Facsímil 02

Inteligencia clásica

Capítulo 02

BFS, DFS y coste uniforme: los algoritmos ciegos

686f6c61 · 2026

Capítulo 02: BFS, DFS y coste uniforme: los algoritmos ciegos

Entrando en el tema

En el capítulo anterior definiste el problema: estados, acciones, meta y coste. Construiste el vocabulario. Ahora necesitas algoritmos que resuelvan ese problema sin pistas del dominio y sin función heurística. A ciegas.

Tres algoritmos compiten por el título de «mejor búsqueda ciega». Los tres usan exactamente el mismo bucle (extraer, comprobar, expandir, añadir). La única diferencia entre ellos es **la estructura de datos de la frontera**.[1] Una cola produce BFS. Una pila produce DFS. Una cola de prioridad produce UCS. El resto es el mismo código.

Este capítulo desmenuza los tres. Con pseudocódigo. Con análisis de complejidad. Con ejemplos trazados paso a paso. Porque si no entiendes por qué BFS consume memoria exponencial y DFS puede perderse para siempre, no entenderás por qué A* (el algoritmo del próximo capítulo) fue una revolución.

El bucle genérico

Antes de entrar en cada algoritmo, fijemos el pseudocódigo común.[2] Los tres algoritmos ejecutan exactamente esto:

```
función BÚSQUEDA(problema):
    frontera ← [s₀]                    // estructura depende del algoritmo
    visitados ← {s₀}

    mientras frontera no esté vacía:
        s ← EXTRAER(frontera)          // ← aquí está toda la diferencia
        si ES-META(s):
            return RECONSTRUIR-CAMINO(s)
        para cada acción a en A(s):
            s' ← f(s, a)
            si s' ∉ visitados:
                visitados ← visitados ∪ {s'}
                AÑADIR(frontera, s')

    return FRACASO
```

La línea `s ← EXTRAER(frontera)` es la única que cambia entre algoritmos.[3] En BFS, `EXTRAER` es `dequeue` (el primero que entró). En DFS, es `pop` (el último que entró). En UCS, es `extract-min` (el de menor coste). Tres implementaciones. Tres comportamientos radicalmente distintos.

La forma matemática de decirlo es: en cada iteración elegimos un nodo de la frontera según una política π:

$$n_t = \text{extraer}_\pi(F_t)$$

SÍMBOLO	SIGNIFICADO	EJEMPLO
F_t	Frontera en el instante t: nodos descubiertos pero no expandidos.	$[B, C, D]$.
n_t	Nodo elegido para expandir en la iteración t.	En BFS sería B; en DFS podría ser D.
π	Política de extracción de la frontera.	FIFO, LIFO o menor coste $g(n)$.
extraer_π	Operación que aplica esa política.	`dequeue`, `pop` o `extract-min`.

Y el resto del bucle actualiza frontera y visitados:

$$F_{t+1} = (F_t \setminus \{n_t\}) \cup (\text{Succ}(n_t) \setminus V_t)$$

SÍMBOLO	SIGNIFICADO	EJEMPLO
$\text{Succ}(n_t)$	Sucesores generados al expandir n_t.	Si $n_t = B$, quizá $\{D, E\}$.
V_t	Estados ya visitados antes de la iteración t.	$\{A, B\}$.
$\setminus$	Diferencia de conjuntos: quitar elementos ya presentes.	No reañadir estados visitados.

Así que los tres algoritmos se reducen a tres políticas:

$$\pi_{\text{BFS}} = \text{FIFO}, \qquad \pi_{\text{DFS}} = \text{LIFO}, \qquad \pi_{\text{UCS}}(n) = \arg\min_{n \in F} g(n)$$

BFS: explorar por niveles

Algoritmo

BFS usa una **cola** (FIFO: *first in, first out*). Cuando expandimos un estado a profundidad d, sus sucesores se añaden al final de la cola, detrás de todos los estados de profundidad d que aún no se han expandido. El resultado es una exploración por niveles concéntricos.[4]

```
Frontera: [A]           → dequeue A, enqueue(B, C)
Frontera: [B, C]        → dequeue B, enqueue(D, E)
Frontera: [C, D, E]     → dequeue C, enqueue(F)
Frontera: [D, E, F]     → ...
```

Propiedades formales

Para un espacio de búsqueda con factor de ramificación b y profundidad de la solución más superficial d:[5]

PROPIEDAD	VALOR	EXPLICACIÓN
Completitud	Sí (si b es finito)	Si existe solución, BFS la encuentra porque explora sistemáticamente todos los nodos por niveles.
Optimalidad	Sí (si coste = 1)	BFS encuentra el camino con menos pasos porque el primer nodo meta que descubre está a la profundidad mínima.
Tiempo	$O(b^d)$	En el peor caso, explora todos los nodos hasta profundidad d. Con $b = 10, d = 10$: 10^{10} expansiones.
Espacio	$O(b^d)$	Almacena todos los nodos del nivel actual en la frontera. Este es su talón de Aquiles.

El conteo de nodos de BFS sale de la suma de niveles del árbol:

$$N_{\text{BFS}}(d) = \sum_{i=0}^{d} b^i = \frac{b^{d+1} - 1}{b - 1}$$

SÍMBOLO	SIGNIFICADO	EJEMPLO
$N_{\text{BFS}}(d)$	Nodos generados hasta profundidad d.	Si $d = 6$, todos los niveles de 0 a 6.
b	Factor de ramificación medio.	$b = 10$.
d	Profundidad de la solución más superficial.	$d = 6$.
i	Nivel del árbol de búsqueda.	$i = 0$ es el estado inicial.

Con $b = 10$ y $d = 6$:

$$N_{\text{BFS}}(6) = 1 + 10 + 10^2 + 10^3 + 10^4 + 10^5 + 10^6 = 1\,111\,111$$

La memoria se aproxima por el tamaño del nivel más profundo que queda en la frontera:

$$M_{\text{BFS}}(d) \approx b^d$$

Con $b = 10$ y $d = 12$, BFS puede necesitar almacenar alrededor de 10^{12} nodos. A 1 KB por nodo, eso ronda 10^{15} bytes: aproximadamente 1 PB, no “un ordenador grande”. Imposible para la mayoría de problemas reales.[6]

DFS: lanzarse en profundidad

Algoritmo

DFS usa una **pila** (LIFO: *last in, first out*). Cuando expandimos un estado, sus sucesores se colocan en el tope de la pila, y el algoritmo explora inmediatamente el que queda arriba. El resultado es una inmersión profunda por la primera rama disponible.[7]

```
Convención: el tope de la pila está a la izquierda.

Frontera: [A]           → pop A, push(C), push(B)
Frontera: [B, C]        → pop B (tope de la pila), push(E), push(D)
Frontera: [D, E, C]     → pop D
Frontera: [E, C]        → ...
```

DFS es inherentemente recursivo. De hecho, la implementación más natural de DFS es recursiva, sin frontera explícita:

```
función DFS-RECURSIVO(s, visitados):
    si ES-META(s): return s
    visitados ← visitados ∪ {s}
    para cada acción a en A(s):
        s' ← f(s, a)
        si s' ∉ visitados:
            resultado ← DFS-RECURSIVO(s', visitados)
            si resultado ≠ FRACASO: return resultado
    return FRACASO
```

La pila de llamadas de la recursión es la frontera. Cada llamada anidada es un paso más en profundidad.[8]

Propiedades formales

PROPIEDAD	VALOR	EXPLICACIÓN
Completitud	No (sin límite)	En espacios infinitos, DFS puede perderse por una rama infinita sin retroceder nunca. Con límite de profundidad, es completo.
Optimalidad	No	Encuentra el primer camino, no el más corto. Puede devolver uno de 50 pasos cuando existe uno de 3.
Tiempo	$O(b^m)$	m es la profundidad máxima. Peor que BFS si $m \gg d$.
Espacio	$O(b \cdot m)$	Solo almacena el camino actual y sus hermanos no explorados. Esta es su gran ventaja.

La diferencia entre tiempo y memoria se ve mejor separando las dos fórmulas:

$$T_{\text{DFS}}(m) = O(b^m)$$

$$M_{\text{DFS}}(m) = O(b \cdot m)$$

SÍMBOLO	SIGNIFICADO	EJEMPLO
$T_{\text{DFS}}(m)$	Trabajo máximo si DFS baja hasta profundidad m.	Puede ser enorme si la rama mala es muy profunda.
$M_{\text{DFS}}(m)$	Memoria necesaria para camino actual y alternativas pendientes.	Con $b = 10, m = 20$, unos 200 nodos.
m	Profundidad máxima explorada.	$m = 20$.

La ventaja de memoria de DFS es dramática. Con $b = 10, m = 20$, DFS mantiene del orden de:

$$b \cdot m = 10 \cdot 20 = 200$$

nodos de memoria. BFS para una frontera comparable podría necesitar 10^{20} nodos. DFS es el único algoritmo viable para espacios profundos sin heurística, pero esa frugalidad se paga con ausencia de optimalidad y riesgo de perderse.[9]

DLS: DFS con un límite

Antes de IDS conviene nombrar la pieza que lo sostiene: la búsqueda con límite de profundidad (*depth-limited search*, DLS). Es DFS con una frontera artificial: explora en profundidad, pero nunca baja más allá de un límite L. Si alcanza L sin encontrar la meta, da marcha atrás como si esa rama se hubiera agotado.

```
función DLS(s, L, visitados):
    si ES-META(s): return s
    si L = 0: return CORTE                  // límite alcanzado
    para cada acción a en A(s):
        s' ← f(s, a)
        si s' ∉ visitados:
            r ← DLS(s', L - 1, visitados ∪ {s'})
            si r ≠ FRACASO y r ≠ CORTE: return r
    return CORTE si alguna rama tocó el límite, si no FRACASO
```

DLS resuelve el problema de las ramas infinitas de DFS, porque con un L finito siempre termina, pero introduce otro: si eliges L menor que la profundidad de la solución, no la encuentras; si lo eliges demasiado grande, vuelves a pagar tiempo y memoria de más. Es completo solo cuando $L \geq d$. La distinción entre **CORTE** (se alcanzó el límite y quizá había solución más abajo) y **FRACASO** (la rama se agotó de verdad) es justo lo que permite a IDS decidir si merece la pena subir el límite una vuelta más.

IDS: lo mejor de dos mundos

El *Iterative Deepening Search* (IDS) combina la optimalidad de BFS con la memoria de DFS.[10] La idea es simple: ejecuta DFS con límite de profundidad $L = 0, 1, 2, \ldots$ hasta encontrar la solución:

```
función IDS(problema):
    para L = 0, 1, 2, ... hasta ∞:
        resultado ← DFS-LIMITADO(s₀, L)
        si resultado ≠ FRACASO: return resultado
```

Parece ineficiente, porque cada iteración reexplora los niveles anteriores, pero el coste de la reexploración es sorprendentemente bajo: los niveles profundos dominan el coste total. El número aproximado de nodos expandidos por IDS hasta profundidad d es:

$$N_{\text{IDS}}(d) = \sum_{\ell=0}^{d} (d - \ell + 1) b^{\ell}$$

SÍMBOLO	SIGNIFICADO	EJEMPLO
ℓ	Nivel del árbol que se reexplora en varias iteraciones.	El nivel 0 se toca $d+1$ veces.
$d - \ell + 1$	Número de veces que IDS vuelve a visitar el nivel ℓ.	Si $d = 3$, el nivel 1 se visita 3 veces.
b^{ℓ}	Nodos aproximados del nivel ℓ.	Con $b = 10$, el nivel 3 tiene $1\,000$ nodos.

Comparado con BFS:

$$\frac{N_{\text{IDS}}}{N_{\text{BFS}}} \approx \frac{b}{b-1}$$

Para $b = 10$:

$$\frac{10}{9} \approx 1.11$$

IDS explora aproximadamente un 11 % más de nodos que BFS, pero con un consumo de memoria $O(b \cdot d)$ en lugar de $O(b^d)$.[11] Es el algoritmo preferido cuando el espacio de búsqueda es grande, la profundidad de la solución es desconocida y no hay heurística disponible.

UCS: cuando cada paso cuesta distinto

BFS asume que todos los pasos cuestan lo mismo. Pero en el mundo real, un paso puede costar 5 y otro 500. BFS encuentra el camino con menos pasos, no el más barato.

UCS generaliza BFS reemplazando la cola por una **cola de prioridad** ordenada por $g(n)$, el coste acumulado desde el estado inicial hasta n.[12] En cada paso, UCS expande el nodo con menor $g(n)$:

$$g(n) = \sum_{i=1}^{k} c(s_{i-1}, a_i)$$

SÍMBOLO	SIGNIFICADO	EJEMPLO
$g(n)$	Coste acumulado desde el estado inicial hasta el nodo n.	Llegar a D cuesta 7.
$c(s_{i-1}, a_i)$	Coste de aplicar la acción a_i desde el estado anterior.	Una carretera de 5 km o una acción con coste 5.
k	Número de acciones del camino hasta n.	Tres movimientos: $k = 3$.
$s_0 \to s_1 \to \ldots \to s_k$	Secuencia de estados recorrida hasta llegar a n.	$A \to C \to D$.

La política de extracción queda así:

$$n_t = \arg\min_{n \in F_t} g(n)$$

Si dos caminos llegan al mismo estado, UCS conserva el de menor coste:

$$g_{\text{nuevo}}(s') = g(n_t) + c(n_t, a)$$

$$g(s') \leftarrow \min\left(g(s'), g_{\text{nuevo}}(s')\right)$$

SÍMBOLO	SIGNIFICADO	EJEMPLO
n_t	Nodo extraído de la frontera en la iteración t.	C, porque $g(C) = 2$.
F_t	Frontera ordenada por coste acumulado.	$[(C, 2), (B, 5)]$.
$g_{\text{nuevo}}(s')$	Coste candidato para llegar a un sucesor.	Si $g(C) = 2$ y $c(C, D) = 5$, entonces $g_{\text{nuevo}}(D) = 7$.
$\min$	Operación que se queda con el camino más barato conocido.	Si ya había $D = 9$, se reemplaza por $D = 7$.

Ejemplo concreto:

```
Frontera: [(A, g=0)]            → extraer A, añadir B(g=5), C(g=2)
Frontera: [(C, g=2), (B, g=5)]  → extraer C (menor coste), añadir D(g=7)
Frontera: [(B, g=5), (D, g=7)]  → extraer B, añadir E(g=11)
```

Observa que B se descubrió antes que C, pero C se expandió primero porque su coste acumulado era menor. UCS no discrimina por antigüedad: solo le importa el coste.

Propiedades formales

PROPIEDAD	VALOR	CONDICIÓN
Completitud	Sí	Todos los costes $c(s, a) \geq \epsilon > 0$
Optimalidad	Sí	El primer nodo meta extraído es óptimo
Tiempo	$O(b^{1+\lfloor C^*/\epsilon \rfloor})$	C^* = coste solución óptima, ϵ = coste mínimo
Espacio	$O(b^{1+\lfloor C^*/\epsilon \rfloor})$	Similar al tiempo en el peor caso

BFS es un caso especial de UCS donde $c(s, a) = 1$ para toda acción. En ese caso, $g(n) = \text{profundidad}(n)$ y UCS se comporta exactamente como BFS.[13]

Búsqueda bidireccional

Hay una idea que reduce el coste de la búsqueda ciega de forma espectacular: buscar desde los dos extremos a la vez. En lugar de explorar solo desde el estado inicial hacia la meta, la búsqueda bidireccional lanza dos búsquedas simultáneas, una hacia delante desde s_0 y otra hacia atrás desde la meta, y para en cuanto las dos fronteras se tocan.

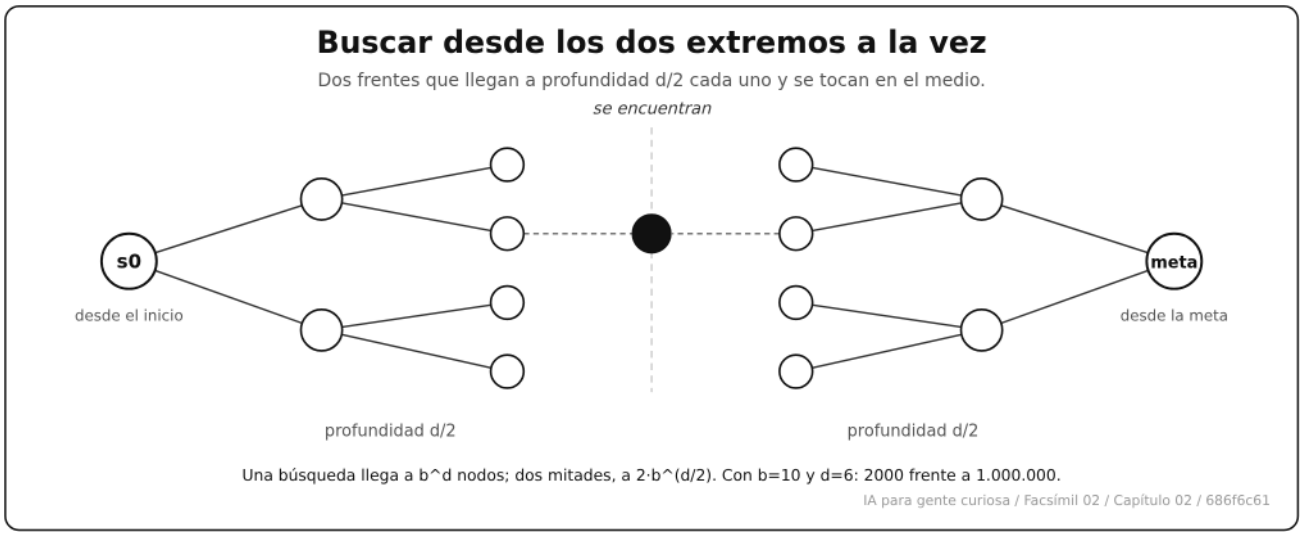
La razón por la que ayuda tanto es geométrica. Una búsqueda que llega a profundidad d explora del orden de b^d nodos. Dos búsquedas que se encuentran en el medio llegan cada una solo a profundidad $d/2$:

$$b^{d/2} + b^{d/2} = 2\,b^{d/2} \ll b^d$$

SÍMBOLO	SIGNIFICADO	EJEMPLO
b	Factor de ramificación medio.	$b = 10$.
d	Profundidad de la solución.	$d = 6$.
$b^{d/2}$	Nodos que explora cada una de las dos mitades.	$10^3 = 1\,000$ por lado.
$2\,b^{d/2}$	Coste total aproximado de las dos búsquedas.	$2\,000$ frente a 10^6.

En palabras: con $b = 10$ y $d = 6$, una búsqueda normal toca del orden de un millón de nodos; dos búsquedas que se encuentran en el medio tocan unos dos mil. La diferencia entre b^d y $b^{d/2}$ es la diferencia entre inviable y trivial.

El precio es que no siempre se puede aplicar. Hace falta poder buscar hacia atrás desde la meta, es decir, conocer los predecesores de un estado; que la meta sea un estado concreto y no una propiedad abstracta; y comprobar de forma eficiente si las dos fronteras ya se han tocado. Cuando se cumplen esas condiciones, es difícil de batir.



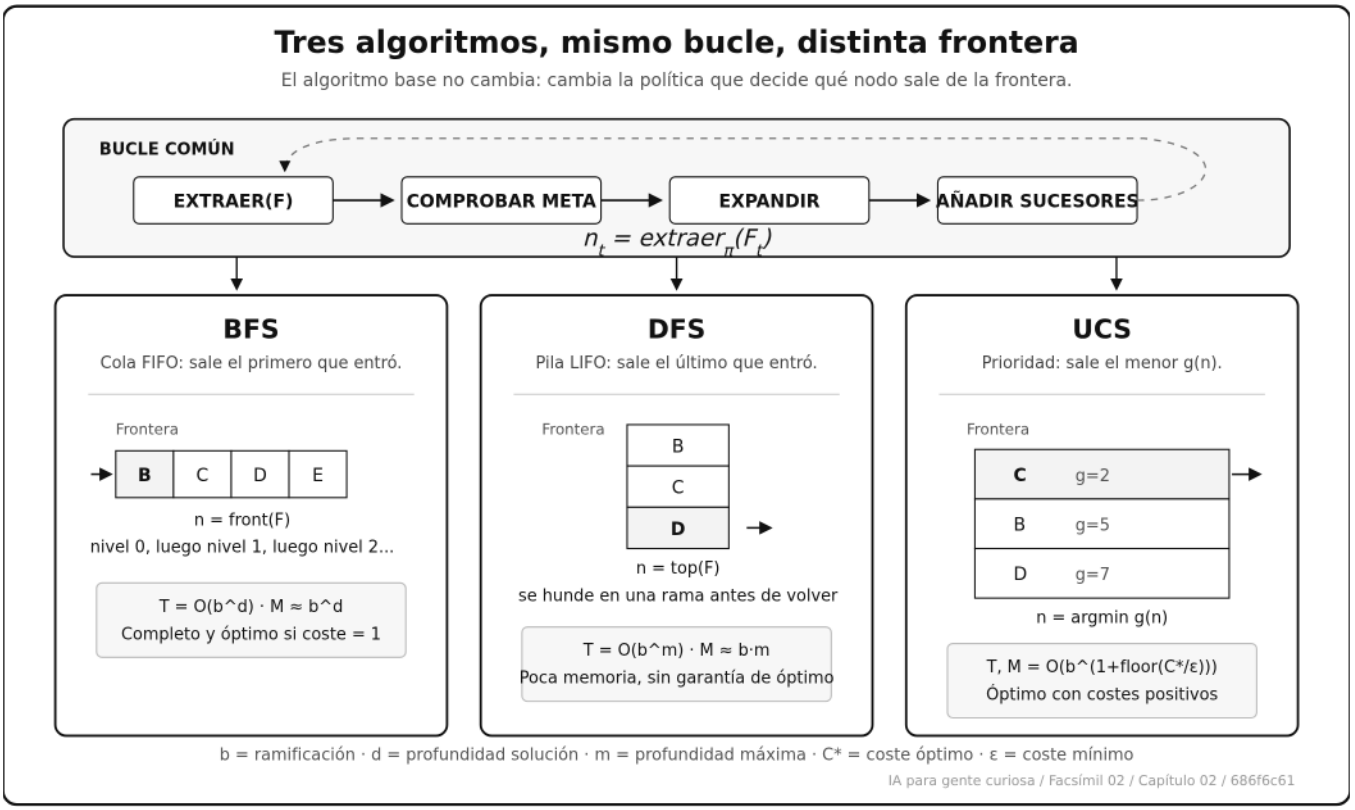
Comparar búsquedas como ingeniero

Una comparación útil no se queda en “este algoritmo encuentra camino”. Debe registrar la **traza de expansión** y métricas mínimas. Si no las registras, no puedes explicar por qué BFS encontró una solución rápida pero cara, por qué DFS tuvo suerte o por qué UCS tardó más pero devolvió menor coste.

MÉTRICA	QUÉ MIDE	POR QUÉ IMPORTA
Estados expandidos	Cuántas veces sacaste un nodo de la frontera.	Aproxima trabajo computacional.
Estados generados	Cuántos sucesores se produjeron.	Mide cuánto crece el árbol aunque no todo se expanda.
Frontera máxima	Máximo tamaño de la frontera.	Aproxima presión de memoria.
Profundidad de solución	Número de acciones del camino devuelto.	BFS optimiza esto si los costes son uniformes.
Coste de solución	Suma de costes $g(n)$.	UCS optimiza esto si los costes son positivos.
Traza	Orden exacto de expansión.	Permite revisar empates, ciclos y decisiones de frontera.

También hay un detalle profesional que suele pasarse por alto: **el desempate**. Si dos nodos tienen el mismo coste, la implementación debe decidir cuál sale primero. Dos implementaciones correctas de UCS pueden expandir nodos en orden distinto si no fijan una

regla estable de desempate. Para comparar runs, fija el orden de sucesores y el criterio de desempate.



Un ejemplo trazado

Veámoslo sobre un grafo concreto. Cinco estados, con estos costes por arista y orden de sucesores alfabético:

- A → B (coste 1), A → C (coste 5)
- B → D (coste 1)
- C → E (coste 1)
- D → E (coste 1)

El estado inicial es A y la meta es E. Hay dos caminos: A → C → E, con dos pasos y coste 6, y A → B → D → E, con tres pasos y coste 3. El más corto en pasos no es el más barato.

ALGORITMO	ORDEN DE EXPANSIÓN	CAMINO DEVUELTO	PASOS	COSTE
BFS	A, B, C, D, E	A → C → E	2	6
DFS	A, B, D, E	A → B → D → E	3	3
UCS	A, B, D, E	A → B → D → E	3	3

BFS descubre la meta por la rama más corta en pasos (A → C → E) y devuelve un camino caro. UCS ordena por coste acumulado, así que expande A, B y D, y saca E con $g = 3$ antes de mirar siquiera C, que tiene $g = 5$: devuelve el camino óptimo en coste. DFS, con este orden de sucesores, coincide con UCS por suerte; cambia el orden de las aristas y devolverá otra cosa, porque no tiene ninguna garantía. Es exactamente la comparación que puedes reproducir en el cuaderno del facsímil.

Tabla comparativa

ALGORITMO	FRONTERA	COMPLETO	ÓPTIMO	TIEMPO	ESPACIO
BFS	Cola (FIFO)	Sí	Sí (costes = 1)	$O(b^d)$	$O(b^d)$
DFS	Pila (LIFO)	No (sin lím.)	No	$O(b^m)$	$O(b \cdot m)$
UCS	Cola prioridad (g)	Sí	Sí	$O(b^{1+\lfloor C^*/\epsilon \rfloor})$	$O(b^{1+\lfloor C^*/\epsilon \rfloor})$
IDS	Pila (LIFO, repetido)	Sí	Sí (costes = 1)	$O(b^d)$	$O(b \cdot d)$
Bidireccional	Dos colas (FIFO)	Sí	Sí (costes = 1)	$O(b^{d/2})$	$O(b^{d/2})$

Donde b = factor de ramificación, d = profundidad de la solución más superficial, m = profundidad máxima, C^* = coste de la solución óptima, ϵ = coste mínimo de cualquier acción.

En el día a día

BFS es la base del *web crawling*, donde se explora internet por niveles de enlaces, de los algoritmos de «seis grados de separación» en redes sociales y de cualquier problema donde necesites garantizar el camino más corto en un grafo no ponderado. Siempre que «más cerca» signifique «menos saltos», BFS es la herramienta natural.

DFS aparece en los analizadores sintácticos, que recorren el árbol de sintaxis en profundidad, en la resolución de laberintos con poca memoria y como base del *backtracking* que veremos en el capítulo 7 sobre CSP. También es el algoritmo natural para generar permutaciones y combinaciones, donde interesa agotar una rama antes de probar la siguiente.

UCS está en el corazón de los sistemas de navegación. Google Maps no usa BFS, porque las carreteras no miden todas lo mismo: usa UCS, o A*, que es UCS con heurística, para encontrar rutas óptimas en grafos con pesos. En cuanto el coste deja de ser uniforme, UCS es el mínimo imprescindible.

IDS es el algoritmo preferido en motores de ajedrez y otros juegos con espacio de búsqueda profundo y factor de ramificación alto, donde BFS se queda sin memoria y DFS sin garantías. La búsqueda bidireccional, por su parte, aparece cuando se conoce la meta y se puede ir hacia atrás, por ejemplo al resolver un cubo de Rubik desde el estado actual y desde el resuelto a la vez.

Por qué debería importarte

BFS, DFS y UCS no son algoritmos para memorizar: son **patrones de diseño algorítmico**. El patrón es «frontera + bucle». La elección de la estructura de datos para la frontera es la decisión de diseño que determina todas las propiedades del algoritmo resultante.

Este principio, una decisión de implementación aparentemente menor que determina propiedades asintóticas, es recurrente en informática. Y en IA, es la base sobre la que se construye A*: UCS con una heurística añadida a la prioridad. Si no entiendes por qué BFS explora por niveles y DFS se lanza en profundidad, no entenderás por qué A* es mejor que ambos.[14]

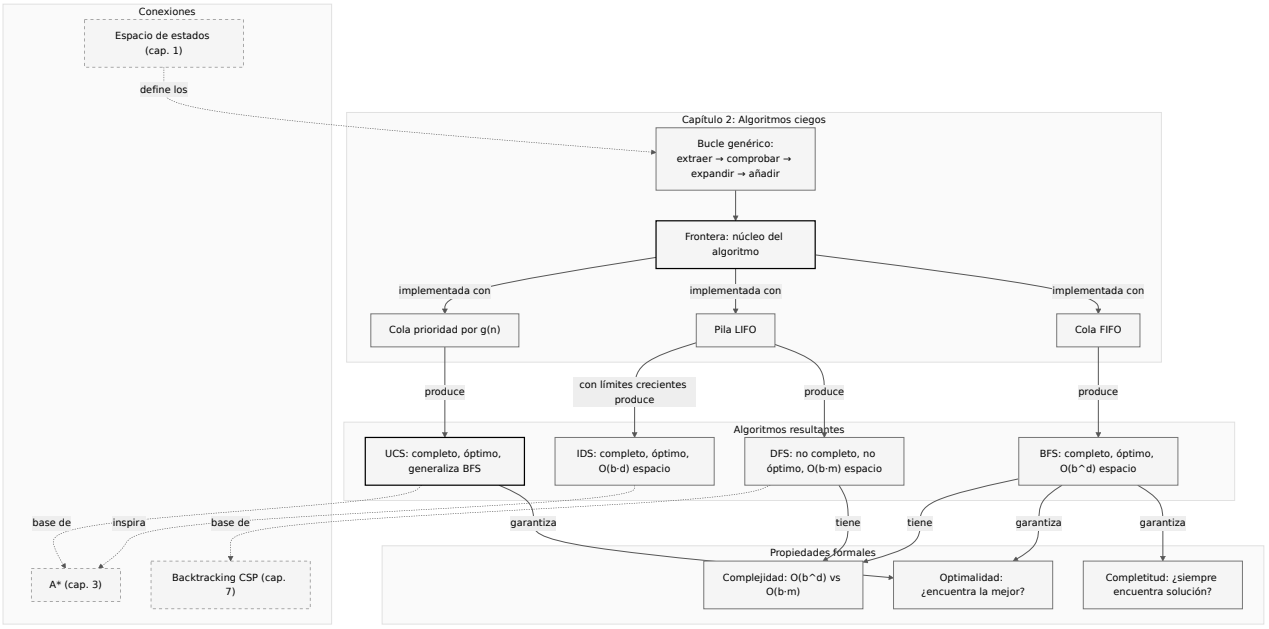
Dónde solía tropezar yo

ERROR	POR QUÉ ES UN ERROR	ANTÍDOTO
Usar DFS sin límite en espacios infinitos	DFS se pierde por una rama infinita sin retroceder. El algoritmo nunca termina.	Usa IDS o establece un límite de profundidad basado en el conocimiento del dominio.
Asumir que BFS es siempre mejor que DFS	BFS garantiza optimalidad pero su consumo de memoria es exponencial. Para $b = 10, d = 15$, BFS necesita petabytes de RAM.	Evalúa b y d antes de elegir. Si b^d supera la memoria disponible, usa IDS o DFS con límite.
Usar BFS con costes no uniformes	BFS optimiza el número de pasos, no el coste. Si las acciones tienen costes distintos, BFS no encuentra el camino óptimo.	Usa UCS. BFS es UCS con $c(s, a) = 1$; fuera de ese caso, UCS es la herramienta correcta.
No detectar estados repetidos	Sin un conjunto `visitados`, los tres algoritmos pueden quedar atrapados en ciclos infinitos.	Mantén `visitados` y comprueba antes de añadir a la frontera. Es la optimización más rentable en búsqueda.

Cómo encaja todo

El capítulo anterior definió el contrato del problema. Este capítulo enseña que, una vez tienes estados y acciones, la decisión crítica es la política de frontera. Cambiar una cola por una pila o por una cola de prioridad cambia garantías, memoria y coste encontrado.

Esto prepara el salto al capítulo 3: A* no aparece de la nada. Es UCS con una estimación del coste restante. Primero entiendes $g(n)$; después podrás entender $g(n) + h(n)$.



Vocabulario aprendido

TÉRMINO	DEFINICIÓN
BFS	Algoritmo de búsqueda por niveles con cola FIFO. Completo y óptimo para costes uniformes. $O(b^d)$ en tiempo y espacio.
DFS	Algoritmo de búsqueda en profundidad con pila LIFO. $O(b \cdot m)$ en espacio pero no es completo ni óptimo sin límite.
UCS	Algoritmo con cola de prioridad por $g(n)$. Generaliza BFS para costes no uniformes. Óptimo con costes positivos.
IDS	DFS repetido con límites crecientes. Combina optimalidad de BFS con bajo consumo de memoria de DFS.
DLS	DFS con un límite de profundidad fijo. Completo solo si el límite es mayor o igual que la profundidad de la solución.
Búsqueda bidireccional	Dos búsquedas simultáneas, desde el inicio y desde la meta, que se encuentran en el medio. Coste $O(b^{d/2})$.
Factor de ramificación (b)	Número medio de sucesores por estado. Determina la complejidad exponencial de la búsqueda.
Traza de expansión	Orden en el que el algoritmo extrae estados de la frontera. Permite auditar la búsqueda.
Frontera máxima	Tamaño máximo que alcanza la frontera durante la ejecución. Aproxima presión de memoria.
Coste acumulado	$g(n)$: suma de costes desde el estado inicial hasta el nodo actual.

Antes de pasar página

- [ ] ¿Puedo escribir el pseudocódigo del bucle genérico de búsqueda? (Si no, vuelve a «El bucle genérico».)
- [ ] ¿Sé qué estructura de datos usa la frontera en BFS, DFS y UCS? (Cola, pila, cola de prioridad.)
- [ ] ¿Puedo explicar las propiedades formales (completitud, optimalidad, complejidad) de cada algoritmo? (Si no, vuelve a las tablas de propiedades.)
- [ ] ¿Entiendo por qué IDS es preferible a BFS en espacios profundos, y qué papel juega el DLS dentro de él? (Si no, vuelve a «DLS» e «IDS: lo mejor de dos mundos».)

- [ ] ¿Sé cuándo se puede aplicar la búsqueda bidireccional y por qué pasa de b^d a $b^{d/2}$? (Si no, vuelve a «Búsqueda bidireccional».)

- [ ] ¿Sé explicar camino, coste, nodos expandidos y frontera máxima de una búsqueda? (Si no, vuelve a «Comparar búsquedas como ingeniero».)

En resumen

IDEA FUERZA	DETALLE
La frontera lo decide todo.	Una cola produce BFS. Una pila produce DFS. Una cola de prioridad por $g(n)$ produce UCS. El resto del bucle es idéntico.
BFS es óptimo en pasos pero devorador de memoria. DFS es frugal en memoria pero ni completo ni óptimo.	IDS combina lo mejor de ambos: optimalidad de BFS con memoria de DFS, a costa de reexplorar (~11 % más de nodos).
UCS es BFS generalizado: optimiza coste, no pasos.	Con costes uniformes, UCS = BFS. Con costes variables, solo UCS (o A*) garantiza optimalidad.
Una búsqueda seria deja traza.	Sin orden de expansión, frontera máxima y coste acumulado no puedes comparar algoritmos de forma profesional.

Para saber más

Hart, P. E., Nilsson, N. J. y Raphael, B. (1968). A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths. *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*, 4(2), 100-107. https://doi.org/10.1109/TSSC.1968.300136

Luger, G. F. (2008). *Artificial intelligence: structures and strategies for complex problem solving* (6.ª ed.). Pearson.

Nilsson, N. J. (1998). *Artificial intelligence: a new synthesis*. Morgan Kaufmann.

Pearl, J. (1984). *Heuristics: intelligent search strategies for computer problem solving*. Addison-Wesley.

Poole, D., Mackworth, A. y Goebel, R. (1998). *Computational intelligence: a logical approach*. Oxford University Press.

Rich, E., Knight, K. y Nair, S. B. (2009). *Artificial intelligence* (3.ª ed.). McGraw-Hill.

Russell, S. y Norvig, P. (2021). *Artificial intelligence: a modern approach* (4.ª ed.). Pearson. https://aima.cs.berkeley.edu/

Notas

1. Russell, S. y Norvig, P. (2021). *Artificial intelligence: a modern approach* (4.ª ed.). Pearson. La sección 3.4 demuestra que todos los algoritmos de búsqueda no informada comparten la misma estructura algorítmica y que su comportamiento queda completamente determinado por la política de extracción de la frontera. ↩

2. Nilsson, N. J. (1998). *Artificial intelligence: a new synthesis*. Morgan Kaufmann. El capítulo 7 presenta el algoritmo genérico de búsqueda en grafos que unifica BFS, DFS y UCS. ↩

3. Poole, D., Mackworth, A. y Goebel, R. (1998). *Computational intelligence: a logical approach*. Oxford University Press. El capítulo 3 presenta este marco unificado y demuestra que encapsula toda la familia de algoritmos de búsqueda no informada. ↩

4. Rich, E., Knight, K. y Nair, S. B. (2009). *Artificial intelligence* (3.ª ed.). McGraw-Hill. El capítulo 3 analiza BFS en detalle, incluyendo su implementación con cola y el análisis de complejidad. ↩

5. Russell, S. y Norvig, P. (2021). *Artificial intelligence: a modern approach* (4.ª ed.). Pearson. ↩

6. Luger, G. F. (2008). *Artificial intelligence: structures and strategies for complex problem solving* (6.ª ed.). Pearson. La sección 3.2 cuantifica el problema de memoria de BFS y motiva la necesidad de DFS e IDS. ↩

7. Poole, D., Mackworth, A. y Goebel, R. (1998). *Computational intelligence: a logical approach*. Oxford University Press. ↩

8. Nilsson, N. J. (1998). *Artificial intelligence: a new synthesis*. Morgan Kaufmann. El capítulo 7 explica la equivalencia entre DFS con pila explícita y DFS recursivo, y analiza las implicaciones para el consumo de memoria. ↩

9. Rich, E., Knight, K. y Nair, S. B. (2009). *Artificial intelligence* (3.ª ed.). McGraw-Hill. ↩

10. Luger, G. F. (2008). *Artificial intelligence: structures and strategies for complex problem solving* (6.ª ed.). Pearson. ↩

11. Russell, S. y Norvig, P. (2021). *Artificial intelligence: a modern approach* (4.ª ed.). Pearson. ↩

12. Hart, P. E., Nilsson, N. J. y Raphael, B. (1968). A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths. *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*, 4(2), 100-107. https://doi.org/10.1109/TSSC.1968.300136 ↩

.3. Pearl, J. (1984). *Heuristics: intelligent search strategies for computer problem solving*. Addison-Wesley. El capítulo 2 demuestra formalmente que UCS es una generalización de BFS y que A* es a su vez una generalización de UCS. ↩

.4. Pearl, J. (1984). *Heuristics: intelligent search strategies for computer problem solving*. Addison-Wesley. El capítulo 3 demuestra cómo A* emerge naturalmente de UCS al incorporar una heurística en la función de evaluación. ↩