



© Fernando Berzal, berzal@acm.org

Sistemas Expertos



- Sistemas expertos
 - Historia
 - Estructura de un sistema experto
 - Características de un sistema experto
- Sistemas expertos basados en reglas (S.E.B.R.)
 - Motor de inferencia
 - Encadenamiento hacia adelante y hacia atrás





Encargados de realizar (o asistir en la realización de) tareas ejecutadas por expertos:

- Ingeniería (diseño, detección de fallos...)
- Análisis científico
- Diagnóstico médico
- Análisis financiero
- Configuración de componentes
- Sistemas de control y monitorización
- Educación [intelligent tutoring systems]
- **...**



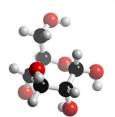
Sistemas Expertos



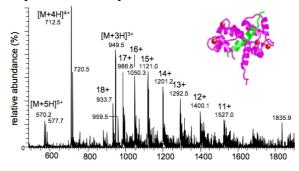
Historia

Dendral ["Dendritic Algorithm"] Universidad de Stanford, 1965-1975

Edward Feigenbaum, Bruce Buchanan, Joshua Lederberg & Carl Djerassi



 Primer sistema experto, programado en LISP para la identificación de compuestos orgánicos analizando datos de espectroscopia de masas.







Historia MYCIN

Stanford Research Institute, 1970s

Tesis doctoral de Edward Shortliffe bajo la dirección de Bruce Buchanan.

- Diseñado en LISP para identificar las bacterias causantes de infecciones severas (p.ej. meningitis) y recomendar antibióticos, con una dosis ajustada al peso del paciente [Nota: el nombre de muchos antibióticos termina con el sufijo "-mycin"].
- Separación entre datos y conocimiento (reglas).
- Manejo de incertidumbre mediante factores de certeza [CF: Certainty Factors].



Sistemas Expertos



Stanford Research Institute, 1974-1983 R. Duda, P.E. Hart, N.J. Nilsson, et al.

- Evaluación del potencial minero de una localización geológica (lugares de exploración o prospección).
- Representación del conocimiento del experto (mediante una red de inferencia) y de su proceso de razonamiento (mediante el uso de técnicas de tipo probabilístico).





Historia

R1 / XCON [eXpert CONfigurer]

Carnegie Mellon University, 1978
John P. McDermott



- Escrito en OPS5 para ayudar en la selección de componentes para la configuración de máquinas DEC VAX, de Digital Equipment Corporation (adquirida por Compaq en 1998, que se fusionó con HP en 2002).
- Puesto en marcha en 1980, en 1986 había procesado 80,000 pedidos y se estima que le ahorraba a DEC más de \$40M al año.

Sistemas Expertos



Historia

CLIPS

NASA Johnson Space Center, 1985-Gary Riley

http://clipsrules.sourceforge.net/



C Language Integrated Production System.

Sintaxis y nombre inspirado en OPS ("Official Production System"), 1977, creado por Charles Forgy durante su doctorado con Allen Newell en CMU.

Otros "expert system shells", descendientes de CLIPS:

- **Jess** [Java Expert System Shell] http://www.jessrules.com/
- FuzzyCLIPS, NRC, Canada





Algunos sistemas expertos "clásicos"

Medicina Mycin, Puff, Abel, AI/COAG, AI/RHEUM, CADUCEUS,

ANNA, BLUE BOX, ONCOCIN, VM, INTERNIST-I, CASNET

Química CRYSALIS, DENDRAL, TQMSTUNE, CLONER,

MOLGEN, SECS, SPEX...

Matemáticas AM (Automated Mathematician), EURISKO, SMP,

MATHPERT... CCH-ES, ExperTAX...

Informática PTRANS, BDS, R1/XCON, XSEL, XSITE, DART, SNAP,

YES/MVS, TIMM...

Electrónica ACE, IN-ATE, NDS, EURISKO, PALLADIO, IDEA,

REDESIGN, CADHELP, SOPHIE...

Ingeniería REACTOR, DELTA (GE), JETA, STEAMER, SACON,

CALLISTO, G2, SHARP, MARVEL, Pile Selection...

Geología DIPMETER, LITHO, MUD, PROSPECTOR...



Sistemas Expertos



Algunos "shells" para sistemas expertos

- **E-MYCIN** ["Essential/Empty MYCIN"], Stanford Research Institute, 1973-1980.
- OPS ["Official Production System"]
 Carnegie Mellon University, 1977.
- KEE ["Knowledge Engineering Environment"] para máquinas Lisp, IntelliCorp, 1983
- CLIPS ["C Language Integrated Production System"]
 NASA Johnson Space Center, 1985
- **ESDE** ["Expert System Development Environment"], para máquinas MVS y VM, IBM, 1986
- **JESS** ["Java Expert System Shell"] Sandia National Labs, 1995
- **Drools** [business rules engine] JBoss, 2001 http://www.jboss.org/drools/





¿En qué áreas resultan útiles los sistemas expertos?

En aquellas en las que haya expertos [humanos] que nos puedan proporcionar el conocimiento necesario (de ahí el nombre de sistemas expertos).



Sistemas Expertos



Diferencias con respecto a la programación convencional (imperativa)

Se separa el conocimiento de los mecanismos que permiten manipularlo:

- Apenas existen instrucciones en el sentido clásico.
- El "programa" consiste, básicamente, en declarar conocimiento (usualmente, en forma de reglas).
- Una "caja negra" (motor de inferencia) infiere nuevo conocimiento y determina el flujo de control.





Datos

En lenguaje natural:

```
Los padres de Elena son Carlos y Belén.
Los padres de Carlos son Juan y María.
```

Declaración de hechos PROLOG:

```
padres('Carlos', 'Belén', 'Elena').
padres('Juan', 'María', 'Carlos').
```



Sistemas Expertos



Conocimiento

En lenguaje natural:

Los padres de los padres son los abuelos.

Programa en "PROLOG":

```
abuelos(Abuelo, Abuela, Nieto) if
  padres(Abuelo, Abuela, Hijo) and
  padres(Hijo, MujerDelHijo, Nieto).
abuelos(Abuelo, Abuela, Nieto) if
  padres(Abuelo, Abuela, Hija) and
  padres(EsposoHija, Hija, Nieto).
```





Uso de un sistema experto

Consulta (objetivo):

```
?- abuelos('Juan', 'María', Nietos).
donde Nietos es una variable.
```

Respuesta del intérprete/compilador de PROLOG:

```
Nietos = 'Elena'
```

Conocimiento inferido (deducido) a partir de los hechos y las reglas conocidos por el sistema.



Sistemas Expertos



Ejemplo

Sistema de control de una planta industrial

Datos:

Temperatura actual del reactor $1 = 75^{\circ}$

Conocimiento:

Si la temperatura de cualquier reactor supera el umbral establecido, entonces activar el mecanismo de emergencia.





Ejemplo

Sistema de control de una planta industrial

El conocimiento suele ser más estático que los datos, pero también puede cambiar ("refinarse"):

Si la temperatura de cualquier reactor supera el umbral establecido, entonces activar el mecanismo de emergencia, hacer sonar la alarma y evacuar al personal.



Sistemas Expertos



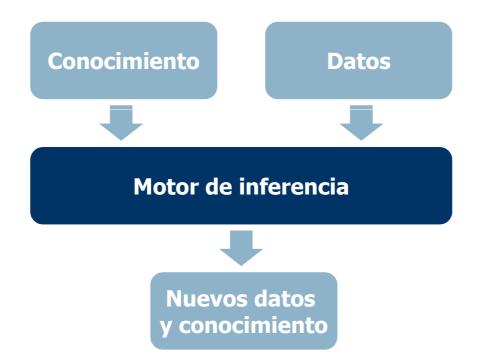
Datos vs. Conocimiento

Datos	Conocimiento
Afirmaciones puntuales	Afirmaciones generales
Suelen ser dinámicos	Suele ser estático
Declaración extensiva	Declaración intensiva
Gran volumen	Pequeño volumen
Almacenamiento secundario	Almacenamiento en RAM
Representación eficiente	Representación simbólica





Estructura de un sistema experto





Sistemas Expertos



Términos habituales en Psicología

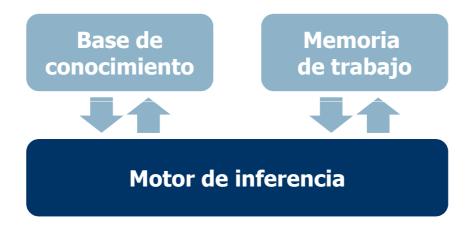


- LTM [long-term memory]: Memoria a largo plazo.
- STM [short-term memory]: Memoria a corto plazo.





Arquitectura de un sistema experto



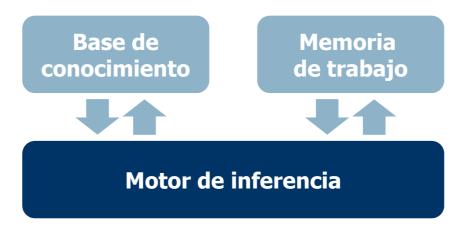
- KB [knowledge base]: Base de conocimiento.
- WM [working memory]: Memoria de trabajo.



Sistemas Expertos



Arquitectura de un sistema experto



El motor de inferencia [inference engine] determina cuáles son las reglas aplicables en cada momento y se encarga de ejecutarlas.





Ejemplo

Regla 1. Si el coche no arranca, realice una comprobación de la batería

Regla 2. Si el coche no arranca, compruebe el indicador de combustible

•••

Regla 75. Si se comprobado la batería y el voltaje de la batería es inferior a 10 voltios, entonces tiene que cambiar la batería.

•••

Regla 120. Si ha comprobado el indicador de combustible y el depósito de combustible está vacío, entonces hay que llenar el depósito.



Sistemas Expertos



Ejemplo

Regla 1. IF coche no arranca, THEN comprobar batería

Regla 2. IF coche no arranca THEN comprobar combustible

...

Regla 75. IF comprobar batería

AND voltaje batería < 10V

THEN cambiar batería

•••

Regla 120. IF comprobar combustible

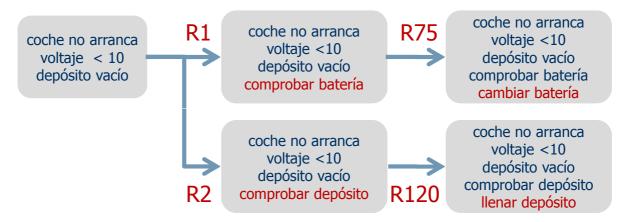
AND depósito de combustible vacío

THEN llenar depósito.





Ejemplo



El motor de inferencia determina el orden en el que se aplican las reglas "activas" (aquéllas para las que se cumple su antecedente).



Sistemas Expertos



Características de un sistema experto

- Separación de los datos y el conocimiento de su manipulación, lo que permite actualizar fácilmente la base de conocimiento o la base de datos sin tener que modificar el motor de inferencia ("shell").
- Implementación del conocimiento explícito de un experto en un dominio concreto ["domain knowledge"]





Características de un sistema experto

Objetivo:

Ayudar en la toma de decisiones (pero no sustituir al experto!!!).

Consejo práctico:

No intentar cubrir un área excesivamente grande.

Dividirla en subproblemas y construir, para cada uno de ellos, un sistema experto específico que lo resuelva.



Sistemas Expertos



Características de un sistema experto

Razonamiento simbólico

- si una persona tiene fiebre y no es alérgica al ácido acetil salicílico (AAS) entonces suministrar aspirina 500 mg
- Pedro no tiene fiebre
- Pedro no es alérgico al AAS
- \forall x Fiebre(x) \land ¬AlergiaAAS(x) → Terapia(x, Aspirina500)
- Fiebre (Pedro)
- ¬AlergiaAAS (Pedro)





Características de un sistema experto

Razonamiento heurístico

- Reglas heurísticas basadas en la experiencia de los expertos (que pueden fallar en situaciones concretas):
 - Ante un problema de arranque, descartar que sea un fallo de carburación y chequear primero el sistema eléctrico.
 - Si el tipo de interés está bajo, considerar invertir en acciones.
 Si el tipo de interés está alto, mejor invertir en bonos.
 - Las personas no suelen coger una gripe en verano.
 - Si se sospecha cáncer, comprobar el historial familiar.



Sistemas Expertos



Características de un sistema experto

Razonamiento inexacto (con incertidumbre)

- PROSPECTOR ('likelihoods' [verosimilitudes])
- MYCIN ('certainty factors' [factores de certeza])

Si el paciente es un huésped de riesgo y existen reglas que mencionan a las pseudomonas y existen reglas que mencionan a las klebsiellas, entonces es plausible (0.4) que deban considerarse primero las segundas.





Resumen de características

Programas convencionales	Sistemas expertos
Programación imperativa	Programación declarativa
Razonamiento algorítmico	Razonamiento heurístico
Control definido por el programador	Control determinado por el motor de inferencia
Difíciles de modificar	Fáciles de modificar
Información precisa	Información no precisa
Se ofrece una solución como resultado final	Se ofrece una recomendación razonada
Solución "óptima"	Solución aceptable



Sistemas expertos basados en reglas

Modelos conductuales

p.ej. Aprendizaje condicionado (perros de Pavlov)

Antes





Salivación



Timbre



Sin respuesta

Durante el condicionamiento



Comida +timbre



Salivación

Después





Salivación



Modelos conductuales

p.ej. Aprendizaje condicionado (perros de Pavlov)

LONDON'S TIMES



AT DINNER PARTIES



Sistemas expertos basados en reglas

- Producción: Término utilizado en Psicología Cognitiva para describir relaciones entre situaciones y acciones.
- Regla de producción: Término utilizado en I. A. para denotar un mecanismo de representación del conocimiento que implementa una producción.

SI situación ENTONCES acción

- La situación (condición ó antecedente) establece las condiciones que se han de satisfacer en un momento dado para que la regla sea aplicable.
- La acción ó consecuente establece las acciones que se han de realizar cuando la regla "se active".

La acción en una regla de producción puede involucrar:

- Añadir algún dato (hecho) a la memoria de trabajo.
- Suprimir algún dato de la memoria de trabajo.
- Ejecutar algún procedimiento.

Ejemplo

Base de conocimiento:

Reglas de producción.

Mecanismo de inferencia:

Encadenamiento hacia adelante (p.ej. CLIPS).



Sistemas expertos basados en reglas

Ejemplo: Guía de reparación del automóvil

Regla 1. IF coche no arranca, THEN comprobar batería

Regla 2. IF coche no arranca

THEN comprobar combustible

...

Regla 75. IF comprobar batería

AND voltaje batería < 10V

THEN cambiar batería

...

Regla 120. IF comprobar combustible

AND depósito de combustible vacío

THEN llenar depósito.



Ejemplo: Guía de reparación del automóvil



El motor de inferencia determina el orden en el que se aplican las reglas "activas" (aquéllas para las que se cumple su antecedente).



Sistemas expertos basados en reglas

Ejemplo: Sistema experto de diagnóstico médico

IF el paciente tiene manchas violáceas THEN proceder a realizar un test de alergias

IF el paciente tiene manchas violáceas

AND el resultado del test de alergias es negativo

THEN añadir meningitis como posible diagnóstico

IF el paciente tiene manchas violáceas

AND el resultado del test de alergias es negativo

THEN añadir problema sanguíneo como posible diagnóstico



Representación del conocimiento en un S.E.B.R.

Datos: Cualquier mecanismo de representación vale.

Conocimiento: Reglas.

```
VG. SI condición ENTONCES acción
SI antecedente ENTONCES consecuente
```



Sistemas expertos basados en reglas

Motor de inferencia

¿Cómo se van aplicando las reglas de la base de conocimiento sobre los hechos de la memoria de trabajo?

- El motor de inferencia es el encargado de hacerlo.
- Pueden utilizarse dos mecanismos básicos de inferencia:
 - Hacia adelante (p.ej. CLIPS)
 - Hacia atrás (p.ej. PROLOG).
- Se puede programar por completo (p.ej. en C) o utilizar un shell de sistema experto (que proporciona un lenguaje específico para declarar hechos y reglas y el motor de inferencia ya implementado).

Motor de inferencia: Encadenamiento hacia adelante

Dada una regla R: si A entonces C

- La regla R se puede disparar, ejecutar o aplicar hacia adelante cuando se satisfacen las condiciones especificadas en su antecedente A.
- Cuando la regla se dispara, se procede a la ejecución de las acciones especificadas en su consecuente C.

Sistemas expertos basados en reglas

Motor de inferencia: Encadenamiento hacia adelante

Un motor de inferencia con encadenamiento hacia adelante:

- parte de unos hechos (datos en la memoria de trabajo),
- va cotejando (emparejando) los datos de la memoria de trabajo con los antecedentes de las reglas, y
- las va disparando hasta que se satisface algún objetivo o hasta que ninguna regla sea aplicable.

Motor de inferencia: Encadenamiento hacia adelante Emparejamiento

- Comparación de los antecedentes de cada regla con los hechos de la memoria de trabajo.
- Resultado: Conjunto de reglas que pueden aplicarse en cada momento ("conjunto conflicto").



Sistemas expertos basados en reglas

Motor de inferencia: Encadenamiento hacia adelante Resolución de conflictos

- Selección de una regla del "conjunto conflicto" (cuando exista más de una).
- Resultado: Regla seleccionada para su aplicación.



Motor de inferencia: Encadenamiento hacia adelante

- Ejecución de la regla
- La regla seleccionada se ejecuta (dispara); esto es, se ejecutan las acciones especificadas en su parte derecha.
- Principio de refracción: La regla ejecutada no volverá a ser aplicable hasta que no desaparezca alguno de los hechos que hicieron posible su aplicación y vuelvan a afirmarse ("asertarse")

Sistemas expertos basados en reglas

Motor de inferencia: Encadenamiento hacia adelante

EJEMPLO

- RO: IF hay placas (puntos blancos) en la garganta THEN diagnóstico: posible infección de garganta
- R1: IF garganta inflamada

 AND sospechamos infección bacteriana

 THEN diagnóstico: posible infección de garganta
- R2: IF temperatura paciente > 39
 THEN paciente tiene fiebre
- R3: IF paciente enfermo más de una semana AND paciente tiene fiebre THEN sospechamos infección bacteriana



Motor de inferencia: Encadenamiento hacia adelante

EJEMPLO

M.T.	C.C.	Resolución
temperatura = 40		
enfermo dos semanas		
garganta inflamada		

Memoria de trabajo inicial:

Datos provenientes de la exploración del paciente, p.ej.

temperatura = 40
enfermo dos semanas
garganta inflamada



Sistemas expertos basados en reglas

Motor de inferencia: Encadenamiento hacia adelante

EJEMPLO

M.T.	C.C.	Resolución
<pre>temperatura = 40 enfermo dos semanas garganta inflamada</pre>	R2	R2
<pre>temperatura = 40 enfermo dos semanas garganta inflamada fiebre</pre>		

Si no aplicamos el principio de refracción, podríamos estar añadiendo indefinidamente el hecho de que la persona tiene fiebre.

Motor de inferencia: Encadenamiento hacia adelante

EJEMPLO

M.T.	C.C.	Resolución
temperatura = 40 enfermo dos semanas garganta inflamada	R2	R2
<pre>temperatura = 40 enfermo dos semanas garganta inflamada fiebre</pre>	R3	R3
temperatura = 40 enfermo dos semanas garganta inflamada fiebre posible infección bacteriana		



Sistemas expertos basados en reglas

Motor de inferencia: Encadenamiento hacia adelante

EJEMPLO

M.T.	C.C.	Resolución
<pre>temperatura = 40 enfermo dos semanas garganta inflamada fiebre posible infección bacteriana</pre>	R1	R1
temperatura = 40 enfermo dos semanas garganta inflamada fiebre posible infección bacteriana infección en la garganta		

Diagnóstico: Posible infección en la garganta



Motor de inferencia: Encadenamiento hacia adelante

EJEMPLO

Si, en la exploración inicial, se hubiesen visto puntos blancos en la garganta, entonces tendríamos:

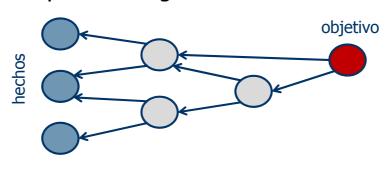
M.T.	C.C.	Resolución
temperatura = 40 enfermo dos semanas garganta inflamada puntos blancos en la garganta	R0, R2	???

Dependiendo del orden en que el motor de inferencia seleccione las reglas, podríamos llegar a un diagnóstico con menos pasos (si se elige R0 primero) o, incluso, puede que diferente.

Sistemas expertos basados en reglas

Motor de inferencia: Encadenamiento hacia atrás

Es obligatorio incluir un objetivo inicial (lo que pretendemos demostrar), que se se irá reemplazado por otros subobjetivos como resultado de aplicar las reglas hacia atrás.





Motor de inferencia: Encadenamiento hacia atrás

Dada una regla R: si A entonces C

- La regla se puede aplicar hacia atrás cuando existe un objetivo OBJ que concuerda con el consecuente C.
- Cuando se aplica una regla hacia atrás, se procede a sustituir la demostración de OBJ por la demostración de los antecedentes A de la regla; esto es, el objetivo inicial OBJ se reemplaza por todos los objetivos A.

Sistemas expertos basados en reglas

Motor de inferencia: Encadenamiento hacia atrás

Un motor de inferencia con encadenamiento hacia atrás:

- parte de unos hechos (datos) y de un objetivo inicial,
- va cotejando (emparejando) los consecuentes de las reglas con la lista de objetivos, y
- va aplicando las reglas hacia atrás (aumentando así la lista de objetivos) hasta que todos ellos coincidan con hechos de la memoria de trabajo.

Motor de inferencia: Encadenamiento hacia atrás

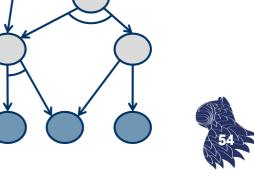
Para representar los objetivos que han de demostrarse,

suele utilizarse un grafo Y/O:

EJERCICIO

Dibujar el grafo Y/O

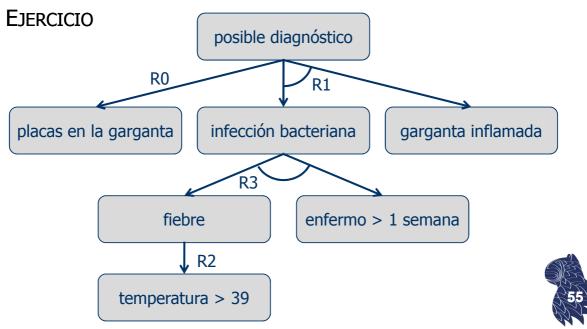
para el ejemplo anterior.



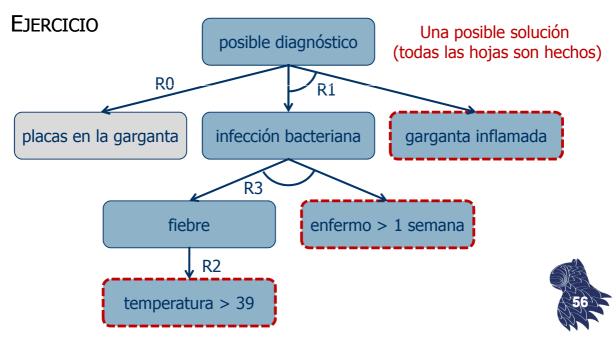
Sistemas expertos basados en reglas

Motor de inferencia:

Encadenamiento hacia atrás



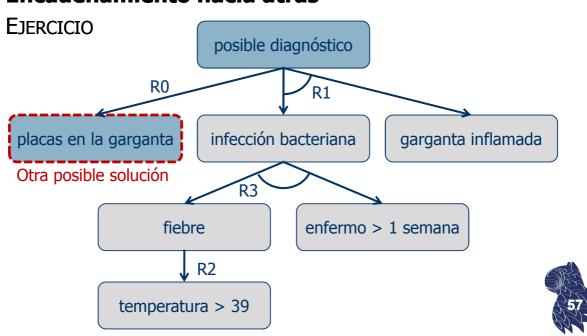
Motor de inferencia: Encadenamiento hacia atrás



Sistemas expertos basados en reglas

Motor de inferencia:

Encadenamiento hacia atrás



Bibliografía: Sistemas Expertos

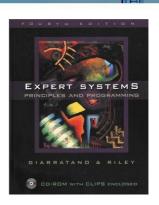
- John Durkin, Expert Systems: Design and Development. Prentice Hall, 1994.
- Peter Jackson, Introduction to Expert Systems. Addison Wesley, 1998.
- James P. Ignizio, Introduction to Expert Systems: The Development and Implementation of Rule-Based Expert Systems. McGraw-Hill, 1990.
- Ernest Friedman-Hill, **Jess in Action: Java Rule-Based Systems**. Manning Publications, 2003.
- Jay Liebowitz (editor): The Handbook of Applied Expert Systems. CRC Press, 1997.



Bibliografía: Sistemas Expertos

CLIPS

Joseph C. Giarratano & Gary D. Riley
 Expert Systems:
 Principles and Programming
 Thomson, 4th edition, 2005.
 ISBN 0534384471



PROLOG

William F. Clocksin
 & Christopher S. Mellish:
 Programming in Prolog
 Springer, 5th edition, 2003
 ISBN 3540006788



