DECSAI
Departamento de Ciencias de la Computación e I.A.
Universidad de Granada

Búsqueda en Inteligencia Artificial

© Fernando Berzal, berzal@acm.org

Búsqueda en I.A.

- Introducción
- Espacios de búsqueda
- Agentes de búsqueda
- Uso de información en el proceso de búsqueda
  - Búsqueda sin información (a ciegas)
  - Búsqueda con información (heurística)
- Estrategias de control
  - Estrategias irrevocables
  - Estrategias tentativas
- Características de los problemas de búsqueda
  - Problemas "ignorables" (monótonos y reversibles)
  - Problemas "no ignorables" o irrecuperables
- Caso práctico: Búsqueda en juegos con adversario

Introducción

Problemas NP-difíciles

Definición informal:

Problemas que, para resolverlos de forma exacta, **requieren** la realización de una búsqueda en un espacio que es de tamaño exponencial.

- Nadie sabe como evitar esa búsqueda.
- No se espera que nadie lo consiga nunca…

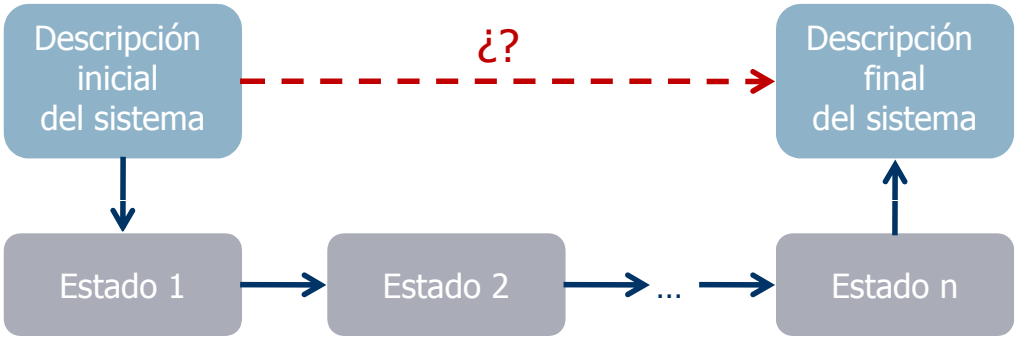
Introducción

Problemas NP-difíciles

- Todos los problemas de los que se ocupa la I.A. son NP-difíciles (si existe un algoritmo rápido para un problema, difícilmente consideraremos que el problema requiere inteligencia).
- Si un problema es NP-difícil y tenemos un algoritmo que encuentra la solución de forma rápida y casi siempre correcta, podemos considerar que el algoritmo es "inteligente".
- La I.A. implica que la búsqueda está sujeta a errores.

Introducción

Problema típico en I.A.

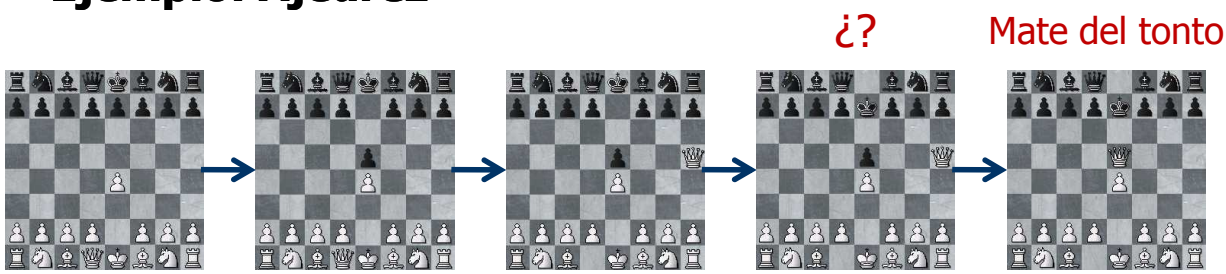


→ representa la aplicación de algún operador o transformación del sistema.

¿Cómo se selecciona, en cada momento, el operador que se debería aplicar?

Introducción

Ejemplo: Ajedrez



- Se dispone de varios operadores (movimientos legales).
- Se ha de elegir cuál es el más adecuado en cada momento (¿qué pieza movemos y a dónde?).
- No tiene sentido aplicar (ejecutar) el primer operador que sea válido, sino que se debe realizar un proceso previo de **búsqueda** del mejor operador, tras lo cual se procederá a su aplicación.

Espacios de búsqueda

- La búsqueda la realiza un programa (o agente).
- El espacio de búsqueda será un grafo dirigido en el que cada nodo representa un posible estado del sistema.

  NOTA: Dependiendo del problema, cada nodo incluirá una descripción completa del sistema, o bien sólo las modificaciones necesarias para pasar de un nodo padre a su hijo.

Espacios de búsqueda

Búsqueda en un espacio de estados

- **Espacio de estados**:

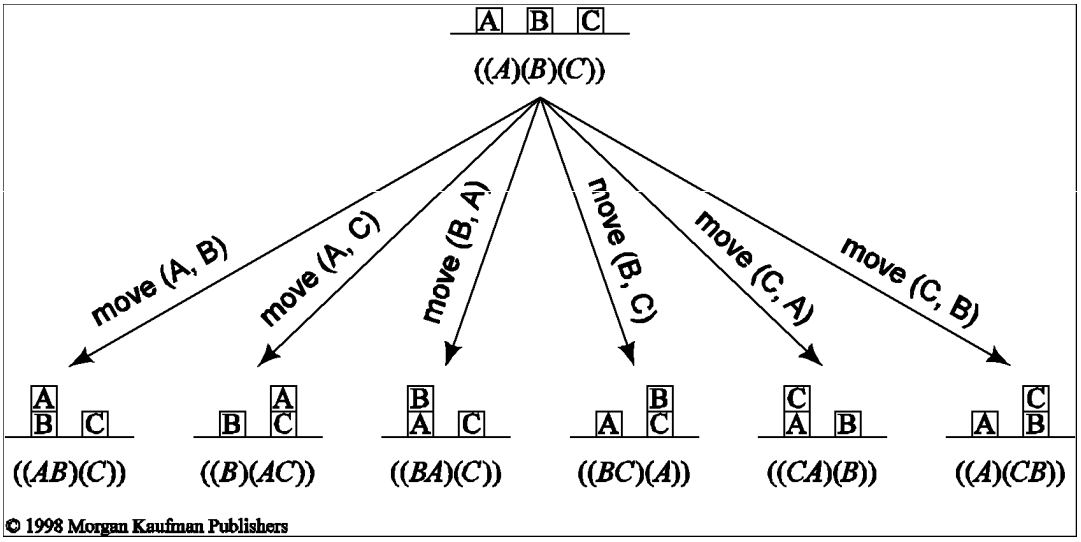
  Representación del problema a través de las (posibles) acciones del agente.

- **Búsqueda en el espacio de estados**:

  Resolución del problema mediante la proyección de las distintas acciones del agente.

Espacios de búsqueda

Posibles acciones del agente (operadores)



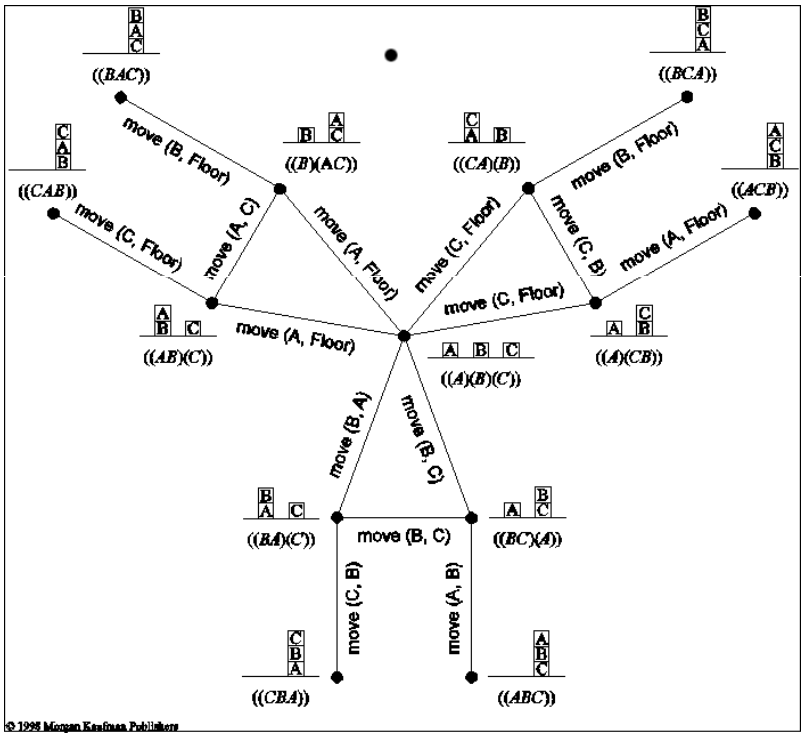
Espacios de búsqueda

Búsqueda en un espacio de estados

Grafo implícito

- Grafo teórico que representa todas las posibles transformaciones del sistema aplicando todos los operadores posibles recursivamente.
- Debido a su complejidad exponencial, que requeriría una cantidad inviable de memoria y tiempo, el grafo implícito no puede generarse por completo.

Espacios de búsqueda



Espacios de búsqueda

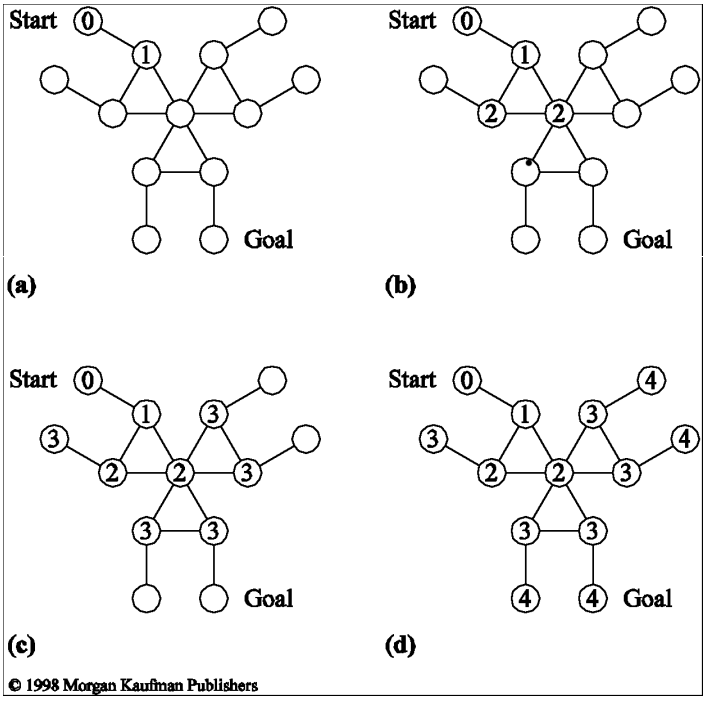
Búsqueda en un espacio de estados

Grafo explícito

- Debido a la complejidad exponencial del grafo implícito, se irá generando, paso a paso, una porción del grafo conforme avance el proceso de búsqueda.

- El **grafo explícito** es el subgrafo del grafo implícito que se va generando durante el proceso de búsqueda de una secuencia de operadores que resuelva nuestro problema (camino solución) .

Espacios de búsqueda



Espacios de búsqueda

Búsqueda en un espacio de estados

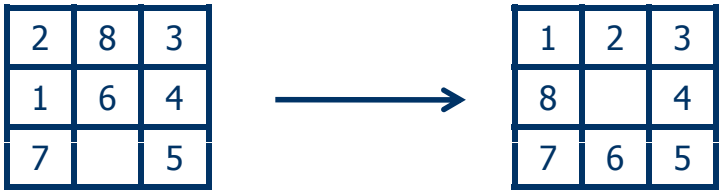
Grafo explícito

Condiciones de parada

- Se ha encontrado la solución.
- Se ha acabado el tiempo disponible.
- Se ha llegado a un nivel de profundidad determinado.

Espacios de búsqueda

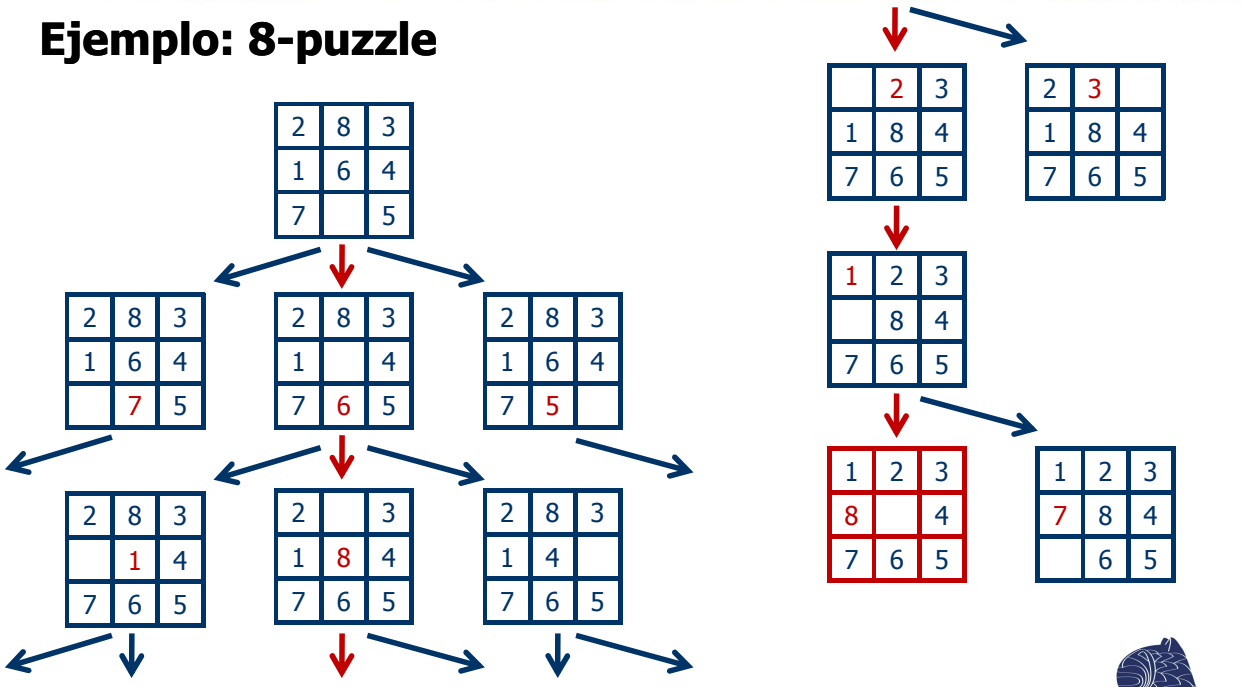
Ejemplo: 8-puzzle



En el problema del 8-puzzle hay que encontrar un camino desde la configuración inicial hasta una determinada configuración final.

Espacios de búsqueda

Ejemplo: 8-puzzle



Espacios de búsqueda

Ejercicio: Problema del mono y los plátanos

Un mono está en la puerta de una habitación. En el centro de la habitación hay un plátano colgado del techo, pero no puede alcanzarle desde el suelo. En la ventana de la habitación hay una caja, que el mono puede mover y a la que puede encaramarse para alcanzar el plátano. El mono puede realizar las siguientes acciones: desplazarse de la puerta al centro, del centro a la ventana y viceversa; empujar la caja a la vez que se desplaza; subirse y bajarse de la caja; coger el plátano.

El problema consiste en encontrar una secuencia de acciones que permita al mono coger el plátano.

Agentes de búsqueda

Según el tipo de problema, nos podemos encontrar con:

- **Agentes de búsqueda que devuelven un único operador**

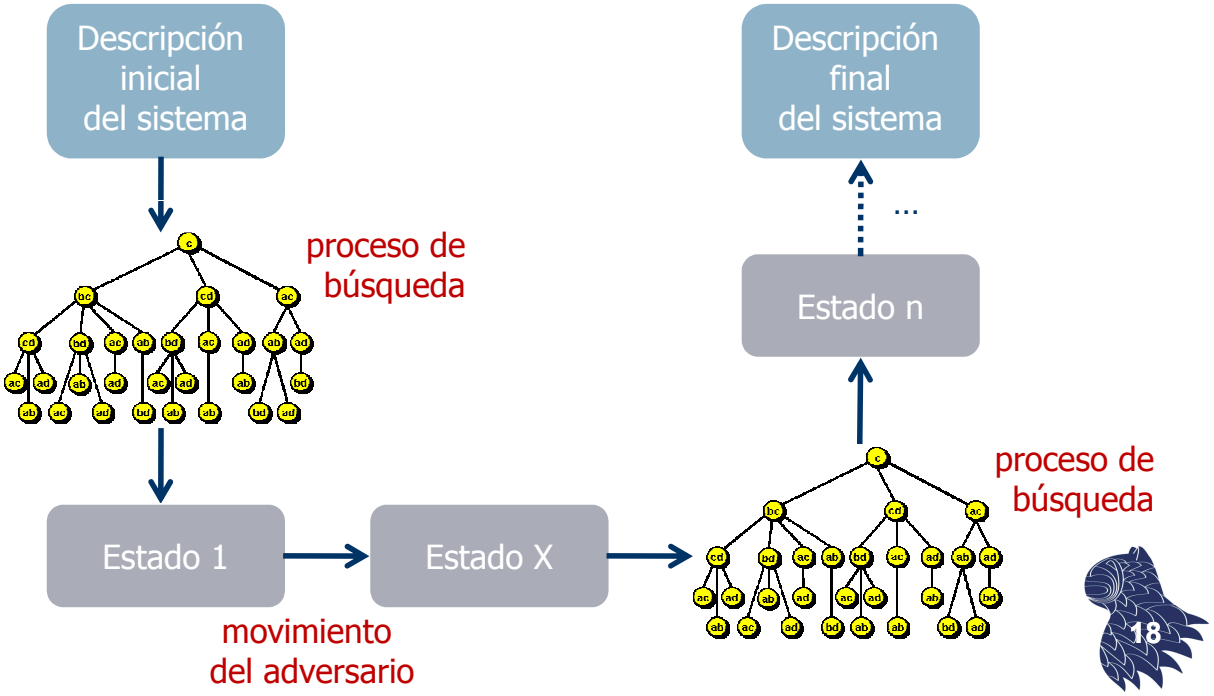
  vg. Juegos con adversario (como el ajedrez)

- **Agentes de búsqueda que devuelven una secuencia de operadores**

  vg. Juegos sin adversario (como el 8-puzzle)
  Sistemas de planificación
  Sistemas expertos (con encadenamiento hacia adelante)

Agentes de búsqueda

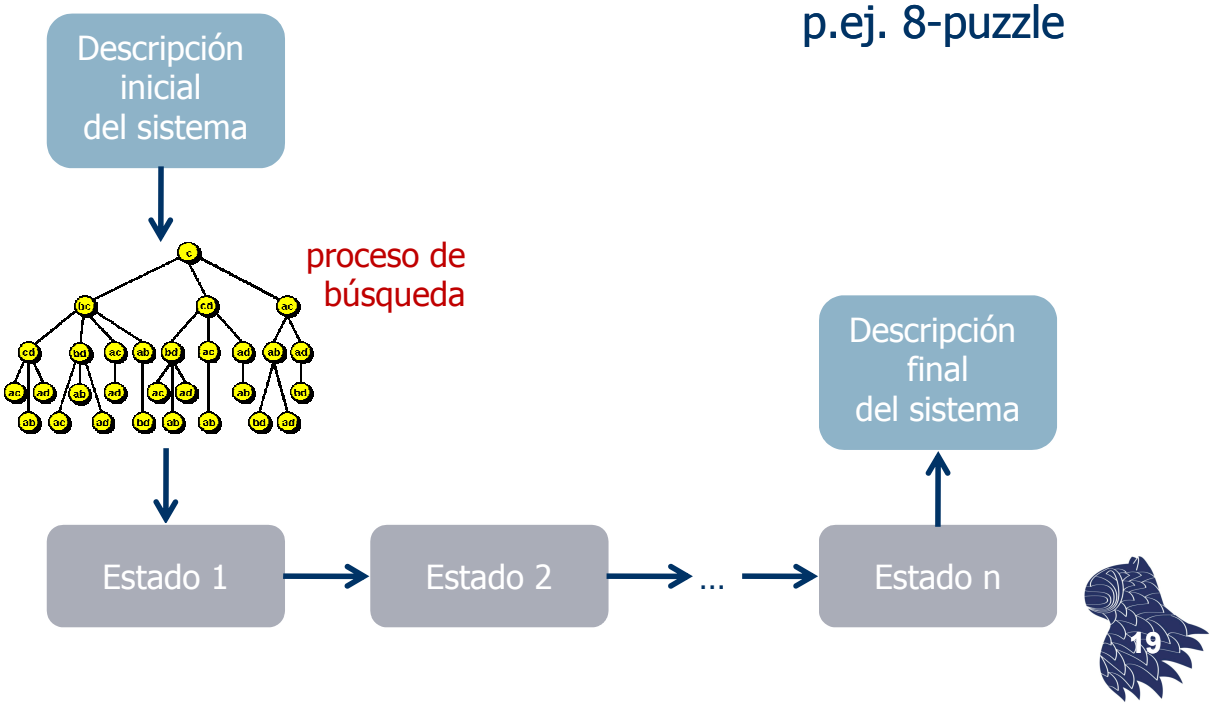
... **que devuelven un único operador**, p.ej. ajedrez



Agentes de búsqueda

... **que devuelven una secuencia de operadores**

p.ej. 8-puzzle



Uso de información

- Un problema puede tener varias soluciones, pero debido a la extensión del grafo implícito, no podemos explorarlo por completo, por lo que tampoco podemos buscar la mejor solución al problema (suponiendo algún criterio de optimalidad).

- Por eso, en muchos problemas de I.A. nos conformamos con buscar **soluciones aceptables** (cualquier camino a una solución lo suficientemente buena) y no soluciones óptimas (la mejor solución posible).

  NOTA: Existen técnicas matemáticas/algorítmicas para resolver determinados tipos de problemas de optimización, p.ej. programación dinámica.

Uso de información

Heurísticas

Las heurísticas son criterios, métodos o principios para decidir cuál de entre varias acciones promete ser la mejor para alcanzar una determinada meta.

- En la generación del grafo explícito, nos podemos guiar con heurísticas que nos den una indicación acerca de cómo de bueno o prometedor es un determinado estado u operador.

  p.ej.
  ¿Qué pieza deberíamos mover en una partida de ajedrez?
  ¿Qué regla aplicamos en primer lugar al hacer un diagnóstico?

Uso de información

Heurísticas

- El uso de heurísticas nos permite convertir nuestra búsqueda de una solución en un proceso guiado de **ensayo y error** (p.ej. backtracking).

NOTA: Compárese el uso heurístico de información para guiar el proceso de búsqueda en Inteligencia Artificial con formalismos como la teoría de la decisión o la teoría de juegos, que en ocasiones nos permitirán determinar la decisión óptima si somos capaces de identificar todos los factores relevantes para el problema en cuestión (y las incertidumbres asociadas a ellos !!).

http://en.wikipedia.org/wiki/Decision_theory

http://en.wikipedia.org/wiki/Game_theory

Búsqueda sin información

- Sólo realizaremos una **búsqueda a ciegas** [blind search] cuando no exista información específica sobre el problema que nos ayude a determinar cuál es el mejor operador que se debería aplicar en cada momento (o el mejor nodo del grafo explícito por el que continuar la búsqueda).

- Se pueden utilizar distintos criterios para explorar el espacio de búsqueda, p.ej. LIFO (en profundidad) o FIFO (en anchura).

Búsqueda con información

- En problemas medianamente complejos, no obstante, tendremos que utilizar algún tipo de información para guiar nuestra búsqueda.

  p.ej. Para generar el grafo completo del juego del ajedrez (10^{47} estados), generando 3 billones de nodos por segundo y sin restricciones de memoria, tardaríamos unos 10^{30} años en resolver el problema, ¡10^{20} veces la edad estimada del universo!

  http://www.wolframalpha.com/input/?i=universe+age

Búsqueda con información

Se pueden distinguir dos casos básicos:

- Información incluida en la descripción del propio conocimiento que tenemos del problema.

  p.ej. Uso de prioridades en los S.E.B.R.

- Información especificada aparte de la descripción del conocimiento.

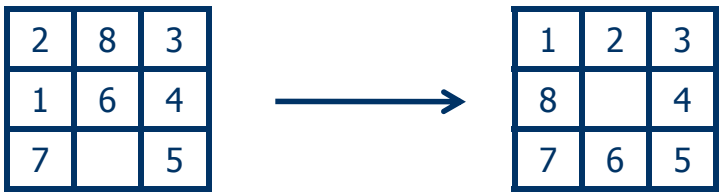
  p.ej. Uso de una función heurística que evalúa la bondad de un estado del sistema:
  f(estado) ∈ R

Búsqueda con información

Ejemplo: 8-puzzle

Ya que conocemos el estado final deseado, podemos utilizar la siguiente función heurística:

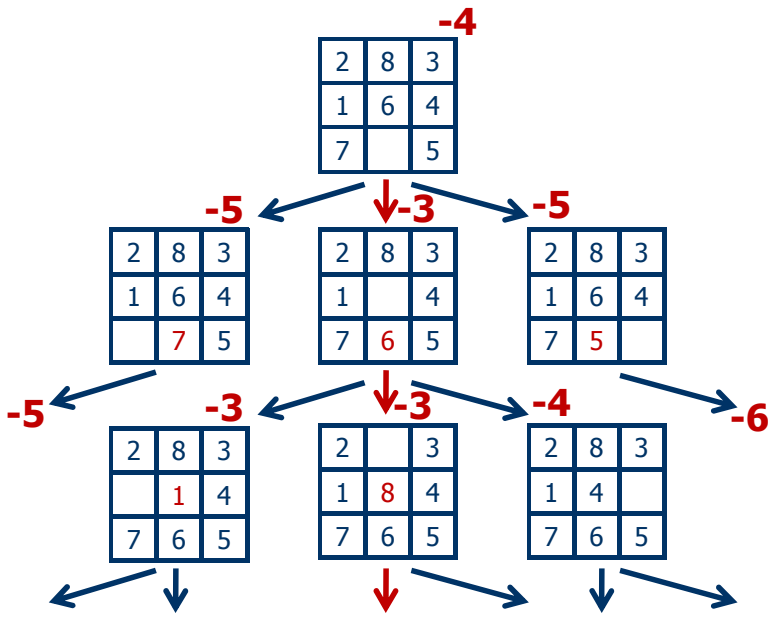
f(tablero)= **-** número de piezas mal colocadas con respecto al objetivo

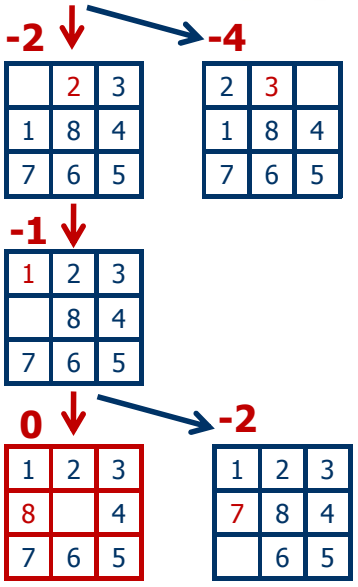


f(E) = -4 f (OBJ) = 0

Búsqueda con información

Ejemplo: 8-puzzle





Estrategias de control

El tipo de estrategia de control que utilice nuestro agente de búsqueda (irrevocable o tentativa) determinará la respuesta a las siguientes preguntas:

- ¿Cómo vamos generando el grafo explícito en un proceso de búsqueda?
- ¿Guardamos todos los nodos generados?
- ¿Guardamos sólo el camino explorado hasta el último nodo generado?
- ¿Guardamos exclusivamente el último nodo?

Estrategias de control

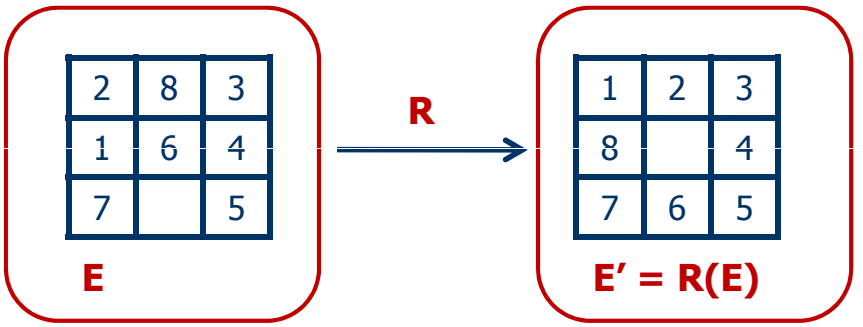
Estrategias irrevocables

En cada momento, el grafo explícito lo constituye un único nodo, que incluye la descripción completa del sistema en ese momento:

- Se selecciona una operador R.
- Se aplica sobre el estado del sistema E, para obtener el nuevo estado E' = R(E).
- Se borra de memoria E y se sustituye por E'.

Estrategias de control

Estrategias irrevocables



Grafo explícito Nuevo grafo explícito

Estrategias de control

Estrategias irrevocables

- **Búsqueda sin información**

  vg. CLIPS (estrategias greedy FIFO, LIFO o LEX)

- **Búsqueda con información**

  vg. CLIPS (conocimiento: prioridades de las reglas)
  Ascensión de colinas (función heurística)

Estrategias de control

Estrategias irrevocables con información

Ascensión de colinas simple

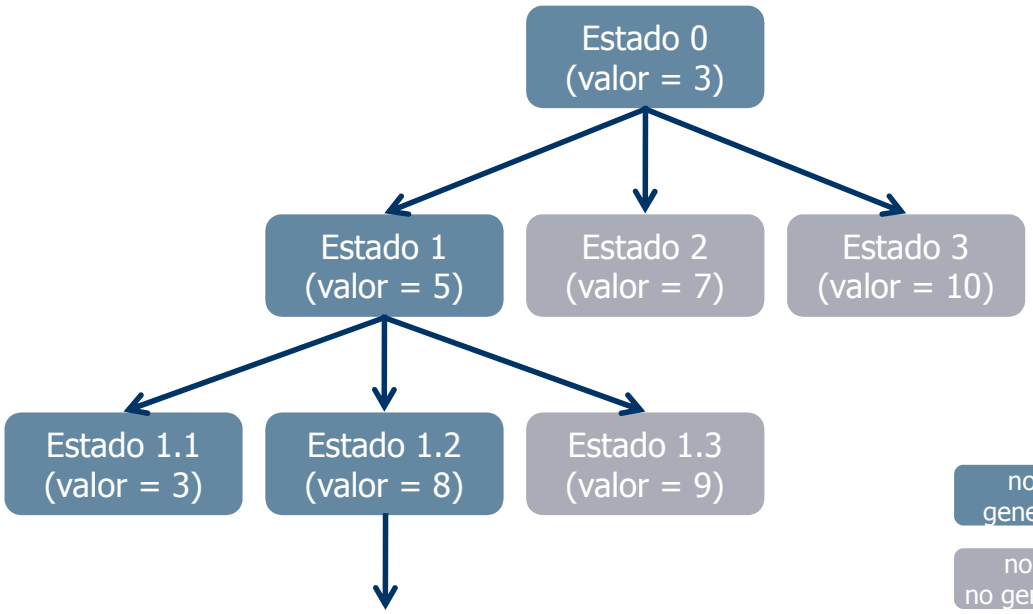
E: Estado activo

while (E no sea el objetivo
y queden nodos por explorar a partir de E) {
Seleccionar operador R para aplicarlo a E
Evaluar f(R(E))
if (f(R(E))>f(E)) {
E = R(E)
}
}

Estrategias de control

Estrategias irrevocables con información

Ascensión de colinas simple



Estrategias de control

Estrategias irrevocables con información

Ascensión de colinas por la máxima pendiente

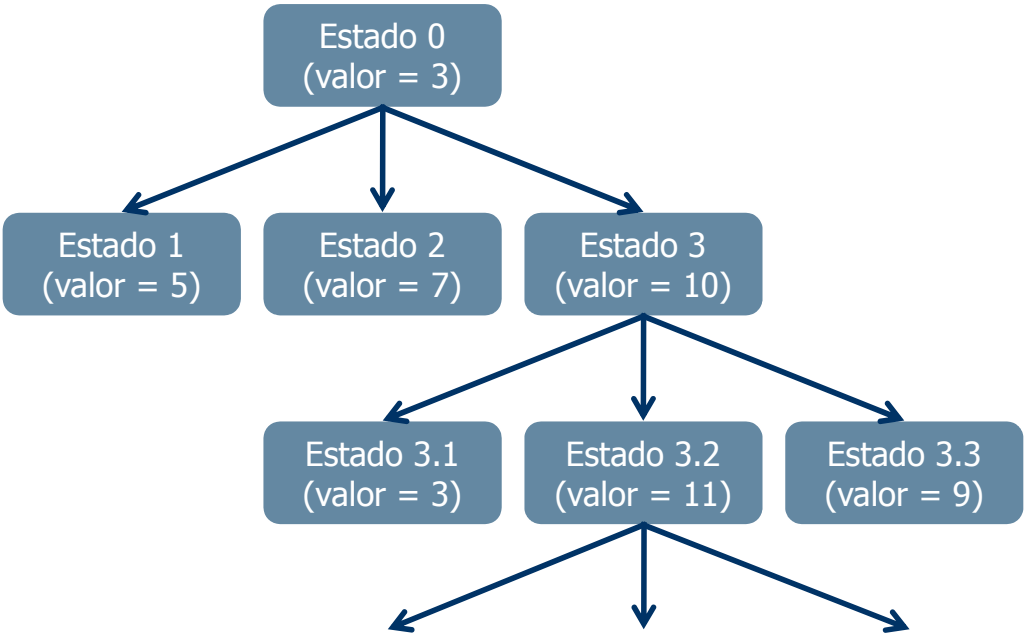
E: Estado activo

while (queden nodos por explorar a partir de E) {
  Para todos los operadores R_i, obtener $E_i=R_i(E)$
  Evaluar $f(E_i)$ para todos los estados $E_i=R_i(E)$
  Seleccionar E_{max} tal que $f(E_{max}) = max\{f(E_i)\}$
  if ($f(E_{max})>f(E)$) {
    $E = E_{max}$
  } **else return** E
}

Estrategias de control

Estrategias irrevocables con información

Ascensión de colinas por la máxima pendiente



Estrategias de control

Estrategias irrevocables con información

Ascensión de colinas por la máxima pendiente

- Se realiza una búsqueda del mejor hijo del nodo actual E (para seleccionar el operador R más prometedor).
- Una vez elegido el operador R más prometedor, obtenemos el estado E'=R(E) y se repite el proceso a partir del estado E'
- En memoria sólo tenemos que almacenar E, el hijo de E que estemos considerando en cada momento y el mejor hijo que hayamos encontrado.

Estrategias de control

Estrategias irrevocables con información

Ascensión de colinas por la máxima pendiente

- El proceso se repite hasta que se encuentre una solución, hasta no podamos avanzar más o hasta que todos los hijos sean peores que el padre del que provienen.
- Este último criterio puede dar lugar a varios problemas debido a la existencia de máximos locales y mesetas en la función de evaluación heurística.

Estrategias de control

Estrategias irrevocables con información

Ascensión de colinas por la máxima pendiente

1	2	3
8		4
7	6	5

objetivo

3	2	1
8		4
7	6	5

$E_{\text{máximo local}}$

Máximo local

Todos los movimientos empeoran el valor de la función heurística.

1	2	3
6	7	4
	8	5

E_{meseta}

Meseta

Todos los movimientos dejan igual el valor de la función heurística.

Estrategias de control

Estrategias irrevocables con información

Ascensión de colinas por la máxima pendiente

Posibles soluciones:

- Continuar la exploración de más niveles del árbol (pero, entonces, ya no estaríamos ante una estrategia de control irrevocable).
- "Dar saltos", aunque sólo sea de vez en cuando.
  vg. algoritmos genéticos
  enfriamiento simulado [simulated annealing]

Estrategias de control

Estrategias tentativas de control

En memoria se guardan todos los estados ó nodos generados hasta el momento, de forma que la búsqueda puede proseguir por cualquiera de ellos:

1. Seleccionar un estado E del grafo.
2. Seleccionar un operador R aplicable sobre E.
3. Aplicar R, para obtener un nuevo nodo R(E).
4. Añadir el arco E $\rightarrow$ R(E) al grafo
5. Repetir el proceso.

Estrategias de control

Estrategias tentativas sin información

- Al no disponer de información que nos guíe en el proceso de búsqueda, seguimos criterios generales

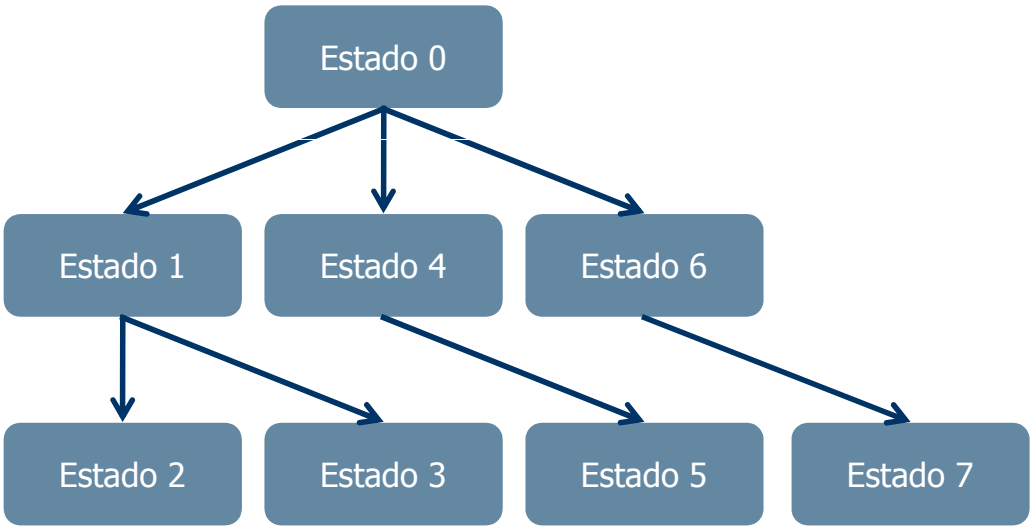
  vg. Exploración del grafo en profundidad
  Exploración del grafo en anchura

- Podemos definir criterios de parada (p.ej. detener la generación cuando se haya llegado a un nivel de profundidad determinado o se haya consumido el tiempo disponible).

Estrategias de control

Estrategias tentativas sin información

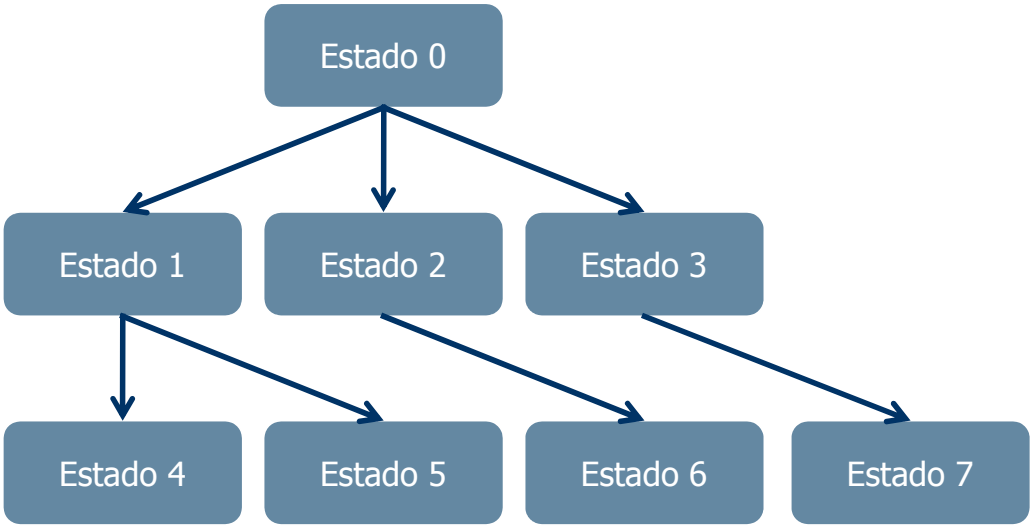
Exploración en profundidad



Estrategias de control

Estrategias tentativas sin información

Exploración en anchura



Estrategias de control

Estrategias tentativas con información

Exploración primero el mejor

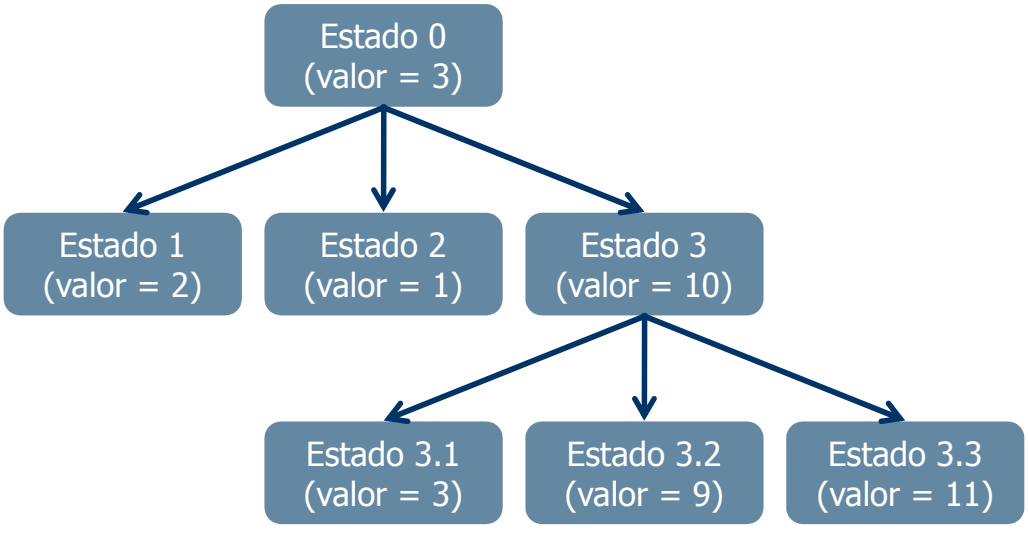
Se explora exhaustivamente el grafo utilizando una función heurística para determinar el orden en que se exploran los nodos:

1. Seleccionar el nodo E del grafo que tenga mayor valor para la función heurística.
2. Seleccionar un operador R aplicable sobre E.
3. Aplicar R, para obtener un nuevo nodo R(E).
4. Añadir el arco E $\rightarrow$ R(E) al grafo
5. Repetir el proceso.

Estrategias de control

Estrategias tentativas con información

Exploración primero el mejor



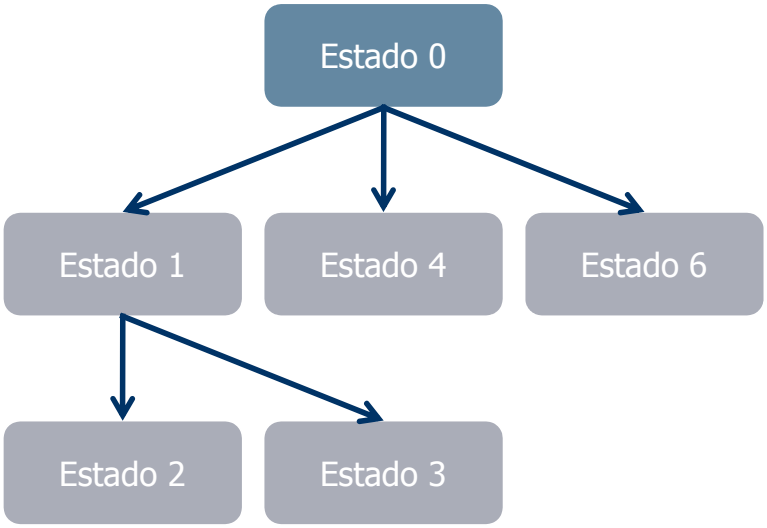
Estrategias de control

Estrategia tentativa retroactiva
Backtracking

- En memoria sólo guardamos un hijo de cada estado; esto es, se mantiene el camino desde el estado inicial hasta el actual.
- El grafo explícito, por tanto, es realmente una lista.
- ¿Cuando para el proceso? Cuando hemos llegado al objetivo y no deseamos encontrar más soluciones, o bien no hay más operadores aplicables al nodo raíz.

Estrategias de control

Estrategia tentativa retroactiva
Backtracking



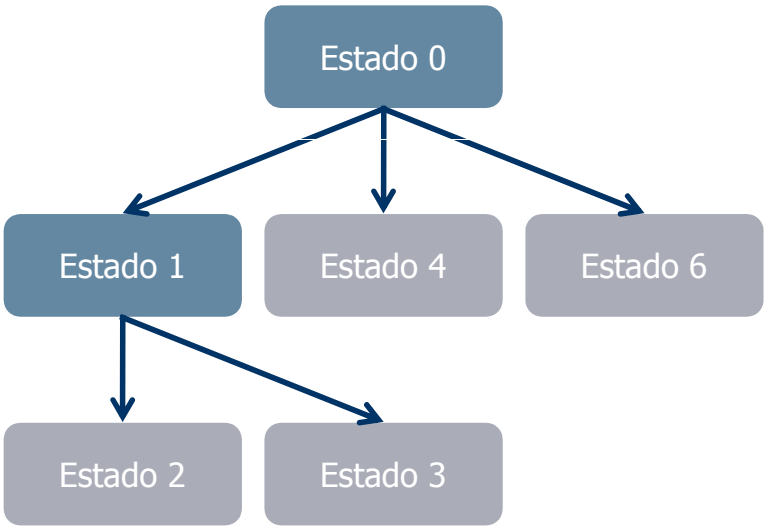
grafo explícito

grafo implícito

Estrategias de control

Estrategia tentativa retroactiva

Backtracking



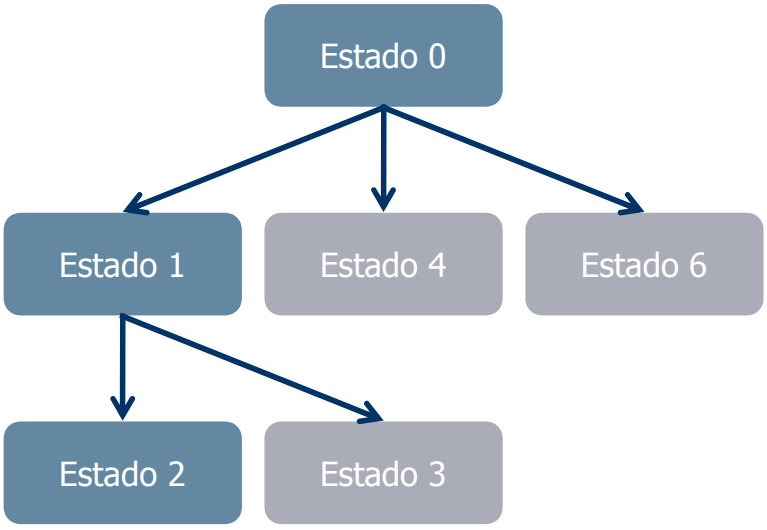
grafo explícito

grafo implícito

Estrategias de control

Estrategia tentativa retroactiva

Backtracking



Vuelta atrás

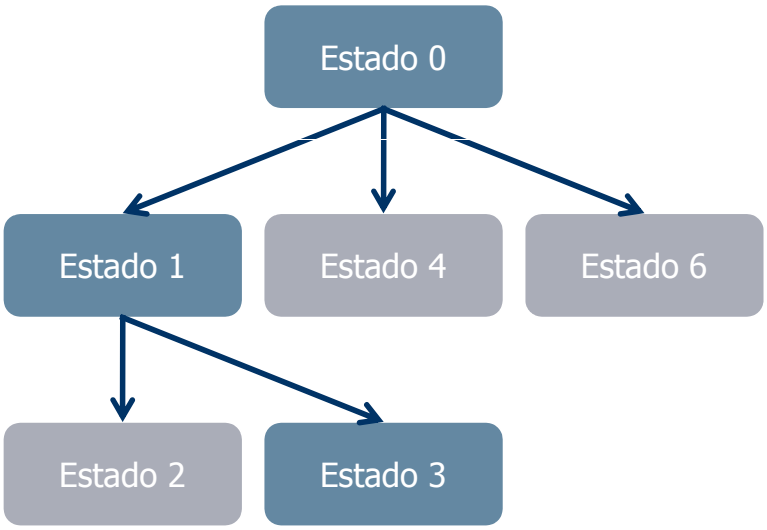
grafo explícito

grafo implícito

Estrategias de control

Estrategia tentativa retroactiva

Backtracking



Vuelta atrás

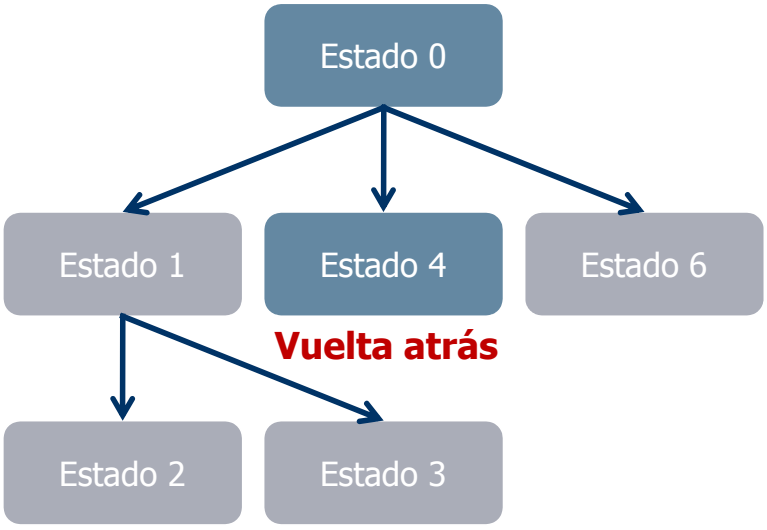
grafo explícito

grafo implícito

Estrategias de control

Estrategia tentativa retroactiva

Backtracking



Vuelta atrás

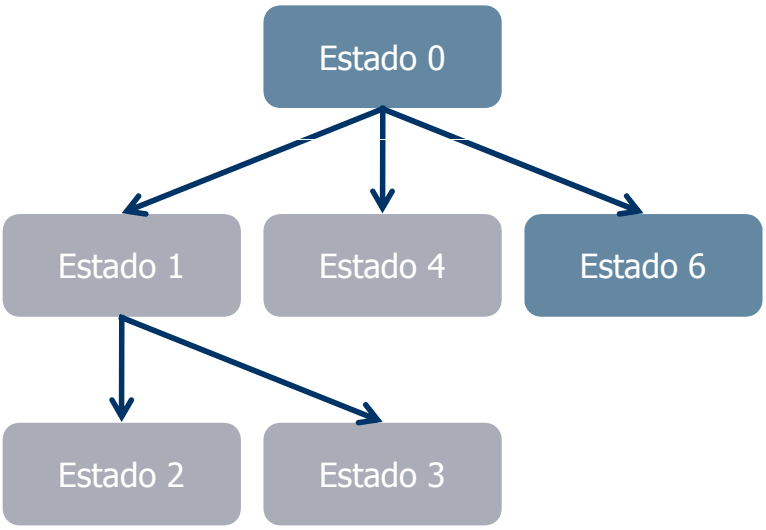
grafo explícito

grafo implícito

Estrategias de control

Estrategia tentativa retroactiva

Backtracking



grafo explícito

grafo implícito

Estrategias de control

Estrategia tentativa retroactiva

Backtracking

¿Cuando se produce una vuelta atrás (o retroceso)?

- Cuando se ha encontrado una solución, pero deseamos encontrar otra solución alternativa.
- Cuando se ha llegado a un límite en el nivel de profundidad explorado o el tiempo de exploración en una misma rama.
- Cuando no existen reglas aplicables al último nodo de la lista (último nodo del grafo explícito).

Estrategias de control

Estrategia tentativa retroactiva

Backtracking

p.ej. Estrategia implementada por defecto en PROLOG.

- Usualmente, se usa backtracking para realizar búsquedas sin información.
- En caso de disponer de una función heurística, es preferible una exploración del grafo por el mejor nodo.

Características del problema

¿Cuáles son las características de un problema que obligan a tomar una determinada estrategia?

- Problemas "ignorables".
  - Problemas "ignorables" monótonos.
  - Problemas "ignorables" reversibles.
- Problemas "no ignorables" o irrecuperables.

Características del problema

Problemas "ignorables"

Un problema es ignorable cuando,
si se puede alcanzar el objetivo desde un estado E,
también puede alcanzarse
desde cualquier otro estado R(E),
donde R es un operador arbitrario.

En definitiva, no corremos ningún riesgo
en la aplicación de cualquier operador.

Características del problema

Problemas "ignorables" monótonos

Cuando la aplicación de cualquier operador se limita a añadir más hechos, sin modificar los ya existentes.

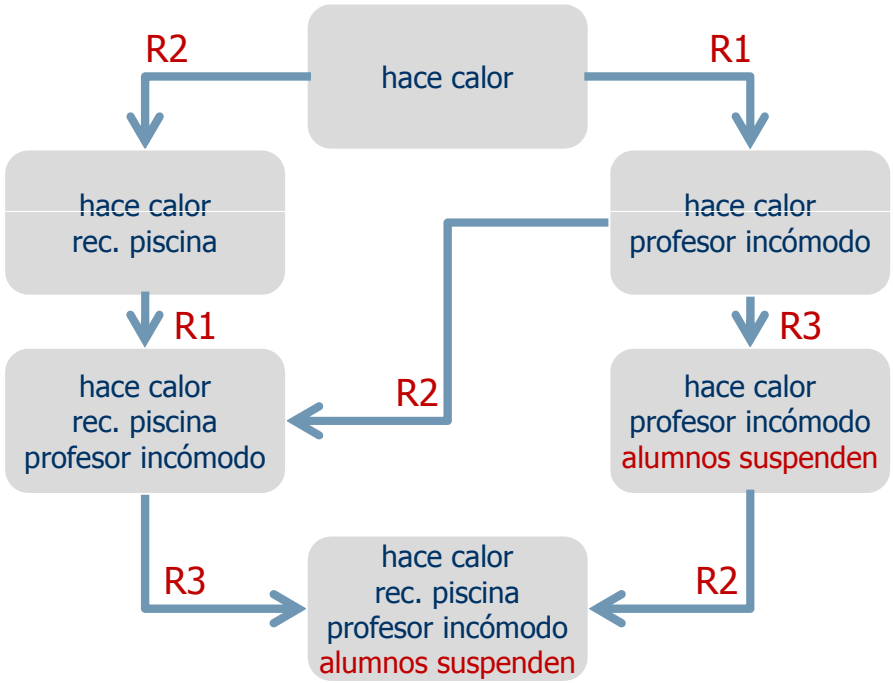
Este tipo de problemas son los tratados en la lógica clásica (que es monótona).

EJEMPLO

```
R1. Si hace calor, entonces el profesor no está cómodo
R2. Si hace calor, entonces recomendar piscina
R3. Si el profesor no está cómodo,
    entonces los alumnos suspenden
```

Características del problema

Problemas "ignorables" monótonos



Características del problema

Problemas "ignorables" monótonos

- El ejemplo anterior ilustra la "ignorabilidad" de un problema: siempre que sea posible, se llegará a la solución (aunque tal vez sea necesario aplicar más reglas de las estrictamente necesarias).

- Al ser el problema ignorable, el grafo de búsqueda puede explorarse utilizando una estrategia irrevocable (así lo haremos, sobre todo, si el coste de representación de los estados en memoria es elevado).

  NOTA: Obviamente, siempre se puede explorar con una estrategia de control retroactiva.

Características del problema

Problemas "ignorables" reversibles

Cuando las acciones de los operadores son reversibles;
es decir, $\forall$ estado E, $\forall$ operador R, $\exists$ operador R^{-1} tal que

$$\mathbf{R^{-1}(R(E))=E}$$

EJEMPLOS

- 8-puzzle.
- Planificación de movimientos de un robot con STRIPS.

Características del problema

Problemas "ignorables" reversibles

- Se les puede aplicar una estrategia irrevocable:

  Si se decide no proseguir la búsqueda por un estado E', generado a partir de otro estado E aplicando R(E), siempre se puede aplicar R^{-1} a E' para obtener de nuevo E y buscar otro operador aplicable a E.

- Si el coste computacional de la aplicación de los operadores es alto y no hay muchas restricciones de memoria, entonces es mejor utilizar una estrategia retroactiva.

Características del problema

Problemas "ignorables" reversibles

Operación reversible

Operador inverso (o vuelta atrás)

Operación alternativa

Características del problema

Problemas "no ignorables" o irrecuperables

Cuando la aplicación de un operador puede generar un estado desde el cual no sea posible llegar a un estado objetivo.

EJEMPLOS

- Control de la adición de sustancias químicas en el proceso realizado por una planta industrial.
- Juegos con adversario, como el ajedrez.

Características del problema

Problemas "no ignorables" o irrecuperables

EJEMPLO: Sustituciones simbólicas en una cadena

R1: C → DL
R2: C → BM
R3: B → MM
R4: Z → BBM

Estado inicial: E_0 = {C B Z}

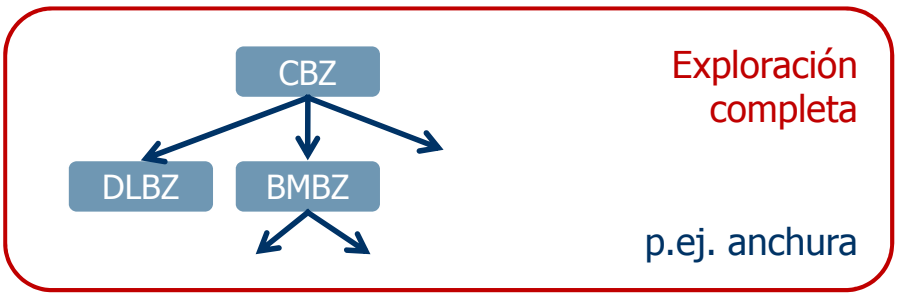
Estado final: Cadena sólo con emes

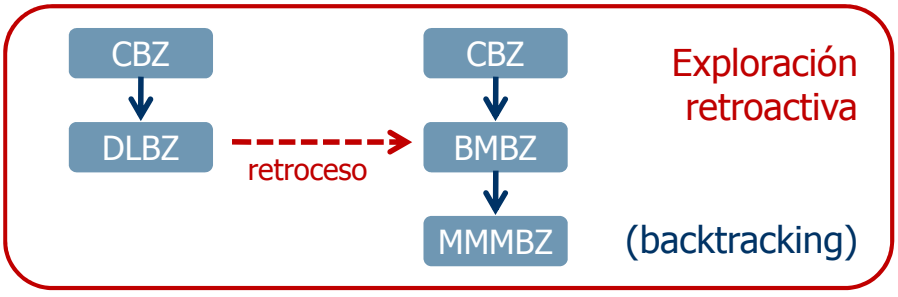
- Si aplicamos R1 es imposible llegar a un estado final, por lo que el problema es irrecuperable.
- Si quitásemos R1, entonces el problema sí sería "ignorable".

Características del problema

Problemas "no ignorables" o irrecuperables

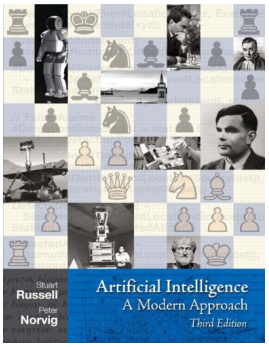
Lo usual será utilizar una estrategia tentativa:



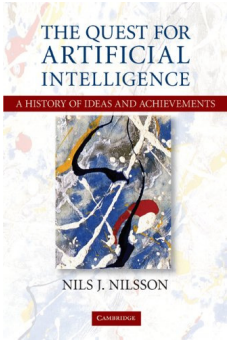


Bibliografía

- Stuart Russell & Peter Norvig: **Artificial Intelligence: A Modern Approach** Prentice-Hall, 3rd edition, 2009 ISBN 0136042597



- Nils J. Nilsson **The Quest for Artificial Intelligence** Cambridge University Press, 2009 ISBN 0521122937



Bibliografía

Bibliografía complementaria

- Elaine Rich & Kevin Knight: **Artificial Intelligence**. McGraw-Hill, 1991.
- Patrick Henry Winston: **Artificial Intelligence**. Addison-Wesley, 1992.
- Nils J. Nilsson: **Principles of Artificial Intelligence**. Morgan Kaufmann, 1986.
- Daniel Jurafsky & James H. Martin: **Speech and Language Processing**. Prentice Hall, 2008.
- Yoav Shoham & Kevin Leyton-Brown: **Multiagent Systems: Algorithmic, Game-Theoretic, and Logical Foundations**. Cambridge University Press, 2008.