CAPITULO 1

REPRESENTACIÓN DE CONOCIMIENTO TEMPORAL

- **El Especialista Temporal de Kahn y Gorry**
- **Modelo de Allen**
- **Álgebra de Puntos Temporales**
- **Resumen**
- **Textos básicos**

1. REPRESENTACIÓN DE CONOCIMIENTO TEMPORAL

En todo sistema físico en estudio, la inclusión de la variable tiempo incrementa la dificultad asociada al tratamiento de los problemas del dominio. La inteligencia artificial contempla el problema temporal desde dos puntos de vista diferentes:

- La representación computacional de la información dependiente del tiempo.
- El razonamiento basado en información temporal

La utilización de información temporal es importante en muchos dominios y problemas, ya que permite:

- Identificar contextos temporales
- Comparar datos pasados entre sí
- Realizar predicciones

Algunos ejemplos en donde la información temporal es importante son los siguientes:

- SI HA SUFRIDO UNA INTERVENCION QUIRURGICA RECIENTE, ENTONCES...

- SI LAS ELECCIONES HAN TENIDO LUGAR HACE MENOS DE 7 DIAS, ENTONCES…

- SI LA PRESION DEL REACTOR SE HA MANTENIDO ESTABLE DURANTE LOS ULTIMOS VEINTE MINUTOS, ENTONCES…

El problema de la representación del conocimiento temporal puede ser tratado desde dos puntos de vista: el sintáctico y el semántico.

Para el tratamiento sintáctico de la información temporal se pueden utilizar asociaciones etiqueta-evento:

HIPOTENSION_SEVERA	FECHA:	03/09/94	HORA:	17:15
SHOCK_HIPOVOLEMICO	FECHA:	03/09/94	HORA:	17:45

o grafos de evolución (en los que se indican relaciones temporales y no sólo relaciones causales):

HIPOTENSION_SEVERA $\rightarrow$ SHOCK_HIPOVOLEMICO

Desde una perspectiva semántica, el tiempo se emplea normalmente como contexto, y suele estar implícito.

En relación con los procesos inferenciales el tiempo es importante ya que permite el establecimiento de relaciones causales. Tales relaciones, importantísimas en IA, son el resultado de considerar conjuntamente los hallazgos efectuados durante el proceso inferencial y la cronología de tales hallazgos. En este sentido, el establecimiento de relaciones causales basadas en información temporal permite aumentar las capacidades predictivas de nuestros sistemas inteligentes.

En cualquier caso, los problemas clave de la representación del conocimiento temporal son:

- La representación del eje temporal
- El ajuste de la granularidad

Al respecto, podemos considerar que el eje temporal está constituido por una secuencia de puntos discretos de forma que los eventos suceden en instantes concretos de dicho eje. Otra forma de considerar el eje temporal es suponer una secuencia continua de intervalos, de forma que los eventos suceden en alguno de tales segmentos temporales. En ambos casos la representación del conocimiento será diferente.

En cuanto al ajuste de granularidad temporal, es importante que la representación sea capaz de contemplar intervalos de tiempo más o menos largos dependiendo del contexto. La idea es similar al hecho de que para medir el tamaño de una persona utilizamos centímetros, mientras que la longitud del diámetro terrestre la expresamos en kilómetros.

Además de considerar los dos puntos anteriores, también precisamos de un modelo que sea capaz de manejar la información temporal. En este capítulo veremos algunos ejemplos de estos modelos.

1.1. El Especialista Temporal de Kahn y Gorry

Entre los primeros trabajos que abordan la problemática de la representación temporal podemos destacar la aproximación de Kahn y Gorry (1977) y su “especialista temporal”.

Kahn y Gorry indican que el conocimiento temporal puede, en gran parte, incluirse en un conjunto de rutinas a las que se refieren colectivamente como el “especialista temporal”. Dicho especialista temporal estará al servicio de un programa de resolución de problemas para tratar aquellas cuestiones temporales que aparezcan en el dominio. El especialista temporal se alimenta con una serie de sentencias que hacen referencia a cuestiones temporales. El programa de resolución de problemas puede preguntar al especialista que haga deducciones, y que responda a una serie de preguntas sobre dichas sentencias temporales.

<u>Una sesión con el especialista temporal</u>

Para hacernos una idea del funcionamiento del especialista temporal podemos ver una conversación con el mismo. Para facilitar la exposición se han traducido las sentencias temporales a lenguaje natural.

Usuario: Nací el 25 de Enero de 1952. Cuando sólo tenía semanas me operaron. Empecé la educación primaria a los 5 años y terminé en Junio de 1965. Fui a Inglaterra dos años después. Estuve allí 8 ó 9 semanas.

Usuario: ¿Qué edad tenía cuando fui a Inglaterra?

Sistema: 15.5 años con un margen de error de 1.6 meses.

Usuario: Explica tu respuesta.

Sistema: La fecha del final del viaje a Inglaterra es 17-Ago-1967 con un margen de error de 1.6 meses y la fecha de nacimiento es 25-Ene-1952, viernes.

Usuario: ¿Cuánto tiempo hace que fui a Inglaterra?

Sistema: Entre 8 y 8.3 años.

Usuario: ¿Qué pasó antes de que cumpliera 10 años?

Sistema: El comienzo de la educación primaria, la operación y el nacimiento.

Usuario: Nací el 5 de Mayo de 1955.

Sistema: Pensaba que la fecha de nacimiento era el 25-Ene-1952, no 5-May-1955. ¿Se refiere al mismo nacimiento?

Usuario: Sí

Sistema: ¿Es correcto 5-May-1955?

Usuario: Sí

Sistema: Anteriormente se me preguntó que edad tenía la persona al final del viaje a Inglaterra y respondí que 15.5 años con un margen de 1.6 meses. Sin embargo, mi razonamiento estaba basado en el hecho de que el nacimiento era el 25-Ene-1952, que ahora dice que es incorrecto. Puedo olvidarlo o puedo contestar la pregunta otra vez. ¿Vuelvo a hacer los cálculos?

Usuario: Sí.

Sistema: La respuesta ahora es 12.3 años con un margen de 1.6 meses.

Como vemos el especialista temporal acepta especificaciones temporales de diversos formatos, detecta inconsistencias y vuelve a deducir hechos basados en las especificaciones que causaban la inconsistencia.

Representación de las referencias temporales.

Una especificación temporal es una sentencia que parcialmente establece la relación temporal entre dos eventos, cada uno de los cuales puede ser considerado un punto de tiempo. Las especificaciones temporales que referencian más de dos eventos pueden ser descompuestas en sentencias más sencillas que sólo involucren dos eventos temporales. Uno de los eventos de la especificación suele actuar como evento de referencia. Algunos ejemplos de especificaciones temporales serían:

- Juan tuvo un resfriado hace tres semanas.
- Juan nació el 6 de Junio de 1966
- Dos o tres años después de graduarse Juan regresó a su escuela.

En el primer caso el evento de referencia es el momento actual, en el segundo el evento de referencia sería el "punto cero" del calendario, y en el tercer caso el momento de su graduación.

El hecho de utilizar puntos de tiempo obliga a que las referencias temporales que involucran intervalos temporales sean divididas en dos eventos separados que corresponden al inicio y al final de la ocurrencia. Por ejemplo la expresión: "Juan iba hacia el colegio cuando se cayó de la bicicleta" debería ser introducida en el especialista temporal como "Juan se cayó de la bicicleta después de salir hacia el colegio y antes de llegar al colegio".

Organización de las especificaciones temporales

El modo según el cual el especialista temporal organiza las especificaciones temporales es importante, ya que esta organización tiene mucha influencia en la eficiencia con que se responde a las distintas cuestiones.

El especialista temporal presenta tres formas distintas de organizar las especificaciones temporales (Figura 1.1):

- Fechas: Inserta los eventos en una línea temporal según su fecha. Admite expresiones difusas permitiendo incluir sus límites superior e inferior.

- Eventos de referencia: Pueden existir eventos temporales que son usados con frecuencia y cuya fecha se conoce con exactitud. En ese caso pueden usarse dichos eventos para calcular la fecha de otros eventos relacionados con ellos.

- Cadenas antes/después: Las cadenas antes/después ocurren cuando los eventos principales forman una secuencia.

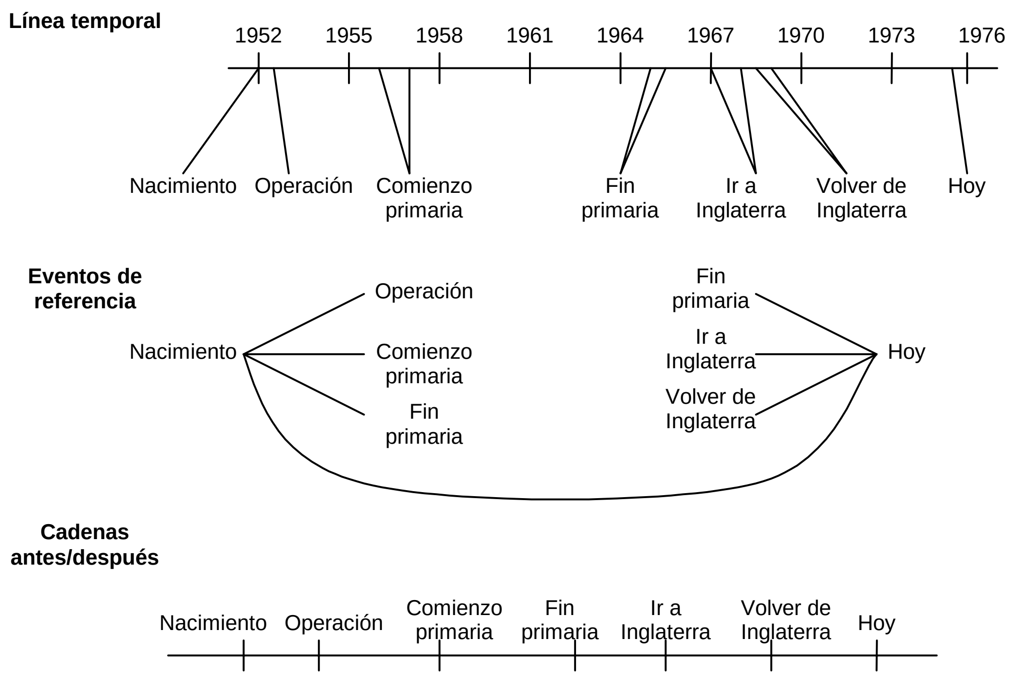


Figura 1.1 Formas de organizar las referencias temporales.

La decisión de qué esquema de organización utilizar está bajo el control del usuario.

Preguntas al especialista temporal

El especialista temporal puede responder tres tipos de preguntas acerca de los hechos almacenados en sus base de datos:

(1) ¿Sucedió X en la expresión temporal T?

(2) ¿Cuándo sucedió X?

(3) ¿Qué sucedió en la expresión temporal T?

La capacidad del especialista temporal de responder preguntas reside en un conjunto de programas llamados colectivamente “fetcher” (buscador). Las tareas del fetcher son aceptar un patrón que especifica una pregunta, interpretar el patrón para determinar el tipo de pregunta y seleccionar los métodos adecuados para responderla. Cada método es un programa independiente diseñado para responder un tipo particular de pregunta haciendo uso de una organización de hechos concreta de la base de datos.

1.2. Modelo de Allen

El modelo de Allen se basa en la utilización de intervalos de tiempo como elementos fundamentales para establecer relaciones temporales. Allen justifica esta aproximación basándose en que la utilización de intervalos permite representar de forma más natural la información temporal. Para ilustrar esta teoría Allen presenta los siguientes ejemplos:

(a) Generalmente las referencias temporales serán vagas e implícitas como por ejemplo: "Encontramos la carta mientras Juan estaba fuera". Este tipo de situaciones se representa de forma más sencilla a través de intervalos que a través de puntos.

(b) Algunos eventos parecen ser instantáneos (cualquiera podría decir que el hecho de encontrar la carta se produce en un instante de tiempo), pero si examinamos estos eventos minuciosamente veremos que podrían ser descompuestos en nuevos eventos (encontrar la carta se puede descomponer en "mirar al lugar donde estaba la carta" y "darse cuenta de que la carta está en el sitio donde se está mirando"). A su vez, estos nuevos eventos se podrían descomponer en otros nuevos eventos. Debido a esto la utilización de puntos de tiempo no sería útil ya que éstos no se pueden descomponer.

(c) Existen una serie de ejemplos en los cuales el uso de puntos de tiempo de anchura cero nos conducen a situaciones problemáticas: Imaginemos que tenemos dos intervalos de tiempo: uno, en el cual tenemos una lámpara apagada seguido de otro, en el que la lámpara está encendida. Ahora el problema está en determinar si estos intervalos son abiertos o cerrados. Si ambos son abiertos existe un punto de tiempo entre los dos intervalos en el cual la lámpara no está ni apagada ni encendida. Si ambos son cerrados existe un punto de tiempo entre los dos intervalos en el cual la lámpara está apagada y encendida. La solución podría estar en adoptar el convenio de que los intervalos son cerrados en el inicio y abiertos en el final. De esta forma los intervalos sólo tendrían un punto final. La artificialidad de esta solución enfatiza el hecho de que el modelo de tiempo basado en puntos no corresponde a la idea intuitiva que tenemos sobre el tiempo.

(d) Si permitimos puntos de tiempo, los intervalos pueden ser representados por sus puntos finales; así, podemos definir un intervalo como un par ordenado de puntos sobre la línea real que define el tiempo, en donde el primer punto es menor que el segundo. Allen explica que esta solución no es conveniente debido a que no facilita estructurar el conocimiento de una manera adecuada para la realización de tareas típicas de razonamiento temporal.

Relaciones Temporales de Allen.

Una vez que hemos establecido que el elemento básico de la representación temporal es el intervalo, es necesario definir las posibles relaciones existentes entre dichos intervalos. Allen define un total de trece posibles relaciones entre un par ordenado de intervalos de tiempo (Tabla 1.1).

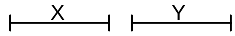
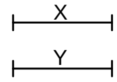
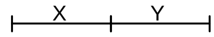
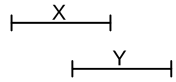
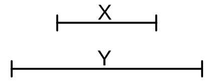
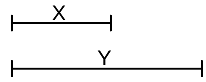
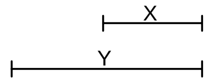
Relación	Símbolo	Símbolo para la inversa	Ejemplo gráfico
X antes Y (before)	< ó b	> ó bi	
X igual Y (equal)	= ó eq	no tiene inversa	
X seguido de Y (meets)	m	mi	
X superpuesto a Y (overlaps)	o	oi	
X durante Y (during)	d	di	
X comienza Y (starts)	s	si	
X finaliza Y (finishes)	f	fi	

Tabla 1.1 Las trece posibles relaciones entre intervalos de tiempo de Allen (la relación igual no tiene inversa).

Las relaciones entre intervalos se representan en una red en donde los nodos son intervalos individuales y los arcos entre dichos nodos con etiquetas que indican las posibles relaciones existentes entre ellos. Si existe incertidumbre sobre la relación que debe existir en un determinado arco, la solución propuesta es poner todos los casos posibles en el arco. De esta forma los arcos son etiquetados con vectores de relaciones, que indican que dicho arco puede llevar cualquiera de las condiciones que aparecen en el vector. Por ejemplo, *i* durante *j* ó *i* antes *j* ó *j* durante *i*, se representaría como:

$$Ni \xrightarrow{(<,\ d,\ di)} Nj$$

De esta manera podemos ver que existen $2^{13} = 8192$ relaciones posibles entre un par ordenado de intervalos.

La red siempre mantiene una información completa sobre los intervalos. Cuando se introduce una nueva relación se deben calcular todas las consecuencias que conlleve esta introducción. Esto se hace calculando el cierre transitivo de las relaciones temporales de la siguiente manera: el nuevo hecho añade una restricción sobre como sus dos intervalos deberían ser relacionados, lo que podría, sucesivamente, introducir nuevas restricciones entre nuevos intervalos a través de las reglas de transitividad que gobiernan las relaciones temporales (Tabla 1.2). Por ejemplo, si añadimos el hecho de que i sucede durante j y ya teníamos en la red que j está antes que k, entonces podemos inferir que i debe estar antes que k. Este nuevo hecho se añade a la red y posiblemente introduzca nuevas restricciones entre las relaciones de nuevos intervalos.

A r1 B \ B r2 C	<	>	d	di	o	oi	m	mi	s	si	f	fi
"antes" <	<	??	< o m d s	<	<	< o m d s	<	< o m d s	<	<	< o m d s	<
"después" >	??	>	> oi mi d f	>	> oi mi d f	>	> oi mi d f	>	> oi mi d f	>	>	>
"durante" d	<	>	d	??	< o m d s	> oi mi d f	<	>	d	> oi mi d f	d	< o m d s
"contiene" di	< o m di fi	> oi di mi si	o oi d di =	di	o di fi	oi di si	o di fi	oi di si	di fi o	di	di si oi	di
"superpuesto a" o	<	> oi di mi si	o d s	< o m di fi	< o m	o oi d di =	<	oi di si	o	di fi o	d s o	< o m
"superpone a" oi	< o m di fi	>	oi d f	> oi mi di si	o oi d di =	> oi mi	o di fi	>	oi d f	oi > mi	oi	oi di si
"seguido de" m	<	> oi mi di si	o d s	<	<	o d s	<	f fi =	m	m	d s o	<
"sigue a" mi	< o m di fi	>	oi d f	>	oi d f	>	s si =	>	d f oi	>	mi	mi
"comienza" s	<	>	d	< o m di fi	< o m	oi d f	<	mi	s	s si =	d	< m o
"comenzado por" si	< o m di fi	>	oi d f	di	o di fi	oi	o di fi	mi	s si =	si	oi	di
"finaliza" f	<	>	d	> oi mi di si	o d s	> oi mi	m	>	d	> oi mi	f	f fi =
"finalizado por" fi	<	> oi mi di si	o d s	di	o	oi di si	m	si oi di	o	di	f fi =	fi

Tabla 1.2 Tabla de transitividad para las relaciones temporales (omitiendo la relación =). Cada celda de la tabla muestra las relaciones finales existentes entre los intervalos A y C dadas las relaciones existentes entre A – B y B – C.

El algoritmo para realizar esta propagación es el siguiente:

- En primer lugar definiremos la subrutina "Restricciones" que es la función de transitividad para listas de relaciones (como las etiquetas de los arcos). En dicha subrutina *r1* y *r2* son relaciones temporales, *T*(*r1*, *r2*) es la entrada en la tabla de transitividad para esas relaciones, *R1* y *R2* son etiquetas de arcos y ε representa el conjunto vacío.

Restricciones (*R1*, *R2*)
    $C \leftarrow \varepsilon$;
    Para cada *r1* en *R1*
        Para cada *r2* en *R2*
            $C \leftarrow C \cup T(r1, r2)$;
    Devuelve *C*;

- Asumimos que tenemos una cola denominada *PorHacer* y que tenemos definidas las operaciones apropiadas sobre la cola. Sean entonces i, j intervalos; $N(i, j)$ las relaciones que hay entre i y j en el arco de la red, y $R(i, j)$ la nueva relación entre i y j que se añade a la red, entonces el algoritmo final para actualizar la red temporal es el siguiente:

Añadir $R(i, j)$
    Añadir <i, j> a la cola *PorHacer*;
    Mientras *PorHacer* no es vacía **hacer**
    Comienzo
        Coger el siguiente <i, j> de la cola *PorHacer*;
        $N (i, j) \leftarrow R (i, j)$;
        para cada nodo k de forma que Comparable(k, j) **hacer**
        Comienzo
            $R (k, j) \leftarrow N (k, j) \cap$ Restricciones $(N (k, i), R (i, j))$
            Si $R (k, i) \subset N (k, i)$
                entonces Añadir <k, i> a *PorHacer*
        Fin
        Para cada nodo k de forma que Comparable (j, k) **hacer**
        Comienzo
            $R (i, k) \leftarrow N (i, k) \cap$ Restricciones $(R (i, j), N (j, k))$
            Si $R (i, k) \subset N (k, i)$
                entonces Añadir <i, k> a *PorHacer*
        Fin
    Fin

Inicialmente, y por motivos de sencillez, podemos suponer que el predicado “Comparable” devuelve “cierto” para cualquier par de nodos.

Para reducir los requisitos de espacio de la representación sin afectar de forma importante a los mecanismos inferenciales, Allen introduce los llamados “intervalos de referencia”. Podemos definir un intervalo de referencia como un intervalo temporal cualquiera pero con la característica añadida de que agrupa intervalos. Las restricciones temporales entre cada par de intervalos incluidos en un intervalo de referencia están calculadas de antemano. Cada intervalo se relaciona con el resto de intervalos del sistema únicamente a través del intervalo de referencia.

En este caso es necesario redefinir el predicado Comparable visto anteriormente: Para cualquier nodo N definimos Referencia(N) como el conjunto de intervalos de referencia para N. Para cualesquiera dos nodos K y J, Comparable (K, J) es cierto si:

(1) Referencia (K) $\cap$ Referencia (J) no es vacía, es decir, comparten un intervalo de referencia; o

(2) $K \in$ Referencia (J); o

(3) $J \in$ Referencia (K).

Como los intervalos de referencia tienen el mismo comportamiento que los intervalos temporales, pueden tener así mismo intervalos de referencia definiendo de esta manera, una jerarquía de grupos representable gráficamente mediante un árbol.

Lógica temporal de Allen

Basándose en las relaciones entre intervalos temporales descritas en el apartado anterior, Allen establece una lógica temporal que, básicamente, consiste en una extensión temporal de la lógica de predicados de primer orden.

La lógica consta de tres tipos básicos de términos:

- Términos del tipo **INTERVALO DE TIEMPO** que, evidentemente, representan intervalos de tiempo.
- Términos del tipo **PROPIEDAD**, que se refieren a proposiciones que pueden ser ciertas o no durante un determinado intervalo de tiempo.
- Términos que corresponden a objetos en el dominio.

Uno de los predicados más importantes es SE_MANTIENE(p,t): la propiedad p se cumple durante todo el intervalo t.

Las primitivas básicas de relaciones entre intervalos son las ya dadas anteriormente:

- DURANTE(t_1,t_2): t_1 está totalmente contenido en t_2
- COMIENZA(t_1,t_2): empiezan juntos pero acaba antes t_1
- FINALIZA(t_1,t_2):acaban juntos pero empieza antes t_2
- ANTES(t_1,t_2): t_1 es antes de t_2 y no se tocan
- SUPERPUESTO(t_1,t_2): t_1 empieza antes que t_2, y se solapan
- SEGUIDO(t_1,t_2): t_1 está justo antes que t_2
- IGUAL(t_1,t_2): son el mismo intervalo

Pueden obtenerse axiomas adicionales, como:

ANTES (t_1, t_2) $\wedge$ ANTES (t_2, t_3) $\Rightarrow$ ANTES (t_1, t_3)

SEGUIDO (t_1, t_2) $\wedge$ DURANTE (t_2, t_3) $\Rightarrow$ SUPERPUESTO (t_1, t_3) $\vee$ DURANTE(t_1, t_3) $\vee$ SEGUIDO (t_1, t_3)

Podemos definir también un nuevo predicado:

EN (t_1, t_2) $\Leftrightarrow$ (DURANTE (t_1, t_2) $\vee$ COMIENZA (t_1, t_2) $\vee$ FINALIZA (t_1, t_2))

Gracias a esto, podemos definir la propiedad esencial de SE_MANTIENE: si *p* se cumple durante *T*, se cumple en todo subintervalo de *T*.

SE_MANTIENE (p, t) $\Leftrightarrow$ ($\forall t$. EN (t, T) $\Rightarrow$ SE_MANTIENE (p, t))

Hay una serie de funciones and, or, not, all y exists que permiten expresiones lógicas. Por ejemplo:

SE_MANTIENE ($\neg p$, T) $\Leftrightarrow$ ($\forall$ t. EN (t, T) $\Rightarrow$ $\neg$SE_MANTIENE (p, t))

Al contrario:

$\neg$SE_MANTIENE(p,T)

es equivalente a:

$\neg$ ($\forall$ t EN(t, T) $\Rightarrow$ MANTIENE (p, t))

Como vemos el modelo de las relaciones temporales de Allen le da a la variable temporal una representación formal. Su implementación es sencilla al estar basado en la lógica de predicados de primer orden.

Críticas al modelo de Allen

Las críticas al modelo de Allen se han centrado sobre todo en el hecho de no utilizar puntos de tiempo y basar su representación en intervalos temporales. Estas críticas las podemos clasificar en dos grupos:

- Críticas a la representación del conocimiento.
- Críticas a la complejidad de los cálculos hechos con intervalos temporales.

Entre las críticas a la representación del conocimiento podemos destacar el trabajo de Galton (1990) para quien el modelo de Allen no es adecuado para representar hechos que están en movimiento continuo. Según Galton, el movimiento continuo implica que un objeto cualquiera no puede estar en una posición en un intervalo de tiempo, ya que eso significaría que durante ese intervalo el objeto estuvo parado. Un objeto estaría en una posición diferente en cada instante de tiempo.

Por ello, Galton propone una revisión al modelo de Allen en el que se incluyan instantes temporales además de intervalos. De esta forma podrían incluirse dos nuevos predicados:

- DentroDe(I, T) $\Rightarrow$ El instante *I* cae en el intervalo *T*.
- Limita(I, T) $\Rightarrow$ El instante *I* limita al intervalo *T*.

En cuanto a las críticas a la complejidad de los cálculos realizados con intervalos temporales podemos destacar los trabajos de Vilain y Kautz (1986) y van Beek (1992, 1996). Estos autores reconocen en el modelo de Allen su sencillez y su fácil implantación, sin embargo indican que el álgebra de intervalos en la que se basa el modelo de Allen requiere gran cantidad de recursos computacionales.

Al respecto, existen dos operaciones que se consideran fundamentales dentro del razonamiento temporal:

- Búsqueda de todas las relaciones posibles entre pares de intervalos (o puntos). Se hace mediante un razonamiento deductivo atendiendo a las relaciones transitivas entre intervalos temporales.

- Búsqueda de un escenario consistente con la información suministrada. Lo que significa encontrar una subred de la red actual en la que cada nodo se etiquete con una sólo relación y que exista una instanciación consistente de dicha subred. Si no existe dicha instanciación significa que la red es inconsistente.

Para ilustrar estas operaciones podemos pensar el siguiente ejemplo, en el que partimos de las siguientes especificaciones temporales:

- " Juan estaba leyendo el periódico mientras tomaba el desayuno "
- " Posó el periódico y bebió lo que le quedaba de su café "
- " Después de desayunar se fue a dar un paseo "

En la Figura 1.2(a) podemos ver la red inicial que podemos construir. A partir de las relaciones transitivas podemos extender esta red hasta obtener todas las posibles relaciones en base a razonamientos deductivos, tal y como se muestra en la Figura 1.2(b). Un escenario consistente con la descripción de eventos de la red formada se muestra en la Figura 1.2(c) lo cual nos permite encontrar una ejemplificación consistente como se muestra en la Figura 1.2(d).

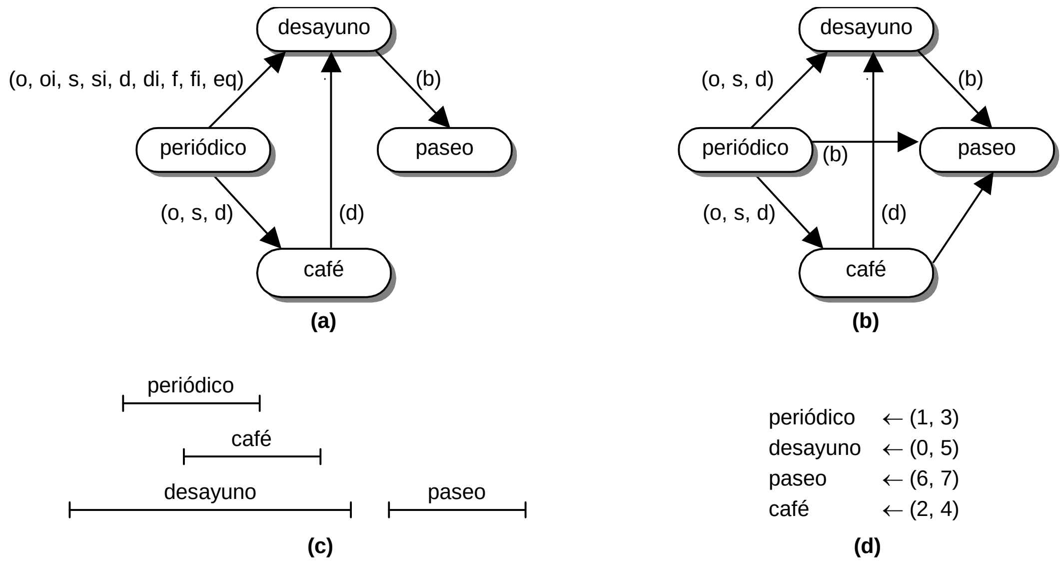


Figura 1.2 (a) Red inicial, (b) red en la que se incluyen todas las relaciones posibles entre pares de intervalos, (c) escenario consistente y (d) ejemplificación del escenario consistente.

En el álgebra de intervalos, estas dos operaciones son NP-completas, lo que significa que serán intratables computacionalmente en la mayoría de los casos. Esto implica que sea complicado realizar consultas complejas a nuestra base de datos temporal.

Para solucionar este problema Vilain y Kautz, y posteriormente van Beek proponen un álgebra más sencilla, basada en puntos de tiempo, y presentan un método para convertir las representaciones en intervalos temporales en representaciones en puntos temporales. Como veremos en el siguiente apartado esta transformación no siempre es posible.

1.3. Álgebra de Puntos Temporales

Una alternativa al razonamiento basado en intervalos de tiempo es el basado en puntos de tiempo. En el álgebra de puntos, éstos se relacionan entre sí a través de vectores de relación, cada uno de los cuales está compuesto por un conjunto de relaciones básicas entre puntos (Tabla 1.3).

Relación	Símbolo	Ejemplo gráfico
X precede Y (precedes)	<	X ● Y ●
X igual Y (same)	=	X ● Y ●
X sigue Y (follows)	>	Y ● X ●

Tabla 1.3 Las tres posibles relaciones entre puntos de tiempo.

Vilain y Kautz definen dos operaciones básicas entre puntos o intervalos de tiempo:

- Suma: Representa la intersección entre dos vectores que definen una relación entre intervalos (o puntos) para devolver aquel vector que representa la relación menos restrictiva permitida.

Ej: V_1 = (Antes, Seguido de, Superpuesto a)
V_2 = (Superpuesto a, Comienza, Durante)
$V_1 + V_2$ = (Superpuesto a)

- Multiplicación: Es la operación que Allen denominaba Restricciones y que dados tres intervalos (A, B y C) y un vector V_1 que relaciona A y B, y un vector V_2 que relaciona B y C, permite obtener el vector menos restrictivo que relaciona A con C.

Ej: V_1 = (Antes, Seguido de, Superpuesto a)
V_2 = (Antes, Seguido de)
$V_1 \times V_2$ = (Antes)

El álgebra temporal basada en puntos posee también las operaciones de adición y producto. Las tablas de estas operaciones se muestran en la Tabla 1.4 y en la Tabla 1.5.

Las claves para interpretar las tablas son las siguientes:

∅	es	(), el vector nulo.
>	es	(PRECEDE).
≤	es	(PRECEDE, IGUAL).
>	es	(SIGUE).
≥	es	(IGUAL, SIGUE).
=	es	(IGUAL).
≠	es	(PRECEDE, SIGUE).
?	es	(PRECEDE, IGUAL, SIGUE).

+	<	≤	>	≥	=	~=	**?**
<	<	<	∅	∅	∅	<	<
≤	<	≤	∅	=	=	<	≤
>	∅	∅	>	>	∅	>	>
≥	∅	=	>	≥	=	>	≥
=	∅	=	∅	=	=	∅	=
~=	<	<	>	>	∅	≠	≠
?	<	≤	>	≥	=	≠	?

Tabla 1.4 Adición en el álgebra de puntos temporales

×	<	≤	>	≥	=	≠	**?**
<	<	<	?	?	<	?	?
≤	<	≤	?	?	≤	?	?
>	?	?	>	>	>	?	?
≥	?	?	>	≥	≥	?	?
=	<	≤	>	≥	=	≠	?
≠	?	?	?	?	≠	?	?
?	?	?	?	?	?	?	?

Tabla 1.5 Multiplicación en el álgebra de puntos temporales

Para las redes de puntos, van Beek presenta algoritmos más eficientes para realizar las tareas del razonamiento temporal. En concreto define un algoritmo de complejidad $O(n^2)$ en el tiempo para la tarea de encontrar un escenario consistente (en donde n es el número de puntos), y define un algoritmo de complejidad $O(\max(mn^2, n^3))$ en el tiempo para encontrar todas las posibles relaciones entre puntos de tiempo (en donde n es el número de puntos y m es el número de pares de puntos que no pueden considerarse iguales).

Álgebra de puntos vs. álgebra de intervalos

La facilidad en el tratamiento del álgebra de puntos parece hacerla más adecuada para la representación del tiempo. La mayoría de los problemas que requieren manejar relaciones temporales pueden ser representados mediante puntos de tiempo.

Sin embargo, los puntos de tiempo son inadecuados para representar, por sí mismos, toda la semántica del lenguaje natural. Además presenta muchos inconvenientes para modelizar muchos de los eventos y acciones del mundo real. En estos casos, la representación temporal basada en intervalos es mejor.

La mayoría de las relaciones basadas en intervalos tienen una traducción directa en álgebra de puntos. Se puede considerar que un intervalo queda delimitado por sus puntos extremos (inicial y final), traduciendo las relaciones existentes entre intervalos a relaciones entre los puntos extremos de dichos intervalos.

Por ejemplo, la relación entre intervalos A (o, s, d) B puede ser traducida por las siguientes aserciones basadas en puntos: $(A^- < A^+) \wedge (A^+ > B^-) \wedge (B^- < B^+) \wedge (A^+ < B^+)$, en donde A^- denota el punto inicial del intervalo A, A^+ el punto final y de forma similar para B. La red de puntos resultante sería la mostrada en la Figura 1.3.

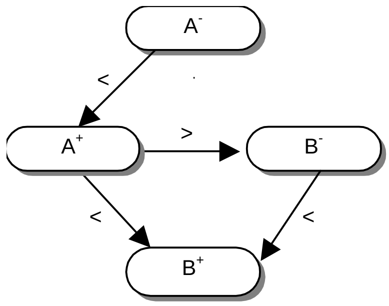


Figura 1.3 Red de puntos resultante de la relación A (o, s, d) B

Sin embargo no todas las relaciones entre intervalos pueden ser expresadas sin pérdidas como relaciones entre sus puntos inicio y fin. En concreto lo que no puede expresarse con puntos son expresiones en las que aparecen disyunciones. Así, por ejemplo, la relación A (b, bi) B entre intervalos significa que A está antes o después que B. Para expresar esta relación con puntos necesitamos hacer uso de la disyunción,

$$((A^- < B^-) \wedge (A^- < B^+) \wedge (A^+ < B^-) \wedge (A^+ < B^+) \vee$$
$$(A^- > B^-) \wedge (A^- > B^+) \wedge (A^+ > B^-) \wedge (A^+ > B^+))$$

La aproximación más cercana a esta expresión utilizando solo conjunciones sería:

$$(A^- \neq B^-) \wedge (A^- \neq B^+) \wedge (A^+ \neq B^-) \wedge (A^+ \neq B^+)$$

Sin embargo pasando esta expresión a álgebra de intervalos obtenemos A (b, bi, o, oi, d, di) B, que contempla la posibilidad de que A y B se superpongan, lo cual no se indicaba en la relación inicial A (b, bi) B.

De esta forma vemos que existen dos tipos de redes temporales: basadas en intervalos (Interval Algebra) y basadas en puntos (Point Algebra). También existirá un subconjunto de las redes basadas en intervalos denominadas redes SIA (Simple Interval Algebra) las cuales son directamente representables en base a redes basadas en puntos. Las redes SIA incluyen todas las relaciones no ambiguas entre intervalos, es decir, relaciones que pueden ser expresadas usando vectores que contienen sólo un simple constituyente. También incluyen muchas relaciones ambiguas, pero no todas. Se puede representar la ambigüedad en relación de pares de puntos finales, pero no se puede representar en relación a intervalos completos.

Las redes SIA solo admiten un pequeño subconjunto de las 2^{13} relaciones permitidas en las redes basadas en intervalos (Tabla 1.6). Sin embargo este subconjunto permite que la mayoría de la redes basadas en intervalos de la bibliografía sean SIA.

	A^-B^-	A^-B^+	A^+B^-	A^+B^+		A^-B^-	A^-B^+	A^+B^-	A^+B^+
(b)	?	?	<	?	(b, m, o, s)	≤	?	?	<
(m)	?	?	=	?	(b, m, o, fi)	<	?	?	≤
(o)	<	?	>	<	(m, o, s, d)	?	?	≥	<
(s)	=	?	?	<	(m, o, di, fi)	<	?	≥	?
(d)	>	?	?	<	(o, s, fi, eq)	≤	?	>	≤
(f)	>	?	?	=	(s, d, f, eq)	≥	?	?	≤
(eq)	=	?	?	=	(b, m, o, s, d)	?	?	?	<
(b, m)	?	?	≤	?	(b, m, o, di, fi)	<	?	?	?
(m, o)	<	?	≥	<	(m, o, s, fi, eq)	≤	?	≥	≤
(o, s)	≤	?	>	<	(b, m, o, s, fi, eq)	≤	?	?	≤
(o, fi)	<	?	>	≤	(o, s, d, f, fi, eq)	?	?	>	≤
(s, d)	≥	?	?	<	(o, s, si, di, fi, eq)	≤	?	>	?
(s, eq)	=	?	?	≤	(m, o, s, d, f, fi, eq)	?	?	≥	≤
(d, f)	>	?	?	≤	(m, o, s, si, di, fi, eq)	≤	?	≥	?
(f, eq)	≥	?	?	=	I – (b, m, o, s, d)	?	?	?	≥
(b, m, o)	<	?	?	<	I – (b, m, o, di, fi)	≥	?	?	?
(m, o, s)	≤	?	≥	<	I – (b, bi, m, mi)	?	<	>	?
(m, o, fi)	<	?	≥	≤	I – (b, bi, m)	?	≤	>	?
(o, s, d)	?	?	>	<	I – (b, m)	?	?	>	?
(o, di, fi)	<	?	>	?	I – (b, bi)	?	≤	≥	?
(s, si, eq)	=	?	?	?	I – (b)	?	?	≥	?
(f, fi, eq)	?	?	?	=	I	?	?	?	?

Tabla 1.6 Relaciones admitidas en las redes SIA y su equivalente en una representación basada en puntos. Las relaciones A- < A+ y B- < B+ se consideran siempre ciertas. No se muestran las operaciones inversas (por ejemplo (bi) también es una relación válida en redes SIA).I representa el conjunto que comprende las 13 relaciones básicas.

En la actualidad la investigación también se dirige ha desarrollar nuevos algoritmos para el álgebra de intervalos que sean eficientes para la mayoría de situaciones típicas que suelen aparecer en la representación temporal.

1.4. Resumen

En muchas situaciones, para la resolución de problemas es necesario tener en cuenta la variable temporal y es necesario proveer a los sistemas inteligentes de una base de conocimientos temporal. En este capítulo revisamos los trabajos más importantes desarrollados en este campo. Comenzamos con el especialista temporal de Kahn y Gorry, un conjunto de rutinas al servicio de un programa de resolución de problemas para tratar las cuestiones temporales que aparecen en el dominio. Después presentamos el modelo de Allen, el modelo de representación de conocimiento temporal que más impacto ha tenido en la bibliografía. La importancia de este modelo reside en su sencillez y claridad, características ambas que permiten recoger fácilmente la semántica del lenguaje natural. Las críticas al modelo de Allen provienen de dos frentes, por un lado la no inclusión de puntos de tiempo, lo que complica la representación de algunas situaciones y, por otro lado, la complejidad del álgebra de intervalos para realizar acciones propias del razonamiento temporal. Por esta razón autores como Vilain, Kautz y van Beek proponen un nuevo modelo basado en puntos, más sencillo de tratar computacionalmente y muestran cómo pasar del modelo basado en intervalos al modelo basado en puntos, lo cual no siempre es posible.

1.5. Textos básicos

- Kahn and Gorry "Mechanizing Temporal Knowledge", Artificial Intelligence, vol. 9, pp. 87-108, 1977.

- Allen, "Maintaining Knowledge about Temporal Intervals", Communications of the ACM, vol. 26, no. 11, pp. 832-843, 1983.

- Allen, "Towards a General Theory of Action and Time", Artificial Intelligence, vol. 23, no. 2, pp. 123-154, 1984.

- Galton, "A Critical Examination of Allen's Theory of Action and Time", Artificial Intelligence, vol. 42, no. 159-188, 1990.

- Vilain and Kautz, "Constrainst Propagation Algorithms for Temporal Reasoning", 5th Natural Conference on Artificial Intelligence. Proccedings AAAI-86, Los Gato, IA, Morgan Kauffman, pp. 377-382, 1986

- van Beek, "Reasoning about qualitative temporal information", Artificial Intelligence, vol. 58, pp. 297-326, 1992.

- van Beek, "Temporal query processing with indefinite information", Artificial Intelligence in Medicine, vol. 3, pp. 325-339, 1991.

- van Beek and Manchak, "The Design and Experimental Analysis of Algorithms for Temporal Reasoning", Journal of Artificial Intelligence Research, vol. 4, pp. 1-18, 1996.