



**DECSAI**

**Departamento de Ciencias de la Computación e I.A.**

Universidad de Granada



# Sistemas Expertos

© Fernando Berzal, [berzal@acm.org](mailto: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



# Sistemas Expertos



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

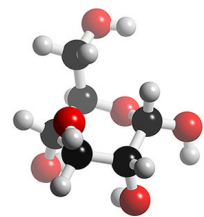


## Historia

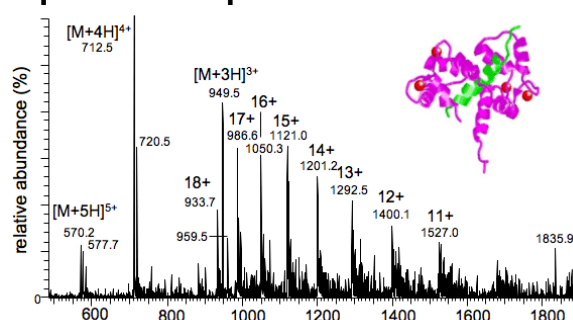
### **Dendral** ["Dendritic Algorithm"]

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.



# Sistemas Expertos



## 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

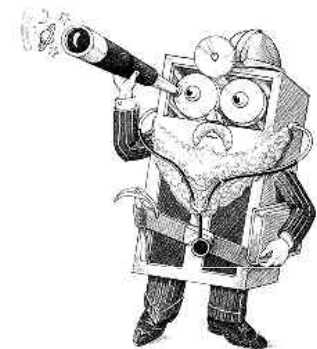


## Historia

### PROSPECTOR

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).



# Sistemas Expertos



## 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



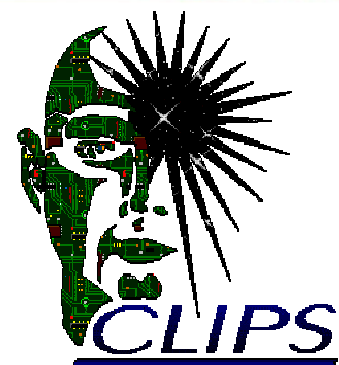
## Historia

### 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



# Sistemas Expertos



## Algunos sistemas expertos "clásicos"

Medicina	MYCIN, PUFF, ABEL, AI/COAG, AI/RHEUM, CADUCEUS, ANNA, BLUE BOX, ONCOCIN, VM, INTERNIST-I, CASNET
Química	CRYSLIS, DENDRAL, TQMSTONE, 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).



## 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.



# Sistemas Expertos



## 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.



## Ejemplo

### Sistema de control de una planta industrial

- Datos:  
Temperatura actual del reactor 1 = 75°
- Conocimiento:  
Si la temperatura de cualquier reactor supera el umbral establecido, entonces activar el mecanismo de emergencia.





# Sistemas Expertos



## 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

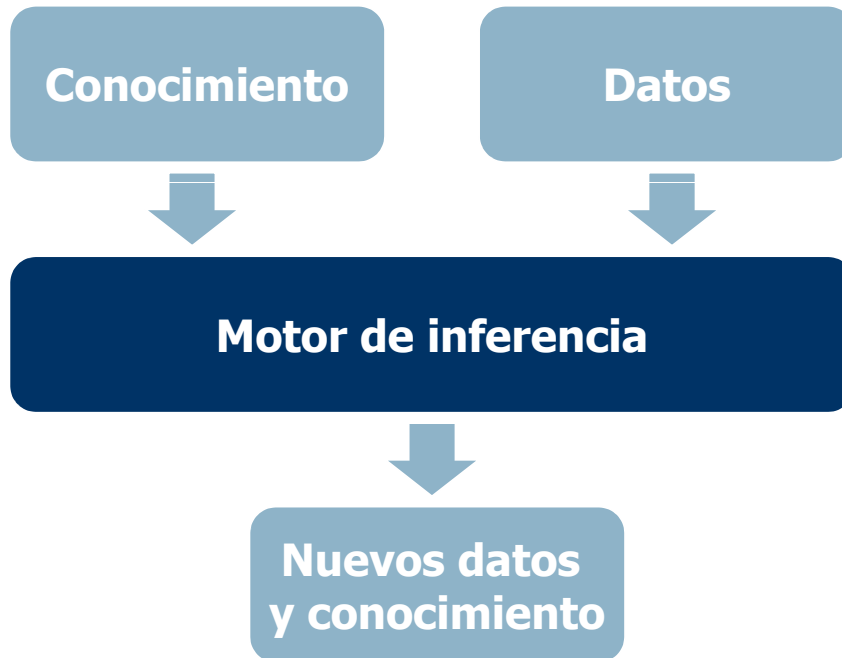
Datos	Conocimiento
Afirmaciones puntuales	Afirmaciones generales
Suelen ser dinámicos	Suele ser estático
Declaración extensiva	Declaración intensiva
Gran volumen	Pequeño volumen
Almacenamiento secundario	Almacenamiento en RAM
Representación eficiente	Representación simbólica



# Sistemas Expertos



## Estructura de un sistema experto



# Sistemas Expertos



## Términos habituales en Psicología



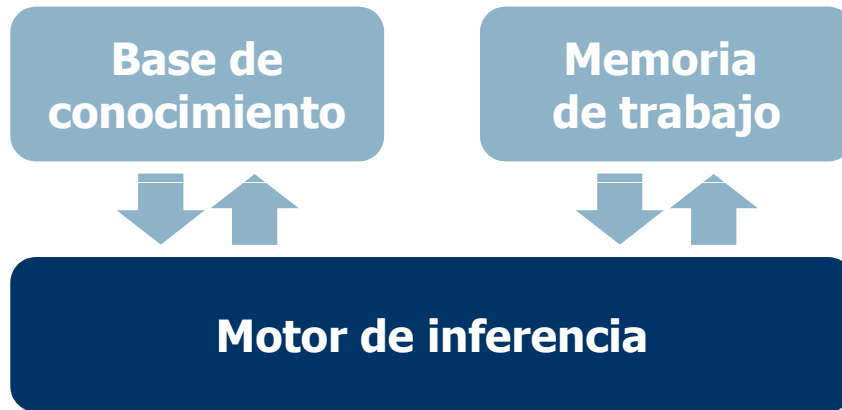
- LTM [long-term memory]: Memoria a largo plazo.
- STM [short-term memory]: Memoria a corto plazo.



# Sistemas Expertos



## Arquitectura de un sistema experto



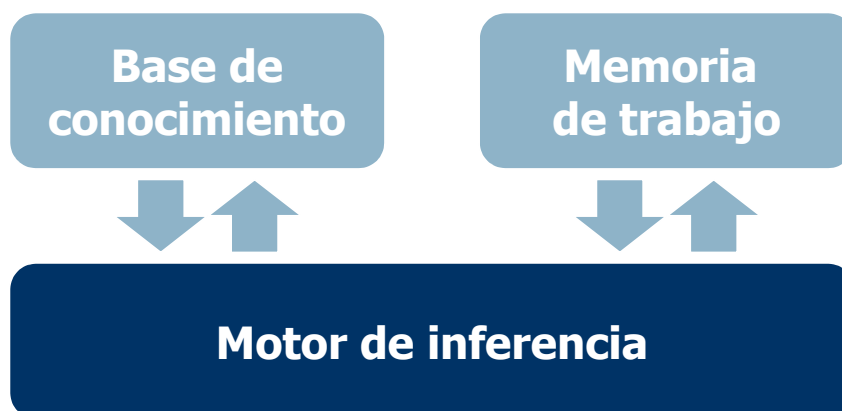
- KB [knowledge base]: Base de conocimiento.
- WM [working memory]: Memoria de trabajo.



# 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.



# Sistemas Expertos



## 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

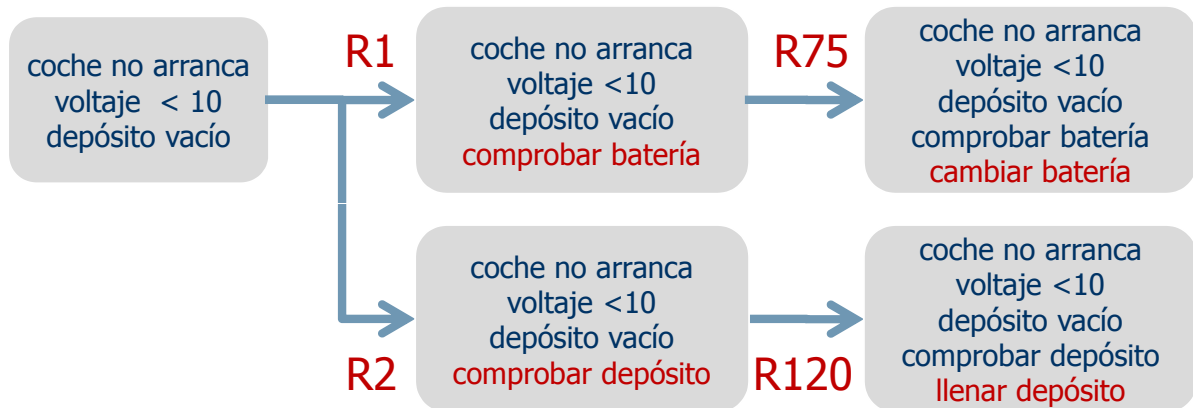
...

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).



## 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"]



# Sistemas Expertos



## 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

$$\forall x \text{ Fiebre}(x) \wedge \neg \text{AlergiaAAS}(x) \rightarrow \text{Terapia}(x, \text{Aspirina500})$$

- Fiebre(Pedro)
- $\neg \text{AlergiaAAS}(\text{Pedro})$



# Sistemas Expertos



## 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.



# Sistemas Expertos



## 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



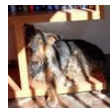
Comida



Salivación



Timbre



Sin respuesta

Durante el condicionamiento



Comida + timbre



Salivación

Después



Timbre



Salivación





# Sistemas expertos basados en reglas

## Modelos conductuales

p.ej. Aprendizaje condicionado (perros de Pavlov)



# 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".



# Sistemas expertos basados en reglas

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

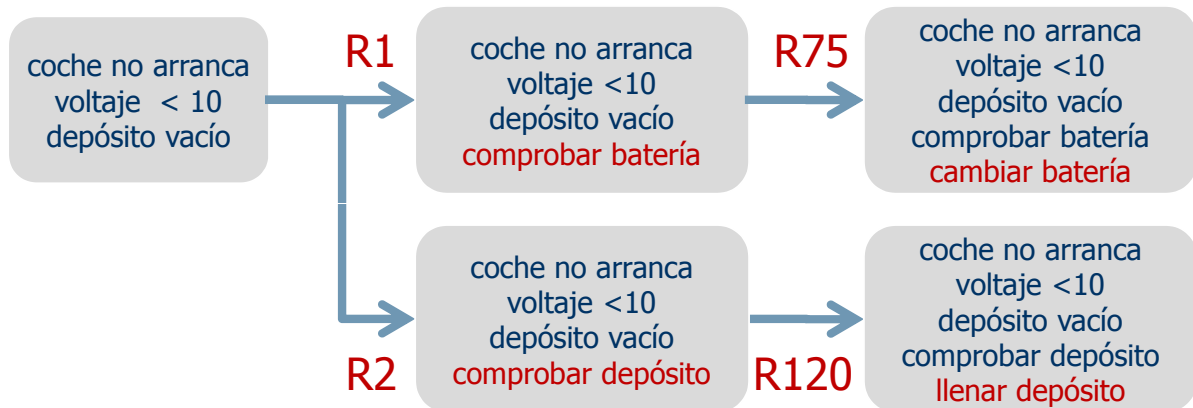
...

Regla 120. IF comprobar combustible  
AND depósito de combustible vacío  
THEN llenar depósito.



# Sistemas expertos basados en reglas

## 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



# Sistemas expertos basados en reglas

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

- **Datos:** Cualquier mecanismo de representación vale.

vg. Tupla (Pedro, 27, 124000)

Registro (C) Empleado ( Nombre=Pedro,  
Edad=27,  
Salario=124000 )

Objeto (OO) Clase cliente (propiedades y métodos)

- **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).



# Sistemas expertos basados en reglas

## **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.



# Sistemas expertos basados en reglas

## **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.



# Sistemas expertos basados en reglas

## 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

R0: 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



# Sistemas expertos basados en reglas



## Motor de inferencia:

### Encadenamiento hacia adelante

#### EJEMPLO

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

## 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
<code>temperatura = 40</code> <code>enfermo dos semanas</code> <code>garganta inflamada</code>	R2	R2
<code>temperatura = 40</code> <code>enfermo dos semanas</code> <code>garganta inflamada</code> <code>fiebre</code>		

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





# Sistemas expertos basados en reglas



## Motor de inferencia:

### Encadenamiento hacia adelante

#### EJEMPLO

M.T.	C.C.	Resolución
temperatura = 40 enfermo dos semanas garganta inflamada	R2	R2
temperatura = 40 enfermo dos semanas garganta inflamada fiebre	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
temperatura = 40 enfermo dos semanas garganta inflamada fiebre posible infección bacteriana	R1	R1
temperatura = 40 enfermo dos semanas garganta inflamada fiebre posible infección bacteriana infección en la garganta		



**Diagnóstico: Posible infección en la garganta**

# Sistemas expertos basados en reglas

## 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.

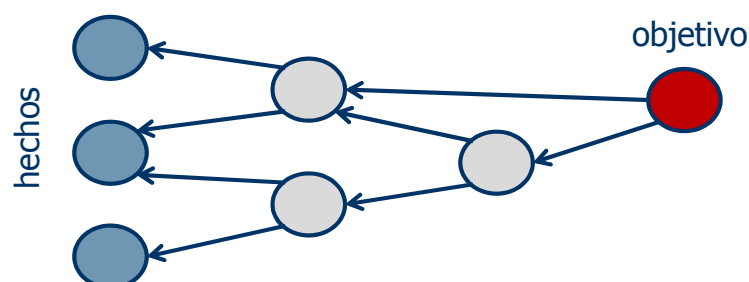


# Sistemas expertos basados en reglas

## Motor de inferencia:

### Encadenamiento hacia atrás

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



# Sistemas expertos basados en reglas



## **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.

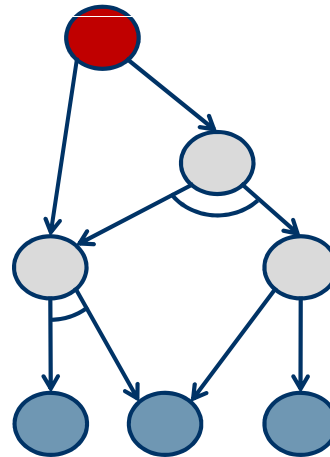


# Sistemas expertos basados en reglas

## Motor de inferencia: Encadenamiento hacia atrás

Para representar los objetivos que han de demostrarse, suele utilizarse un grafo Y/O:

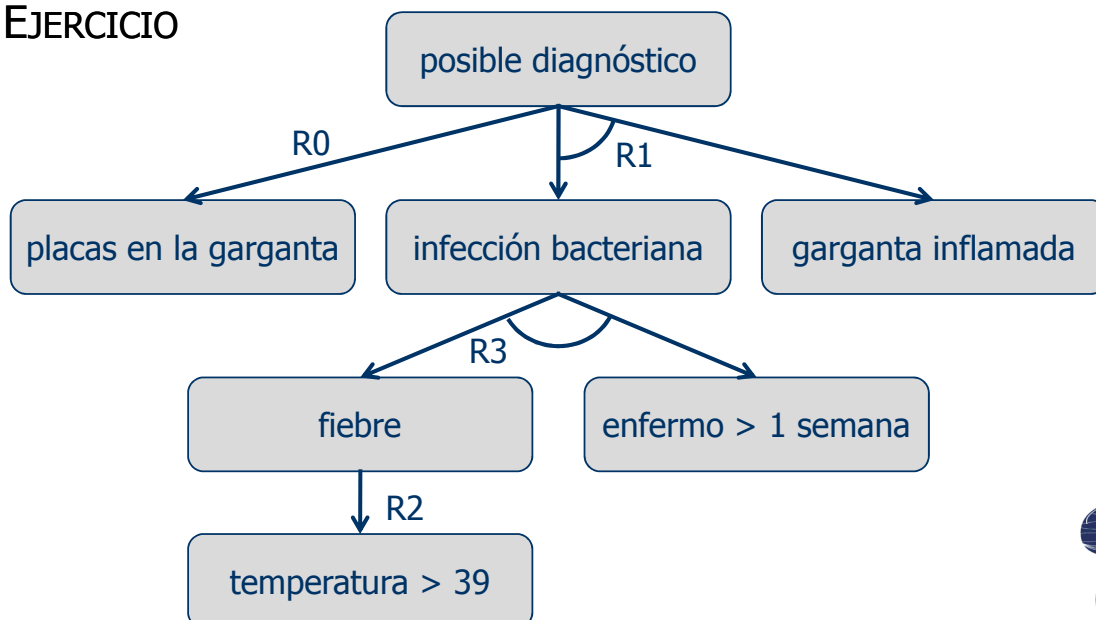
EJERCICIO  
Dibujar el grafo Y/O  
para el ejemplo anterior.



# Sistemas expertos basados en reglas

## Motor de inferencia: Encadenamiento hacia atrás

EJERCICIO

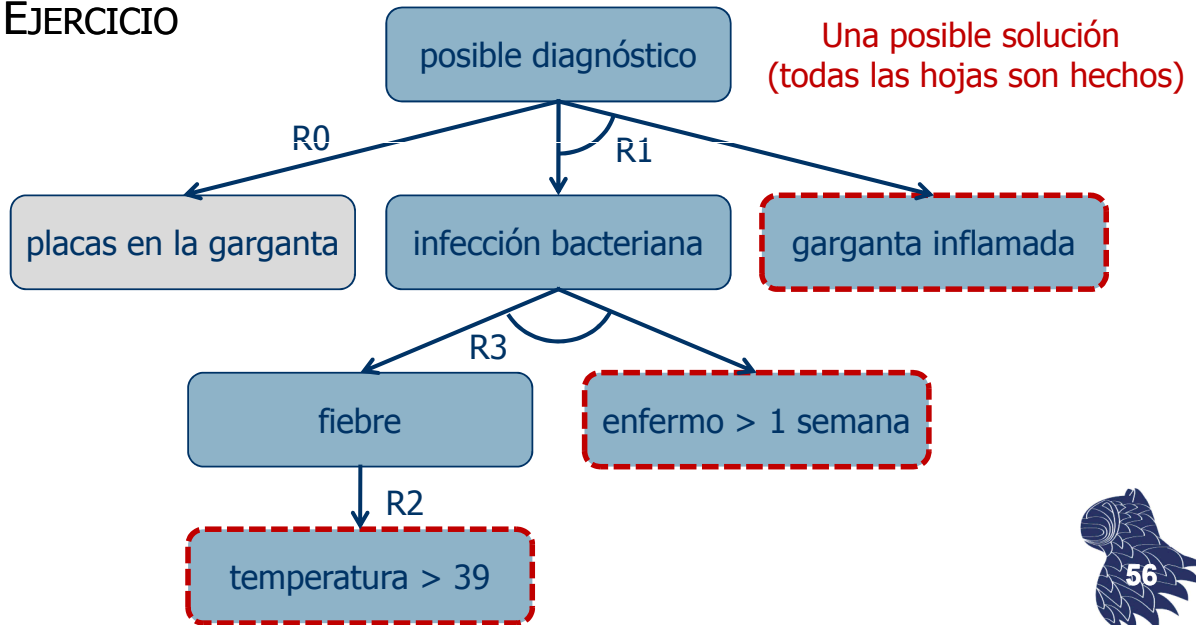


# Sistemas expertos basados en reglas



## Motor de inferencia: Encadenamiento hacia atrás

EJERCICIO

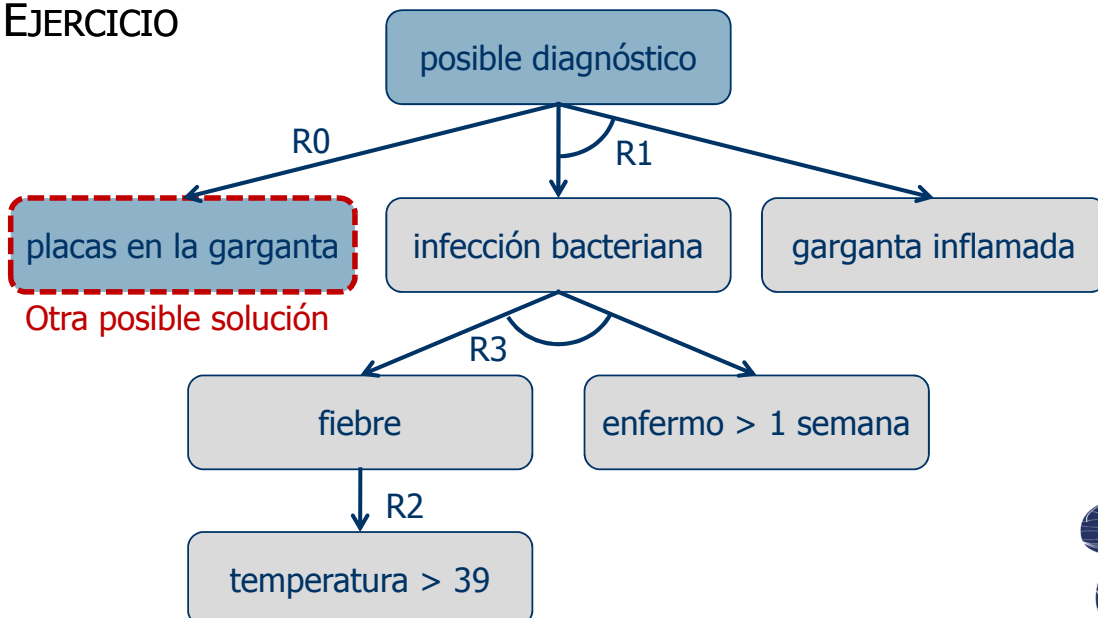


# Sistemas expertos basados en reglas



## Motor de inferencia: Encadenamiento hacia atrás

EJERCICIO



# Bibliografía: Sistemas Expertos

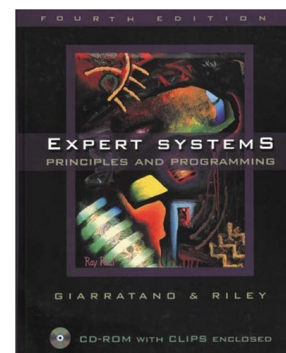
- John Durkin, **Expert Systems: Design and Development**. Prentice Hall, 1994.
- Peter Jackson, **Introduction to Expert Systems**. Addison Wesley, 1998.
- James P. Ignizio, **Introduction to Expert Systems: The Development and Implementation of Rule-Based Expert Systems**. McGraw-Hill, 1990.
- Ernest 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, 4<sup>th</sup> edition, 2005.  
ISBN 0534384471



## PROLOG

- William F. Clocksin  
& Christopher S. Mellish:  
**Programming in Prolog**  
Springer, 5<sup>th</sup> edition, 2003  
ISBN 3540006788

