

# SISTEMAS EXPERTOS: APLICACIONES EN CONSTRUCCION

Eloy Morúa Padilla, Ph.D.

## RESUMEN

Con este artículo se introduce al lector en el campo de los sistemas expertos y se describe su uso en la Ingeniería en Construcción, específicamente su utilización en el área de programación de proyectos.

Se describen dos de los sistemas expertos existentes hasta la segunda mitad del año de 1986; se discuten sus limitaciones y sus posibles mejoras para convertirlos en sistemas integrados para la programación y el control de proyectos.

## INTRODUCCION A LOS SISTEMAS EXPERTOS

La mayoría de los centros universitarios estadounidenses que investigan en Ingeniería en Construcción, están dedicando gran parte de sus recursos al diseño de **sistemas expertos**, especialmente en el campo de la programación de proyectos (1,3,5,6). Un **sistema experto** es un programa o un conjunto de programas de computadora, que trata de imitar los procedimientos, procesos o lógica que sigue un experto para resolver problemas propios de su campo.

La programación de obras es una tarea poco sistematizada, que requiere de gran cantidad de análisis y criterio técnico, y que se presta para el desarrollo y empleo de este tipo de sistemas. En términos muy generales, el *modus operandi* de los sistemas

expertos consiste en la simulación de modelos que abstraen sistemas reales. Mediante la simulación el analista puede predecir el comportamiento de estos últimos, tratar de detectar áreas conflictivas, mejorar procesos, predecir duración y costo, etc.

Los componentes básicos de un sistema experto son (Figura N° 1) (1,5):

1. **Base de conocimientos:** este subsistema contiene información acerca de campos específicos de la ingeniería. Esta se representa generalmente por medio de condiciones del tipo "Si... ENTONCES...EN CASO CONTRARIO..." Por ejemplo, "Si la actividad excavación se encuentra retrasada, **entonces** es necesario dedicarle más recursos. **En caso contrario** proseguirá según el programa". Con esta operación lógica, los sistemas expertos tratan de imitar el proceso que seguiría un profesional cuando resuelve problemas dentro de su campo de conocimientos.
2. **Memoria inmediata:** esta es una base de datos actualizada dinámicamente con el fin de incorporar los cambios producidos en las actividades del proyecto. Por ejemplo, si la actividad 'Excavación para Cimientos' ya terminó, el sistema cambia el atributo de esta actividad de 'en progreso' a 'finalizada'.
3. **Motor de inferencia:** este es el módulo que se encarga de consultar la

---

\*Profesor Departamento de Ingeniería en Construcción, ITCR.

base de conocimientos, y de utilizar el estado del sistema para resolver problemas propios del campo de aplicación en consideración.

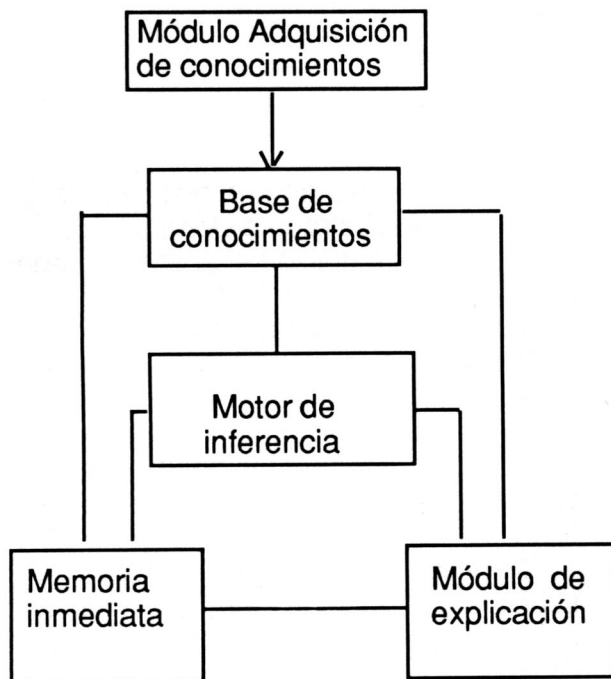


FIGURA Nº 1. Componentes de un sistema experto

**4. Módulo de explicación:** este módulo es el que está a cargo de explicar las acciones tomadas por el sistema cuando este resuelve un problema. Por lo general, este módulo sólo se usa cuando el usuario solicita alguna explicación. Por ejemplo, el usuario podría preguntar: "¿Por qué fue interrumpida la actividad "Muros" en el día 48?"

El sistema podría responder: - "La actividad "Muros" fue interrumpida el día 48, por que los albañiles que trabajaban en ella se necesitaban en la actividad 'Columnas', la cual era de mayor prioridad".

**5. Módulo de adquisición de conocimientos:** este módulo permite agregar información, es decir, conocimiento, al sistema experto con el fin de actualizarlo (en otras palabras, retroalimentarlo). Desde un punto de vista práctico, es imposible diseñar un sistema con una base de conocimientos que incluya absolutamente todo el conocimiento de un determinado campo. Por lo tanto, el diseño del sistema experto debe ser lo suficientemente flexible para ampliar cualitativa y cuantitativamente las reglas de conocimiento en una forma sencilla y fácil.

REQUISITOS DE UN MODELO DE PROGRAMACION

Antes de describir en forma resumida las características de algunos de los prototipos y modelos diseñados en el campo de la Ingeniería en Construcción, vale la pena revisar los requisitos que debe de llenar un modelo para programación de obras. En términos generales, estos requisitos son los siguientes (6):

1. El modelo debe dar al usuario la capacidad de **utilizar el costo del proyecto**, (una de las variables importantes, si no la más importante) para planificar y programar obras. En consecuencia, es imprescindible incluir este dato en los análisis que se realizan a lo largo de la duración del proyecto.
2. Puesto que la duración y el costo de las actividades de un proyecto son resultados conocidos *a posteriori*, es decir, cuando el mismo concluye, los ingenieros de proyecto constantemente han de estar resolviendo situaciones bajo condiciones de incertidumbre. Por lo tanto, el **costo y la duración** de las

actividades deben ser modelados como **variables aleatorias**, que bien pueden computarse similar a un patrón conocido.

3. El modelo debe **considerar las correlaciones** que existen entre las diferentes duraciones de la red, y entre la duración y el costo de las actividades. Cuando dos o más actividades utilizan los mismos recursos y están sometidas a los efectos de un mismo clima, las actividades no pueden considerarse como independientes.

4. El modelo debe permitir al ingeniero **evaluar diferentes opciones** o estrategias para:

- (i) Escoger las actividades que pueden empezar en una fecha determinada,
- (ii) Asignar recursos a estas actividades para consumir continuamente los recursos escasos y
- (iii) Estimar el efecto que las estrategias seleccionadas tienen en la duración y(o) en el costo del proyecto.

5. El modelo debe **generar información** relacionada con el estado del proyecto, para tomar decisiones basadas en los resultados obtenidos hasta una cierta fecha.

6. La construcción es por definición un **proceso dinámico**. Los ingenieros de proyecto diariamente toman decisiones con el fin de mantener los costos de sus proyectos dentro de los límites fijados en el presupuesto, cumplir con el programa de trabajo, alcanzar un flujo continuo de trabajo, utilizar los recursos disponibles de la manera más eficiente posible. El modelo debe entonces imitar este dinamismo.

## ESTADO DEL ARTE DE LA INVESTIGACION

Algunas universidades de los Estados Unidos se encuentran a la vanguardia en el desarrollo de sistemas expertos en el campo de la construcción. Sin que la discusión siguiente pretenda ser exhaustiva, la misma presenta un resumen de algunos de los esfuerzos realizados hasta la primera mitad de 1986.

### UNIVERSIDAD DE STANFORD

El profesor Levitt de la Universidad de Stanford ha desarrollado un sistema basado en el método PERT (3). Este modelo contiene una base de datos que incluye:

- (i) Reglas del tipo "SI...ENTONCES...EN CASO CONTRARIO...",
- (ii) Información sobre las actividades del proyecto (descripción, estado, duración planeada, etc.) y
- (iii) Una serie de "factores de riesgo", los cuales representan variables que podrían afectar la duración de las actividades (productividad de los recursos, condiciones del suelo, etc.).

La duración de cada actividad, estimada utilizando los tres tiempos convencionales del PERT, se utiliza como patrón de control. Durante la simulación del proyecto, el programa de Levitt genera muestras aleatorias de las duraciones. En fechas de corte predeterminadas, el modelo "actualiza" el estado del proyecto con el fin de revisar las duraciones de las actividades que quedan por realizar o se encuentran en progreso. Por ejemplo, (Figura Nº 2) si en una fecha de corte dada, algunas de

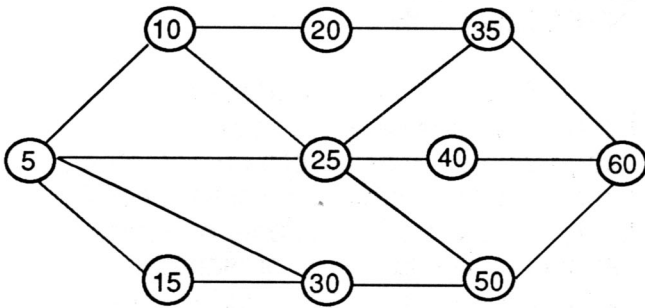


FIGURA Nº 2. Diagrama PERT mostrando actividades en que trabajan carpinteros

las actividades que finalizaron durante el período tuvieron duraciones mayores que la duración promedio (es decir, si las muestras aleatorias son mayores que la duración promedio), el programa analiza los factores de riesgo que son comunes a estas actividades, y escoge como causa probable del incremento en duración, el factor que es común a todas ellas. Por ejemplo, el programa podría encontrar que todas estas actividades utilizaron carpinteros. Actividades 5-10 y 5-25, por ejemplo. El programa entonces escribiría en la pantalla de la terminal:

- "La causa probable del incremento de la duración de las actividades 'Formaleta para Cimientos' y 'Andamios', es una posible reducción en la productividad de los carpinteros".

Si el usuario acepta este razonamiento como correcto, las duraciones del resto de actividades que usan carpinteros se corregirían hacia la derecha, es decir, hacia el tiempo pesimista, y la red se recalcularía con estos tiempos. Actividades 25-40 y 40-60, por ejemplo.

El modelo de Levitt presenta los mismos problemas que el PERT original. Aparte de estos problemas, los cuales han

sido ampliamente analizados (ver referencia 4), al suponer que se tiene información perfecta de una situación cuando se conoce el resultado de una sola muestra de una variable, este modelo no solo no representa la incertidumbre inherente en gran parte de los proyectos de construcción, sino que tampoco simula la forma en la que los ingenieros de proyecto toman decisiones. Es difícil aceptar el argumento de que un ingeniero modificará todas las duraciones estimadas en un proyecto, y las sustituirá con la optimista o la pesimista, basado solamente en **una** muestra de una variable.

## UNIVERSIDAD DE MICHIGAN

En la Universidad de Michigan la investigación ha sido mucho más profunda y se encuentra más avanzada. Bajo la supervisión del Dr. Robert I. Carr, el autor de este artículo desarrolló la primera parte del diseño para un sistema experto integral, llamado DYNASTRAT, Estrategias de Recursos para la Administración Dinámica de Proyectos de Construcción (Resource Strategies for Dynamic Construction Project Management). DYNASTRAT es el primer modelo de programación de obras que bajo la misma estructura cumple con los requisitos antes indicados. Este modelo es el primero que:

1. Confiere condición de variable decisoria al costo del proyecto
2. Modela el costo y la duración de las actividades como variables aleatorias
3. Modela las correlaciones que existen entre las duraciones de las actividades, y entre las duraciones y los costos
4. Evalúa el efecto del medio (precipitación y temperatura) tanto en la duración como en el costo de un proyecto



5. Automáticamente incorpora en la toma de decisiones, información generada por el avance del proyecto
6. Modela asignación de recursos bajo condiciones de incertidumbre
7. Permite variabilidad en los niveles de los recursos asignados a las actividades en progreso
8. Permite a los ingenieros de proyecto evaluar el impacto que diferentes estrategias pueden tener en la duración y el costo de proyectos bajo condiciones de incertidumbre

#### DESCRIPCION DEL MODELO

El modelo de Michigan está formado por varios módulos. Cada uno de estos cumple con una función diferente y especial. Estos módulos (Figura N°3) son :

1. **Lógica de la red:** este módulo selecciona las actividades que pueden empezar en una fecha determinada y calcula los valores comunes de CPM: holguras, tiempos tempranos y lejanos, duración del proyecto, índices de criticalidad, ruta crítica.
2. **Generador de muestras aleatorias independientes:** este módulo genera muestras aleatorias de las variables que afectan la duración y el costo de los proyectos (condiciones del suelo, productividad de la mano de obra y la maquinaria) incluyendo el clima. También contiene información para combinar estas muestras en factores de corrección por clima, duración y costo, con el fin de determinar la duración y el costo de las actividades del proyecto
3. **Estrategias dinámicas:** este módulo es el encargado de:

- (i) Estimar la prioridad de las diferentes actividades del proyecto,
- (ii) Registrar el número y espaciamiento de las fechas de corte y
- (iii) Establecer las condiciones bajo las cuales una o más actividades en progreso pueden ser interrumpidas con el fin de utilizar sus recursos en actividades de mayor prioridad.

#### 4. **Asignación de recursos:** este módulo:

- (i) Escoge el tamaño de las cuadrillas para empezar a asignar recursos.
- (ii) Asigna recursos a las actividades seleccionadas.
- (iii) Interrumpe actividades en progreso.
- (iv) Mantiene un registro de la disponibilidad de recursos (clase y número) a lo largo de la duración del proyecto y
- (v) Predice y actualiza las fechas en las que las diferentes piezas de equipo mayor (grúas, cargadores, etc.) son requeridas en el proyecto.

5. **Simulación del progreso:** este módulo simula el progreso que puede alcanzarse diariamente en cada actividad, de acuerdo con la productividad y número de recursos asignados a cada una de ellas y con las condiciones del clima generadas con el módulo generador de muestras.

6. **Pronóstico de finalización:** al inicio del proyecto, lo mismo que en cada fecha de corte, este módulo recolecta información pertinente a la toma de decisiones. Esta información comprende el estado del proyecto a la fecha de corte y los resultados generados a partir de las actividades que ya finalizaron o que se encuentran en progreso.

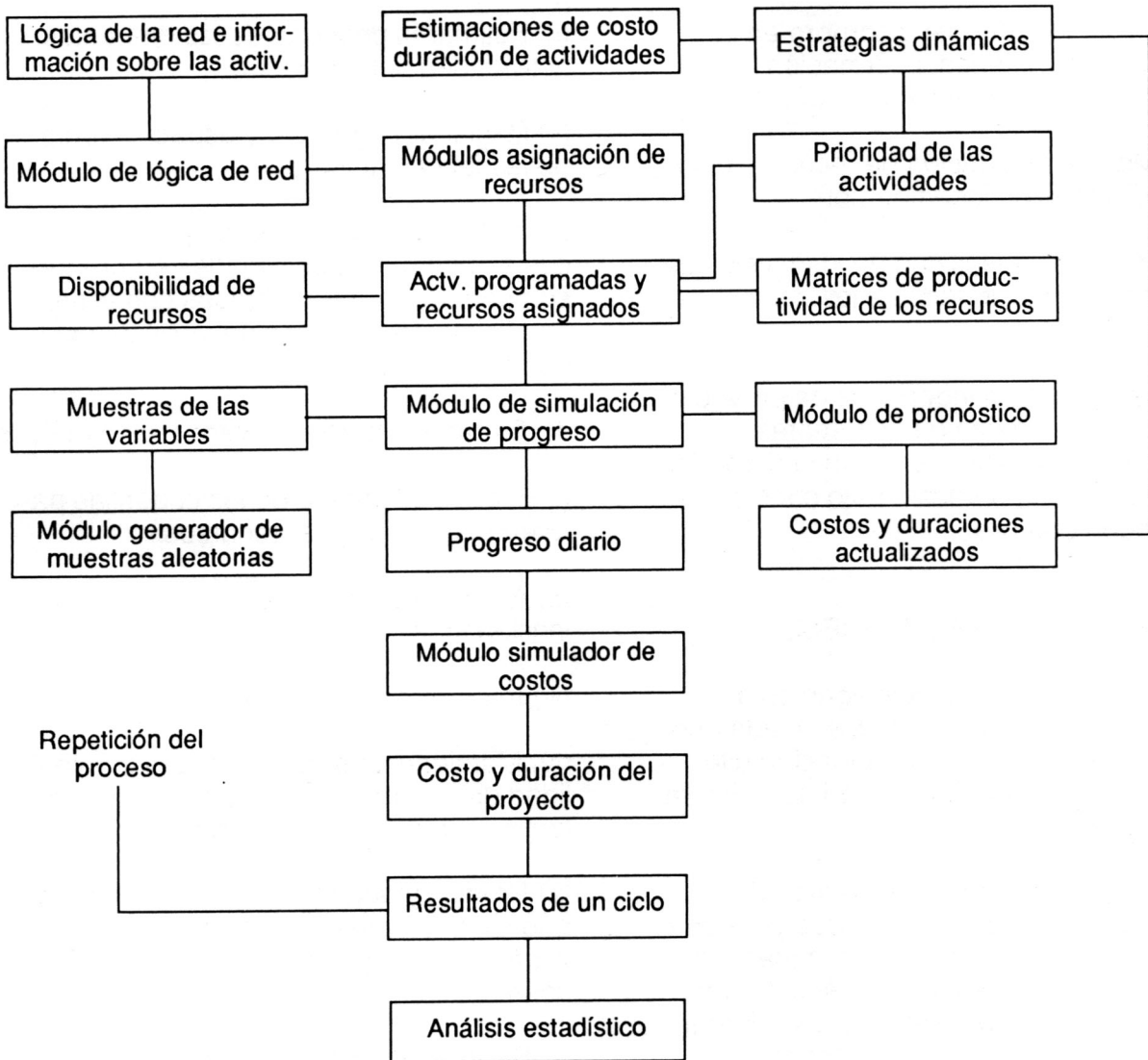


FIGURA Nº 3. Diagrama general del modelo de la Universidad de Michigan

Con esta información este módulo pronostica:

- (i) La duración y el costo de las actividades que no han empezado o que se encuentran en progreso.
- (ii) Las Holguras libre y total y
- (iii) La prioridad de esas actividades.

7. **Simulador de costos:** este módulo calcula el costo directo total de cada

actividad, de acuerdo con los niveles de recursos que le fueron asignados, con el costo de los mismos y con el costo de los materiales. También calcula el costo de administrar el proyecto, y el costo total del mismo

### SIMULACION DE UN PROYECTO

En cada fecha de corte, o cuando una actividad finaliza, el modelo revisa la lógica de la red, con el fin de seleccionar las actividades que pueden empezar,

identifica los recursos que cada una de estas requiere, y revisa si hay recursos disponibles para ellas. Si existen recursos disponibles, el modelo asigna recursos al mayor número posible de actividades, de acuerdo con las estrategias seleccionadas por el usuario en cuanto a niveles de recursos y prioridad de las diferentes actividades.

Si no existen recursos suficientes para programar actividades prioritarias, el modelo determina si pueden tomarse recursos de una o más actividades en progreso, o si estas pueden ser interrumpidas con el fin de programar las primeras.

Usando el clima generado y los factores de corrección por clima, el modelo simula el progreso que puede obtenerse día a día en cada una de esas actividades, calcula el progreso acumulado, el costo diario y el costo total acumulado.

En fechas definidas por el usuario como fechas de corte, el modelo obtiene el estado del proyecto y predice la duración y el costo de las actividades en progreso/sin iniciar, usando para ello la información generada por la simulación de las actividades finalizadas/en progreso. En estas fechas el modelo recalcula la red y la prioridad de todas las actividades que no han finalizado. Cuando todas las actividades finalizan, el modelo registra la duración y el costo de cada actividad, y calcula los parámetros convencionales de CPM con el fin de determinar fechas de inicio y finalización de las actividades, holguras, ruta crítica y duración y costo del proyecto.

## RESULTADOS DEL MODELO

El procedimiento descrito arriba es repetido por un número determinado

de veces (escogido por el usuario), por ejemplo, 100 veces. Un análisis estadístico de los resultados produce, para cada actividad, promedios y desviaciones estándar de la duración, fechas de inicio y finalización, holgura libre y total, número de días de trabajo, número de días en que no se pudo trabajar (por mal tiempo), número de días en que la actividad fue interrumpida (debido a limitaciones en el número de recursos), costo de la mano de obra, costo de los materiales, costo directo total, y producción total (expresada, por ejemplo, en metros cúbicos excavados, o metros lineales de formaleta).

Para el proyecto, un análisis similar produce promedios y desviaciones estándar de la duración del proyecto, días de trabajo, costo total de la mano de obra, costo total de los materiales, costo de la maquinaria y el equipo, costo de recursos ociosos, administración del proyecto y costo total.

El programa también da como parte de los resultados:

- Una lista de las actividades que fueron programadas en las diferentes fechas, indicando la prioridad de cada una de ellas.
- La secuencia en la cual finalizaron las distintas actividades.
- Una lista de las fechas de entrega recomendadas para cada unidad de maquinaria y(o) equipo.
- Las fechas en las cuales el equipo y(o) maquinaria se mantuvo ocioso.

Al analizar estos resultados, el ingeniero puede alterar las estrategias usadas para estimar las prioridades de las actividades y los recursos, con el fin de correr un nuevo conjunto de simulaciones, y poder evaluar el impacto que

estos cambios tienen en el proyecto.

Este procedimiento brinda al ingeniero un medio para seleccionar las estrategias que podrían ofrecer el mejor balance entre duración, costo y empleo de recursos.

## DESARROLLO FUTURO DEL MODELO

En su presente estado de desarrollo, DYNASTRAT puede ser considerado como un sistema experto específico, el cual, con algunas modificaciones, puede ser convertido en un sistema experto genérico para la programación de proyectos. Los módulos de Lógica de la red, Generador de muestras, Estrategias dinámicas, Asignación de recursos, Simulación de progreso, Pronóstico de finalización y Simulación de costos, pueden ser considerados como una base de conocimientos. Esta base puede ser ampliada para incluir en ella información relacionada con costos de mano de obra y maquinaria, precios de materiales, disponibilidad de recursos para diferentes zonas del país, gastos promedio de administración para diferentes tipos de proyectos, sensibilidad de las diferentes actividades a los efectos del clima, etc., toda ella información que actualmente se alimenta al modelo.

Un ingeniero que quisiera utilizar el modelo para analizar un proyecto, solamente tendría que proveer la lógica de la red y una clasificación genérica de cada actividad. Por ejemplo: "Chorrea de Contrapisos" podría ser identificada como una actividad C.2.1., en donde la C la identifica como una actividad de chorrea, el 2 identifica a la actividad como chorrea de losa y el 1 la define como losa sobre el suelo. Con base en esta clasificación, el modelo podría entonces seleccionar de entre las disponibles en la base de datos, la cuadrilla más adecuada para esta actividad, tomando en cuenta la disponibilidad de

recursos y la duración estimada de la actividad.

Futuras modificaciones incluirían un canal de comunicación con un modelo de presupuestación el cual proveerá la información relacionada con los costos de cada actividad y la producción total requerida en cada una de ellas.

Un módulo de explicación podría añadirse al modelo existente con el fin de documentar las decisiones que el modelo toma durante la simulación de un proyecto. En su estado actual, el modelo genera información que aparece en la pantalla de la terminal, pero la que no se da como resultado de la simulación. Algunos ejemplos de esta información son los siguientes:

"En el día=48, las actividades=24 y 32 fueron interrumpidas para programar la actividad=28".

"La obtención del recurso=grúa debe iniciarse alrededor del día=18 para que no se retrase el inicio de las actividades que lo necesitan".

"En el día=80 las actividades=64 no pudieron ser iniciadas porque no había suficientes recursos disponibles".

## CONCLUSIONES

La investigación en el empleo de sistemas expertos aplicados a la Ingeniería en Construcción apenas ha empezado. Las posibilidades del uso de esos sistemas en el campo de la programación de proyectos se muestran sumamente promisorias. Al ser la programación una tarea poco sistematizada y que requiere de extenso análisis y de mucho criterio, el diseño de este tipo de modelos podría convertirse en una herramienta sumamente útil para el análisis de proyectos de construcción de cierta complejidad.



## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Fernes, S. J., *What is an expert system?*  
**Expert Systems in Civil Engineering, Proceedings ASCE Convention.**  
 Seattle, Washington, Abril 8-9, 1985,  
 págs. 1-6.
- Kosten, C. N., *Attributes and characteristics of expert systems, Expert Systems in Civil Engineering, Proceedings ASCE Convention, Seattle, Washington, Abril 8-9, 1985, págs. 30-39.*
- Levitt, R. E., y Kunz, J. C., *Using knowledge of construction and project management for automated schedule updating, Project Management Journal, Diciembre de 1985, págs. 57-76.*
- MacCrimmon, K. R., y Ryavec, C. A., *An analytical approach of the PERT assumptions, Operations Research.*  
 Enero-Febrero de 1964, págs. 16-37.
- McGartland, M. R., y Hendrickson, C. T., *Expert Systems for Construction Project Monitoring, Journal of the Construction Engineering and Management Division, ASCE, Setiembre de 1985, págs. 293-307.*
- Moúa P., E., *Resource Strategies for Dynamic Construction Project Management.* Tesis Doctoral, The University of Michigan, Julio de 1986.

con los mejores títulos  
 en ciencia y tecnología

EDITORIAL  
 TECNOLÓGICA  
 DE COSTA RICA

IMPULSANDO EL PROGRESO  
 TECNOLÓGICO