

¿QUÉ ES EL RAZONAMIENTO TEMPORAL BORROSO?

R. Marín

Dpto. de Informática y Sistemas (Universidad de Murcia)

M. Taboada

Dpto. de Electrónica y Computación (Universidad de Santiago)

Resumen

En este trabajo se analiza el papel de la Lógica Borrosa en el campo del razonamiento temporal. Se plantean los problemas básicos asociados a la representación y gestión de la información dependiente del tiempo en sistemas expertos, y se discuten las estrategias básicas para modelar formalmente la imprecisión temporal presente en múltiples dominios. Se introducen los fundamentos del modelado del tiempo mediante redes de restricciones temporales borrosas, mostrando algunos ejemplos.

Palabras clave: Razonamiento temporal borroso, redes de restricciones borrosas, sistemas expertos borrosos.

Abstract

In this work we analyze the role of fuzzy logic in the field of temporal reasoning. The basic problems associated with the representation and management of time dependent information in expert systems are addressed and the basic strategies used to formally model temporal imprecision present in multiple domains are introduced. The foundations of time modelling through fuzzy temporal constraint networks are introduced and some examples are presented.

Key words: Fuzzy temporal reasoning, fuzzy constraint networks, fuzzy expert systems.

1. Planteamiento del tema

El tiempo es un marco de referencia que permite situar y ordenar los diferentes estados observables de un sistema. En los modelos físicos, el tiempo es la variable independiente por excelencia, respecto a la cual se describen los procesos evolutivos, y en la que se apoya el concepto de cambio. Por otra parte, el tiempo actúa también como concepto organizador de nuestros modelos mentales del mundo físico y, en particular, de la memoria. Ello se refleja profundamente en nuestras expresiones del lenguaje natural, imbuidas de una rica semántica temporal. Nuestros procesos de razonamiento, que se apoyan en la memoria, participan también de esta fuerte dependencia de los conceptos temporales: las inferencias se suceden en el tiempo y las creencias que las sustentan cambian a lo largo del tiempo. Asimismo, el tiempo desempeña un papel relevante en el razonamiento de sentido común,

en consonancia con nuestra interpretación del mundo físico en términos de causas y efectos.

Se comprende, por tanto, el gran interés que la representación del tiempo y el razonamiento temporal despiertan entre los investigadores en inteligencia artificial (IA). Para la mayor parte de las tareas objeto de estudio de la IA (diagnóstico, planificación, monitorización, control, ...) existen múltiples dominios de aplicación en los que el manejo del tiempo es esencial: diagnóstico médico, diagnóstico de fallos en máquinas, planificación de procesos de fabricación, monitorización de pacientes, control de procesos industriales, ...

Por otra parte, estas tareas de aplicación requieren, a menudo, la capacidad de manejar el tiempo en forma inexacta. La imprecisión y la incertidumbre decoran las expresiones en lenguaje natural que usamos para referirnos al tiempo y a la ordenación temporal de los eventos. La preponderancia de la vaguedad temporal se explica por las relaciones entre nuestros mecanismos de percepción del tiempo y nuestra memoria, que es imperfecta y añade ambigüedad a nuestras expresiones temporales.

A título de ejemplo, consideremos el caso de los sistemas expertos en diagnóstico clínico, y examinemos sobre él la relevancia que tienen las características de temporalidad e imprecisión. Podemos considerar el cuerpo humano como un canal de transmisión de información, cuya entrada es una enfermedad (causa) y cuya salida es el conjunto de síntomas observables (efectos) producidos por el proceso fisiopatológico subyacente. El objetivo del sistema experto es ayudar al médico en la tarea de «decodificación» de los síntomas observados, con el fin de identificar las causas posibles. En este proceso, se aplica a los hechos observados un *conocimiento operativo*, organizado como relaciones salida-entrada (efecto-causa), que es esencialmente distinto al *conocimiento descriptivo* que el médico aprende en los libros de texto. Este último está organizado como descripciones de síntomas asociados a cada patología, es decir, como relaciones entrada-salida (causa-efecto). La inversión del conocimiento descriptivo en conocimiento operativo es el resultado de la experiencia; por eso, al segundo se le denomina conocimiento experto. Un sistema experto convencional contiene una representación computacional del conocimiento operativo, construye una representación interna de los hechos observados y razona confrontando el conocimiento con los hechos hasta obtener conclusiones válidas.

La temporalidad y la imprecisión características del dominio médico tienen unas implicaciones claras sobre el modelo simplificado de sistema experto que acabamos de exponer. Partimos de una premisa evidente: los procesos fisiopatológicos son dinámicos y su evolución temporal resulta en una sucesión dada de manifestaciones clínicas. Como consecuencia, muchos síntomas no serán evidentes en el momento del diagnóstico, sino que habrán aparecido en el pasado, pero no por ello dejan de ser relevantes en la consulta actual. Además, la propia ordenación temporal relativa de los síntomas es indicativa del proceso fisiológico subyacente y de su curso evolutivo. Observemos que la imprecisión temporal puede aparecer, tanto en la especificación

del tiempo de ocurrencia de los hechos, como en la expresión del conocimiento. El primer caso aparece en el relato de los antecedentes clínicos y de los síntomas subjetivos del paciente (v. g. «insuficiencia renal desde hace unos dos años», «comienzo de la fiebre pocas horas después del dolor»). El segundo es propio de sistemas complejos en los que es imposible establecer los umbrales temporales precisos que distinguen entre hechos relacionados y hechos sin conexión causal (v. g. «si aparecen cambios hemodinámicos unos 30 segundos antes de los cambios electrocardiográficos entonces diagnosticar posible isquemia»). En términos del modelo de sistema experto, tenemos las siguientes tres implicaciones: a) la representación interna de los *hechos* debe dar cuenta del tiempo en el que estos han ocurrido, aún en los casos en los que el tiempo de ocurrencia ha sido expresado de forma imprecisa; b) la representación interna del *conocimiento operativo* debe aludir a las relaciones temporales que hacen que un determinado patrón de síntomas tenga un significado asociado; y c) el mecanismo de *confrontación* entre hechos y conocimiento debe comparar la información conocida sobre el tiempo de ocurrencia de los distintos hechos y determinar si estos verifican las relaciones temporales aludidas en el conocimiento.

El objetivo de este trabajo es describir una forma de aplicar la Lógica Borrosa a la resolución del triple problema planteado arriba, limitándonos a los conceptos básicos. El uso de la Lógica Borrosa en la representación y el razonamiento temporal permite modelar formalmente las características de imprecisión temporal presentes en múltiples dominios de aplicación de los sistemas expertos. A la vez, permite mantener un nexo de unión con las expresiones lingüísticas temporales que el experto utiliza en la descripción de su conocimiento y que el usuario introduce en sus descripciones de los hechos observados.

2. Evolución histórica

Las raíces históricas del interés en la formalización del razonamiento temporal son de tipo filosófico, y han aparecido de forma recurrente desde la antigüedad griega. A principios de este siglo y, más tarde, en la década de los 40, resurge este interés, orientado hacia el análisis lógico de los tiempos gramaticales y de temas relacionados con la filosofía de la ciencia. Es a lo largo de la década de los 70 cuando se empieza a trabajar en el tratamiento computacional del tiempo. Por una parte, la crisis del software orienta la búsqueda hacia técnicas formales de especificación de programas concurrentes, basadas en lógicas temporales modales [1], en las que el tiempo está implícito en los operadores modales aplicados. Paralelamente, Kahn y Gorry [2] sientan las bases para un tratamiento explícito de la variable tiempo, introduciendo el concepto de *especialista temporal*, un módulo que representa y gestiona exclusivamente la información concerniente a la posición temporal de los hechos, independientemente del uso que se haga de

esa información para razonar sobre el dominio. Esta separación entre *razonamiento sobre el tiempo* y *razonamiento temporal sobre el dominio* es el punto de partida para un conjunto de desarrollos posteriores. Hay que citar además en esta etapa a las teorías de tiempo, acción y cambio, originadas en la necesidad de resolver problemas de planificación complejos como los que se presentan en el mundo real, emulando el razonamiento de sentido común sobre el mundo físico [3].

En la década de los 80 aparecen los modelos de restricciones temporales, que abordan el problema del razonamiento sobre el tiempo representando las etiquetas temporales asociadas a los hechos como relaciones algebraicas entre parejas de entidades temporales; estas relaciones contienen la información temporal de partida suministrada, y son combinadas con el fin de obtener nueva información sobre los tiempos de ocurrencia. En el modelo de Allen [4] las entidades temporales básicas son intervalos y las relaciones son cualitativas (v. g. «antes», «durante», ...). En el modelo de Vilain y Kautz [5] se definen también relaciones cualitativas («antes», «igual» y «después»), pero entre instantes de tiempo. Van Beek [6] estudia las conexiones entre los distintos tipos de modelos cualitativos y sus algoritmos más eficientes. Más recientemente, Dechter y col. [7] introducen relaciones métricas entre instantes (v. g. «entre 5 y 10 unidades de tiempo antes»). La potencia expresiva de un modelo de restricciones es limitada, equivaliendo a la de una fórmula proposicional no cuantificada. Aparecen dos caminos diferentes para integrar un modelo de restricciones con un modelo más general de razonamiento sobre el dominio dotado de mayor expresividad. Una posibilidad es redefinir el modelo de restricciones mediante un conjunto de axiomas sobre relaciones temporales, que quedan integrados de forma natural en una lógica de predicados de primer orden, usualmente reificada [8]. Alternativamente, se puede seguir la aproximación de la Ingeniería del Conocimiento, integrando directamente el especialista temporal basado en restricciones dentro de la arquitectura propia de los sistemas expertos. En los últimos años, esta última línea está comenzando a producir resultados prácticos en aplicaciones como el diagnóstico de fallos en máquinas [9], el control de procesos industriales en tiempo real [10] o la monitorización inteligente de pacientes [11].

Resulta interesante constatar que la imprecisión temporal está presente, de forma intrínseca, en todos los modelos anteriores. Las relaciones cualitativas, como «antes» o «después», corresponden a un caso extremo de imprecisión. Las relaciones métricas representan la inexactitud temporal definiendo rangos de error, como en el ejemplo citado arriba. Incluso los operadores de la lógica temporal modal pueden considerarse inherentemente imprecisos. No es sorprendente, por tanto, el interés existente desde hace años en la incorporación del modelo formal de la imprecisión proporcionado por la Lógica Borrosa al razonamiento temporal, algo que ya había sido sugerido por Kahn en su trabajo pionero [2], y posteriormente por Vitek [12], pero que no empezó a desarrollarse hasta finales de los 80. Dutta [13, 14] propuso un primer modelo borroso en el que aparecen relaciones entre intervalos

imprecisos, pero que presenta limitaciones importantes, como la inexistencia de una separación entre razonamiento sobre el tiempo y sobre el dominio, o la necesidad de particionar el eje del tiempo en segmentos arbitrarios. Problemas similares presenta la aproximación de Kim y Oh [15], que considera instantes e intervalos.

El punto de inflexión lo marca un trabajo de Dubois y Prade [16] que aborda la definición formal de instantes, intervalos y relaciones temporales imprecisas desde la perspectiva de la Teoría de la Posibilidad. El trabajo propone diversos métodos de ordenación de fechas borrosas y de comparación de relaciones temporales. La formalización de Dubois y Prade es usada por Console y col. [17] como soporte de la imprecisión temporal en un modelo de razonamiento causal, mientras Qian [18] la aplica a la supervisión de procesos industriales, introduciendo una solución al problema de la confrontación entre hechos temporales y condiciones temporales borrosas. En todos estos casos se presupone que las etiquetas temporales de los hechos se especifican en forma absoluta (v. g. «aproximadamente a las 17 horas») o, en el mejor de los casos, mediante una única relación temporal a algún punto de referencia (v. g. «poco antes del disparo de la alarma»). No obstante, hay dominios en los que es necesario poder especificar la posición temporal de un hecho mediante múltiples relaciones (v. g. «comienzo de la fiebre dos o tres días después de la intervención quirúrgica y poco antes de la aparición del dolor»). En estos casos es preciso utilizar un modelo de propagación de restricciones capaz de combinar todas las piezas de información globalmente. Dubois y Prade [16] habían explorado algunas cuestiones clave en la representación de restricciones, sugiriendo el uso del algoritmo de Waltz. Nuestro grupo propuso un modelo general, denominado *Red de Restricciones Temporales Borrosas* (FTCN o Fuzzy Temporal Constraint Networks), que formaliza la representación de restricciones temporales imprecisas [19, 20, 21]. Este modelo incluye como casos particulares la especificación de las etiquetas temporales absolutas y de las relativas a un único punto de referencia, e introduce algoritmos eficientes para el caso general y los casos particulares. El modelo permite la definición de intervalos en una forma menos restrictiva que la propuesta por Dubois y Prade. Posteriormente, Godo y Vila [22, 23] han estudiado la inclusión de un modelo similar en una lógica proposicional.

3. Red de restricciones temporales borrosas

Llamaremos *evento* a la ocurrencia de algún hecho del dominio en un instante de tiempo dado, y lo definiremos mediante una pareja $e_j = (h_j, l_j)$, donde h_j es un hecho y l_j es una etiqueta temporal lingüística que expresa el instante de ocurrencia del hecho.

Analicemos el problema de la representación computacional del tiempo de ocurrencia de un evento partiendo de la representación lingüística externa. Supondremos primero el caso sencillo en el que la etiqueta temporal

expresa un tiempo en forma absoluta (un tiempo de reloj o una fecha). Para ello, consideremos el siguiente ejemplo: $e_j = (\text{«Juan llegó a la oficina»}, \text{«Aproximadamente a las 8:00 horas»})$. Comenzaremos por suponer un eje del tiempo τ definido por un conjunto discreto de instantes precisos, $t = \{t_0, t_1, \dots, t_k, \dots\}$, totalmente ordenados. Los t_k representan los consecutivos instantes precisos de tiempo y t_0 representa un origen de tiempos arbitrario, como por ejemplo las 0:00 horas. Puesto que la información suministrada por la etiqueta l_j es incompleta, representaremos la posición temporal del instante de ocurrencia mediante una *variable temporal* X_j , que podrá tomar distintos valores. En el ejemplo, la etiqueta l_j nos suministra la siguiente información imprecisa sobre la localización temporal de X_j : sus posibles valores son los instantes situados en torno a las 8:00 horas. Así, $t = 8:00$ y $t = 8:02$ son valores completamente posibles para X_j , $t = 8:07$ es un valor menos posible y $t = 8:15$ es un valor imposible. Los posibles valores de la variable quedan restringidos a los de un subconjunto borroso del eje del tiempo. Este induce una distribución de posibilidad π_j sobre τ . La distribución π_j se interpreta de la siguiente forma: dado un instante preciso de tiempo $t \in \tau$, $\pi_j(t)$ es un número entre 0 y 1 que representa la posibilidad de que X_j sea precisamente t . Los valores extremos, 1 y 0, corresponden, respectivamente, a la posibilidad absoluta y la posibilidad nula (imposibilidad) de que X_j sea t .

Un tipo particular de distribuciones de posibilidad con una representación computacional sencilla son las distribuciones trapezoidales (fig. 1.a), definidas mediante cuatro parámetros: $\pi_j = (\alpha, \beta, \gamma, \delta)$. Denominamos *soporte* de la distribución π_j al conjunto de valores $t \in \tau$ tal que $\pi_j(t) > 0$, y *núcleo* de π_j al conjunto de valores $t \in \tau$ tal que $\pi_j(t) = 1$. El soporte nos da todos los valores posibles y el núcleo nos da los valores completamente posibles. Consideraremos siempre que el núcleo es no vacío (hay valores completamente posibles) y que la forma de la distribución es convexa. Estas condiciones se dan en una distribución trapezoidal, donde β y γ representan el inicio y el final del núcleo respectivamente, y α y δ el principio y el final del soporte respectivamente. En la fig. 1.b se muestra la distribución trapezoidal $\pi_j = (7:50, 7:55, 8:05, 8:10)$, correspondiente a la etiqueta temporal «aproximadamente a las 8:00 horas» del ejemplo anterior. La distribución trapezoidal suele leerse así: el valor de X_j está posiblemente entre las 7:55 y las 8:05, y necesariamente entre las 7:50 y las 8:10. Esta expresión resalta que los valores del núcleo son los máximamente posibles y que los valores fuera del soporte son imposibles.

Consideremos ahora el caso en el que la etiqueta temporal del evento expresa un tiempo en forma relativa al tiempo de otro evento, que sirve como punto de referencia. Un ejemplo de este tipo es: $e_i = (h_i, l_i) = (\text{«María llegó a la oficina»}, \text{«Aproximadamente 20 minutos después de que Juan llegara a la oficina»})$. La información que nos suministra ahora la etiqueta temporal l_i es la duración imprecisa transcurrida desde el evento de referencia e_j hasta el evento e_i . Los posibles valores de la variable temporal X_i

están ahora restringidos por los posibles valores de la variable X_j asociada al evento de referencia, así como por los posibles valores de la duración imprecisa transcurrida entre el evento e_j y el e_i . Esta, que denominaremos d_{ji} , puede ser representada también mediante un subconjunto borroso del universo de los números enteros I . La distribución de posibilidad π_{ji} inducida por este subconjunto borroso nos da los posibles valores de la duración transcurrida. Se interpreta así: dado un $n \in I$, $\pi_{ji}(n) \in [0, 1]$ representa la posibilidad de que la duración d_{ji} sea precisamente n unidades de tiempo.

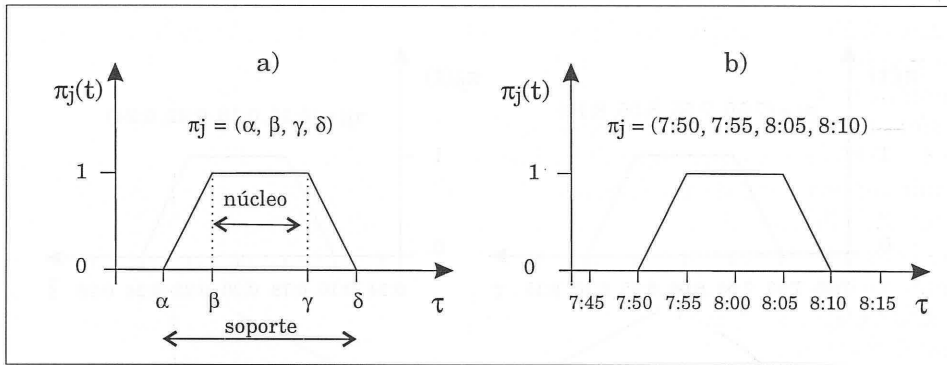


Figura 1. a) Distribución de posibilidad trapezoidal. b) Ejemplo de tiempo absoluto impreciso.

La fig. 2.a muestra la distribución trapezoidal correspondiente a la duración d_{ji} del ejemplo: $\pi_{ji} = (0:16, 0:18, 0:22, 0:24)$. De forma simétrica, entre e_i y e_j ha «transcurrido» una duración negativa d_{ij} dada por $\pi_{ij} = (-0:24, -0:22, -0:18, -0:16)$. La representación computacional del evento e_i consiste en: la variable temporal asociada X_i y las distribuciones de posibilidad de la pareja de duraciones simétricas d_{ij} y d_{ji} . La fig. 2.b muestra esquemáticamente la representación de la relación temporal existente entre e_i y e_j .

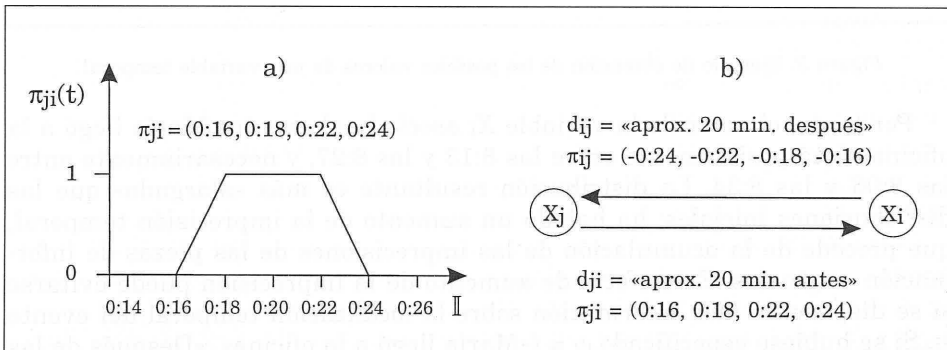


Figura 2. a) Ejemplo de duración imprecisa. b) Representación esquemática de la relación existente entre las variables X_i y X_j .

Ahora podemos calcular los posibles valores de la variable X_i como suma borrosa de los posibles valores de X_j y de los posibles valores de d_{ji} . En términos de distribuciones trapezoidales, la suma borrosa \oplus se obtiene sumando los respectivos parámetros de ambas distribuciones (fig. 3):

$$\begin{aligned} \pi_i &= \pi_j \oplus d_{ji} = (7:50, 7:55, 8:05, 8:10) \oplus (0:16, 0:18, 0:22, 0:24) = \\ &= (8:06, 8:13, 8:27, 8:34). \end{aligned}$$

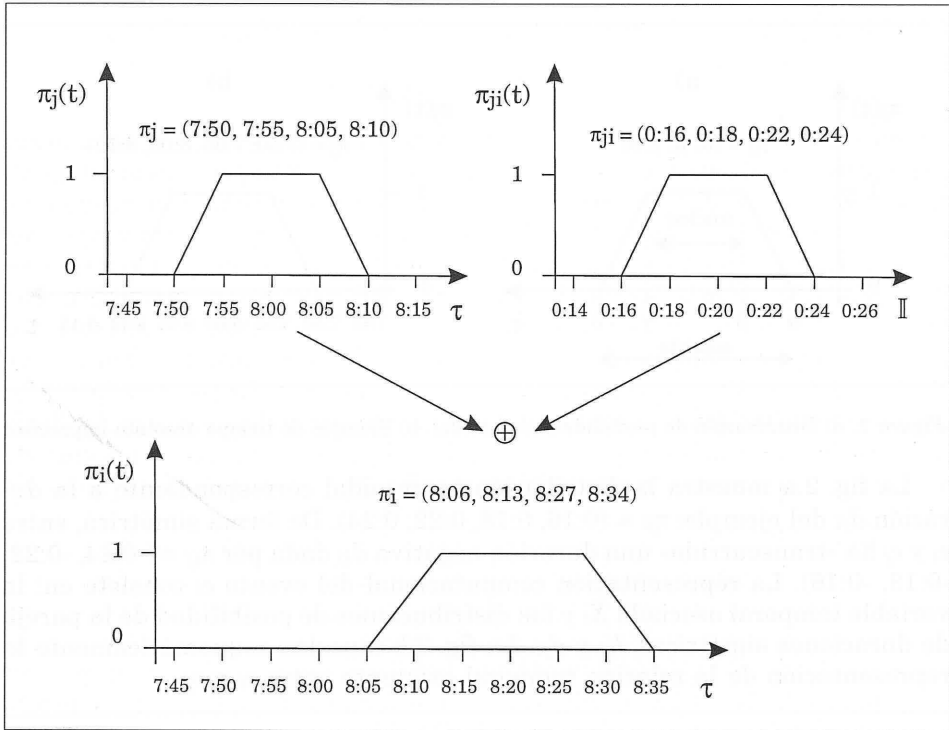


Figura 3. Ejemplo de obtención de los posibles valores de una variable temporal.

Por tanto, el valor de la variable X_i asociada al evento «María llegó a la oficina» está posiblemente entre las 8:13 y las 8:27, y necesariamente entre las 8:06 y las 8:34. La distribución resultante es más «alargada» que las distribuciones iniciales: ha habido un aumento de la imprecisión temporal, que procede de la acumulación de las imprecisiones de las piezas de información originales. Este efecto de aumento de la imprecisión puede evitarse si se dispone de más información sobre la localización temporal del evento e_i . Si se hubiese especificado $e_i =$ («María llegó a la oficina», «Después de las 8:15, y aproximadamente 20 minutos después de que Juan llegara a la oficina»), podríamos haber recortado la distribución π_i a (8:15, 8:15, 8:27, 8:34), mediante una simple operación de intersección de distribuciones.

Observemos también que el primer ejemplo, correspondiente a un tiempo absoluto, puede representarse en la misma forma que los casos correspondientes a tiempos relativos. Basta con tomar un origen de tiempos arbitrario, por ejemplo $t_0 = 0:00$ horas, y definir una variable X_0 a la que se asigna exactamente el valor preciso del origen de tiempos t_0 : $X_0 = t_0 = 0:00$. Ahora podemos interpretar la expresión absoluta «aproximadamente a las 8:00 horas» como la de la duración imprecisa d_{0j} transcurrida desde el origen de tiempos hasta el evento e_j . Los valores posibles de X_j se obtienen como:

$$\begin{aligned}\pi_j &= \pi_0 \oplus \pi_{0j} = (0:00, 0:00, 0:00, 0:00) \oplus (7:50, 7:55, 8:05, 8:10) = \\ &= (7:50, 7:55, 8:05, 8:10).\end{aligned}$$

En resumen, el tiempo de ocurrencia de cualquier evento e_i se expresa mediante una etiqueta temporal lingüística l_i , que siempre puede interpretarse como la duración imprecisa transcurrida desde el tiempo de ocurrencia de algún evento de referencia e_j . Por otra parte, el tiempo de ocurrencia del evento e_i se representa computacionalmente mediante una variable temporal X_i y las distribuciones de posibilidad de una pareja de duraciones imprecisas simétricas d_{ij} y d_{ji} entre las variables X_i y X_j . Las duraciones restringen los valores de tiempo que pueden ser asignados a las dos variables. Por eso, se denominan *restricciones temporales binarias borrosas*. El paso de la representación lingüística a la representación computacional consiste en traducir la duración imprecisa expresada por la etiqueta a las distribuciones de posibilidad de las restricciones binarias. En [21] se presenta un lenguaje completo de este tipo.

El modelo FTCN se introduce para formalizar la representación computacional de situaciones generales en las que se especifica un número arbitrario de eventos, cuyas posiciones temporales pueden venir descritas por varias etiquetas temporales lingüísticas relativas a distintos puntos de referencia. Una FTCN se define como un par $N = \langle X, D \rangle$ formado por un conjunto finito de $n + 1$ variables temporales $X = \{X_0, X_1, \dots, X_n\}$, y un conjunto finito de restricciones binarias borrosas $D = \{d_{ij}/i, j \leq n\}$ sobre esas variables, siendo X_0 un origen preciso de tiempos.

La representación visual de una FTCN es un grafo en el que los nodos corresponden a variables temporales y los arcos corresponden a las restricciones entre ellas. La fig. 4 muestra un ejemplo de FTCN correspondiente a una distribución temporal de síntomas. Por simplicidad, en el grafo sólo se representa una restricción de cada par de restricciones simétricas. Tampoco se representan las restricciones no definidas: entre X_2 y X_3 existe una restricción implícita no dibujada que permite cualquier valor de duración transcurrida, es decir, $d_{23}(n) = 1$ para toda duración precisa n . Aunque no se ha introducido ninguna restricción explícita entre los instantes X_2 y X_3 , un especialista temporal basado en el modelo FTCN puede obtenerla propagando las otras restricciones conocidas. Para ello, se aplica un algoritmo que combina exhaustivamente todas las restricciones [20], y que está basado en

el proceso de cálculo descrito en la figura 3. La combinación exhaustiva es necesaria para evitar el efecto de aumento de la imprecisión; de hecho, el algoritmo obtiene las *restricciones mínimas*, que son las que, conservando toda la información original, tienen la menor imprecisión. Para el ejemplo, se obtiene una restricción mínima $\pi^m_{23} = (4, 8, 10, 12)$.

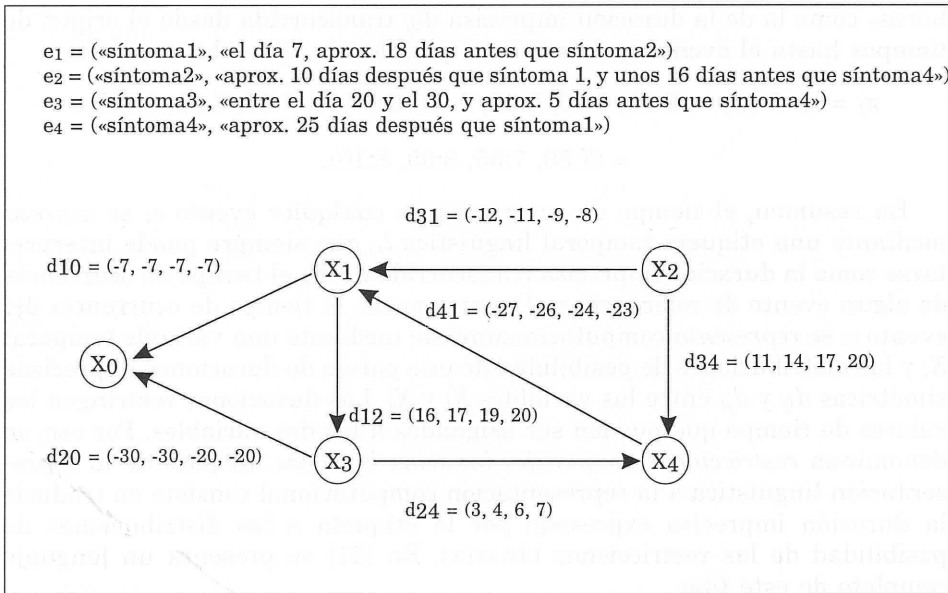


Figura 4. Ejemplo de red de restricciones temporales borrosas.

Supongamos que un sistema experto para diagnóstico médico contiene la siguiente regla: «Si el síntoma S_2 aparece entre 6 y 11 días después que el síntoma S_3 entonces sugerir diagnóstico Z ». Para un paciente con la distribución de síntomas de la figura 3 el proceso sería el siguiente. Primero, el mecanismo de razonamiento sobre el dominio traslada al especialista temporal la consulta: ¿ X_2 «entre 6 y 11 días antes» X_3 ? El analizador lingüístico del especialista temporal traduce la relación consultada a una distribución de posibilidad $\pi^c_{23} = (6, 6, 11, 11)$, utilizando el mismo lenguaje que se aplica a la representación de etiquetas temporales. Por otra parte, se obtiene la restricción temporal mínima π^m_{23} realmente existente entre las variables. A continuación, se comparan ambas distribuciones para evaluar el grado de compatibilidad entre la relación consultada y la restricción mínima. Un procedimiento de comparación consiste en la obtención de las medidas de posibilidad Π y necesidad N definidas por las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned}
 \Pi &= \max \min \{ \pi^c_{23}(m), \pi^m_{23}(m) \} = \\
 &= \max \min \{ (6, 6, 11, 11), (4, 8, 10, 12) \} = 1
 \end{aligned}$$

$$N = \min \max \{\pi^c_{23}(m), 1 - \pi^m_{23}(m)\} =$$

$$= \min \max \{(6, 6, 11, 11), 1 - (4, 8, 10, 12)\} = 0.5$$

La medida de posibilidad Π indica si es posible que la relación consultada sea cierta. Para disponer de alguna certeza, la relación consultada debe ser completamente posible, es decir, Π debe alcanzar el valor máximo 1. Que ello ocurra significa que la imposibilidad de la relación consultada es nula, único caso en el que tendremos alguna certeza en ella. La medida de necesidad N nos mide esa certeza en la relación consultada. Sólo cuando $\Pi = 1$, la medida de necesidad N puede ser mayor que 0. El valor de N es exactamente la imposibilidad de la relación contraria (X_2 «no entre 6 y 11 días antes» X_3). Por tanto, cuanto mayor sea esta imposibilidad, mayor será la certeza en la relación consultada. Siempre se cumple que $N \leq \Pi$, y se interpretan como una banda de estimación del grado de verificación de la relación consultada. Finalmente, el proceso termina aplicando algún operador de implicación que propague el grado de verificación de la condición de la regla hacia la conclusión. En nuestro ejemplo, obtendríamos el grado de verificación de la conclusión diagnóstica.

4. Aplicaciones y problemas abiertos

Las aplicaciones del razonamiento temporal borroso son aún limitadas. Aunque existen aplicaciones a problemas industriales [18], la mayoría se orientan hacia el dominio médico [13, 14, 17, 19, 20, 21, 22, 23]. Las razones que explican la prevalencia de los modelos temporales borrosos en sistemas de uso clínico han sido apuntadas en la primera sección. En esta línea, nuestro grupo está desarrollando un sistema de monitorización inteligente aplicable a pacientes que han sido ingresados en una unidad de cuidados intensivos coronarios con un diagnóstico de infarto agudo de miocardio. El trabajo se realiza en colaboración con la Universidad de Santiago y el Hospital General de Elche. El sistema incluye un especialista temporal basado en el modelo FTCN, cuyo objetivo es integrar la información temporal de las señales hemodinámicas y eléctricas del paciente con la información temporal propia de la historia clínica. Se utilizan cuatro técnicas de razonamiento temporal que se aplican a la detección de episodios de señal, a la detección de patrones temporales de síntomas y a la valoración diagnóstica del curso evolutivo del paciente [24, 25, 26].

La explotación práctica del razonamiento temporal borroso es aún un problema abierto. Para ello, se precisan herramientas *software* que simplifiquen y aceleren el desarrollo de aplicaciones complejas. Tales herramientas deberían integrar distintos modelos de representación y gestión del tiempo, proporcionando la eficiencia y la flexibilidad requerida para la construcción de aplicaciones a una diversidad de dominios. Eventualmente, la acumulación

de experiencia en la resolución de problemas de complejidad real permitirá abrir nuevas vías de extensión del modelo básico. Así lo hemos constatado en nuestra aplicación a la monitorización de pacientes. Por último, existen otros problemas, de carácter más fundamental, en los que se trabaja activamente. Problemas de este tipo, abordados por otros grupos de nuestro país, son el estudio de las técnicas de confrontación y de los operadores de implicación más apropiados, o la integración del modelo básico en las lógicas formales [22, 23].

5. Bibliografía

Existe una abundante bibliografía sobre técnicas convencionales de razonamiento temporal, cuyo punto de arranque es el trabajo de Kahn y Gorry [2]. En el apartado de lógicas modales temporales, [1] ofrece una breve, aunque interesante, introducción al tema. Una recopilación de artículos básicos sobre razonamiento temporal de sentido común aparece en [3], con énfasis en los problemas planteados por la aplicación a tareas de planificación. Las referencias [5-8] reflejan hitos en el desarrollo de modelos de restricciones temporales convencionales, mientras [9-11] muestran algunas de sus aplicaciones.

La introducción de la Lógica Borrosa en el campo del razonamiento temporal es relativamente reciente, lo que se refleja en una bibliografía más limitada. Las referencias [12-15] desarrollan algunas ideas preliminares en este tema. El punto de referencia obligado es el trabajo de Dubois y Prade [16]. Finalmente, las distintas líneas teóricas que arrancan de este último trabajo quedan resumidas en [17-23], y algunas de sus aplicaciones prácticas se describen en [24-26].

6. Referencias

- [1] Gotzhein, R., «Temporal logic and applications: a tutorial», *Computer Networks and ISDN Systems*, 24, (1992), 203-218.
- [2] Kahn, K. and Gorry, G., «Mechanization of temporal knowledge», *Artificial Intelligence*, 9, (1977), 87-108.
- [3] Allen, J., Hendler, J. and Tate, A., *Readings in Planning*, Morgan Kaufmann, 1990.
- [4] Allen, J., «Maintaining knowledge about temporal intervals», *Communications of the ACM*, 26 (11), (1983), 832-843.
- [5] Vilain, M. y Kautz, «Constraint propagation algorithms for temporal reasoning», *Proc. of the AAAI-86*, (1986), 377-382.
- [6] Van Beek, P., «Reasoning about qualitative temporal information», *Proc. of the AAAI-90*, (1990), 728-734.
- [7] Dechter, R., Meiri, I. and Pearl, J., «Temporal constraint networks» *Artificial Intelligence*, 49, (1991), 61-95.

- [8] Allen, J., «Towards a general theory of action and time», *Artificial Intelligence*, 23, (1984), 123-154.
- [9] Nökel, K., *Temporally distributed symptoms in technical diagnosis*, Berlín, Springer-Verlag, 1991.
- [10] Berlanga, R.; Barber, F.; Verdú, F. and Ibáñez, F., «Solving job-scheduling problems using temporal constraint-based heuristics» *Actas de CAEPIA'95*, (1995), 141-150.
- [11] Barro, S.; Bugarín, A.; Félix, P.; Ruiz, R.; Marín, R. and Palacios, F., «Fuzzy logic applications in cardiology: study of some cases», en *Fuzzy Logics and Soft Computing*, eds. Bouchon-Menier, R. Yager and L. Zadeh, World Scientific, 1995.
- [12] Vitek, M., «Fuzzy information and fuzzy time», *Proc. of the IFAC Symp. Fuzzy Information, Knowledge Representation and Decision Analysis*, (1983), 159-162.
- [13] Dutta, S., «Temporal reasoning in medical experts systems», *Proc. of the Symp. on the Engineering of Computer-Based Medical Systems*, (1988), 118-122.
- [14] Dutta, S., «An event based fuzzy temporal logic», *Proc. of the 18th IEEE Int. Symp. on Multiple-Valued Logic*, (1988), 64-71.
- [15] Kim, H. and Oh, K., «A new representation model in uncertain temporal knowledge», *Proc. of the IFSA'91*, (1991), 113-116.
- [16] Dubois, D. and Prade, H., «Processing fuzzy temporal knowledge», *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*, 19(4), (1989), 729-774.
- [17] Console, L., Rivolin, J. and Torasso, P., «Fuzzy temporal reasoning on causal models», *Int. J. of Intelligent Systems*, 6, (1991), 107-133.
- [18] Qian, D., «Representation and use of imprecise temporal knowledge in dynamics systems», *Fuzzy Sets and Systems*, 50, (1992), 59-77.
- [19] Barro, S.; Marín, R.; Otero, R. P.; Ruiz, R. and Mira, J., «On the handling of time in intelligent monitoring of CCU patients», *Proc. of the 14th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, (1992), 871-873.
- [20] Marín, R.; Barro, S.; Bosch, A.; Navarrete, I.; Cárdenas, M.; Bugarín, A. and Mira, J., «Un modelo para la representación de información temporal borrosa», *Actas del III Congreso Español sobre Tecnologías y Lógica Fuzzy*, (1993), 209-216.
- [21] Barro, S.; Marín, R.; Mira, J. and Rodríguez-Patón, A., «A model and a language for the fuzzy representation and handling of time», *Fuzzy Sets and Systems*, 61, (1994), 153-175.
- [22] Godo, L. and Vila, L., «A temporal reasoning system based on fuzzy temporal constraints», *Actas del IV Congreso Español sobre Tecnologías y Lógica Fuzzy*, (1994), 43-48.
- [23] Vila, L. and Godo, L., «Query answering in fuzzy temporal constraints», *Actas del IV Congreso Español sobre Tecnologías y Lógica Fuzzy*, (1994), 65-70.
- [24] Presedo, J.; Vila, J.; Barro, S.; Palacios, F.; Ruiz, R.; Taddei, A. and Emdin,

- M., «Fuzzy modelling of expert's knowledge in ECG-based ischaemia detection», *Fuzzy Sets and Systems*, 1995 (pendiente de publicación).
- [25] Félix, P., Barro, S. and Marín, R., «Un lenguaje para la expresión de patrones temporales borrosos», *Actas de CAEPIA'95*, (1995), 353-366.
- [26] Marín, R., Barro, S. and Palacios, F., «Una aplicación del razonamiento temporal a la monitorización de pacientes», *Boletín de la AEPIA*, 1996 (pendiente de publicación).