

APLICACION DE LA TECNOLOGIA DE SISTEMAS EXPERTOS
AL DIAGNOSTICO DE DAÑOS EN ESTRUCTURAS AFECTADAS
POR INCENDIOS

Michele Tatoli, Tomás R. Maneiro

Ingeniero Civil, Universidad Central de Venezuela

y

Miguel Cerrolaza

Profesor, Instituto de Materiales y Modelos Estructurales,

Universidad Central de Venezuela, Apto. Postal 50361,

Caracas 1050-A, Venezuela.

RESUMEN

El presente trabajo propone un prototipo de Sistema Experto para la evaluación de Situaciones Críticas en Ingeniería (EECS-1), específicamente se desarrolló una Base de Conocimientos en el área de el Diagnóstico de Daños en Edificaciones de Concreto Armado afectadas por Incendios. El conocimiento fué representado en términos probabilísticos de hipótesis y evidencias, y el motor de inferencia se basa en el teorema de Bayes.

Se desarrollaron tres módulos complementarios del sistema, cuyos objetivos son : justificar las preguntas del EECS-1, ayudar al usuario a la comprensión de las mismas y sugerir correctivos asociados a la situación diagnosticada.

El EECS-1 fué validado con la ayuda del experto humano, mostrando un comportamiento satisfactorio con el juicio de éste, aún en situaciones límites.

DESCRIPCION DEL EXPERTO BAYESIANO.

El Experto Bayesiano es un programa computacional escrito en lenguaje Pascal (Turbo Pascal 4.0) que funciona en entorno de MS-DOS, utilizando el teorema de Bayes como mecanismo de inferencia en procesos de predicción y diagnóstico de situaciones que se presentan en el mundo real. El motor de inferencia trabaja con dos tipos de información, una "a priori" proporcionada por la fuente del conocimiento (expertos humanos, libros, estadísticas, revistas, etc) y otra "a posteriori" aportada por el usuario al sistema durante el diálogo. Adicionalmente el sistema está provisto de tres módulos complementarios : un módulo de Justificación de preguntas que le permite mostrar su línea de razonamiento al usuario cuando éste lo solicite, otro denominado módulo de ayuda, diseñado para explicar o aclarar al usuario las preguntas que hace, y finalmente un módulo de correctivos que orienta al usuario sobre las acciones preliminares asociadas a la situación diagnosticada.

REPRESENTACION DEL CONOCIMIENTO.

El Experto Bayesiano requiere que el conocimiento sea estructurado de una forma particular, por el hecho de basar su mecanismo de inferencia en el teorema de Bayes que maneja información de tipo probabilístico.

En principio, se establecen las hipótesis ó conclusiones que manejará el sistema y sus probabilidades "a priori", que representan las probabilidades de ocurrencia en ausencia de cualquier información adicional. Luego, el experto aporta la probabilidad de que se verifique un hecho ó evidencia supuesto que una hipótesis esté presente $P(E:H)$ ó no esté presente $P(E:\bar{H})$. Estas se denominan probabilidades condicionales y generalmente no son manejadas con facilidad por el experto, ya que su conocimiento suele ser más cualitativo que cuantitativo, sin embargo, con un poco de esfuerzo el experto podrá cuantificar la probabilidad condicional $P(E:H)$. Esto significaría para un médico, por ejemplo, suministrar la probabilidad de que un paciente tenga fiebre(E), si sabe que tiene gripe(H). Lo que realmente le representaría mayor

dificultad sería dar la probabilidad de que el paciente tenga fiebre(E) si éste no tiene gripe(noH), pero afortunadamente existe una expresión matemática que relaciona ambos términos con lo cual se calcula la probabilidad condicional $P(E:\bar{H})$ a partir de la $P(E:H)$ proporcionada por el experto.

En definitiva, la BC queda estructurada en dos partes: la primera contempla una lista de las evidencias que se podrían observar y que llamamos base de evidencias (BE), figura 1, y la segunda se compone de las hipótesis, sus correspondientes probabilidades iniciales y las probabilidades condicionales ($P(E:H)$ y $P(E:\bar{H})$) de las evidencias asociadas a cada hipótesis, como se muestra en la figura 2.

Es importante aclarar, que no es necesario que todas las evidencias que constituyen la BE, tengan inherencia en cada hipótesis.

BASE DE EVIDENCIAS (FUEGO).

01 ¿ EXISTEN MANCHAS DE HUMO EN EL CONCRETO ?

02 ¿ HUBO PERDIDA DEL FRISO EN EL ELEMENTO ?

03 ¿ SE PRESENTO DESCASCARAMIENTO DEL CONCRETO ?

04 ¿ SE PRESENTO AGRIETAMIENTO DEL CONCRETO ?

05 ¿ SE PRESENTO DEFORMACION EN EL CONCRETO ?

Fig. 1

Fig. 1

BASE DE CONOCIMIENTOS (LOSAS)

01 LOSA LEVEMENTE AFECTADA, 0.16 ,

1, 0.58 , 0.244 ,

2, 0.25 , 0.694 ,

3, 0.16 , 0.512 ,

4, 0.00 , 0.000 ,

5, 0.00 , 0.000 ,

6, 0.00 , 0.000 ,

7, 0.00 , 0.000 ,

8, 0.00 , 0.000 ,

9, 0.00 , 0.000 ,

10, 0.00 , 0.000 ,

11, 0.00 , 0.000 ,

12, 0.00 , 0.000 ,

13, 0.00 , 0.000 ,

14, 0.00 , 0.000 ,

15, 0.00 , 0.000 ,

16, 0.00 , 0.000 ,

17, 0.00 , 0.000 ,

MODULO DE JUSTIFICACION.

La justificación de EECs-1 está basada en la evaluación constante del efecto que una respuesta del usuario causa sobre las probabilidades de las hipótesis ó conclusiones manejadas. A este efecto se le denominó Factor de Importancia (FI). El proceso de diseño de la estructura para el cálculo del FI requiere gran esfuerzo debido a que el mecanismo de inferencia bayesiano, por sus características propias, no se presta para acometer con facilidad esta labor.

Básicamente, el FI es la multiplicación de dos números, donde el primero representa el salto en la probabilidad de las hipótesis, ocasionado por la respuesta del usuario a una evidencia mostrada por el sistema, y el segundo es otro factor al que se denominó Factorfuzzy, ya que proviene de la aplicación de la lógica difusa al sistema.

La aparición de este nuevo factor se debe a otra característica propia del método bayesiano, la cual establece que si una hipótesis tiene una probabilidad de ocurrencia baja, se verá fuertemente influenciada por una

evidencia "a favor" (una evidencia "a favor" es aquella que aumenta la probabilidad de la hipótesis), y por el contrario si la hipótesis presenta una alta probabilidad antes de evaluar el efecto de una respuesta, el desplazamiento que una evidencia "a favor" puede producir es mucho menor. Este fenómeno se agudiza, en la medida que las probabilidades son muy bajas ó muy altas.

Se incorporó al sistema la ecuación de una curva definida a trozos, figuras 3, 4 y 5, obtenida empíricamente, que establece los pares ordenados de un conjunto borroso, cuya primera componente es la probabilidad antes de evaluar la respuesta (Fact), y la segunda es el Factorfuzzy. En la curva se puede observar que el Factorfuzzy crece con Fact, con el fin de compensar la situación arriba señalada.

Adicionalmente, se crearon un par de conjuntos de variable lingüística para facilitar la comunicación.

El primero de ellos, figura 6, establece una variable lingüística a la respuesta numérica del usuario, por ejemplo una respuesta de 3, significa una afirmación con reservas, (La reserva en la afirmación puede provenir de dos hechos, uno, que no se tenga certeza sobre la misma.

FactorFuzzy
 $\text{Factor} = e^{-(2 \cdot \text{Pact})} + 3 \cdot \text{Pact}$

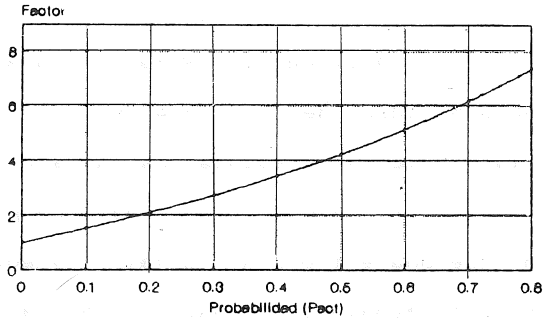


Fig. 3

FactorFuzzy
 $\text{Factor} = 16 \cdot (\text{Pact})^3$

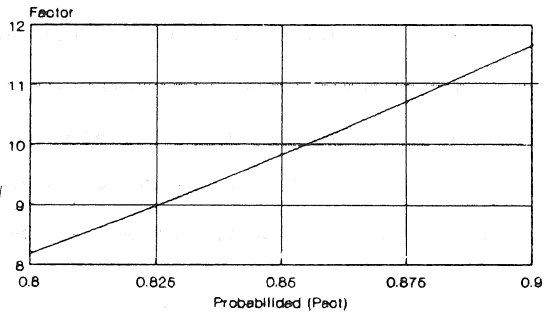


Fig. 4

FactorFuzzy
 $\text{Factor} = (0.27 \cdot \text{Pact}) / (1.01 - \text{Pact})^{1.75}$

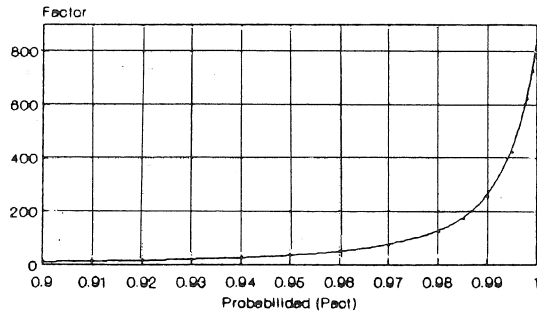


Fig. 5

y dos, que la presencia de la evidencia no es total), de la evidencia que el sistema pregunta.

Respuesta Numérica	Variable Lingüística
5	Afirmación sin dudas
4	Afirmación con fuerza
3	Afirmación con reservas
2	Afirmación débil
1	Afirmación muy vaga
0	Incertidumbre total
-1	Negación muy insegura
-2	Negación débil
-3	Negación moderada
-4	Negación fuerte
-5	Negación rotunda

Fig. 6

El segundo conjunto, figura 7 , se adaptó al FI, estableciendo una relación directa entre éste y una variable lingüística, por ejemplo, a un FI comprendido entre 0.6 y 1, se le asignó la frase " Refuerza en gran medida la importancia de la hipótesis ".

Rango del FI	Variable lingüística
> 1.0	Corroborar en forma tajante
0.6 a 1.0	Refuerza en gran medida
0.4 a 0.6	Aumenta considerablemente
0.2 a 0.4	Acrecienta moderadamente
0.0 a 0.2	Aumenta levemente
0	No influye nada
-0.2 a 0.0	Disminuye levemente
-0.4 a -0.2	Debilita moderadamente
-0.6 a -0.4	Disminuye considerablemente
-1.0 a -0.6	Aminora en gran medida
< -1.0	Reduce en forma tajante

Fig. 7

Es necesario explicar ciertas características que se establecieron para el FI, una de ellas es que puede ser positivo o negativo, dependiendo del sentido en que varía la probabilidad de la hipótesis. Si se incrementa ésta el FI es positivo y si disminuye es negativo. Otra característica es que generalmente oscila entre -1 y 1, lo que no quiere decir que esté acotado entre estos dos valores, por ello existen, en la segunda escala lingüística, dos intervalos que se extienden hasta $\pm\infty$

partiendo de ± 1 respectivamente. Los rangos que se establecieron en la escala lingüística, son el resultado de un proceso de ensayo y error con el sistema, hasta lograr adaptar las variables lingüísticas al FI. La estructuración de estos rangos es simétrica, además los intervalos asociados a valores bajos son de menor dimensión comparados a intervalos de valores altos; esto se explica por el hecho de que el FI calculado en un proceso coherente de entrada de información, es decir sin respuestas contradictorias por parte del usuario, tiende a ser bajo y por tanto era preciso afinar la selección de la variable lingüística.

El módulo de justificación presenta un reporte actualizado (las tres últimas evidencias preguntadas por el sistema, las respuestas del usuario a las mismas y el efecto de estas en la hipótesis más probable al momento de solicitar la justificación) que permite explicar al usuario el porqué de su conclusión parcial, lo que hace posible que el usuario se dé cuenta de cuales evidencias son las que orientan al sistema en determinada dirección y la magnitud de esta orientación.

MODULO DE AYUDAS.

Como consecuencia de lo particulares y específicos que suelen ser los problemas que se procesan a través de un SE, surge por parte del sistema la utilización de un vocabulario técnico propio del campo que se está tratando, lo que obstaculiza la comunicación máquina-usuario que en momentos puede dar pie a este último, a mal interpretar el sentido de las preguntas que realiza el sistema. Esto originaria la incorporación de información errónea, provocando cambios inadecuados de la línea de razonamiento y por tanto resultados poco confiables. Es por esto, que surge la necesidad de diseñar la forma de proporcionar al usuario, en cualquier instante que lo requiera, información complementaria de la pregunta que el sistema efectúa.

En principio, la investigación se enfocó a la parte operativa, para crear una infraestructura dentro del programa principal que permitiese acceder a la información complementaria, sin afectar el proceso de inferencia que el sistema desarrolla simultáneamente. En una segunda fase, se recurrió al experto humano, para que éste proporcionara la información adicional en un lenguaje más común, que fuese

capaz de aclarar al usuario cada pregunta; esta información se almacena en un archivo, que contiene los números de las evidencias y sus explicaciones correspondientes, aquellas preguntas muy explícitas no necesitan ser incluidas.

MODULO DE CORRECTIVOS.

El módulo de correctivos surge debido a una sensación de vacío que se generaba cuando el sistema realizaba su diagnóstico y finalizaba así su labor. En este momento era deseable que adicionalmente al diagnóstico, el sistema sugiriera las acciones a tomar asociadas a éste.

Es evidente que estas recomendaciones solo pueden ser acciones preliminares y generales, sin embargo, permiten orientar al usuario y aumentan su percepción del problema diagnosticado.

El módulo de correctivos es accesible al usuario a través de un menú que el sistema presenta una vez emitido su diagnóstico y para su funcionamiento requiere de una base con información proporcionada por el experto.

DESCRIPCION DEL EECS-1.

La frecuencia con que se presentan incendios en zonas urbanas y la dificultad que significa para la mayoría determinar la capacidad estructural remanente después del hecho, justificaba el desarrollo de SE en el área. Otra razón era que la solución del problema requiere de una buena parte de heurística y manejo de información imprecisa y más importante aún, se disponía de un experto humano en el área dispuesto a colaborar.

El primer paso en la elaboración de la BC, fué la identificación del problema, caracterizando los aspectos más importantes, además de fijar los objetivos y alcances del sistema. Es aquí donde surge el primer obstáculo, ya que el conocimiento no se adaptaba plenamente a la estructura que caracteriza al Experto Bayesiano, lo que obligó a reformular el planteamiento inicial del problema, que consistía en el diagnóstico del daño de la estructura como un todo, cambiando al diagnóstico del daño en los elementos estructurales por separado. Esto condujo a la elaboración de tres BC asociadas a losas, vigas y columnas respectivamente.

Se acordó que las BC debían contemplar como hipótesis los niveles de daño posible. El experto creyó conveniente establecer cuatro hipótesis, que son : Levemente afectada, moderadamente afectada, fuertemente dañada y severamente dañada, con lo que se cubría el espectro de daños totalmente.

Se elaboró una lista tentativa de hechos presentes en una edificación siniestrada, que permiten al experto hacer conjeturas acerca del estado de la misma y que debían ser preguntadas por el sistema al usuario, con el fin de elaborar el diagnóstico, a partir de esta lista se constituyó la base de evidencias definitiva que complementa la BC.

Cada una de las BC se fueron nutriendo lenta y cuidadosamente con el conocimiento del experto, traducido éste en probabilidades que el sistema bayesiano emplea en su mecanismo de inferencia.

EJEMPLO REPRESENTATIVO.

Se presenta a continuación un ejemplo que permite demostrar el comportamiento del sistema, ante situaciones extremas e intermedias. Las preguntas del sistema van precedidas por la identificación "EECS-1 : ", mientras que, las respuestas del usuario se anteceden con la palabra "Usuario : " .

El ejemplo supone la existencia de una viga de concreto armado con signos muy marcados de deterioro, luego de un incendio. A continuación, se reproduce el diálogo máquina-usuario, de este caso :

EECS-1 : ¿ Se observó acero "no estructural" fundido ?

USUARIO : 5

EECS-1 : ¿ Existen fisuras en el elemento ?

USUARIO : 5

EECS-1 : ¿ Extinguieron el fuego los bomberos ?

USUARIO : 5

EECS-1 : ¿ Hubo pérdida del friso en el elemento ?

USUARIO : 5

(Este diálogo continúa, incorporándose al sistema más información "a posteriori" y cuando éste lo estima conveniente, emite su diagnóstico.)

EECS-1 : ¿ Notaste pérdida de adherencia acero-concreto ?
USUARIO : 5

del diálogo

El DIAGNOSTICO es :

VISA SEVERAMENTE DAÑADA

Con una probabilidad de $PA > 1$

Presione ENTER para continuar

En el ejemplos anteriores se pone en evidencia que el sistema es apto en el reconocimiento de los límites del dominio del conocimiento. Para confirmar el buen funcionamiento global del EECS-1, es necesario demostrar que éste no oscila alrededor de situaciones intermedias; en función de esto, se realizó un gráfico para cada BC (losas, vigas y columnas), que se compone de la siguiente manera :

En las ordenadas se representan, los valores de las probabilidades finales de cada hipótesis, luego de contestarse con un valor "fijo" a todas las preguntas realizadas por el sistema. Se entiende por valor "fijo", un valor cualitativo constante del estado de daño del elemento. En las abscisas, se representan las respuestas del usuario.

En estos gráficos, figuras 8 , 9 y 10, se puede observar que el EECS-1, tiene un comportamiento sin fluctuaciones y converge asintóticamente hacia los límites esperados. Otra característica apreciable en los gráficos, es su criterio conservador ante las situaciones que se le plantean, sobre todo si ésta es un poco incierta.

Comportamiento del EECS-1 Elemento : LOSA

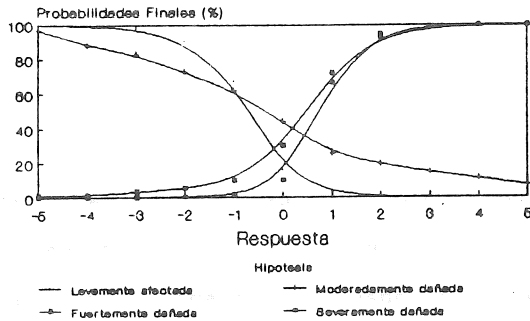


Fig. 8

Comportamiento del EECS-1 Elemento : COLUMNA

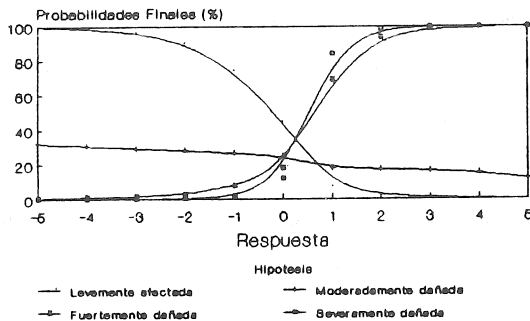


Fig. 9

Comportamiento del EECS-1 Elemento : VIGA

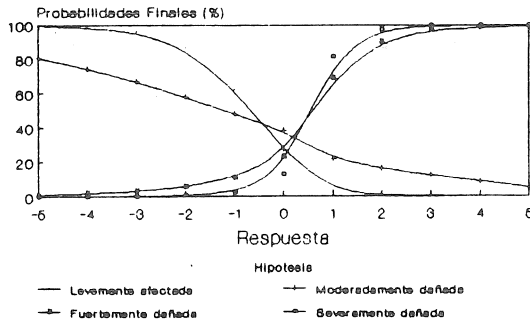


Fig. 10

CONCLUSIONES

La base de conocimientos desarrollada en este trabajo, permite al EECs-1 evaluar los daños en estructuras de concreto armado afectadas por incendio, lo cual tiene una utilidad práctica evidente.

Los módulos complementarios del SE Bayesiano mejoran sustancialmente la comunicación máquina-usuario. El módulo de justificación permite al usuario comprender la línea de razonamiento del sistema, a través de conjuntos de variable lingüística. El módulo de ayudas facilita al usuario la comprensión de términos técnicos. El módulo de correctivos complementa el diagnóstico del sistema, con recomendaciones de tipo preliminar asociadas al nivel de daño.

El sistema presentado en este trabajo demostró, en el proceso de validación, tener un comportamiento adecuado y sin saltos, coincidiendo regularmente con el criterio del experto humano.

REFERENCIAS

- CERROLAZA, M., GOMEZ, B. y ALARCON, E. (1988)
" Expert System for Quality Prediction in Structural Engineering ". IABSE Congress, Helsinki, Finlandia.
- DELFIN, F., GOMEZ, E. y TORRES, O. (1983)
" Efectos del fuego en estructuras de hormigón "
Revista del IDIEM, Chile.
- HAYES-ROTH, F., WATERMAN, D. y LENAT, D. (1983)
" Building Expert Systems "
Addison Wesley, New York. USA.
- NAYLOR, C. (1983)
" Build your own Expert System "
Sigma Technical Press.
- WATERMAN, D.A. (1986)
" A Guide to Expert Systems "
Addison-Wesley Publishing Company, USA.