
CAPITULO 1

SISTEMAS DE PRODUCCIÓN

- **Base de Conocimientos**
 - **Memoria Activa**
 - **Motor de Inferencias**
 - **Dinámica de los Sistemas de Producción**
 - **Ciclo Básico de un Sistema de Producción**
 - **Resumen**
 - **Textos Básicos**
-

1. SISTEMAS DE PRODUCCIÓN

Los sistemas de producción pueden definirse como sistemas inteligentes basados en reglas en los que los mecanismos de emparejamiento son una parte explícita de su arquitectura.

Podemos clasificar a los sistemas de producción en dos categorías, según la sintaxis de las reglas, y según su estructura de control⁴⁴:

- Sistemas dirigidos por los datos
- Sistemas dirigidos por los objetivos

En los sistemas dirigidos por los datos las inferencias se obtienen cuando los antecedentes de alguna (o más) de sus reglas de producción se emparejan con, al menos, una parte de los hechos que describen el estado actual. No todos los *hechos* tienen por qué verse representados en la regla, pero el antecedente de la regla sí debe estar completamente representado en los hechos. Cuando esto ocurre, se dice que la regla en cuestión se ha *activado*⁴⁵, y está en condiciones de ser *ejecutada*.

Por el contrario, en los sistemas de producción dirigidos por los objetivos, tanto los antecedentes como los consecuentes de las reglas deben ser considerados como *aserciones* sobre los datos. En este caso, la activación de las reglas tiene lugar por medio de un encadenamiento regresivo⁴⁶, y el emparejamiento se efectúa a través de las conclusiones de las reglas. Así, para alcanzar una determinada meta hay que configurar un proceso evocativo en el que, de forma recursiva, se van estableciendo los antecedentes de las metas como submetas de orden inferior.

Un sistema de producción está constituido por tres elementos fundamentales:

- La base de conocimientos
- La memoria activa
- El motor de inferencias

Estos tres elementos se relacionan como se muestra en la figura 5.1.

⁴⁴ Algunos autores prefieren denominar a tales sistemas, respectivamente, *dirigidos por los antecedentes* y *dirigidos por los consecuentes*.

⁴⁵ O lo que es lo mismo, se ha seleccionado como potencialmente ejecutable. Su ejecución o no dependerá de la estrategia de exploración elegida.

⁴⁶ Ya se ha mencionado que un encadenamiento regresivo es un proceso “hacia atrás”.

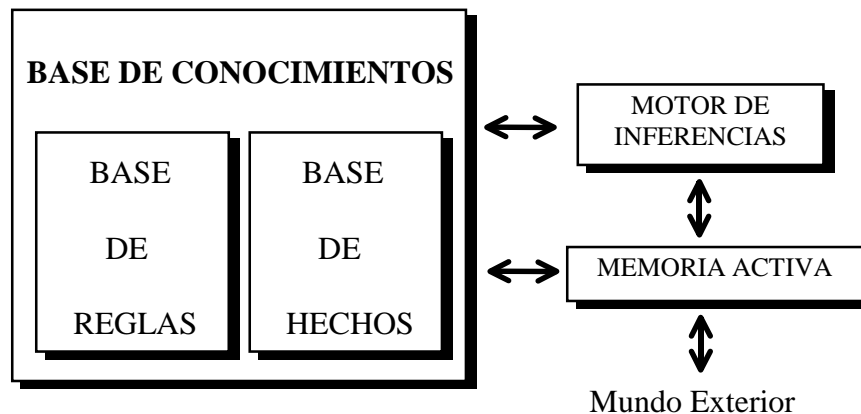


Figura 1.1 Arquitectura básica de un Sistema de Producción

1.1. Base de Conocimientos

La base de conocimientos describe el universo de discurso o dominio en el cual el sistema de producción tiene que plantear soluciones. A su vez, la base de conocimientos está constituida por *bases de hechos* y por *bases de reglas*. Los sistemas de producción realmente interesantes suelen tener varias bases de hechos y varias bases de reglas, relativas a diferentes aspectos del dominio. Por ejemplo, en el campo de la Medicina, podríamos agrupar el conjunto de todas las entidades relevantes para el estudio de las enfermedades oculares en una base de hechos, y el conjunto de todas las relaciones que se pueden establecer entre dichas entidades, en una base de reglas. Ambas estructuras podrían estar diferenciadas con respecto al conocimiento relevante para estudiar, por ejemplo, las enfermedades renales.

Las bases de hechos forman el esqueleto declarativo del sistema de producción, y su misión es la de articular a todos los hechos potencialmente relevantes del dominio.

Por otra parte, las bases de reglas constituyen el esqueleto procedimental del sistema de producción, y a través de ellas se posibilita la construcción de los *circuitos inferenciales*⁴⁷ que nos van a permitir obtener conclusiones válidas. Obviamente, la estructura de las bases de hechos y de las bases de reglas debe ser tal que ambas entidades puedan “comprenderse” entre sí. Un ejemplo contribuirá a aclarar la situación⁴⁸. Supongamos la siguiente regla de producción:

⁴⁷ O recorridos posibles entre unidades de conocimiento relacionadas.

⁴⁸ La estructura física de los conceptos que se tratan en este ejemplo va a depender de la herramienta y/o del lenguaje utilizado para implementar el sistema de producción. En este sentido, y en beneficio de la claridad, hemos preferido prescindir de los elementos específicos del lenguaje.

REGLA1

IF: <CREPUSCULO COLOR> = ROJO
AND: <CIELO NUBES> = AUSENTES
AND: <CIELO TONALIDAD> = NORMAL
THEN: <PRONOSTICO METEOROLOGICO> = BUEN_TIEMPO

Esta regla nos permite relacionar distintos elementos y propiedades de un dominio concreto (que podría ser el de la Meteorología). Sin embargo, aparte del contenido de la regla en cuestión, es claro que ésta opera sobre un esqueleto declarativo constituido por diferentes entidades, diferentes propiedades de las entidades, y diferentes valores⁴⁹ de las propiedades. El esqueleto declarativo correspondiente a la regla del ejemplo anterior estaría compuesto por tres frames⁵⁰, como las que se muestran a continuación⁵¹:

CREPUSCULO
COLOR

CIELO
NUBES
TONALIDAD

PRONOSTICO
METEOROLOGICO

Nótese que tanto el antecedente como el consecuente de la regla del ejemplo reflejan trayectorias (“paths”) en las frames de la base de hechos. Supongamos que incluimos ahora una nueva regla como la siguiente:

REGLA2

IF: <PRONOSTICO METEOROLOGICO> = BUEN_TIEMPO
THEN:<ACTIVIDAD RECOMENDADA> = IR_AL_CAMPO
AND: <ACTIVIDAD DESCARTADA> = IR_AL_CINE

En este caso tendríamos que actualizar nuestra base de hechos e incluir la nueva frame⁵²:

ACTIVIDAD
RECOMENDADA
DESCARTADA

⁴⁹ De acuerdo con el planteamiento que hacemos en este texto, veremos que los valores van a tener un tratamiento especial.

⁵⁰ Obviamente, si hemos elegido la estructura de frames para representar el conocimiento estático.

⁵¹ En realidad son fragmentos de frames.

⁵² Afortunadamente, las herramientas de ingeniería del conocimiento disponibles hoy día se ocupan ellas mismas de actualizar las distintas estructuras, procurando también que no haya incompatibilidades.

1.2. Memoria Activa⁵³

La memoria activa, o memoria de trabajo, es la estructura que contiene toda la información de naturaleza estática necesaria para resolver un problema concreto. Esta información incluye:

- datos iniciales del problema
- datos incorporados con posterioridad
- hechos establecidos durante los procesos inferenciales
- hipótesis de trabajo, metas o submetas que todavía no han sido establecidas

En la memoria activa es en donde se producen todos los cambios de estado de nuestro sistema, de forma que es la memoria activa la que representa siempre nuestro estado actual. Por esta razón, la memoria activa es la responsable de interactuar con el mundo exterior, aceptando la entrada de información de naturaleza no inferencial, y es también el foco permanente de atención de las reglas del sistema.

Un ejemplo de memoria activa podría ser el siguiente:

```
M0 = [ <CREPUSCULO COLOR>           = ROJO,
      <CIELO NUBES>                 = AUSENTES,
      <CIELO TONALIDAD>             = NORMAL,
      (<ACTIVIDAD RECOMENDADA>      = IR_AL_CAMPO)
      ]
```

Esta memoria activa contiene tres datos, que son las listas que aparecen entre <> con sus valores asociados (de acuerdo con la estructura “parámetro-relación-valor”), una hipótesis que aparece entre (<>), y ningún hecho establecido.⁵⁴

A continuación vamos a identificar el resto de la estructura de un hipotético sistema de producción construido a partir de los ejemplos mencionados en lo que llevamos de capítulo⁵⁵.

BASE DE CONOCIMIENTOS = BASE DE HECHOS + BASE DE REGLAS

⁵³ Algunos autores consideran que la base de hechos y la memoria activa son la misma estructura. Hablan entonces de *bases de hechos permanentes*, cuando representan el esqueleto declarativo del sistema, y de *bases de hechos temporales*, cuando sólo incluyen conocimiento declarativo relativo al problema en curso. Los autores de este texto prefieren considerarlas como entidades diferentes. Ello simplifica la comprensión de ambas estructuras, y de los problemas derivados de la relación del sistema de producción con el mundo exterior.

⁵⁴ Puesto que todavía no hemos lanzado ningún proceso inferencial.

⁵⁵ Por razones obvias omitiremos la estructura del motor de inferencias.

BASE DE HECHOS = [<CREPUSCULO COLOR>, <CIELO NUBES>, <CIELO TONALIDAD>, <PRONOSTICO METEOROLOGICO>, <ACTIVIDAD RECOMENDADA>, <ACTIVIDAD DESCARTADA>]

BASE DE REGLAS = [<R1>, <R2>] (Regla1 y Regla2 del apartado anterior)

Adelantándonos un poco a los acontecimientos, vamos ahora a lanzar un proceso inferencial dirigido por los objetivos. En este caso el motor de inferencias investigará en M0 las hipótesis todavía no establecidas:

HIPOTESIS = (<ACTIVIDAD RECOMENDADA> = IR_AL_CAMPO)

A continuación, y dado que el proceso es dirigido por los objetivos, se investigará qué reglas de la base de reglas concluyen algo⁵⁶ sobre <ACTIVIDAD RECOMENDADA>, que es una entidad de la base de hechos.

REGLA RELEVANTE =

R2

Ahora procede investigar el antecedente de R2 para verificar si la información que hay en M0 es suficiente para concluir algo:

ANTECEDENTE⁵⁷ = <PRONOSTICO METEOROLOGICO> = BUEN_TIEMPO

En M0 no hay información alguna sobre este nuevo parámetro (i.e., <PRONOSTICO METEOROLOGICO>), por lo que debe ser considerado como una nueva hipótesis. M0 debe actualizarse:

$$M1 = M0 \cup [\begin{array}{ll} <PRONOSTICO METEOROLOGICO> & = BUEN_TIEMPO \\ <CREPUSCULO COLOR> & = ROJO, \\ <CIELO NUBES> & = AUSENTES, \\ <CIELO TONALIDAD> & = NORMAL, \\ (<ACTIVIDAD RECOMENDADA> & = IR_AL_CAMPO), \\ (<PRONOSTICO METEOROLOGICO> & = BUEN_TIEMPO) \end{array}]$$

La nueva hipótesis, que aparece como conclusión de R1, obliga a investigar el antecedente de esta regla. Esta vez la nueva memoria activa, M1, sí representa completamente a todas y cada una de las premisas del antecedente de R1. Además, los

⁵⁶ Nótese que lo que se pretende es encontrar un valor para el parámetro investigado. Una vez encontrado, la hipótesis será cierta o falsa.

⁵⁷ Asumiremos que la conversión de la “ecuación” del antecedente en “lista” es responsabilidad del motor de inferencias.

valores asociados son los que emparejan, por lo que la regla puede ejecutarse. Nótese que si en M1 tuviésemos, por ejemplo, <CREPUSCULO COLOR> = AMARILLO, el parámetro investigado estaría igualmente presente en la memoria activa, pero con un valor diferente al que exige la regla, por lo que la regla sería falsa, y la conclusión no podría establecerse. En concreto, después de la sustitución obtendríamos:

AMARILLO = ROJO

Este resultado sería interpretado como falso. Por el contrario, en nuestro caso tenemos:

ROJO = ROJO ⇒ t (cierto)
 AND AUSENTES = AUSENTES ⇒ t
 AND NORMAL = NORMAL ⇒ t

La conclusión puede ser establecida, ya que todo el antecedente es cierto. La regla se ejecuta, y la submeta se confirma como hecho, con lo que la memoria activa se actualiza de la siguiente forma:

M2 = [<CREPUSCULO COLOR> = ROJO,
 <CIELO NUBES> = AUSENTES,
 <CIELO TONALIDAD> = NORMAL,
 (<ACTIVIDAD RECOMENDADA> = IR_AL_CAMPO),
 <PRONOSTICO METEOROLOGICO> = BUEN_TIEMPO
]

REGLAS RELEVANTES =

R2

 REGLAS EJECUTADAS =

R1

A continuación la regla R2 está en condiciones de ser ejecutada, ya que ahora M2 verifica completamente su antecedente. La ejecución de R2 produce una nueva actualización de la memoria activa. Tras haberse producido la actualización, y al no haber más hipótesis que confirmar o descartar, el proceso termina.

Mf = [<CREPUSCULO COLOR> = ROJO,
 <CIELO NUBES> = AUSENTES,
 <CIELO TONALIDAD> = NORMAL,
 <ACTIVIDAD RECOMENDADA> = IR_AL_CAMPO,
 <ACTIVIDAD DESCARTADA> = IR_AL_CINE,
 <PRONOSTICO METEOROLOGICO> = BUEN_TIEMPO
]

REGLAS RELEVANTES =

 REGLAS EJECUTADAS =

R2
R1

Cuando el proceso se detiene, la memoria activa contiene una descripción del estado final del problema, constituido por los tres datos de partida, la hipótesis

confirmada como hecho, y dos nuevos hechos identificados como ciertos durante el proceso inferencial.

De acuerdo con nuestro planteamiento (ver nota número 52 a pie de página), los hechos y los datos de la memoria activa corresponden a entidades de la base de hechos, pero con valores concretos asociados. La diferencia entre hechos y datos es la procedencia de los valores asociados. Así, mientras los valores de las trayectorias correspondientes a los hechos de la base son asignados a través de un proceso inferencial, los datos representan información que procede directamente del mundo exterior. Por último, las hipótesis son trayectorias completas (incluyendo valores), cuya veracidad se desea investigar.

1.3. Motor de Inferencias

El motor de inferencias consta, fundamentalmente, de dos entidades: un intérprete y una estrategia de control, que están físicamente separados de la unidad de conocimientos del dominio de aplicación; y contiene los mecanismos necesarios para:

- Examinar la memoria activa y determinar qué reglas deben ejecutarse. Este proceso de selección se realiza en función de la estrategia de búsqueda elegida y de los modelos implementados para la resolución de los conflictos que pudiesen aparecer.
- Controlar y organizar el proceso de ejecución de las reglas seleccionadas en el paso anterior.
- Actualizar la memoria activa cuando sea preciso.
- Asegurar que el sistema tiene autoconocimiento. Ello implica saber en todo momento qué reglas han sido activadas, cuáles han sido ejecutadas⁵⁸, cuál ha sido el último hecho incorporado a la memoria activa, etc.

El proceso global de trabajo del motor de inferencias se produce por ciclos denominados “ciclos básicos del sistema de producción”. La naturaleza de tales ciclos básicos es netamente diferente si el proceso de búsqueda está dirigido por los datos o si, por el contrario, está dirigido por los objetivos.

En cualquier caso, todo motor de inferencias debe ser considerado como un intérprete y, como tal, no es más que un programa de naturaleza secuencial cuya misión es decidir qué es lo que hay que hacer en cada momento, reconociendo y activando las reglas apropiadas en función de:

- los criterios de activación elegidos

⁵⁸ Obviamente, no todas las reglas activadas son siempre ejecutadas. Un ejemplo de lo que se acaba de afirmar lo constituyen los procesos de búsqueda en profundidad, en los que sólo se ejecuta una de las reglas activadas, manteniéndose las demás en este estado para posibilitar una eventual vuelta atrás o backtraking.

- las estrategias de búsqueda implementadas
- la dirección de tránsito por el espacio de estados

Además, para tratar de optimizar el proceso de exploración del espacio de estados correspondiente, la estrategia de control del motor de inferencias debe observar los criterios ya comentados de⁵⁹:

- producir movimientos válidos en el espacio de estados
- ser sistemática
- ser eficiente

El motor de inferencias es, pues, quien gobierna los procesos inferenciales en los sistemas de producción y, dado que los sistemas de producción están basados esencialmente en reglas, tendremos que ser capaces de definir cómo va a poder materializarse la propagación del conocimiento en el sistema. En este sentido, y desde una perspectiva completamente general, consideraremos dos procedimientos básicos de propagación:

- Encadenamiento progresivo de reglas, que se traducirá en un proceso de búsqueda dirigido por los datos.
- Encadenamiento regresivo de reglas, que se traducirá en un proceso de búsqueda dirigido por los objetivos.

Aparte del tipo de encadenamiento de reglas, como norma general todo motor de inferencias debería incluir⁶⁰:

- el emparejador o intérprete que active las reglas relevantes en cada momento, de acuerdo con el estado actual de la memoria activa.
- la estrategia de búsqueda, que incluya las heurísticas de exploración del espacio de estados.
- los mecanismos de autoconocimiento, que permitan identificar estructuras utilizadas, estados del problema, cambios en la memoria activa, órdenes de prioridades de acciones y hechos inferidos, etc.
- los mecanismos de terminación de los procesos inferenciales.

Evidentemente, lo descrito hasta ahora no es más que una visión muy simplificada de la realidad de los sistemas de producción. Quedan en el tintero aspectos tan importantes como la adquisición de datos, la interacción con el usuario y con el mundo exterior, su integración con sistemas de información más amplios,... aspectos que, por ahora, exceden las pretensiones de este texto.

⁵⁹ Ver capítulo 2

⁶⁰ Lo que se menciona a continuación puede ser formalizado, al menos parcialmente. Trataremos esta formalización un poco más adelante, en este mismo capítulo.

1.4. Dinámica de los Sistemas de Producción

Con el objeto de ilustrar algunas de las ideas presentadas en apartados anteriores, vamos a estudiar el comportamiento dinámico de un hipotético sistema de producción en el que la base de reglas es la siguiente:

BR = [R1, R2, R3, R4, R5, R6, R7]

y en el que las reglas individuales del sistema son:

R1: IF (X and Y) THEN Z

R2: IF (C and D) THEN G

R3: IF (E and V) THEN H

R4: IF (A and B) THEN C

R5: IF (F or G) THEN X

R6: IF (Z and B) THEN V

R7: IF (E and C) THEN F

Además, consideraremos la memoria activa inicial:

M0 = <A, B, D, Y, E, (H)>

en la que los elementos entre paréntesis son hipótesis sin confirmar, mientras que los elementos que no llevan paréntesis son, o datos del problema, o hechos previamente demostrados.

La diferencia en el comportamiento de este sistema la vamos a referir exclusivamente a la estructura de su motor de inferencias. Al respecto, vamos a considerar dos casos:

CASO 1: Restricciones del motor de inferencias

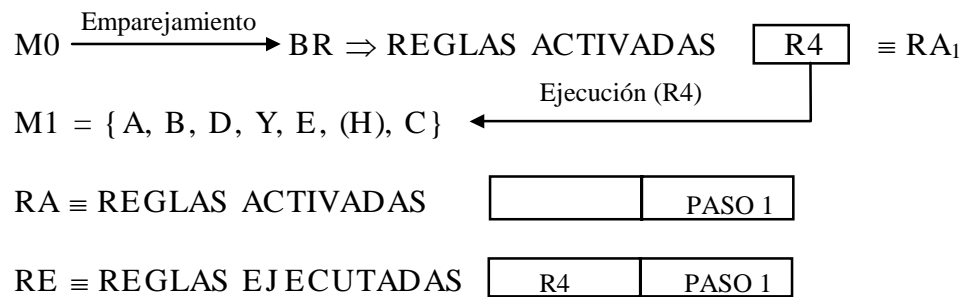
- Encadenamiento progresivo
- Activación de todas las reglas que emparejen con la memoria activa
- Búsqueda en profundidad con ejecución de la primera regla de las que hayan sido activadas más recientemente⁶¹
- No ejecutar dos veces la misma regla
- Terminar cuando H sea un hecho demostrado e incorporado a la memoria activa

⁶¹ Nótese que aquí hay dos restricciones. Efectivamente, puede haber más de una regla activada en un mismo ciclo del motor de inferencias, pero también puede haber más de un ciclo con varias reglas activadas.

En este caso, al ser un encadenamiento progresivo, el emparejador examina los antecedentes de las reglas y selecciona aquellas que se corresponden con hechos y datos de la memoria activa. Análogamente, se ejecutará la primera de las reglas activadas, y el resultado se incorporará a la memoria activa. A continuación se comprobará si en la memoria activa aparece H como hecho demostrado. De no ser así se repetirá un nuevo ciclo hasta que:

- encontremos la solución
- todas las reglas hayan sido ejecutadas y no hayamos llegado a la solución

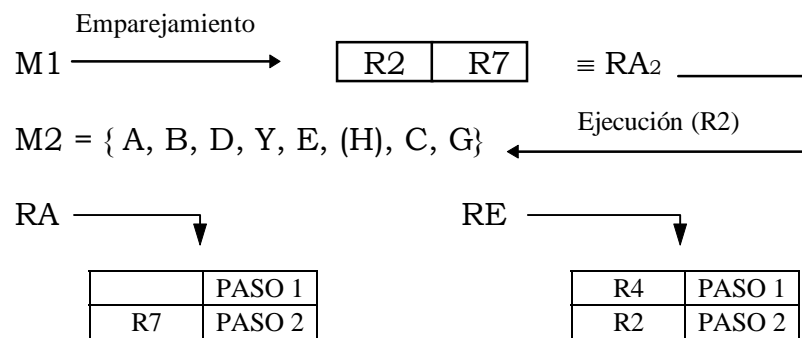
Paso 1



Test de realización:

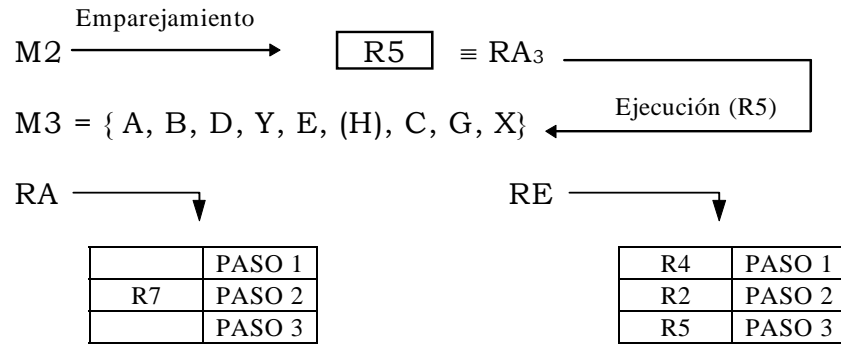
$\text{¿}H \in M_1? \xrightarrow{\text{NO}} \text{IR A PASO 2}$

Paso 2



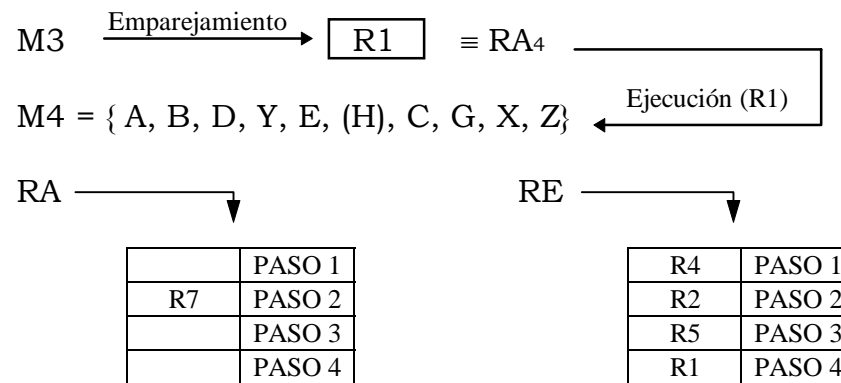
$\text{¿}H \in M_2? \xrightarrow{\text{NO}} \text{IR A PASO 3}$

Paso 3



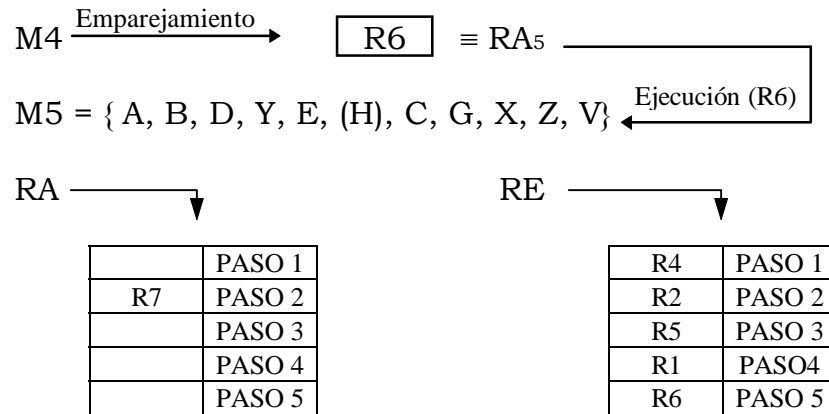
¿H \in M3? $\xrightarrow{\text{NO}}$ IR A PASO 4

Paso 4



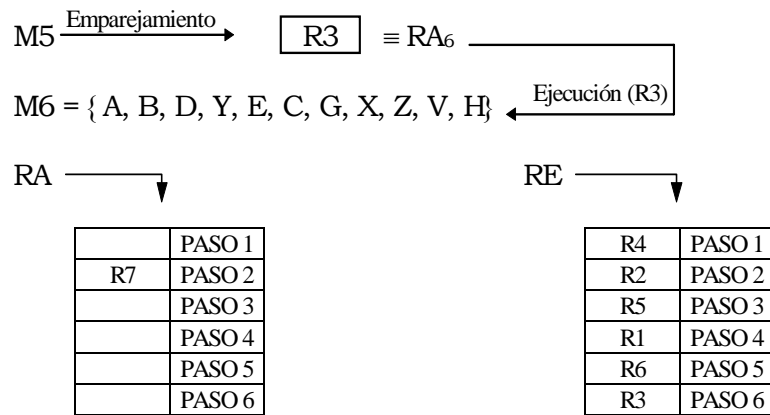
¿H \in M4? $\xrightarrow{\text{NO}}$ IR A PASO 5

Paso 5



¿H ∈ M5? $\xrightarrow{\text{NO}}$ IR A PASO 6

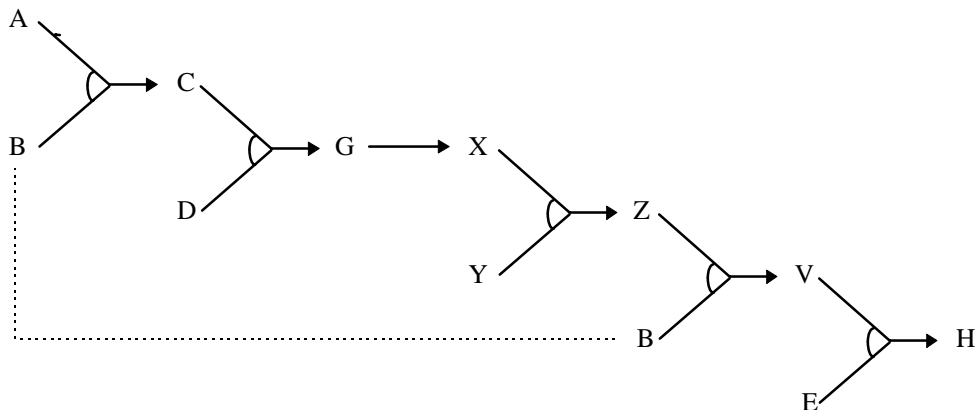
Paso 6



¿H ∈ M6? $\xrightarrow{\text{SI}}$ (FIN)

- N° ciclos del motor de inferencias = 6

Circuito inferencial generado:



En este ejemplo puede comprobarse que la restricción número 3 del motor de inferencias obliga a utilizar primero las reglas activadas en el ciclo actual, antes de emplear reglas activadas (pero no ejecutadas) en ciclos anteriores. Como resultado, al final tenemos a la regla R7 activada y no ejecutada. Podría haber ocurrido que no hubiésemos alcanzado la solución por el camino seguido en el ejemplo. En este caso, el “backtracking” lo haríamos a través de R7. Si hubiese más de una regla activada a través de la cual pudiésemos organizar una vuelta atrás, y estas reglas hubieran sido activadas en diferentes ciclos⁶², deberíamos haber definido una restricción más en el motor de inferencias (por ejemplo: - De ser necesaria una vuelta atrás elegir la primera regla que corresponda al ciclo más antiguo-).

Nótese también que al tratarse de un encadenamiento progresivo de reglas, la hipótesis (H) nunca ha sido examinada por el emparejador⁶³, a pesar de que finalmente ha sido confirmada como hecho durante el proceso inferencial, dejando por lo tanto de ser una hipótesis.

CASO 2: Restricciones del motor de inferencias

- Encadenamiento regresivo
- Activación de todas las reglas que emparejen con la memoria activa
- Búsqueda en anchura exhaustiva
- No ejecutar dos veces la misma regla

⁶² Si hubiesen sido activadas en el mismo ciclo, por la restricción 3 volveríamos a emplear la primera de las supervivientes.

⁶³ No por tratarse de una hipótesis, sino por formar parte del consecuente de una regla y no formar parte del antecedente de ninguna.

- Terminar cuando H haya sido confirmada como un hecho y haya sido incorporada a la memoria activa

En este caso, al ser un encadenamiento regresivo, el foco de atención del motor de inferencias es el conjunto de hipótesis que todavía no están confirmadas. Así, el emparejador examinará las conclusiones de las reglas y seleccionará aquellas que correspondan a hipótesis de la memoria activa. De este modo se van a ir generando subhipótesis que irán incorporándose a la memoria activa. La generación sucesiva de submetas se denomina *retropropagación*. Una vez que la retropropagación ha concluido⁶⁴, comienza la fase de ejecución, en la que las correspondientes conclusiones son inferidas a través de un proceso “hacia adelante”, y por lo tanto la hipótesis inicial puede ser verificada.

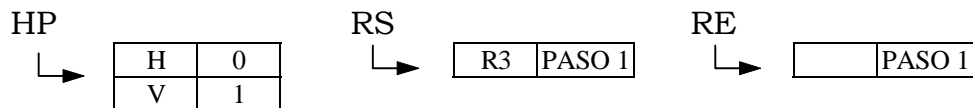
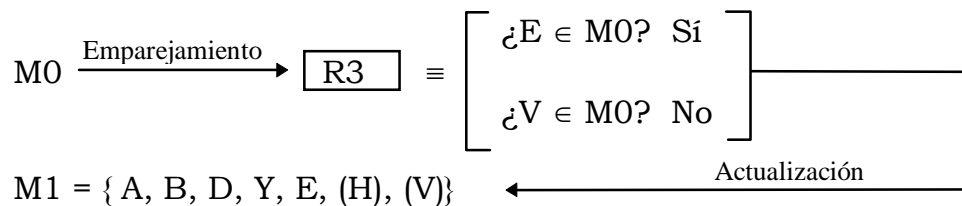
Notación:

HP = HIPOTESIS

RS = REGLAS SELECCIONADAS

RE = REGLAS EJECUTADAS

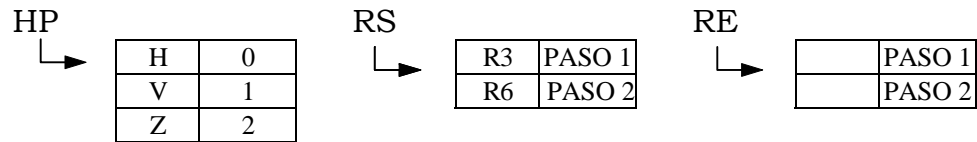
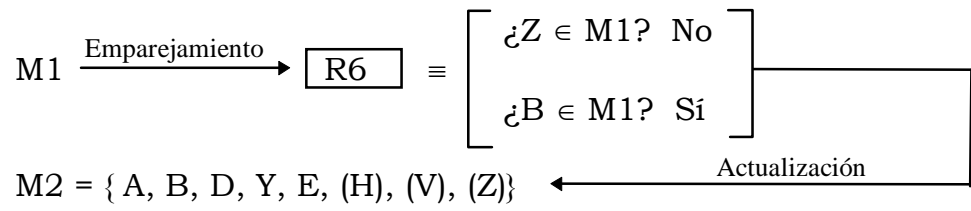
Paso 1



$\text{¿H} \in \text{M1?} \xrightarrow{\text{NO}} \text{IR A PASO 2}$

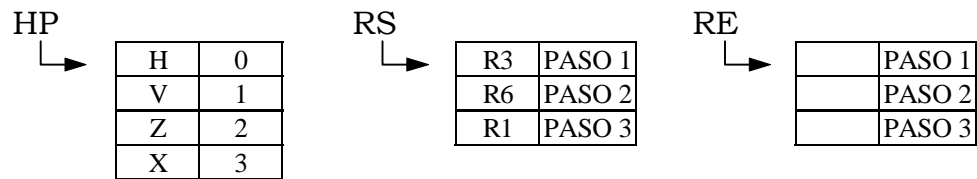
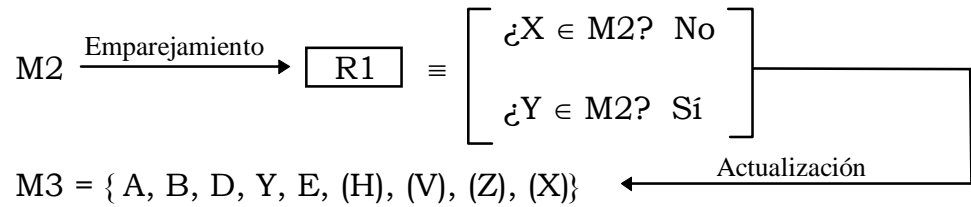
⁶⁴ Situación que ocurre cuando una regla es directamente ejecutable, y por lo tanto su conclusión puede ser establecida.

Paso 2



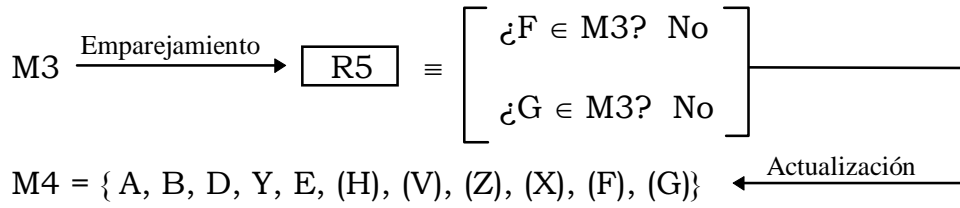
¿H ∈ M2? $\xrightarrow{\text{NO}}$ IR A PASO 3

paso 3



¿H ∈ M3? $\xrightarrow{\text{NO}}$ IR A PASO 4

Paso 4



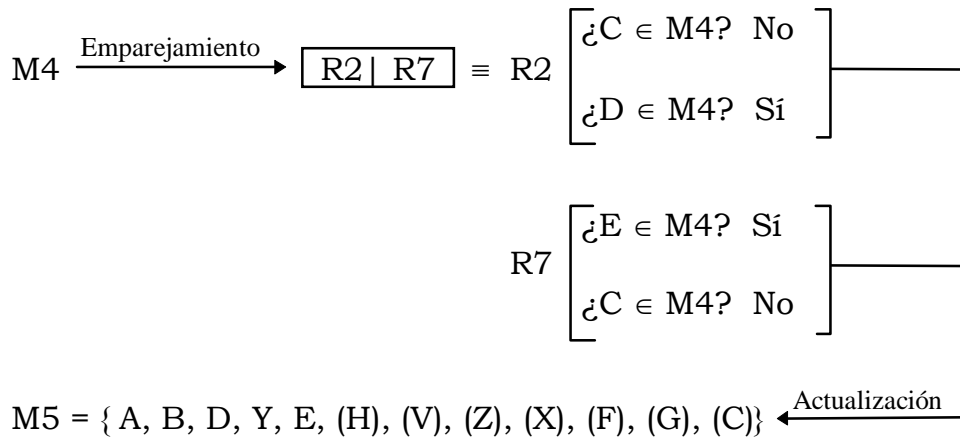
HP	
└	
H	0
V	1
Z	2
X	3
F G	4

RS	
└	
R3	PASO 1
R6	PASO 2
R1	PASO 3
R5	PASO 4

RE	
└	
	PASO 1
	PASO 2
	PASO 3
	PASO 4

¿H ∈ M4? $\xrightarrow{\text{NO}}$ IR A PASO 5

Paso 5



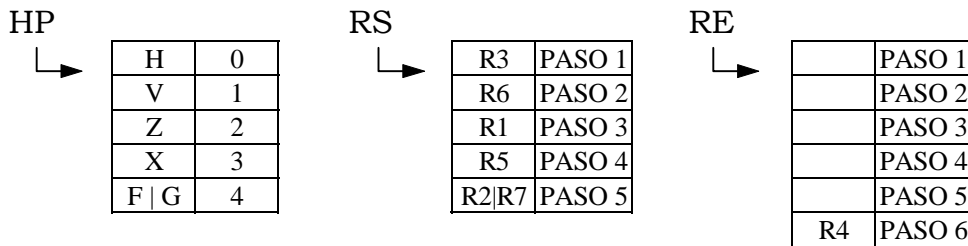
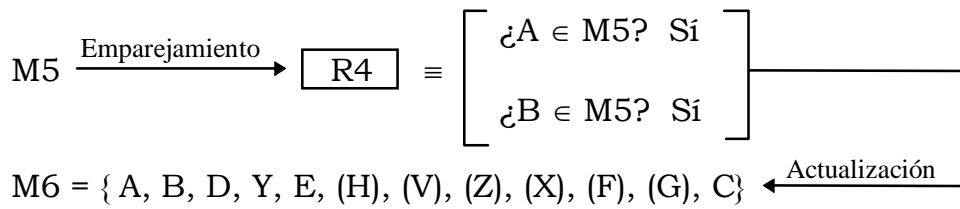
HP	
└	
H	0
V	1
Z	2
X	3
F G	4
C	5

RS	
└	
R3	PASO 1
R6	PASO 2
R1	PASO 3
R5	PASO 4
R2 R7	PASO 5

RE	
└	
	PASO 1
	PASO 2
	PASO 3
	PASO 4
	PASO 5

¿H ∈ M5? $\xrightarrow{\text{NO}}$ IR A PASO 6

Paso 6

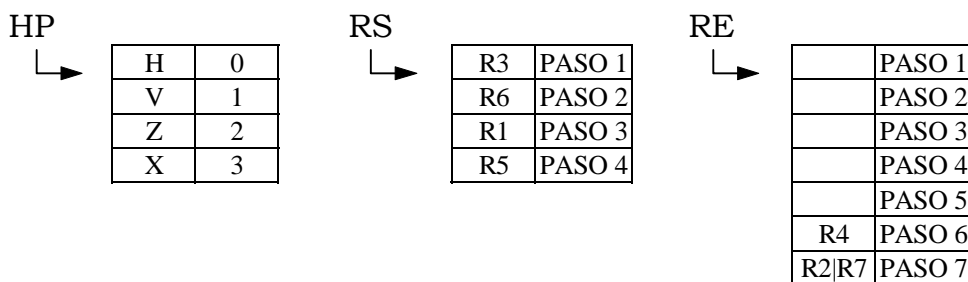
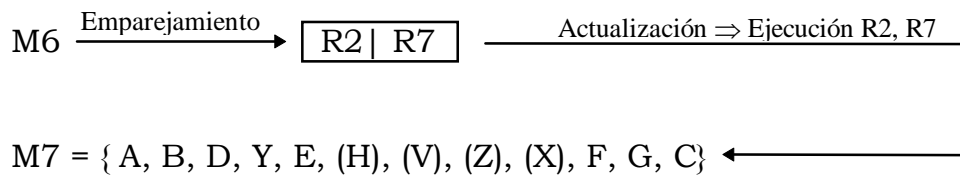


¿H ∈ M6? $\xrightarrow{\text{NO}}$ IR A PASO 7

Después del paso 6 termina el proceso evocativo, ya que no aparece ninguna hipótesis nueva. Por otra parte, la confirmación de una hipótesis como hecho invierte la dirección del proceso.

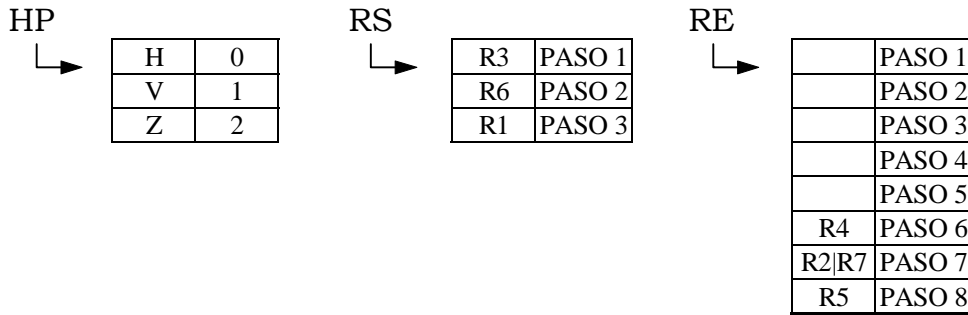
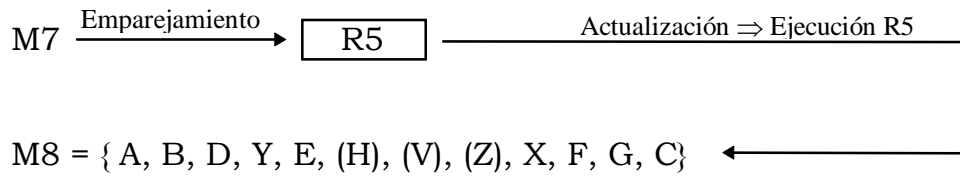
Asumiremos el siguiente planteamiento: con el nuevo estado de la memoria activa ¿hay alguna regla en condiciones de ser ejecutada?

Paso 7



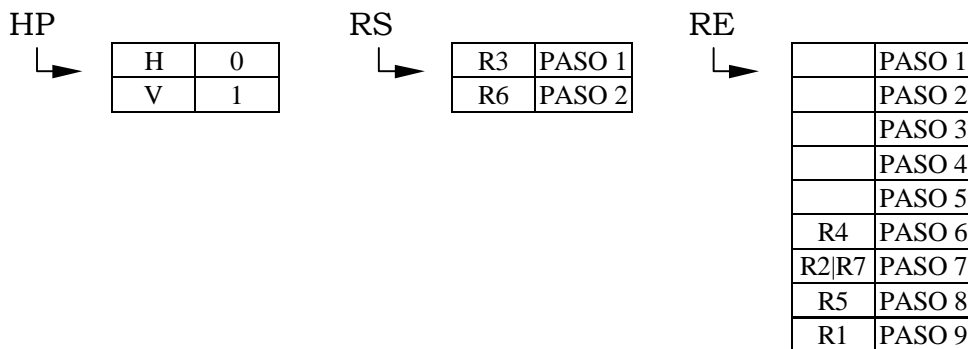
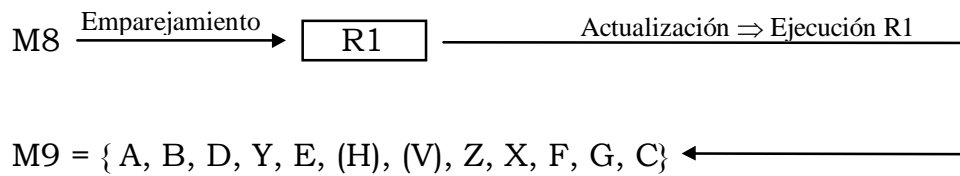
¿H ∈ M7? $\xrightarrow{\text{NO}}$ IR A PASO 8

Paso 8



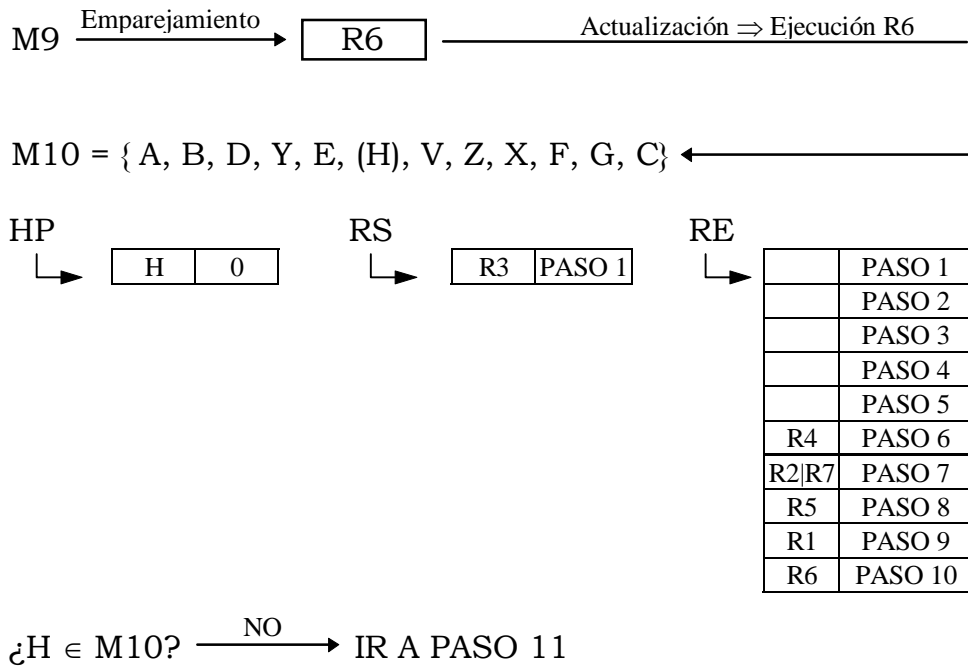
$\text{¿H} \in \text{M8?} \xrightarrow{\text{NO}} \text{IR A PASO 9}$

Paso 9

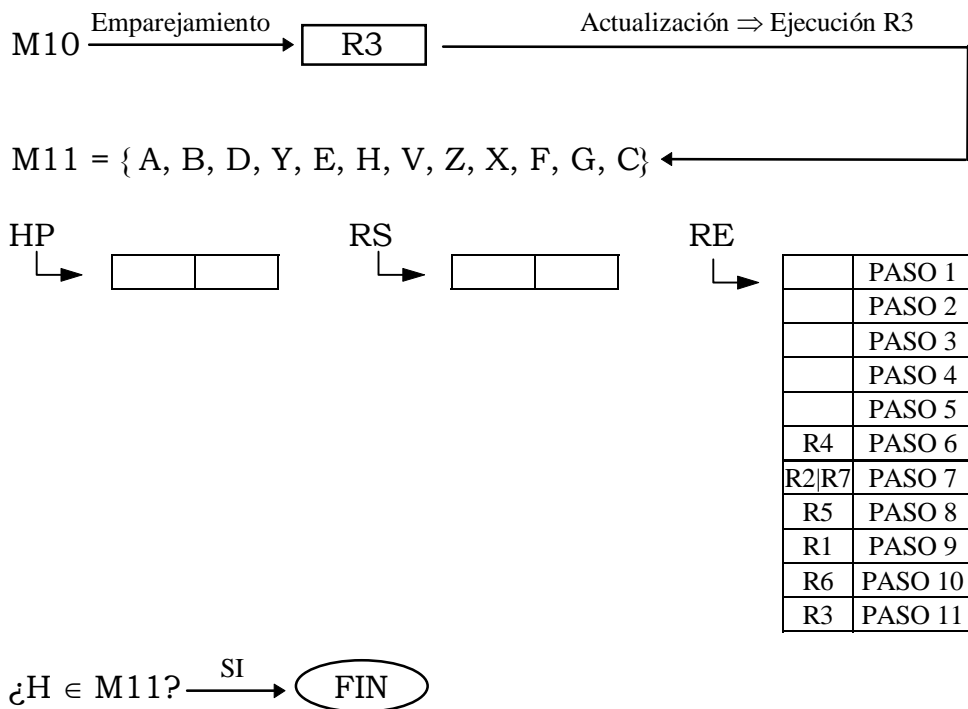


$\text{¿H} \in \text{M9?} \xrightarrow{\text{NO}} \text{IR A PASO 10}$

Paso 10

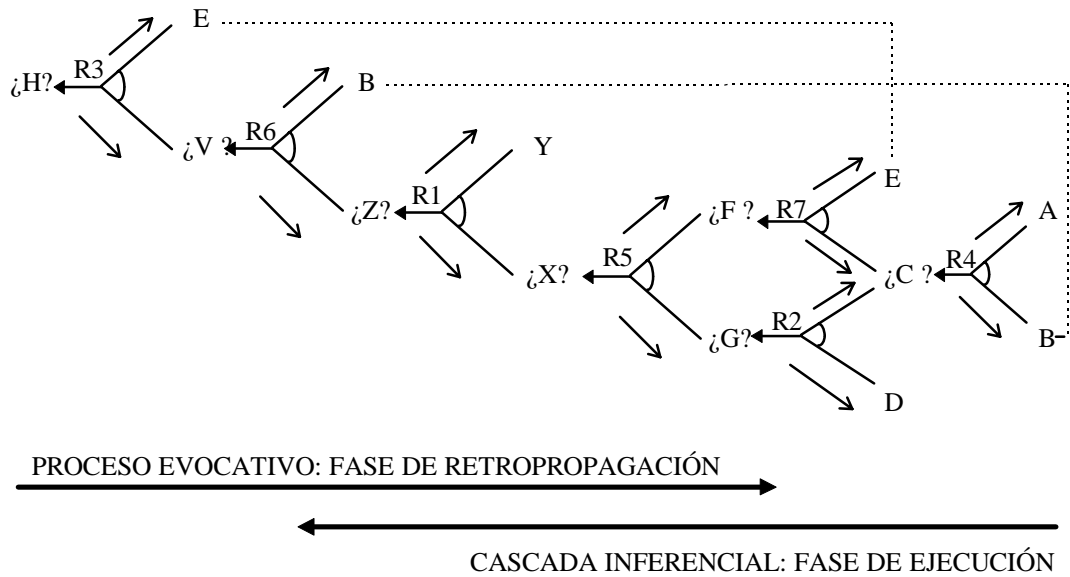


Paso 11



- N° ciclos del motor de inferencias = 11

Circuito inferencial generado



Nótese que el encadenamiento regresivo obliga a establecer hipótesis sucesivas hasta que una de ellas puede confirmarse directamente a partir de los hechos de la memoria activa. Es aquí cuando, de manera general, puede decirse que termina la fase evocativa de retropropagación y comienza la fase de ejecución⁶⁵. Nótese también que el hecho de haber implementado una búsqueda en anchura nos obliga a activar y a ejecutar más de una regla “al mismo tiempo” (i.e., pasos #5 y #7)

Por último es importante darse cuenta de que si un hecho forma parte de la memoria activa, no hace falta duplicarlo aunque durante el proceso inferencial vuelva a ser “verificado”. Esta situación ha aparecido en los dos ejemplos de esta sección.

1.5. Ciclo Básico de un Sistema de Producción

Los ejemplos estudiados en el apartado anterior han servido para ilustrar la naturaleza cíclica de los procesos gobernados por el motor de inferencias de un sistema de producción. Independientemente de si un proceso inferencial está dirigido por los antecedentes o por las metas, el ciclo básico de un sistema de producción está constituido por dos fases claramente diferenciadas:

- Fase de decisión o selección de reglas
- Fase de acción o ejecución de las reglas seleccionadas en el paso anterior

A su vez, la fase de decisión o selección de reglas es responsable de las siguientes tareas:

⁶⁵ En los sistemas reales esta afirmación no tiene por qué ser estrictamente cierta. De hecho, es frecuente que durante el proceso inferencial, y según sea la naturaleza de las hipótesis verificadas, haya continuos “saltos” de una a otra fase.

- Restricción
- Equiparación
- Resolución de conflictos

La restricción trata de simplificar el proceso de equiparación⁶⁶ eliminando del foco de atención del motor de inferencias aquellas reglas que claramente no tienen nada que ver con el estado actual representado en la memoria activa del sistema.

Esta tarea es realizada frecuentemente durante la fase de *ingeniería del conocimiento*⁶⁷, y típicamente se traduce en una organización del dominio de discurso “por temas”. El ejemplo más claro lo tenemos en sistemas de producción en los que la base de conocimientos contiene varias bases de reglas y varias bases de hechos, cada una de ellas relativa a diferentes aspectos del problema global. En todo caso, puede ocurrir que sea necesaria la utilización de unidades de conocimiento que pertenezcan a distintas bases de hechos y/o bases de reglas. Pero lo que también es muy improbable⁶⁸ es que todo el conocimiento del sistema sea potencialmente relevante en todo momento. Por ello, estructurar adecuadamente nuestro sistema de producción suele facilitar mucho la resolución de los problemas planteados y, por consiguiente, contribuye a optimizar los recursos empleados durante los procesos inferenciales.

Esta forma de abordar la etapa de restricción es llevada a cabo a priori, y es de marcada naturaleza estática. Existe una alternativa⁶⁹, de naturaleza más dinámica, de abordar la restricción a partir del llamado *metaconocimiento*. El metaconocimiento puede definirse como “conocimiento sobre conocimiento” y es muchas veces esencial para controlar la aplicación correcta del conocimiento del dominio de discurso. En los sistemas de producción, el metaconocimiento se formaliza como *metarreglas*⁷⁰, que a nivel local, y dentro de un proceso inferencial dado, son capaces de establecer prioridades a la hora de acometer el proceso de activación de reglas. Las metarreglas también pueden utilizarse en la fase de acción, durante la etapa de resolución de conflictos, para decidir qué regla (o reglas) de las que están activadas, debe (o deben) ser ejecutada(s).

La siguiente tarea es la *equiparación*, también llamada *emparejamiento*. Aquí se tratará de identificar qué reglas son potencialmente relevantes en el contexto del problema que queremos resolver. Si el proceso sigue un encadenamiento progresivo, dirigido por los datos, la equiparación consistirá en seleccionar aquellas reglas cuyos antecedentes estén representados en hechos y/o datos de la memoria activa.

Si, por el contrario, estamos ante un encadenamiento regresivo, trataremos de encontrar aquellas reglas que concluyan algo sobre hipótesis presentes en la memoria

⁶⁶ Que será efectuado inmediatamente a continuación de la restricción.

⁶⁷ O fase de diseño y construcción del sistema inteligente, que será tratada con cierta extensión un poco más adelante, en este mismo texto.

⁶⁸ Salvo que el dominio no esté correctamente estructurado.

⁶⁹ Que, sin embargo, no excluye a la anterior.

⁷⁰ Es decir, reglas sobre reglas.

activa. En este caso, como ya se ha visto en la sección anterior, pueden generarse subhipótesis que darán lugar a nuevos ciclos.

El resultado final tras la etapa de emparejamiento es la obtención del denominado *conjunto conflicto* que, como ya hemos mencionado, incluye todas las reglas potencialmente útiles en la resolución de nuestro problema.

Finalmente, en la etapa de *resolución de conflictos*, será cuando se decida qué regla (o reglas) deberemos aplicar. En el capítulo 2 de este mismo texto ya fueron establecidos algunos criterios generales de resolución de conflictos. Conviene ahora contextualizar un poco más la cuestión y darse cuenta de que la decisión final sobre qué regla o reglas aplicar está fuertemente condicionada por la estrategia genérica de búsqueda implementada en la estructura de control del motor de inferencias.

Una vez finalizada la fase de decisión o selección de reglas el sistema está ya preparado para *disparar* físicamente las reglas seleccionadas. Esta es la fase de *acción o ejecución*, cuyo resultado es:

- la actualización de la memoria activa, con nuevos hechos, con nuevas hipótesis, o con ambas a la vez.
- el *marcaje* de las estructuras utilizadas
- la verificación de si debemos o no continuar el proceso cíclico

Este ciclo básico deberá proseguir hasta que, o bien hayamos encontrado la solución al problema planteado, o bien no puedan utilizarse más reglas.

1.6. Resumen

En este tema hemos discutido algunos de los aspectos fundamentales de los llamados “Sistemas de Producción”, o sistemas inteligentes basados en reglas, en los que los mecanismos de equiparación son una parte explícita de su estructura. En tales sistemas hemos reconocido, y descrito, la base de conocimientos -en donde se articulan los esqueletos declarativo y procedimental del sistema inteligente-, la memoria activa -que contiene una descripción completa del estado actual de nuestro sistema durante un proceso consultivo-, y el motor de inferencias -que es el encargado de reconocer en cada momento las estructuras relevantes, y al mismo tiempo es el responsable de gobernar el proceso inferencial-. A continuación se describen los dos grandes tipos genéricos de sistemas de producción: sistemas dirigidos por los datos, y sistemas dirigidos por los objetivos. Los primeros configuran un proceso inferencial progresivo, desde los antecedentes de las reglas hacia los consecuentes de las mismas. Por el contrario, los sistemas dirigidos por los objetivos configuran un proceso inferencial regresivo, desde los consecuentes de las reglas hacia los antecedentes de las mismas. Este proceso regresivo puede suponer el establecimiento de hipótesis intermedias, que son submetas del proceso inferencial global. Seguidamente ilustramos el funcionamiento de ambos tipos de sistemas con sendos ejemplos, en los que se describen también las estructuras de autoconocimiento implicadas. Concluimos el

capítulo con una breve exposición sobre los procesos fundamentales de los ciclos básicos de un sistema de producción.

1.7. Textos Básicos

- Borrajo, Juristo, Martínez, Pazos, “Inteligencia Artificial: métodos y técnicas”, Centro de Estudios Ramón Areces, eds., 1993
- Farreny, “Les Systèmes Experts: Principes et Exemples”, Cepadues, eds., 1985
- Winston, “Inteligencia Artificial”, Addison-Wesley Iberoamericana, eds., 1992