INTELIGENCIA ARTIFICIAL I

Ingeniería en Mecatrónica

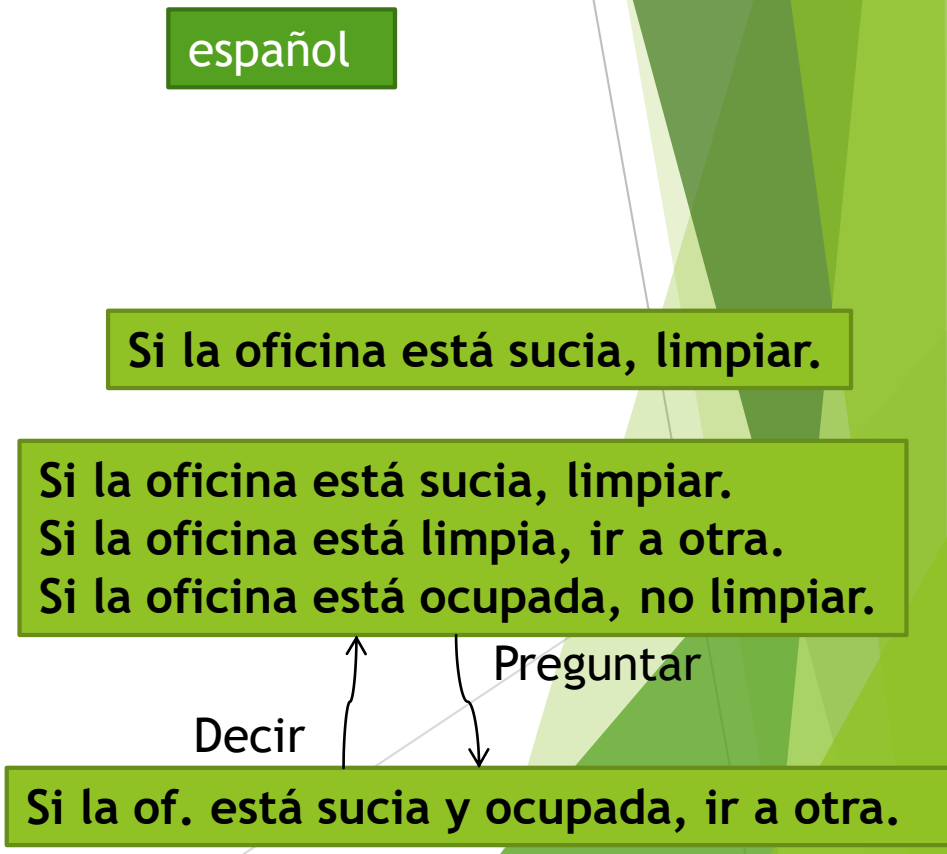
Representación del conocimiento y Razonamiento Lógico

Dra. Ing. Selva S. Rivera

Profesora Titular

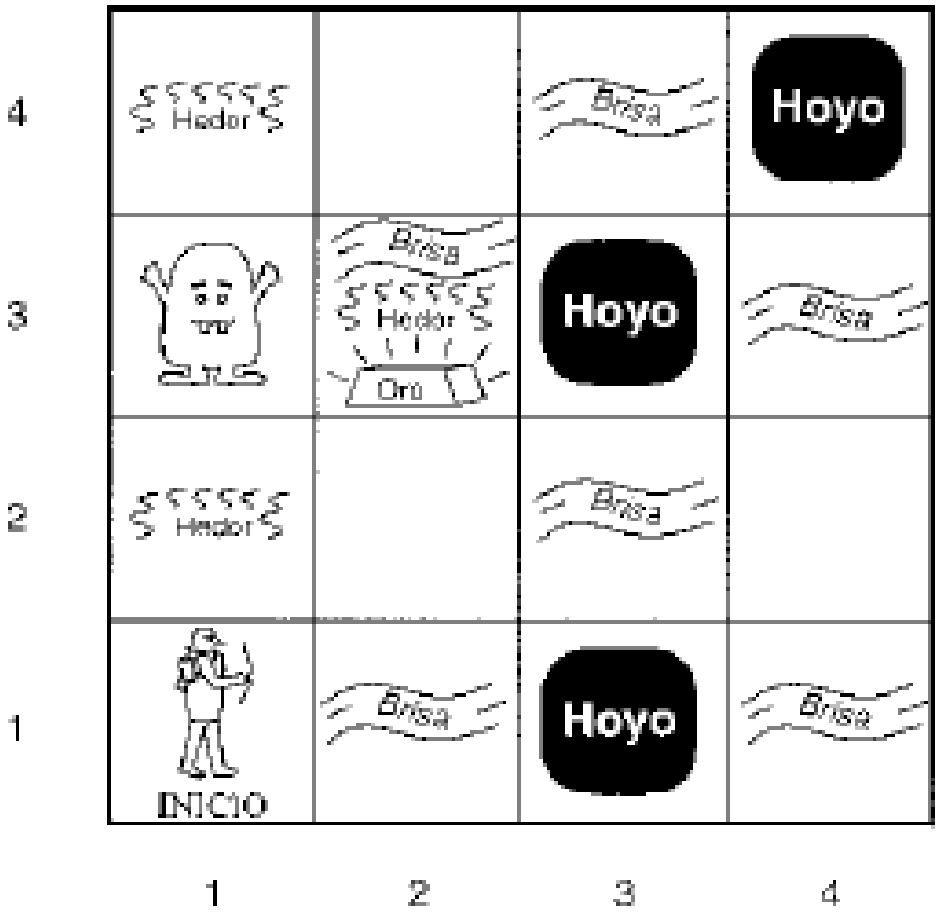
Representación del conocimiento

- Lenguaje de representación del conocimiento
- Sentencias
- Base de Conocimiento



fuente: Inteligencia Artificial. Un enfoque Moderno - Russell y Norvig

El mundo de wumpus

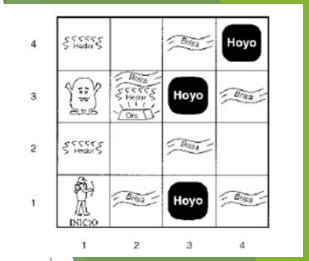


Percepciones

- Hedor
- Brisa
- Resplandor
- Un golpe
- Grito de muerte del Wumpus

fuente: Inteligencia Artificial. Un enfoque Moderno - Russell y Norvig

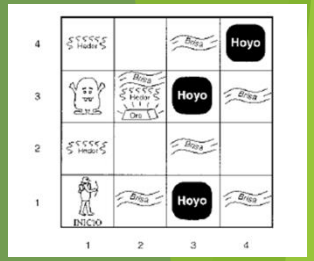
TABLA REAS para el wumpus



Rendimiento	Entorno	Actuadores	Sensores
+1000 por recoger oro	Matriz 4x4	El agente se puede mover hacia adelante y girar 90º a izq. o derecha	Dispone de sensores para percibir, **Hedor**, **Brisa**, **Resplandor**
-1000 por caer en un hoyo o ser comido por el wumpus	El agente siempre comienza en [1,1] orientado a la derecha	El agente muere si entra en una casilla con un hoyo o con el wumpus vivo.	Si el agente intenta atravesar una pared, sentirá un golpe.
-1 por cada acción que se realice	Las posiciones del oro y del wumpus son aleatorias	El agente puede “agarrar” el oro,	Cuando el Wumpus muere emite un **grito** que se escucha en toda la cueva.
-10 por lazar la flecha	Con probabilidad 0,2 cada casilla puede tener un hoyo	El agente puede “disparar” la flecha en línea recta. La flecha avanza hasta que encuentra una pared o mata al wumpus. Sólo se dispone de una flecha.	

fuente: Inteligencia Artificial. Un enfoque Moderno - Russell y Norvig

El mundo de wumpus



1,4	2,4	3,4	4,4
1,3	2,3	3,3	4,3
1,2 OK	2,2	3,2	4,2
1,1 A OK	2,1 OK	3,1	4,1

(a)

A = *Agente*
B = *Brisa*
G = *Resplandor, Oro*
OK = *Casilla segura*
P = *Hoyo*
S = *Hedor*
V = *Visitada*
W = *Wumpus*

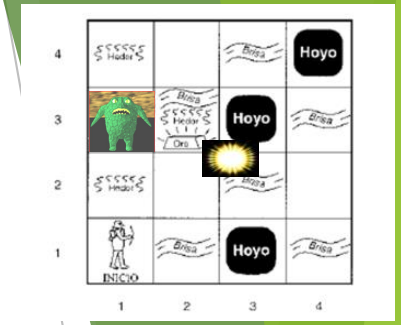
1,4	2,4	3,4	4,4
1,3	2,3	3,3	4,3
1,2 OK	2,2 ¿P?	3,2	4,2
1,1 V OK	2,1 A B OK	3,1 ¿P?	4,1

(b)

Percepciones del agente : [Hedor, Brisa, Resplandor, Golpe, Grito]

fuente: Inteligencia Artificial. Un enfoque Moderno - Russell y Norvig

El mundo de wumpus



1,4	2,4	3,4	4,4
1,3	2,3	3,3	4,3
1,2 A S OK	2,2 OK	3,2	4,2
1,1 V OK	2,1 B V OK	3,1 ¡P!	4,1

(a)

A = *Agente*
B = *Brisa*
G = *Resplandor, Oro*
OK = *Casilla segura*
P = *Hoyo*
S = *Mal hedor*
V = *Visitada*
W = *Wumpus*

1,4	2,4 ¿P!	3,4	4,4
1,3 ¡W!	2,3 A G S B	3,3 ¿P?	4,3
1,2 S V OK	2,2 V OK	3,2	4,2
1,1 V OK	2,1 B V OK	3,1 ¡P!	4,1

(b)

fuente: Inteligencia Artificial. Un enfoque Moderno - Russell y Norvig

REPRESENTACIÓN Y RAZONAMIENTO LÓGICO

- **Las BC se componen de sentencias**

- **SINTAXIS** : especifica las sentencias que están bien formadas

- **SEMÁNTICA:** define el **valor de verdad** de cada sentencia respecto a cada **mundo posible o modelo** (significado de las sentencias)

"m" es un modelo de "α"
Indica que la sentencia
"α" es verdadera en el modelo "m"

fuente: Inteligencia Artificial. Un enfoque Moderno - Russell y Norvig

SENTENCIA X + Y = 4

X e Y son el nº de mujeres y hombres jugando cartas

MODELOS o Mundos Posibles

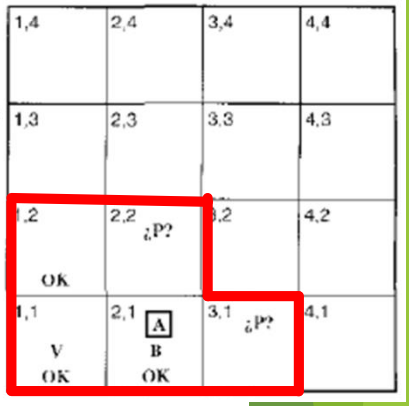
X	Y
0	4
1	3
2	2
3	1
4	0

IMPLICACIÓN

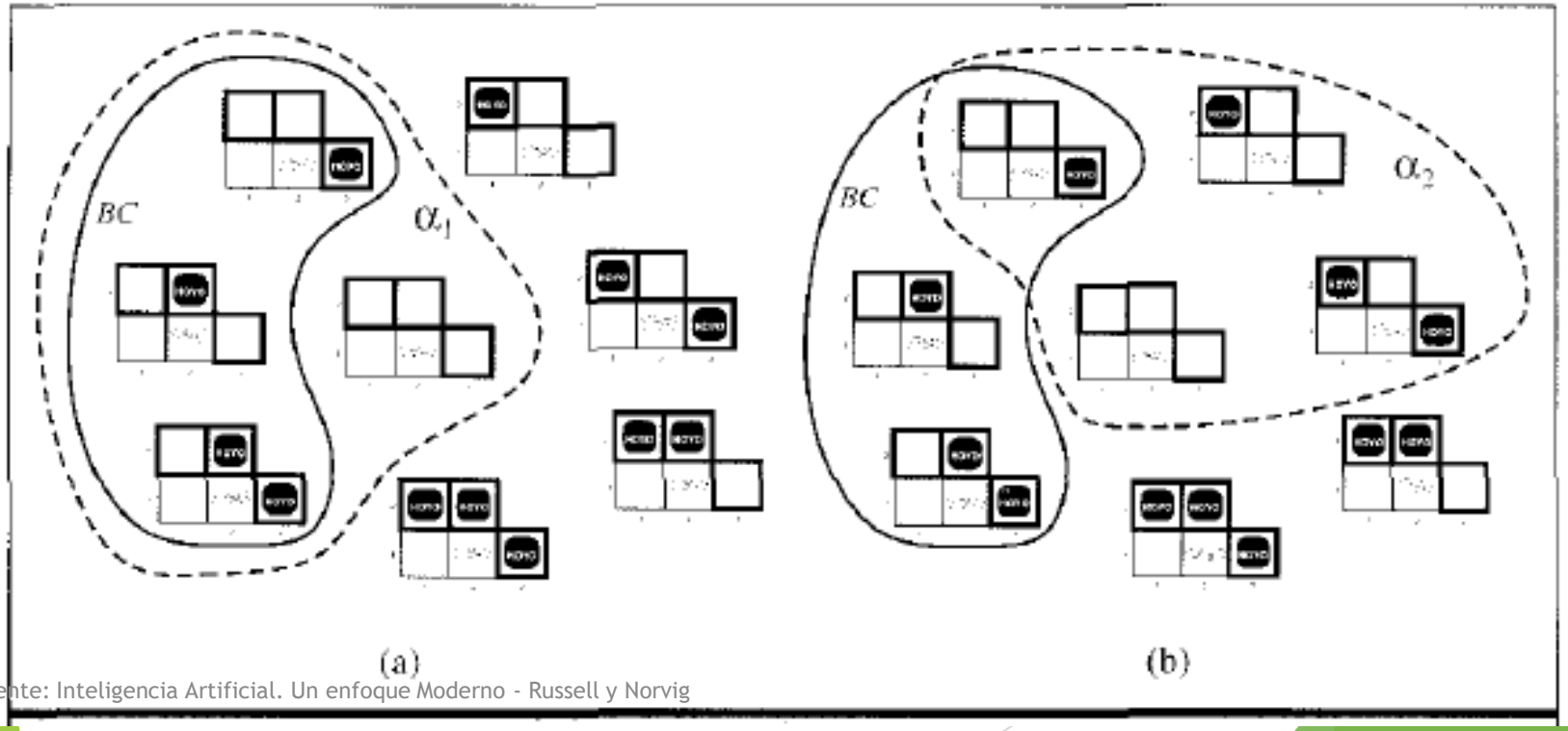
X+Y=4 $\models$ 4=X+Y

fuente: Inteligencia Artificial. Un enfoque Moderno - Russell y Norvig

INFERENCIA LÓGICA



α_1 = «No hay un hoyo en la casilla [1, 2]».
α_2 = «No hay un hoyo en la casilla [2, 2]».



fuente: Inteligencia Artificial. Un enfoque Moderno - Russell y Norvig

Comprobación de modelos

- Es un **algoritmo de inferencia lógica** que enumera todos los modelos posibles y comprueba si α es verdadera en todos los modelos en los que la BC es verdadera.

Se dice que "α se deriva de la BC"

Propiedades de los algoritmos de inferencia

- Un algoritmo de inferencia que deriva sólo sentencias implicadas se dice que es **"sólido" o que "mantiene la verdad".**
- Un algoritmo de inferencia es **"completo"** si puede derivar cualquier sentencia que esté implicada.

fuente: Inteligencia Artificial. Un enfoque Moderno - Russell y Norvig

Lógica proposicional sintaxis

(Define las sentencias que se pueden construir)

- **Sentencias atómicas :** se componen de un único **símbolo proposicional**

- **Sentencias complejas:** se construyen a partir de sentencias más simples mediante el uso de las **conectivas lógicas:**

Conectivas lógicas	descripción
¬	(no) negación
^	(y) conjunción
v	(o) disyunción
⇒ ⊃ o →	(implica) implicación
⇔	(sí y sólo si) bicondicional

fuente: Inteligencia Artificial. Un enfoque Moderno - Russell y Norvig

Backus-Naur form
(para lógica proposicional)

- *Sentencia* → *Sentencia atómica* | *Sentencia compleja*
- *Sentencia atómica* → ***Verdadero*** | ***Falso*** | *Símbolo proposicional*
- *Símbolo proposicional* → ***P*** | ***Q*** | ***R*** | …
- *Sentencia compleja* → ¬ *Sentencia*
  | (*Sentencia* ^ **Sentencia**)
  | (*Sentencia* v ***Sentencia***)
  | (*Sentencia* → **Sentencia**)
  | (*Sentencia* ↔ **Sentencia**)

fuente: Inteligencia Artificial. Un enfoque Moderno - Russell y Norvig

Lógica proposicional - semántica

(Define las reglas para determinar el valor de verdad de una sentencia respecto de un modelo concreto)

Un modelo posible

$$m_1 = \{H_{1,2} = falso, H_{2,2} = \text{falso}, H_{3,1} = verdadero\}$$

Todas las sentencias se construyen a partir de las sentencias atómicas y las cinco conectivas lógicas.

Para calcular el valor de verdad

Para las sentencias atómicas:

- ***Verdadero*** es verdadero en todos los modelos
- ***Falso*** es falso en todos los modelos
- *El valor de verdad de cada símbolo proposicional se debe especificar directamente para cada modelo.*

Para las sentencias complejas:

- *Para toda sentencia* "s" y todo modelo "*m*", *la sentencia* ¬*s* es verdadera en "*m*" *si y sólo si* "s" *es falsa en* "m".

fuente: Inteligencia Artificial. Un enfoque Moderno - Russell y Norvig

Lógica proposicional tabla de verdad

¬P ∨ Q

P	Q	$\neg P$	$P \wedge Q$	$P \vee Q$	$P \Rightarrow Q$	$P \Leftrightarrow Q$
falso	*falso*	*verdadero*	*falso*	*falso*	*verdadero*	*verdadero*
falso	*verdadero*	*verdadero*	*falso*	*verdadero*	*verdadero*	*falso*
verdadero	*falso*	*falso*	*falso*	*verdadero*	*falso*	*falso*
verdadero	*verdadero*	*falso*	*verdadero*	*verdadero*	*verdadero*	*verdadero*

Figura 7.8 Tablas de verdad para las cinco conectivas lógicas. Para utilizar la tabla, por ejemplo, para calcular el valor de $P \vee Q$, cuando P es verdadero y Q falso, primero mire a la izquierda en donde P es *verdadera* y Q es *falsa* (la tercera fila). Entonces mire en esa fila justo en la columna de $P \vee Q$ para ver el resultado: *verdadero*. Otra forma de verlo es pensar en cada fila como en un modelo, y que sus entradas en cada fila dicen para cada columna si la sentencia es verdadera en ese modelo.

fuente: Inteligencia Artificial. Un enfoque Moderno - Russell y Norvig

Base de Conocimiento

- $H_{i\ j}$ es verdadero si hay un hoyo en la casilla [i,j]
- $B_{i\ j}$ es verdadero si hay una corriente de aire (una brisa)en la casilla [i,j]

- No hay ningún hoyo en la casilla [1, 1].

$$R_1: \quad \neg H_{1,1}$$

- En una casilla se siente una brisa si y sólo si hay un hoyo en una casilla vecina. Esta regla se ha de especificar para cada casilla; por ahora, tan sólo incluimos las casillas que son relevantes:

$$R_2: \quad B_{1,1} \Leftrightarrow (H_{1,2} \vee H_{2,1})$$
$$R_3: \quad B_{2,1} \Leftrightarrow (H_{1,1} \vee H_{2,2} \vee H_{3,1})$$

- Las sentencias anteriores son verdaderas en todos los mundos de *wumpus*. Ahora incluimos las percepciones de brisa para las dos primeras casillas visitadas en el mundo concreto en donde se encuentra el agente, llegando a la situación que se muestra en la Figura 7.3(b).

$$R_4: \quad \neg B_{1,1}$$
$$R_5: \quad B_{2,1}$$

BC wumpus

fuente: Inteligencia Artificial. Un enfoque Moderno - Russell y Norvig

Figura 7.9 Una tabla de verdad construida para la base de conocimiento del ejemplo. La BC es verdadera si R_1 hasta R_5 son verdaderas, cosa que sucede en tres de las 128 filas. En estas tres filas, $H_{1,2}$ es falsa, así que no hay ningún hoyo en la casilla [1, 2]. Por otro lado, puede haber (o no) un hoyo en la casilla [2, 2].

inferencia

B1,1	B2,1	H1,1	H1,2	H2,1	H2,2	H3,1	R1	R2	R3	R4	R5	BC
F	F	F	F	F	F	F	V	V	V	V	F	F
F	F	F	F	F	F	V	V	V	F	V	F	F
…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…
F	V	F	F	F	F	F	V	V	F	V	V	F
F	V	F	F	F	F	V	**V**	**V**	**V**	**V**	**V**	**V**
F	V	F	F	F	V	F	**V**	**V**	**V**	**V**	**V**	**V**
F	V	F	F	F	V	V	**V**	**V**	**V**	**V**	**V**	**V**
F	V	F	F	V	F	F	V	F	F	V	V	F
…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…
V	V	V	V	V	V	V	F	V	V	F	V	F

Tabla de verdad para la BC del ejemplo anterior.

Equivalencias

Dos sentencias son equivalentes lógicamente si tienen los mismos valores de verdad en el mismo conjunto de modelos

inferencia

$$
\begin{aligned}
(\alpha \wedge \beta) &\equiv (\beta \wedge \alpha) && \text{Conmutatividad de } \wedge \\
(\alpha \vee \beta) &\equiv (\beta \vee \alpha) && \text{Conmutatividad de } \vee \\
((\alpha \wedge \beta) \wedge \gamma) &\equiv (\alpha \wedge (\beta \wedge \gamma)) && \text{Asociatividad de } \wedge \\
((\alpha \vee \beta) \vee \gamma) &\equiv (\alpha \vee (\beta \vee \gamma)) && \text{Asociatividad de } \vee \\
\neg(\neg\alpha) &\equiv \alpha && \text{Eliminación de la doble negación} \\
(\alpha \Rightarrow \beta) &\equiv (\neg\beta \Rightarrow \neg\alpha) && \text{Contraposición} \\
(\alpha \Rightarrow \beta) &\equiv (\neg\alpha \vee \beta) && \text{Eliminación de la implicación} \\
(\alpha \Leftrightarrow \beta) &\equiv ((\alpha \Rightarrow \beta) \wedge (\beta \Rightarrow \alpha)) && \text{Eliminación de la bicondicional} \\
\neg(\alpha \wedge \beta) &\equiv (\neg\alpha \vee \neg\beta) && \text{Ley de Morgan} \\
\neg(\alpha \vee \beta) &\equiv (\neg\alpha \wedge \neg\beta) && \text{Ley de Morgan} \\
(\alpha \wedge (\beta \vee \gamma)) &\equiv ((\alpha \wedge \beta) \vee (\alpha \wedge \gamma)) && \text{Distribución de } \wedge \text{ respecto a } \vee \\
(\alpha \vee (\beta \wedge \gamma)) &\equiv ((\alpha \vee \beta) \wedge (\alpha \vee \gamma)) && \text{Distribución de } \vee \text{ respecto a } \wedge
\end{aligned}
$$

Figura 7.11 Equivalencias lógicas. Los símbolos α, β y γ se pueden sustituir por cualquier sentencia en lógica proposicional.

validez y satisfacibilidad

Una sentencia es válida (**tautología**) si es verdadera en todos los modelos.

Averiguar la validez de
(BC => a)

Una sentencia es satisfactoria si es verdadera para algún modelo.

α *es válida sí y sólo si* $\neg\alpha$ *es insatisfacible*

refutación

fuente: Inteligencia Artificial. Un enfoque Moderno - Russell y Norvig

Refutación o contradicción

- La demostración de **α** a partir de **BC** averiguando la insatisfacibilidad de (**BC** ^ ¬**α**) se corresponde exactamente con la técnica de demostración en matemáticas de “reducción al absurdo”.

- Asumimos que la sentencia **α** es falsa y observamos si se llega a una contradicción con las premisas en **BC**. Dicha contradicción es justamente lo que queremos expresar cuando decimos que la sentencia (**BC** ^ ¬**α**) es insatisfacible.

fuente: Inteligencia Artificial. Un enfoque Moderno - Russell y Norvig

PATRONES DE INFERENCIA EN LÓGICA PROPOSICIONAL

Reglas de inferencia

- Modus Ponens
- Eliminación
- Resolución

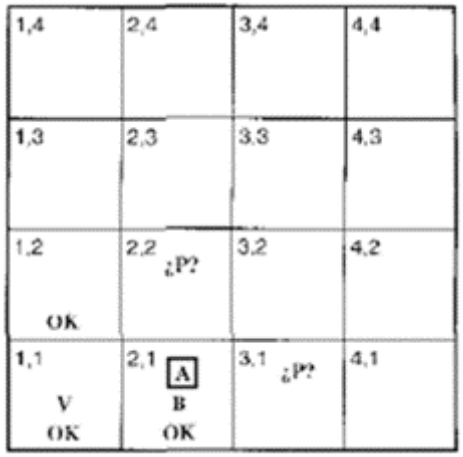
fuente: Inteligencia Artificial. Un enfoque Moderno - Russell y Norvig

Reglas de inferencia

Todas las equivalencias lógicas se pueden utilizar como reglas de inferencia

Modus ponens	$\dfrac{\alpha \Rightarrow \beta, \quad \alpha}{\beta}$	**perro → animal, perro** **Se infiere animal**
Eliminación- ^	$\dfrac{\alpha \wedge \beta}{\alpha}$ $\quad$ $\dfrac{\alpha \wedge \beta}{\beta}$	resplandor ^ wumpus Se puede inferir cualquiera de sus conjuntores
Resolución unaria	$\dfrac{\alpha \vee \beta, \neg\beta}{\alpha}$	resplandor v wumpus, ¬wumpus resplandor
Resolución	$\dfrac{\alpha \vee \beta, \neg\beta \vee \gamma}{\alpha \vee \gamma}$	resplandor v wumpus, ¬wumpus v brisa Se puede inferir resplandor o brisa

Demostrar $\neg H_{1,2}$



- Comenzamos con la BC

$$R_1: -H_{1,1}$$

$$R_2: \ B_{1,1} \leftrightarrow (H_{1,2} \ \vee \ H_{2,1})$$

$$R_3: \ B_{2,1} \leftrightarrow (H_{1,1} \ \vee \ H_{2,2} \vee \ H_{2,2})$$

$$R_4: -B_{1,1}$$

$$R_5: B_{2,1}$$

fuente: Inteligencia Artificial. Un enfoque Moderno - Russell y Norvig

Demostrar $\neg H_{1,2}$

BC

$$R_1: -H_{1,1}$$

$$R_2: \ B_{1,1} \leftrightarrow (H_{1,2} \vee H_{2,1})$$

$$R_3: \ B_{2,1} \leftrightarrow (H_{1,1} \vee H_{2,2} \vee H_{2,2})$$

$$R_4: -B_{1,1}$$

$$R_5: B_{2,1}$$

Eliminamos la bicondiconal

$$R_2: \ B_{1,1} \leftrightarrow (H_{1,2} \vee H_{2,1})$$

- Para obtener

$$R_6: \ (B_{1,1} \rightarrow (H_{1,1} \vee H_{2,1})) \wedge ((H_{1,2} \vee H_{2,1}) \rightarrow B_{1,1})$$

fuente: Inteligencia Artificial. Un enfoque Moderno - Russell y Norvig

Demostrar $\neg H_{1,2}$

- Aplicamos Eliminación- ^

$$R_6: \ (B_{1,1} \rightarrow (H_{1,1} \vee H_{2,1})) \wedge \ ((H_{1,2} \vee H_{2,1}) \rightarrow B_{1,1} \ )$$

- Para obtener

$$R_7: \ (H_{1,2} \vee H_{2,1}) \rightarrow B_{1,1}$$

Y por equivalencia lógica de contraposición obtenemos

$$R_8: \ -B_{1,1} \rightarrow \ - (H_{1,2} \vee H_{2,1})$$

fuente: Inteligencia Artificial. Un enfoque Moderno - Russell y Norvig

BC derivada

$$R_1: -H_{1,1}$$

$$R_2: \ B_{1,1} \leftrightarrow (H_{1,2} \ \vee \ H_{2,1})$$

$$R_3: \ B_{2,1} \leftrightarrow (H_{1,1} \ \vee \ H_{2,2} \vee \ H_{2,2})$$

$$R_4: -B_{1,1}$$

$$R_5: B_{2,1}$$

$$R_6: \ (B_{1,1} \rightarrow (H_{1,1} \vee H_{2,1})) \wedge \ ((H_{1,2} \vee H_{2,1}) \rightarrow B_{1,1})$$

$$R_7: \ (H_{1,2} \vee H_{2,1}) \rightarrow B_{1,1}$$

$$R_8: \ -B_{1,1} \rightarrow \ -(H_{1,2} \vee H_{2,1})$$

fuente: Inteligencia Artificial. Un enfoque Moderno - Russell y Norvig

Demostrar $\neg H_{1,2}$

- **Aplicamos el Modus Ponens**

$$\frac{\alpha \Rightarrow \beta, \quad \alpha}{\beta}$$

- con R_8 y la R_4

$$R_8: \left(-B_{1,1} \rightarrow -\left(H_{1,2}\, V\, H_{2,1}\right)\right)$$

$$R_4: -B_{1,1}$$

- Para obtener

$$R_9: -\left(H_{1,2}\, V\, H_{2,1}\right)$$

fuente: Inteligencia Artificial. Un enfoque Moderno - Russell y Norvig

Demostrar $\neg H_{1,2}$

- Aplicamos la Ley de Morgan a

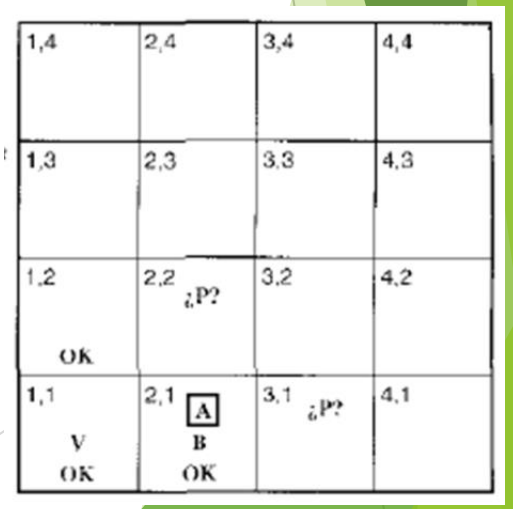
$$R_9: -(H_{1,2} \ V \ H_{2,1})$$

- Para obtener

$$R_{10}: -H_{1,2} \ \Lambda \ -H_{2,1}$$

- Concluyendo por eliminación que

$$\neg H_{1,2}$$

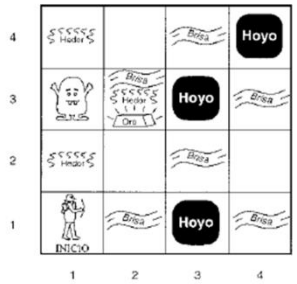


fuente: Inteligencia Artificial. Un enfoque Moderno - Russell y Norvig

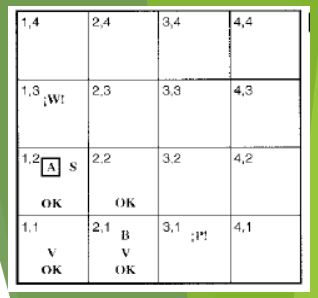
PRUEBA o demostración

- Obtener una prueba es muy semejante a encontrar una solución en un problema de búsqueda.
- Si la función sucesor se define para generar todas las aplicaciones posibles de las reglas de inferencia, entonces todos los algoritmos de búsqueda vistos se pueden utilizar para buscar una prueba.
- La búsqueda de pruebas es una alternativa a tener que enumerar todos los modelos.

fuente: Inteligencia Artificial. Un enfoque Moderno - Russell y Norvig



Resolución



- Consideremos que el agente vuelve de la casilla [2,1] a la [1,1] y entonces va a la casilla [1,2] donde percibe hedor pero no percibe brisa. Entonces **añadimos**:

$$R_{11}: -B_{1,2}$$

$$R_{12}: \ B_{1,2} \leftrightarrow (H_{1,1} \vee H_{2,2} \vee H_{1,3})$$

- Podemos derivar (como hicimos anteriormente)

$$R_{13}: -H_{2,2}$$

$$R_{14}: -H_{1,3}$$

fuente: Inteligencia Artificial. Un enfoque Moderno - Russell y Norvig

Resolución

- Si aplicamos eliminación de la bicondicional a

$$R_3\colon\ B_{2,1} \leftrightarrow (H_{1,1} \vee H_{2,2} \vee H_{3,1})$$

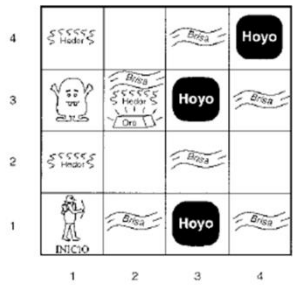
- Seguido del MP a

$$\frac{\alpha \Rightarrow \beta, \quad \alpha}{\beta} \qquad R_5\colon B_{2,1}$$

- Se obtiene

$$R_{15}\colon\ (H_{1,1} \vee H_{2,2} \vee H_{3,1})$$

fuente: Inteligencia Artificial. Un enfoque Moderno - Russell y Norvig



Resolución

- de $R_{15}: (H_{1,1} \vee H_{2,2} \vee H_{3,1})$
- Y sabiendo que $R_{13}: -H_{2,2}$
- Se resuelve $R_{16}: (H_{1,1} \vee H_{3,1})$
- Y recordando que $R_1: -H_{1,1}$ se obtiene

$$R_{17}: H_{3,1}$$

fuente: Inteligencia Artificial. Un enfoque Moderno - Russell y Norvig

Resolución

- Con cláusulas de longitud 2

$$\frac{l_1 \vee l_2 \qquad -l_2 \vee l_3}{l_1 \vee l_3}$$

Disyunción de literales

- La cláusula resultante debería contener sólo una copia de cada literal. Se llama **factorización** al proceso de eliminar copias de literales.

  Ej: AvB se resuelve con Av¬B dando AvA que se reduce a A

Cualquier algoritmo de búsqueda completo, aplicando sólo la regla de resolución, puede derivar cualquier conclusión implicada por cualquier BC en lógica proposicional.

fuente: Inteligencia Artificial. Un enfoque Moderno - Russell y Norvig

Forma normal conjuntiva

- FNC: toda sentencia en lógica proposicional es equivalente lógicamente a una **conjunción de disyunciones** de literales.

Ejemplo:

$$R_2: \; B_{1,1} \leftrightarrow (H_{1,2} \vee H_{2,1})$$

Eliminamos $\leftrightarrow$ $\quad (B_{1,1} \rightarrow (H_{1,2} \vee H_{2,1})) \wedge ((H_{1,2} \vee H_{2,1}) \rightarrow B_{1,1})$

Eliminamos $\rightarrow$ $\quad (-B_{1,1} \vee H_{1,2} \vee H_{2,1}) \wedge (B_{1,1} \vee -(H_{1,2} \vee H_{2,1}))$

Ley de Morgan

$$(-B_{1,1} \vee H_{1,2} \vee H_{2,1}) \wedge (B_{1,1} \vee (-H_{1,2} \wedge - H_{2,1}))$$

$$(-B_{1,1} \vee H_{1,2} \vee H_{2,1}) \wedge ((B_{1,1} \vee - H_{1,2}) \wedge (B_{1,1} \vee - H_{2,1}))$$

fuente: Inteligencia Artificial. Un enfoque Moderno - Russell y Norvig

Algoritmo de resolución

para Lógica Proposicional

- Trabajan utilizando el principio de prueba mediante contradicción. (BC→α ↔ (BC ^ ¬α) es insatisfacible
- Se convierte (BC ^ ¬α) a FNC
- Se aplica la regla de resolución a las cláusulas obtenidas
- Cada par que contiene literales complementarios se resuelve para generar una nueva cláusula
- El proceso continua hasta
  - No hay nuevas cláusulas que se puedan añadir (BC no implica α) o
  - Se deriva la cláusula vacía (BC→ α)

fuente: Inteligencia Artificial. Un enfoque Moderno - Russell y Norvig

Resolución-lp

R_2: $B_{1,1} \leftrightarrow (H_{1,2} \vee H_{2,1})$ R_4: $-B_{1,1}$

$$BC = R_2 \wedge R_4 = (B_{1,1} \Leftrightarrow (H_{1,2} \vee H_{2,1})) \wedge \neg B_{1,1}$$

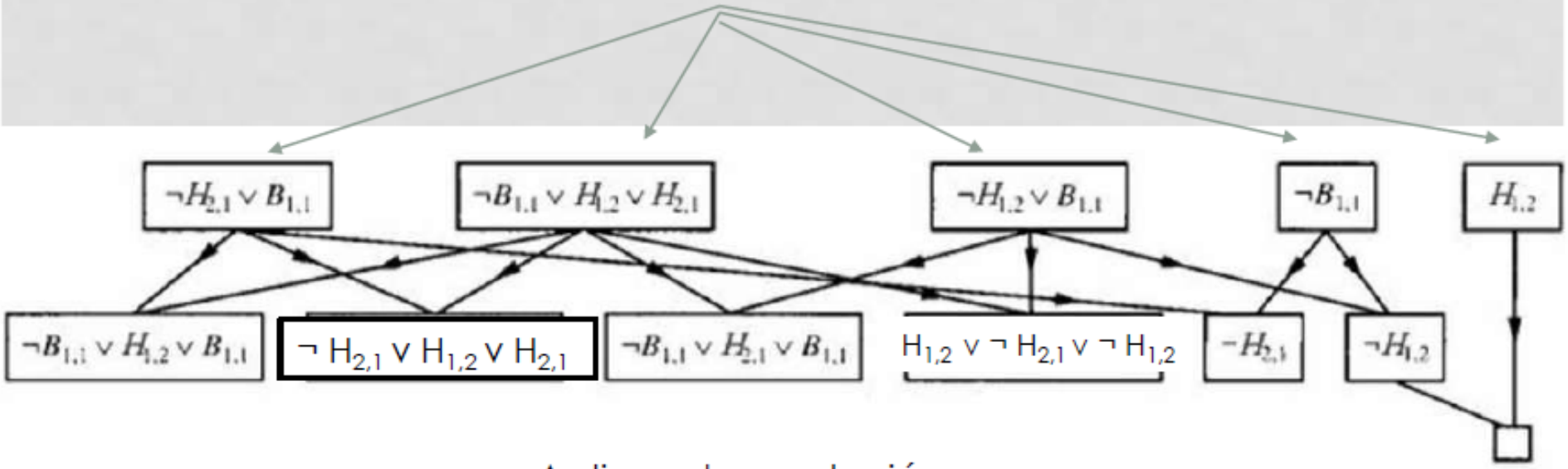
- demostrar: $\neg H_{1,2}$
- Demostramos por contradicción:

$$\underbrace{((B_{1,1} \leftrightarrow (H_{1,2} \vee H_{2,1})) \wedge \neg B_{1,1})}_{BC} \wedge \underbrace{H_{1,2}}_{\neg \alpha}$$

fuente: Inteligencia Artificial. Un enfoque Moderno - Russell y Norvig

EXPRESAMOS LA BC COMO FNC

$$((B_{1,1} \leftrightarrow (H_{1,2} \vee H_{2,1})) \wedge \neg B_{1,1}) \wedge H_{1,2}$$



Aplicando resolución

fuente: Inteligencia Artificial. Un enfoque Moderno - Russell y Norvig

Cláusulas de horn
(disyunción de literales de los cuales como mucho uno es positivo)

- Las CH con exactamente un literal positivo se denominan **cláusulas positivas.** ($L_{1,1} \vee \neg B_{1,1} \vee \neg H_{2,1}$)
- El literal positivo se denomina **cabeza.**
- La disyunción de literales negativos se llama **cuerpo.**
- Una cláusula positiva que no tiene literales negativos

  (cabeza sin cuerpo) se llama **hecho.**
- Cada CH se puede escribir como una implicación cuya premisa sea una conjunción de literales positivos y cuya conclusión sea un único literal positivo. $(B_{1,1} \wedge H_{2,1}) \rightarrow L_{1,1}$
- Averiguar si hay o no implicación con CH se puede realizar en un tiempo lineal respecto al tamaño de la BC.

fuente: Inteligencia Artificial. Un enfoque Moderno - Russell y Norvig

Encadenamiento hacia adelante

- Determina si un símbolo proposicional “q” (la petición) se deduce de una BC compuesta por CH.

- El algoritmo comienza a partir de los hechos (literales positivos) de la BC
  - Si todas las premisas de una implicación se conocen entonces la conclusión se añade al conjunto de hechos conocidos.

  - El proceso continua hasta que la petición “q” es añadida o hasta que no se puedan realizar más inferencias.

- El algoritmo se ejecuta en tiempo lineal.

fuente: Inteligencia Artificial. Un enfoque Moderno - Russell y Norvig

Encadenamiento dirigido por los datos

$P \Rightarrow Q$

$L \wedge M \Rightarrow P$

$B \wedge L \Rightarrow M$

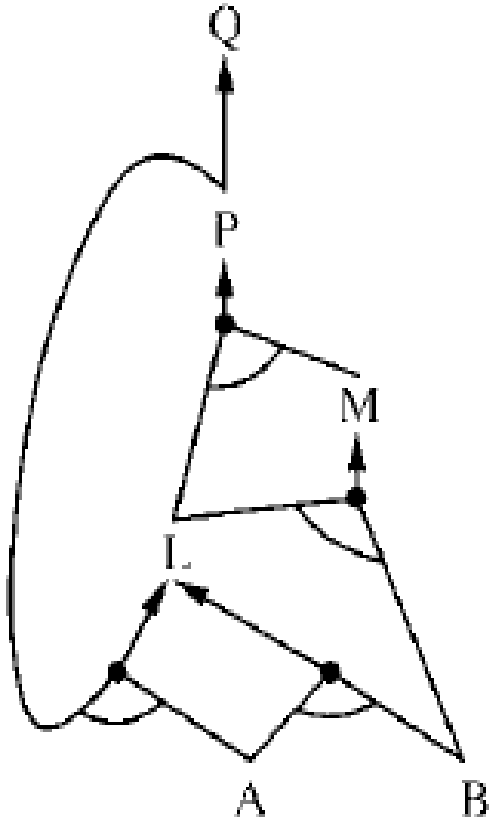
$A \wedge P \Rightarrow L$

$A \wedge B \Rightarrow L$

A

B

(a)



(b)

Figura 7.15 (a) Una base de conocimiento sencilla con cláusulas de Horn. (b) Su correspondiente grafo

fuente: Inteligencia Artificial. Un enfoque Moderno - Russell y Norvig

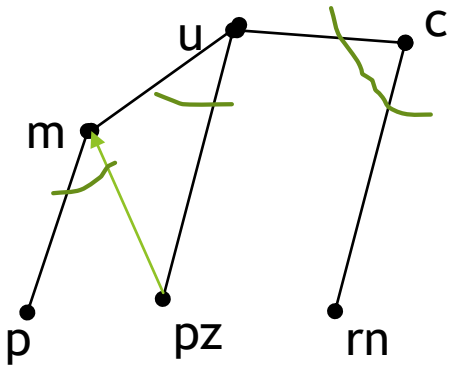
Ejemplo (consignas)

- **Se sabe que:**
- Los animales con pelos o que dan leche son mamíferos. **(p v l)→m**
- Los mamíferos que tienen pezuñas o que rumian son ungulados. **(m ^ pz) → u**
- Los ungulados de cuello largo son jirafas. **(u ^ cl) →j**
- Los ungulados con rayas negras son cebras. **(u^rn) → c**
- Los animales con pelos y pezuñas son mamíferos. **(p ^ pz) →m**
- **Se observa** un animal que tiene pelos, pezuñas y rayas negras. **(p^pz^rn)**
- **Argumentar** por Encadenamiento hacia adelante que es una cebra.

fuente: Inteligencia Artificial. Un enfoque Moderno - Russell y Norvig

Ejemplo (resuelto)

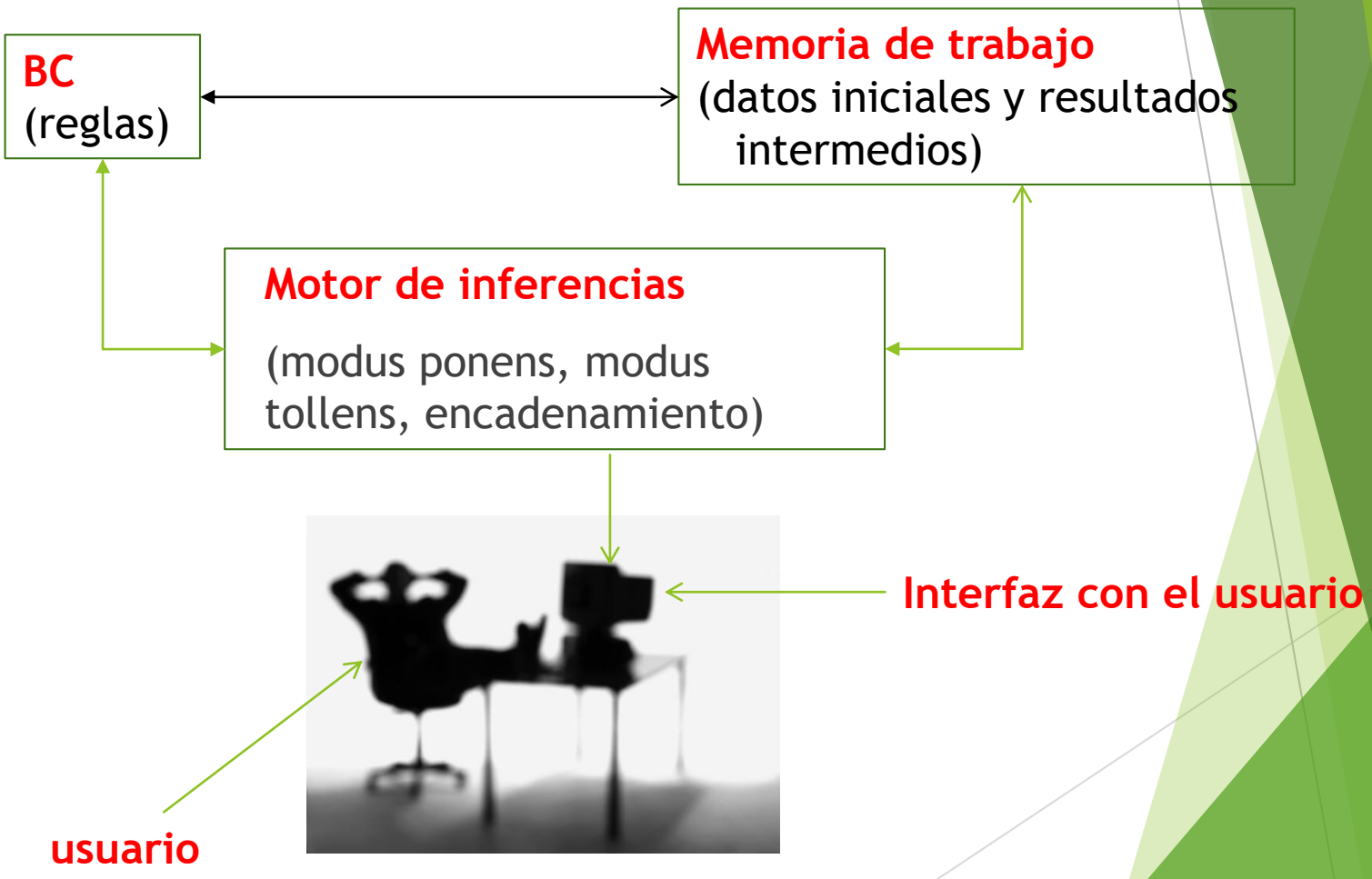
- **Reglas:**
- **(p v l)→m**
- **(m ^ pz)→ u**
- **(u ^ cl) →j**
- **(u^rn) → c**
- **(p ^ pz) →m**



- **Hechos**
- **(p^pz^rn)**
- **Argumentar** por encadenamiento hacia adelante.

fuente: Inteligencia Artificial. Un enfoque Moderno - Russell y Norvig

Sistemas expertos



fuente: Inteligencia Artificial. Un enfoque Moderno - Russell y Norvig

Sistemas expertos
aplicaciones

- Diagnóstico y localización de averías de dispositivos y de sistemas de todas las clases
- Planeamiento y programación de vuelos, personal, puertas de una línea aérea; programación del departamento de empleo de una fábrica; las hojas de operación de procesos de fabricación.
- Configuración de objetos manufacturados
- Toma de decisión financiera
- Vigilancia y control de procesos
- Diseño y fabricación.

fuente: Inteligencia Artificial. Un enfoque Moderno - Russell y Norvig

https://www.clipsrules.net/

C Language Integrated Production System (CLIPS)

fuente: Inteligencia Artificial. Un enfoque Moderno - Russell y Norvig

Agentes basados en circuitos

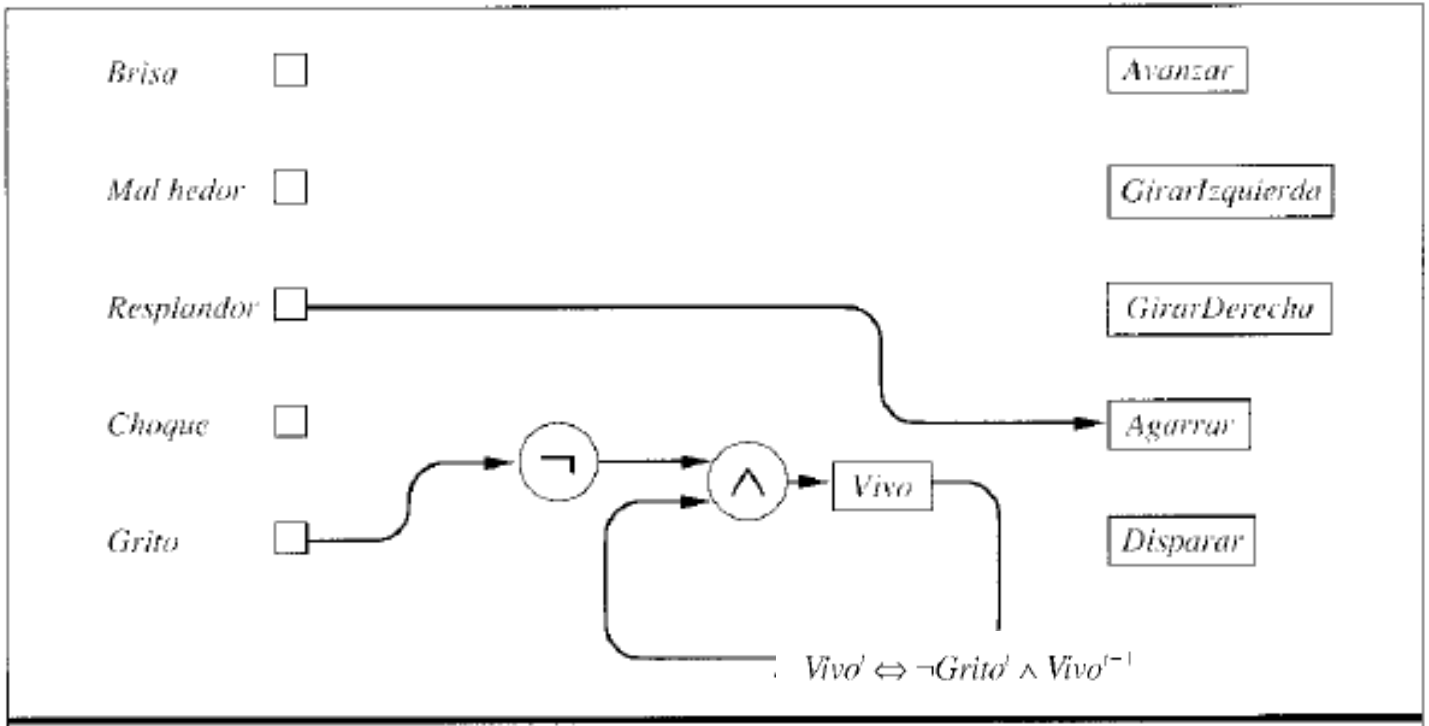


Figura 7.20 Parte de un agente basado en circuitos para el mundo de *wumpus*, mostrando las entradas, las salidas, el circuito para coger el oro, y el circuito que determina si el *wumpus* está vivo. Los registros se muestran como rectángulos, y los retardos de un paso se muestran como pequeños triángulos.

fuente: Inteligencia Artificial. Un enfoque Moderno - Russell y Norvig

Agentes basados en circuitos

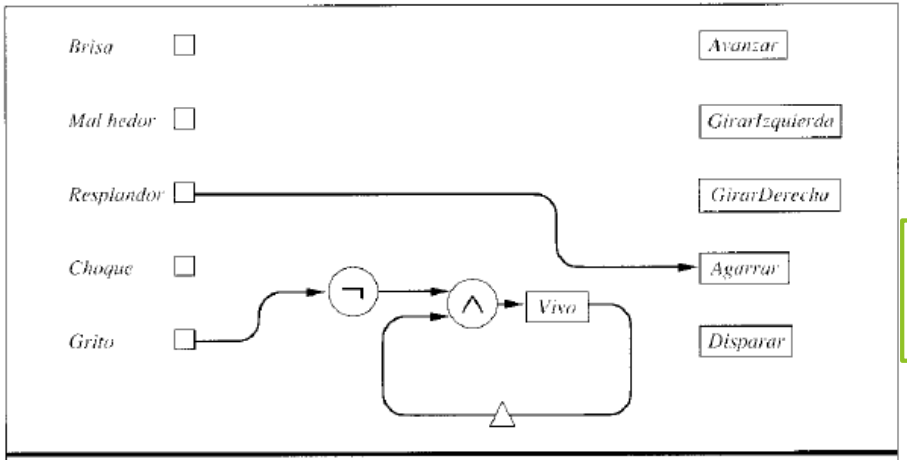


Figura 7.20 Parte de un agente basado en circuitos para el mundo de *wumpus*, mostrando las entradas, las salidas, el circuito para coger el oro, y el circuito que determina si el *wumpus* está vivo. Los registros se muestran como rectángulos, y los retardos de un paso se muestran como pequeños triángulos.

$$Vivo^t \Leftrightarrow \neg Grito^t \wedge Vivo^{t-1}$$

$$Resplandor^t \leftrightarrow Agarrar^t$$

fuente: Inteligencia Artificial. Un enfoque Moderno - Russell y Norvig

EJERCICIO

$$L_{1,1}^{t} \leftrightarrow (L_{1,1}^{t-1} \wedge (\neg Avanzar^{t-1} \vee Tropezar^{t}))$$

$$\vee\ (L_{1,2}^{t-1} \wedge (OrientadoAbajo^{t-1} \wedge Avanzar^{t-1}))$$

$$\vee\ (L_{2,1}^{t-1} \wedge (OrientadoIzquierda^{t-1} \wedge Avanzar^{t-1}))$$

fuente: Inteligencia Artificial. Un enfoque Moderno - Russell y Norvig

Agentes basados en circuitos

$$L^t_{1,1} \Leftrightarrow (L^{t-1}_{1,1} \wedge (\neg Avanzar^{t-1} \vee Tropezar^t)) \vee (L^{t-1}_{1,2} \wedge (OrientadoAbajo^{t-1} \wedge Avanzar^{t-1})) \vee (L^{t-1}_{2,1} \wedge (OrientadoIzquierda^{t-1} \wedge Avanzar^{t-1}))$$

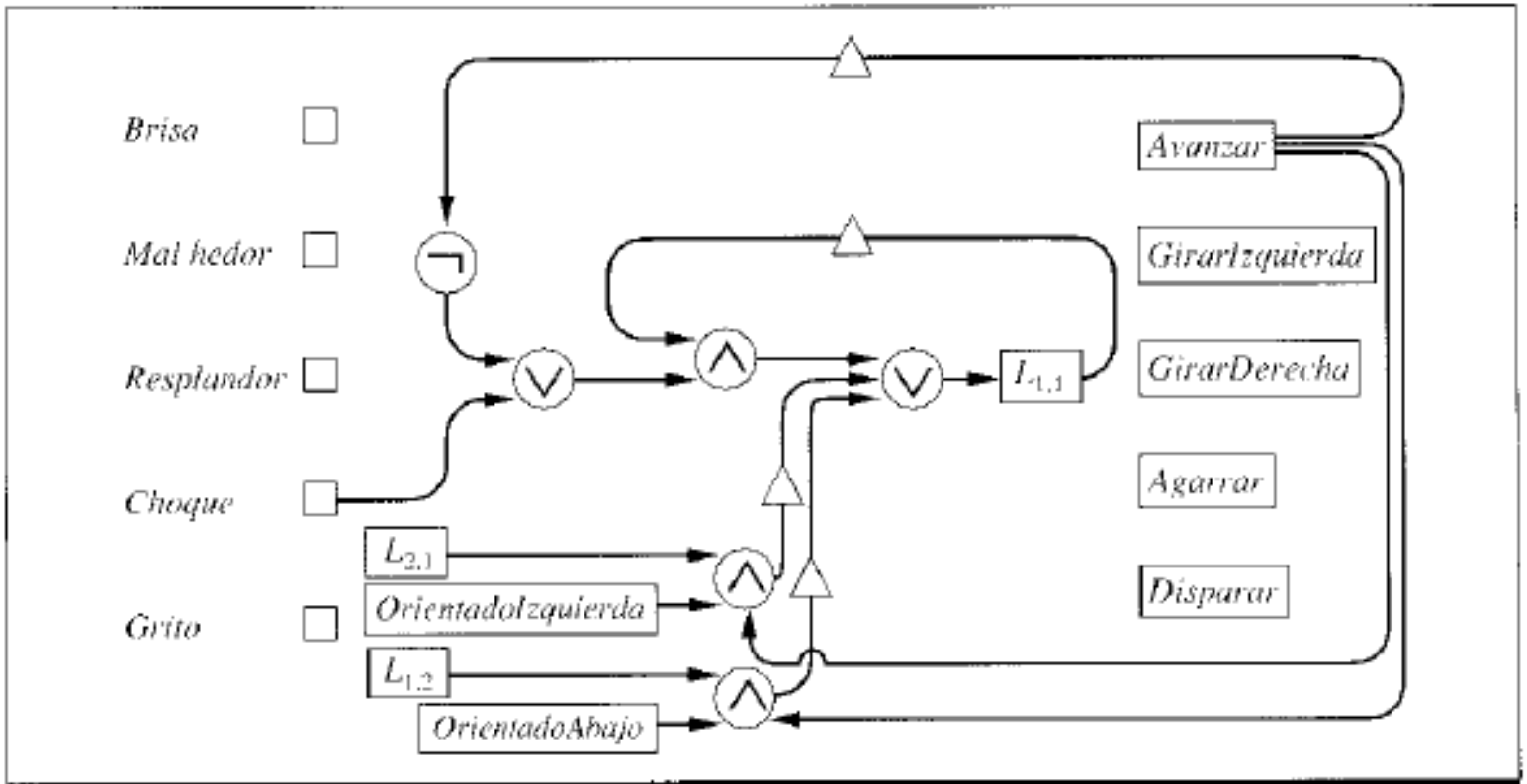


Figura 7.21 El circuito para determinar si el agente está en la casilla [1, 1]. Cada registro de localización y de orientación tiene enlazado un circuito similar.

fuente: Inteligencia Artificial. Un enfoque Moderno - Russell y Norvig

comparación

	Agente basado en inferencias	Agentes basados en circuitos
Precisión	Necesita almacenamiento en cada instante	Utiliza el instante actual y el previo.
Eficiencia computacional	Tiempo exponencial	Tiempo lineal
Completitud	Completo gracias a que recuerda todas sus percepciones anteriores	Podría ser incompleto
Facilidad de construcción	fácil (especifica la física)	difícil (idear circuito acíclicos)

fuente: Inteligencia Artificial. Un enfoque Moderno - Russell y Norvig