de trabajo que se debe asignar a una cuadrilla en una sola vivienda para que trabaje eficientemente (U. de Trabajo/Vivienda)

EnteroSup = Entero superior, por ejemplo:

EnteroSup (10.0) = 10, EnteroSup (10.10) = 11, EnteroSup (10.9) = 11

La Ecuación 1 proporciona el número máximo de cuadrillas que pueden trabajar eficientemente en una vivienda, tomando en cuenta las restricciones que impone el trabajo que se va a desarrollar.

$$G = (R * v_u) / (c_m * r_u * d) \quad (2)$$

Donde: G = número teórico de viviendas construidas simultáneamente (Viviendas)

R = tasa de producción de viviendas deseada o número de viviendas que deben producir por semana (Viviendas/Semana)

r_u = cantidad de trabajo producido por una cuadrilla en una jornada (U. de trabajo/(Cuadrilla x Jornada))

d = número de jornadas o días laborables a la semana (Jornadas/Semana)

La Ecuación 2 permite calcular el número teórico de viviendas que deben ser construidas simultáneamente para obtener la tasa de producción requerida por semana. Se llama teórico porque generalmente se obtiene un número no entero de viviendas.

$$g = \text{EnteroSup} (G) \quad (3)$$

Donde: g = número real de viviendas construidas simultáneamente.

La Ecuación 3 permite obtener el número entero de viviendas que deben construirse simultáneamente para obtener la tasa de producción semanal requerida.

$$r = (g * r_u * c_m * d) / v_u \quad (4)$$

Donde: r = tasa de producción real (Viviendas/Semana).

La Ecuación 4 utiliza el número real de viviendas que se van a construir simultáneamente (g), para calcular el número de viviendas que se producirán a la semana.

$$D = v_u / (r_u * c_m) \quad (5)$$

Donde: D = duración de un trabajo en una vivienda (Jornadas)

La Ecuación 5 permite calcular el tiempo que se requiere para ejecutar un trabajo en una vivienda utilizando c_m cuadrillas, medido en jornadas.

$$T = ((n - 1) * d) / r \quad (6)$$

Donde: T = Tiempo transcurrido entre el inicio de un trabajo en la primera vivienda y el inicio del mismo trabajo en la última vivienda (Jornadas).

n = número total de viviendas a producir

La Ecuación 6 permite calcular el tiempo total que se requiere para ejecutar un solo trabajo en todas las viviendas.

$$TI_1 = \text{Max}_{Act.Preced.} \left[\begin{array}{l} TT_{1(Act.Preced.)} + \text{Tiempo de Espera}_{Act.Preced.} \\ TT_{n(Act.Preced.)} + \text{Tiempo de Espera}_{Act.Preced.} - T \end{array} \right] \quad (7)$$

Donde: TI_1 = fecha de inicio de una actividad (para la primera vivienda). Para la primera actividad se asigna el valor cero a esta fecha.

TT_n = fecha de terminación de la actividad (para la última vivienda.)

Tiempo de espera = tiempo entre la terminación

de una actividad y el inicio de la siguiente actividad.

La Ecuación 7 se usa para calcular la fecha de inicio de una actividad cuidando que se respete el tiempo de espera de las actividades precedentes, tanto en la primera vivienda, como en la última vivienda. Este será el valor en que se basará la gráfica de la línea de balance.

$$TT_1 = TI_1 + D \quad (8)$$

Donde: TT_1 = fecha de terminación de una actividad en la primera vivienda.

$$TI_n = TI_1 + T \quad (9)$$

TI_n = fecha de inicio de una actividad en la última vivienda.

$$TT_n = TI_n + D \quad (10)$$

Donde: TT_n = fecha de terminación de la actividad en la última vivienda.

Las Ecuaciones 8, 9 y 10 permiten calcular los puntos restantes de la gráfica de la línea de balance tomando como punto base la fecha e inicio de la actividad TI_1 .

Programa de construcción detallado de una vivienda. Tomando como base las fechas de inicio de un trabajo cualquiera para la primera y para la última vivienda, es posible calcular la fecha de inicio de cualquiera de las viviendas, considerando el número de viviendas que se construyen simultáneamente y la duración del trabajo en una vivienda.

$$TI_{xj} = TI_{x1} + (\text{EnteroSup}(j/g) - 1) * D_x \quad (11)$$

Donde: TI_{xj} = fecha de inicio de la actividad x en la vivienda j;

TI_{x1} = fecha de inicio de la actividad x en la primera vivienda;

j = número de una vivienda seleccionada.

g = número de viviendas que se construyen simultáneamente.

D_x = duración del trabajo trabajo x en una vivienda

$$TT_{xj} = TI_{xj} + D_x \quad (12)$$

Donde: TT_{xj} = fecha de terminación de la actividad x en la vivienda j

3. DESARROLLO DEL SISTEMA

Al finalizar el proceso de diseño se procedió a la selección del ambiente y el lenguaje para el desarrollo del sistema y posteriormente a la realización de los programas de computadora.

El ambiente de trabajo seleccionado fue el

Windows 3.11 de Microsoft Corp., puesto que permite el desarrollo de una interfaz gráfica, con buena presentación y que ofrece muchas facilidades de manejo al usuario. Los programas se escribieron para el lenguaje KPWin++ versión 1.50A de Knowledge Garden Inc., puesto que ofrecen características apropiadas para la construcción de sistemas expertos, entre ellas: permite la programación orientada a objetos, manipulación de listas, textos, hipertexto e hipergráficos, encadenamiento hacia atrás automático y encadenamiento hacia adelante por medio de programación. Los programas resultantes fueron compilados posteriormente con la versión 3.1 del lenguaje BORLAND C++. Para la administración de la base de datos se utilizó el protocolo asíncrono de comunicación entre aplicaciones de Windows conocido como intercambio dinámico de datos (DDE, Dynamic Data Exchange), utilizando como aplicación servidora el paquete FoxPro versión 2.6 para Windows. El sistema se desarrolló en una computadora Compaq Prolinea 4/33, con procesador intel 486 de 33 mhz de velocidad, 8 MB de memoria RAM y disco duro de 240 MB.

4. RESULTADOS

Para probar el sistema se consideró un proyecto consistente en la construcción de 120 viviendas de un solo modelo, que deben ser entregadas a razón de 20 por semana. El modelo tiene la planta que se muestra en la Figura 5 y las siguientes características: vivienda unifamiliar de 1 recámara, cimentación de mampostería de piedra, muros de bloques de concreto de 12x25x50 cms. reforzados con cadenas y castillos, losa de vigueta y bovedilla impermeabilizada con calereto, acabados en muros y plafones con mortero a 3 capas, instalaciones eléctrica e hidráulica, ventanería de aluminio tipo económico, puertas de multipanel y puerta de servicio de herrería, recubrimiento en baño con azulejos de 20x20 cms., pintura caestina en plafones y vinílica en muros.

El sistema requiere que, en primer lugar, se almacenen los conocimientos de los trabajos para la construcción de viviendas, algunos de los cuales se muestran en la Tabla 1.

Posteriormente se debe definir detalladamente el modelo de vivienda, esto se hace proporcionando las listas de los elementos constructivos (Tabla 2) y de los cuantificadores (Tabla 3).

Con la información anterior, los mecanismos de inferencia del sistema definen la lista de actividades y sus datos complementarios, que se muestra en la Tabla 4. Se parte de la información para cada trabajo de una vivienda, esto es, el nombre, la unidad de medida, la cantidad a ejecutar y el rendimiento de una cuadrilla (columnas 1 a 4), así como el tiempo de espera después de cada actividad (Espe). Basándose en esos datos, en el orden de ejecución dado por la red de actividades y en los requerimientos de producción, se procede a calcular el número máximo de cuadrillas (MC), el número teórico y real de viviendas a construir simultáneamente (G y g), la tasa de producción real semanal (r), la duración del trabajo en una vivienda

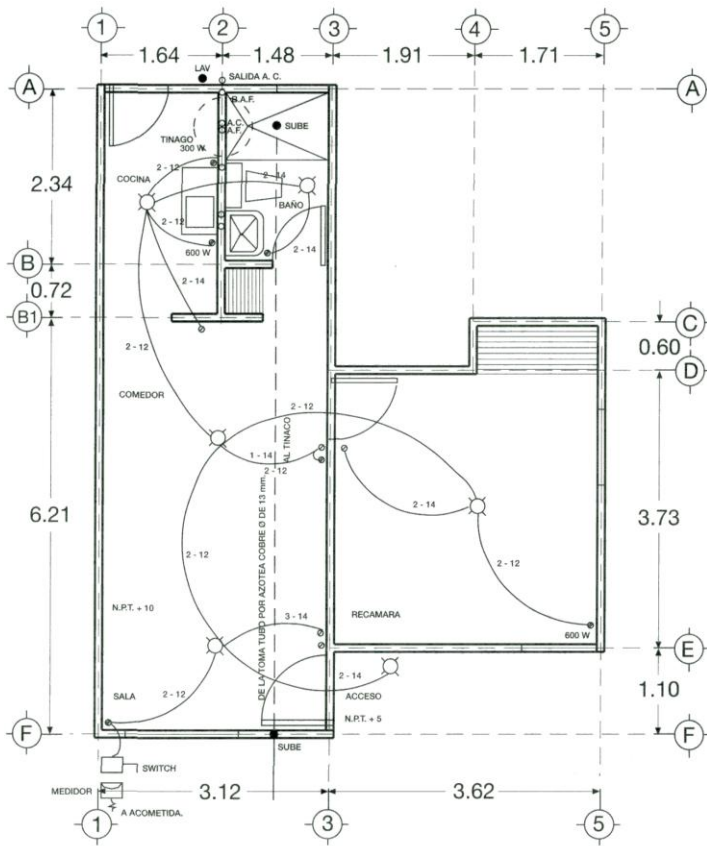


Figura 5. Planta arquitectónica de la vivienda.

(D), el tiempo entre el inicio del trabajo en la primera vivienda y el inicio en la última, la fecha de inicio del trabajo en la primera vivienda (T_{i1}) y el tiempo de terminación del trabajo en la última vivienda (T_{tn}).

Antes de obtener los resultados finales, la información generada puede ser ajustada por el usuario. Los resultados finales que proporciona el sistema son la red de actividades con la ruta crítica de una vivienda, mostrada parcialmente en la Figura 6, la línea de balance, mostrada en la Figura 7, y parte del programa detallado de una vivienda, en este caso de la vivienda N° 60, mostrado en la Figura 8.

5. DISCUSION

El sistema puede producir un número elevado de actividades dependiendo del grado de detalle seleccionado. Esto permite al sistema producir un programa muy preciso del modelo. Sin embargo, desde el punto de vista del usuario, se requerirá un agrupamiento posterior para disminuir el número de actividades en los resultados finales.

Al comparar los resultados del diagrama de la línea de balance con los resultados del programa detallado de una

vivienda, se observa una pequeña diferencia en las fechas de terminación de las actividades. Esto se debe a que las viviendas no se inician de una en una, sino en grupos de m unidades, por lo que la gráfica real de la línea de balance estaría formada por una serie de escalones cuya altura estaría en función del número de viviendas que iniciaran simultáneamente. Por lo tanto las únicas viviendas que no tendrían diferencias en sus fechas serían las que coincidan con el inicio o fin de un escalón.

Las diferencias considerables en las pendientes (tasas de producción real) de las actividades pueden ser fácilmente ajustadas por el usuario, incrementando o disminuyendo el número de cuadrillas en la actividad.

El sistema es un marco adecuado para almacenar el conocimiento relacionado con la construcción de viviendas de diversas características y métodos de construcción. Permite la programación de casas tanto típicas como aquellas que presentan características especiales.

El sistema permite complementar y mejorar gradualmente los conocimientos de su base, dado que los nuevos proyectos pueden ofrecer nuevos conocimientos, o cuando menos permiten verificar y darle mayor precisión a los conocimientos almacenados. Como resultado, el tiempo requerido para programar nuevos proyectos será cada vez menor.

Eventualmente se requerirá muy poca información de los usuarios para realizar la programación de un proyecto.

Los conocimientos que se usaron para probar el prototipo, tales como grupos de trabajo apropiados, rendimientos, componentes de una vivienda, requerimientos para iniciar un trabajo, etc., se obtuvieron a través de una interacción directa con el personal técnico de la principal empresa constructora de viviendas de la región. Este conocimiento, que es válido para esta empresa en sus circunstancias actuales, deberá ser validado y ajustado para otras empresas y otras circunstancias.

Los resultados que ofrece el prototipo, han sido validados haciendo pruebas de escritorio, esto es, de manera manual se ha seguido los algoritmos y realizado los cálculos aritméticos y otros procesos que se requieren. Sin embargo, se requiere agregar módulos complementarios para tener resultados que permitan su aplicación y verificación en proyectos reales, tales como programas con fechas reales de calendario, programas por vivienda y programas por grupo de trabajo.

Por último, entre algunos de los aspectos que se están considerando agregar para mejorar el sistema, se tiene: la capacidad para reagrupar las actividades en activi-

Tabla 1. Trabajos para la construcción de una vivienda.

Trabajo	Unid	Cuadrilla	Rend.	Vol. Mín.	Para iniciar requiere	Al terminar produce
Limpieza del terreno	M2	1 peón	80.00	40.00		Terreno limpio
Trazo y nivelación	M2	1 albañil + 2 peones	90.00	90.00	Terreno limpio	Trazo
Excavación en material "B"	M3	1 peón	2.50	5.00	Trazo	Cepas
Excavación en material "C"	M3	1 oficial de explosivos + 1 peon	1.00	4.00	Trazo	Excavación en roca
Mampostería de piedra de 30 cms	M3	1 albañil + 1 peón	2.00	4.00	Cepas	Cimiento
Anclaje de castillo armado	Pza	1 albañil + 1 peón	6.00	6.00	Cimiento	Anclaje de castillo
Anclaje de castillo ahogado	Pza	1 albañil + 1 peón	60.00	60.00	Cimiento	Anclaje de castillo
Relleno con material inerte	M3	1 peón	6.00	12.00	Mampostería	Relleno
Cadena de desplante 5 X 30 cms. Armada	MI	1 albañil + 1 peón	20.00	20.00	Mampostería; Anclaje Castillo	Cadena de desplante
Muro de block de 12x25X50 cms. Común	M2	1 albañil + 1 peón	12.00	24.00	Cadena impermeabilizada	Muro

dades de nivel superior para diagramas de línea de balance menos detallados; procesos de optimización de recursos, se puede maximizar la producción reasignando de una actividad a otra, ya sea en el mismo modelo o en otro modelo del proyecto; nivelación automática de las tasas de producción de las actividades con el fin de obtener una reducción en la

duración total del proyecto; eliminación automática de redundancias redefiniendo las relaciones de dependencia entre las actividades; ajuste en la fechas programadas de las actividades, tomando en cuenta el efecto del escalonamiento de la gráfica de la línea de balance y la capacidad para producir los programas en fechas de calendario.

Tabla 2. Elementos constructivos del modelo de vivienda.

Elemento constructivo	Trabajo	Cuantificador
Limpieza	Limpieza del terreno	Area del terreno
Trazo	Trazo y nivelación	Area de la construcción
Excavación para cimientos	Excavación en material "B"	Volumen de excavación B
Excavación para fosa y pozo	Excavación en material "C"	Volumen de excavación C
Mampostería	Mampostería de piedra de 30 cms.	Volumen de cimentación
Anclaje de castillo armado	Anclaje de castillo armado	Número de castillos armados
Anclaje de castillo ahogado	Anclaje de castillo ahogado	Número de castillos ahogados
Relleno	Relleno y compactación	Volumen de relleno
Cadena de desplante	Cadena de 5 X 30 cms. Armada	Longitud de cadena de desplante
Muro	Muro de block de 12 X 25 X 50 cms. Acabado común	Area de muros

Tabla 3. Fórmulas de los cuantificadores.

Cuantificador	Fórmula
Area del terreno	Largo del terreno * Ancho del terreno
Area de la construcción	Dato del usuario = 42.96 M ²
Volumen de excavación B	Longitud total de cimentación * Ancho de zanjas de cimentación * Profundidad estrato de desplante
Volumen de excavación C	Volumen de fosa séptica + Volumen de pozo
Longitud total de cimentación	Longitud de cimentación perimetral + Longitud de cimentación interior
Volumen de cimentación	Longitud total de cimentación * Altura de cimentación * Espesor de cimentación
Ancho de zanjas de cimentación	Espesor de cimentación + 0.40
Profundidad estrato de desplante	Dato del usuario = 0.50 M
Espesor de cimentación	Dato del usuario = 0.30 M
Altura de cimentación	Profundidad estrato de desplante + Profundidad del terreno

Tabla 4. Actividades generadas por el sistema.

Actividad	Uni	Cantid	Rend	MC	Espe	G	g	r	D	T	Ti1	Ttn
Acabado en muros	M2	214.09	12.00	9	1.00	7.21	8	22.20	1.98	29.49	65.80	97.27
Acabado en plafones	M2	39.17	10.00	2	1.00	7.12	8	22.4	1.96	29.13	62.84	93.93
Accesorios de empotrar	Jgo	1.00	1.00	1	1.00	3.64	4	22.00	1.00	29.75	78.34	109.09
Accesorios eléctricos	Sal	13.00	20.00	1	1.00	2.36	3	25.38	0.65	25.78	83.71	110.14
Acometida eléctrica	Pza	1.00	5.00	1	1.00	0.73	1	27.50	0.20	23.80	80.08	104.08
Anclaje de castillo ahogado	Pza	10.00	60.00	1	1.00	0.61	1	33.00	0.17	19.83	22.81	42.81
Anclaje de castillo armado	Pza	11.00	6.00	2	1.00	3.33	4	24.00	0.92	27.27	15.37	43.56
Andador de acceso	Pza	1.00	0.50	1	1.00	7.27	8	22.00	2.00	29.75	75.35	107.10
Armado de losa	M2	39.17	30.00	1	1.00	4.75	5	21.06	1.31	31.07	37.35	69.73
Azulejo en baño	M2	12.76	5.00	2	1.00	4.64	5	21.56	1.28	30.36	75.45	107.09
Bajantes pluviales	Pza	2.86	10.00	1	1.00	1.04	2	38.41	0.29	17.04	77.06	94.39
Base para tinaco	Pza	1.00	2.00	1	1.00	1.82	2	22.00	0.50	29.75	78.35	108.60
Boquillas en salidas de centro	Pza	7.00	20.00	1	1.00	1.27	2	31.43	0.35	20.83	74.10	95.28
Cableado de instalación eléctrica	Sal	13.00	8.00	2	1.00	2.95	3	20.31	0.81	32.23	75.45	108.49
Cadena de desplante	MI	41.20	20.00	3	1.00	2.50	3	24.03	0.69	27.24	23.98	51.91
Cadena de enrase	MI	41.20	16.00	2	1.00	4.68	5	21.36	1.29	30.64	35.06	66.99
Cadena perimetral de losa	MI	31.60	12.00	3	1.00	3.19	4	25.06	0.88	26.11	44.62	71.61
Cancelería para ventanas	M2	4.52	12.00	1	1.00	1.37	2	29.20	0.38	22.41	77.80	100.59
Castillos ahogados	MI	28.00	20.00	2	1.00	2.55	3	23.57	0.70	27.77	31.01	59.48
Castillos armados	MI	30.80	11.00	3	1.00	3.39	4	23.57	0.93	27.77	31.01	59.71

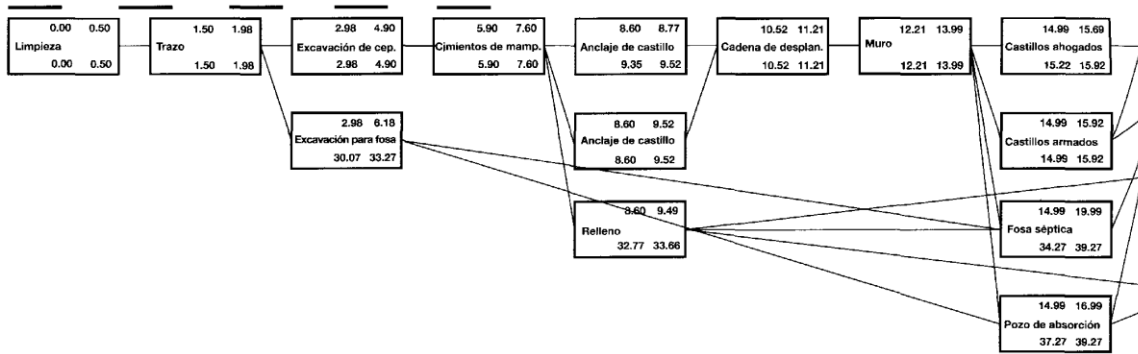


Figura 6. Red parcial de actividades de una vivienda.

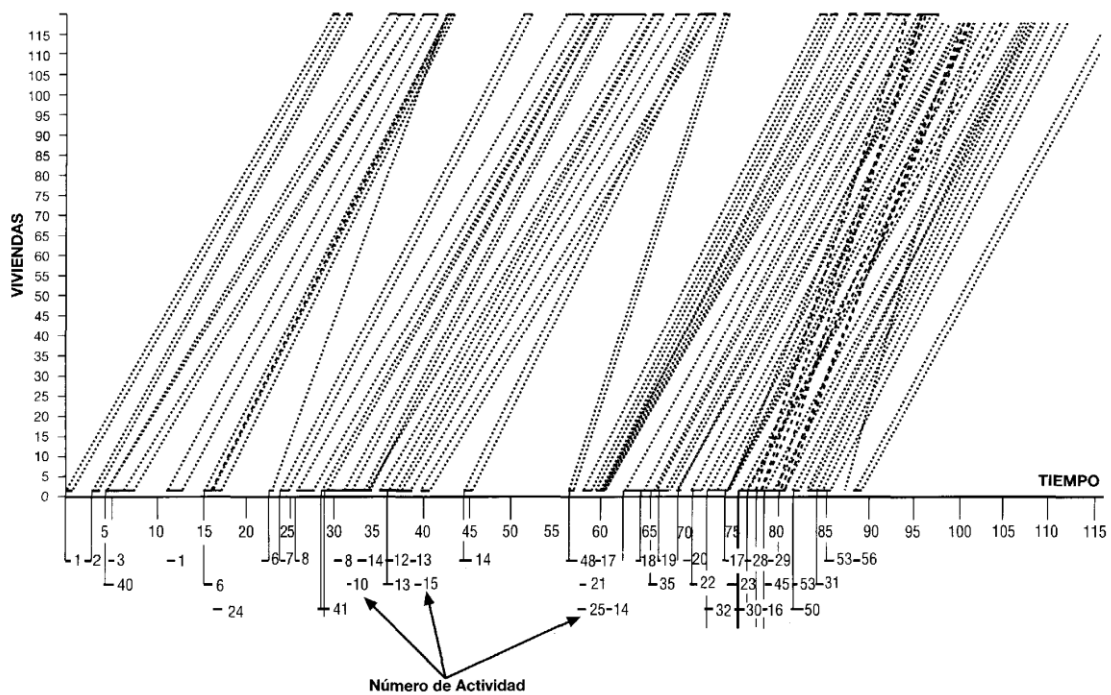


Figura 7. Gráfica de la línea de balance.

Programa de la vivienda N° 60
Limpieza inicia en 14.5 y termina en 15
Trazo inicia en 16.77 y termina en 17.25
Excavación de cepas inicia en 19.69 y termina en 21.61
Cimientos de mampostería inicia en 24.65 y termina en 26.35
Anclaje de castillo ahogado inicia en 32.84 y termina en 33.01
Anclaje de castillo armado inicia en 28.25 y termina en 29.17
Cadena de desplante inicia en 37.09 y termina en 37.78
Muro inicia en 39.91 y termina en 41.69
Castillo ahogados inicia en 44.31 y termina en 45.01
Castillos armados inicia en 44.03 y termina en 44.96
Cerramientos inicia en 46.48 y termina en 47.169
Cadena de enrase inicia en 49.25 y termina en 50.54
Armado de losa inicia en 51.76 y termina en 53.07

Figura 8. Programa detallado de una vivienda.

REFERENCIAS

- AL ZARRAJ, Z. M. (1994), "Formal Development of Line of Balance Technique", *Journal of Construction Engineering and Management*, ASCE, Vol. 116, No. 4, Estados Unidos.
- BOOCH, G. (1991), "Object Oriented Design with Applications", Benjamin/Cummings, California.
- CHERNEFF, J. (1990), "Knowledge Based Interpretation of Architectural Drawings", Ph.D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Estados Unidos.
- CHERNEFF, J., Logcher, R. y Sriram, D. (1991), "Integrating CAD with Construction Schedule Generation", *Journal of Computing in Civil Engineering*, ASCE, Vol. 5, No. 1, Estados Unidos.
- KARTAM, N.A., LEVITT, R. E. y WILKINS, D. E. (1991), "Extending Artificial Intelligence Techniques for Hierarchical Planning", *Journal of Computing in Civil Engineering*, ASCE, Vol. 5, No. 4, Estados Unidos.
- PATTERSON, D. W. (1990), "Introduction to Artificial Intelligence and Expert Systems", Prentice Hall, New Jersey.
- SHAKED, O. y WARSZAWSKI, A. (1992), "CON-SCHED: Expert System for Scheduling of Modular Construction Projects", *Journal of Construction Engineering and Management*, ASCE, Vol. 118, No. 3, Estados Unidos.
- WINSTANLEY, G., CHACON, M. A., y LEVITT, R. E. (1993), "Model-Based Planning: Scaled-Up Construction Application", *Journal of Computing in Civil Engineering*, ASCE, Vol. 7, No. 2, Estados Unidos.

Josué Gerardo Pech Pérez

*Profesor de Carrera de la Maestría en
Ingeniería-Construcción*

Facultad de Ingeniería Universidad Autónoma de Yucatán

e-mail: pperez@tunku.uady.mx

José H. Loría Arcila

*Coordinador Académico y Profesor de Carrera de la
Maestría en Ingeniería-Construcción*

Facultad de Ingeniería Universidad Autónoma de Yucatán

e-mail: larcila@tunku.uady.mx