Arquitectura de Sistemas

Activación

Gustavo Romero López

Updated: 11 de abril de 2025

Departamento de Ingeniería de Computadores, Automática y Robótica

Índice

Lecturas recomendadas

J. Bacon	Operating Systems (4)
A. Silberschatz	Fundamentos de Sistemas Operativos (2)
W. Stallings	Sistemas Operativos (3, 4)
A. Tanuenbaum	Sistemas Operativos Modernos (2)

Motivación

- ¿Por qué introducir estados para las hebras si ya disponemos de estados para los procesos? $\longrightarrow$ **eficiencia**.
- Los estados de las hebras, ¿son necesarios o simplemente mejoran el control de las hebras?
- Si son necesarios, ¿cuáles utilizar?
- Por simplicidad, en este tema nos centraremos en las hebras tipo núcleo.

Ventajas del uso de estados en las hebras

- A veces es necesario acceder a una hebra que espera por un evento pero no tenemos su identificador (TID)... ¿Cómo localizarla?
- Es más rápido buscar si están agrupadas por estados $\longrightarrow$ mejora el rendimiento del SO.
- Imprescindible en ciertos casos:
  - SMP con cola central de hebras preparadas y política de planificación global.
  - SO diferente para máquinas {mono,multi}procesador.

TCB de una hebra núcleo en un SMP

identificador (TID)
estado
puntero de instrucción (IP)
puntero de pila (SP)
banderas
afinidad

- El estado de la hebra como mínimo debe distinguir entre las que se están ejecutando y las que no.
- Una misma hebra **no** debería ejecutarse **en paralelo** en más de un procesador.
- Es útil añadir un campo para indicar cual fue el último procesador en el que se ejecutó (**afinidad**) porque mejora el rendimiento.

Estados de una hebra (1)

- La noción de "*estado de una hebra*" puede resultar un poco confusa porque una hebra en ejecución cambia su estado **interno** de ejecución con cada instrucción.
  - Esta clase de estado pertenece al contexto de una hebra, recordad el tema sobre cambio de hebra.
- La noción de "*estado de una hebra*" que manejaremos aquí hace referencia al estado **externo** de una hebra en cuanto a su relación con el entorno:
  - uso de recursos
  - otras hebras
  - el sistema operativo

Estados de una hebra (2)

Definición: El estado de una hebra expresa la relación de una hebra con respecto a otras y al sistema.

- Una hebra "ejecutando" se está ejecutando sobre un procesador.
- Una hebra "preparada" es ejecutable, sólo está esperando a que se le asigne un procesador libre.
- Una hebra "bloqueada" espera la finalización un evento...
  - el fin de una operación de E/S.
  - la llegada de un mensaje.
  - la llegada de una señal.
  - la liberación de un recurso ocupado.

Modelo de un estado

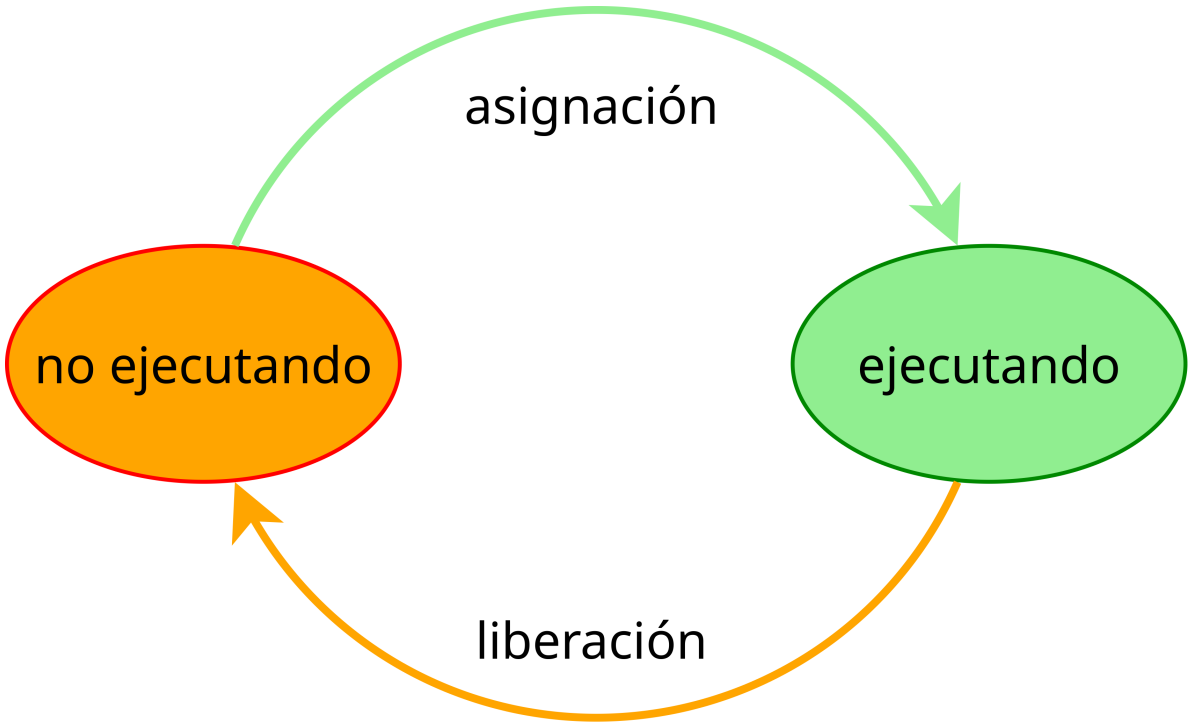
- No existe control explícito sobre las hebras: todas las hebras están activas pero sólo algunas de ellas progresan en su ejecución.
  - debido a la falta de procesadores
  - debido a la espera por ciertos eventos
  - debido a la competencia por recursos

Consecuencias del modelo de un estado

- Planificación:
  - Sólo los más simples son posibles o nos arriesgamos a una gran sobrecarga.
  - Ineficiente debido a los cambios de hebra superfluos.
- Sólo válido en sistemas con un único procesador.

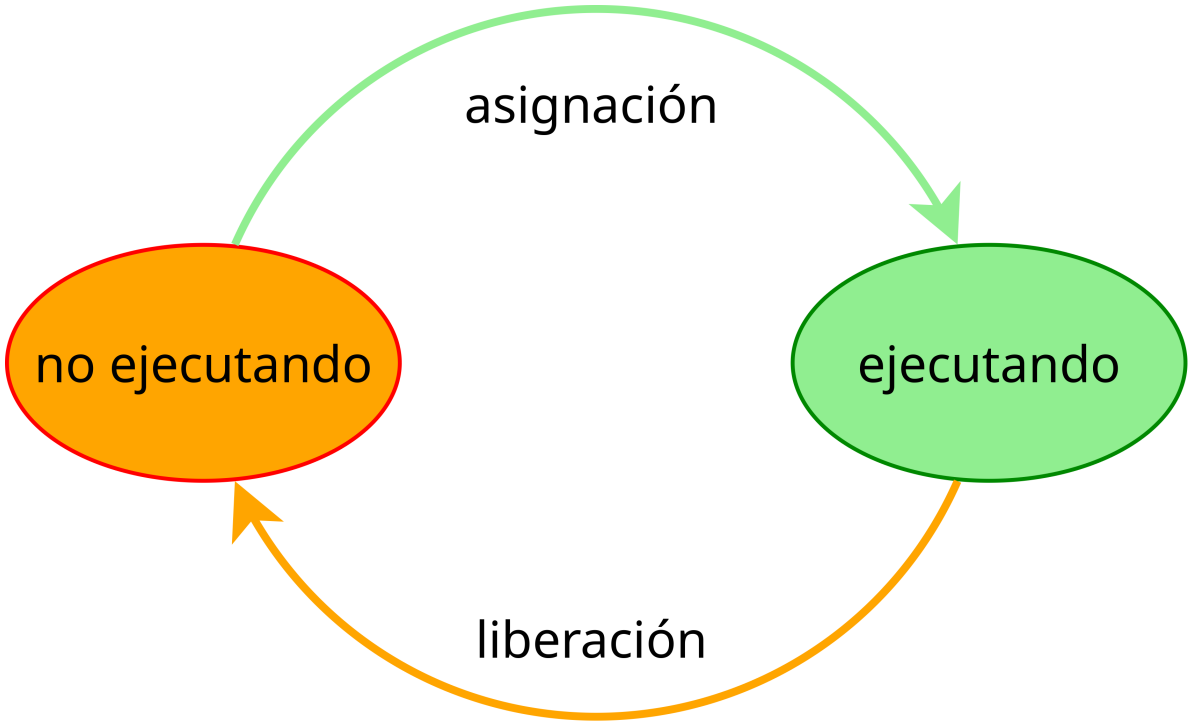
Modelo de dos estado

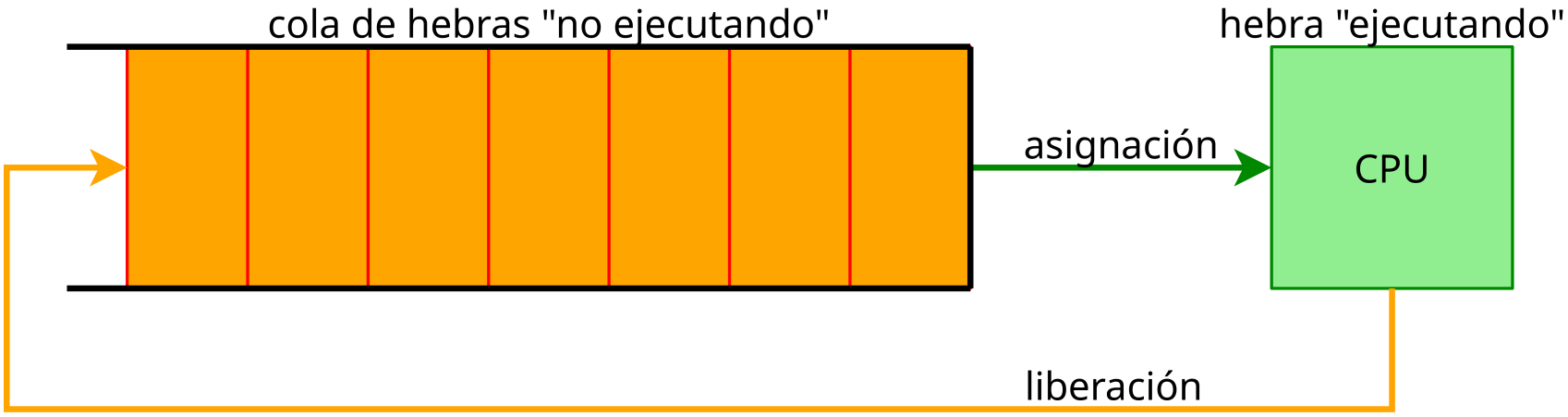
- Modelo demasiado simple.
- Cada hebra está en uno de los estados:
  - ejecutando
  - no ejecutando



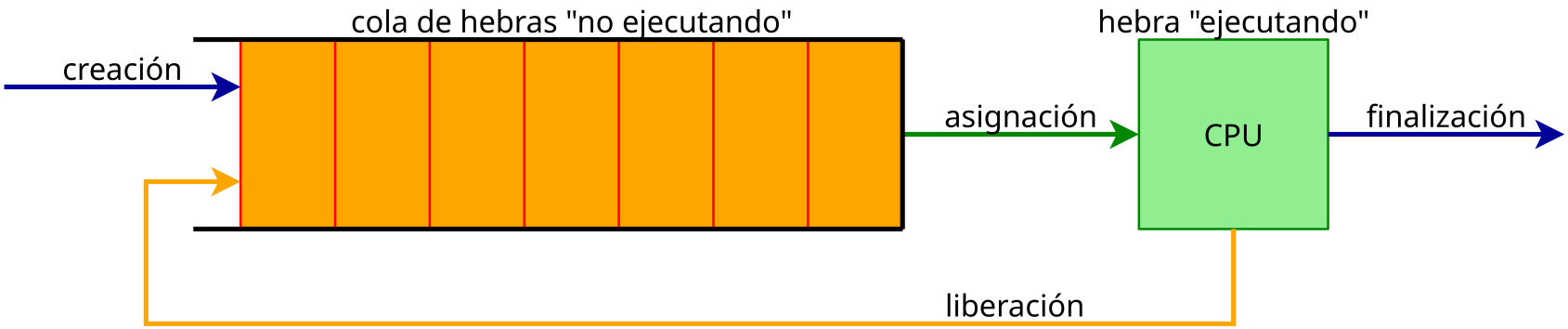
Modelo de dos estados

- ¿Cómo implementar este modelo?



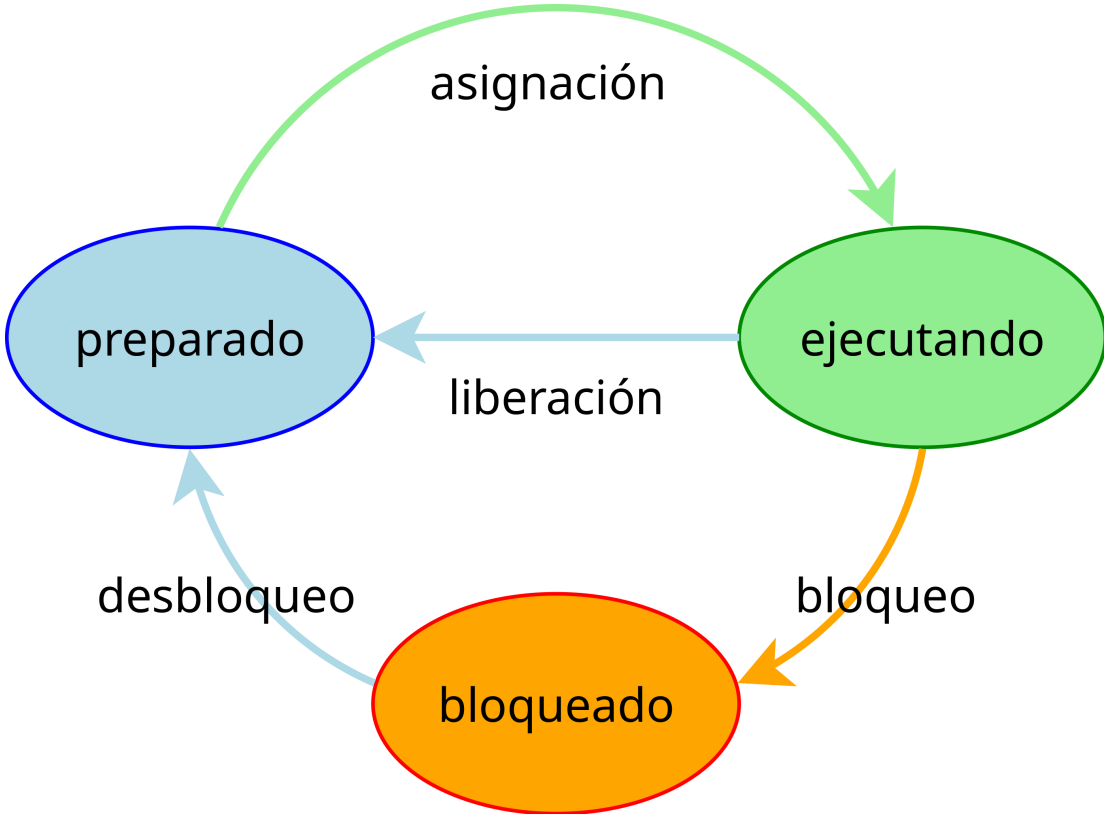


- Este modelo representa un sistema estático.



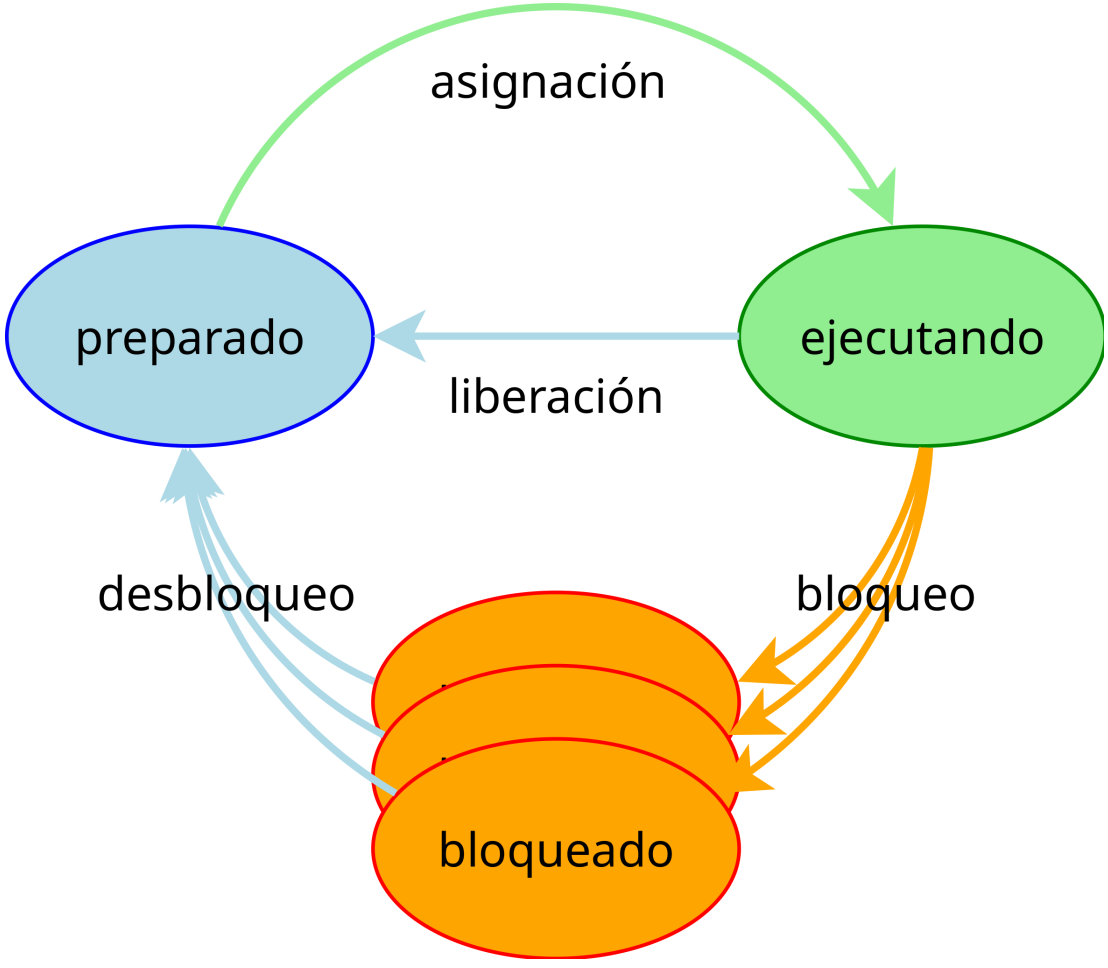
- Estos modelos son utilizados a menudo para analizar los efectos sobre la elección de parámetros de diseño: velocidad del procesador, longitud de las colas y políticas de planificación.

Modelo de tres estados



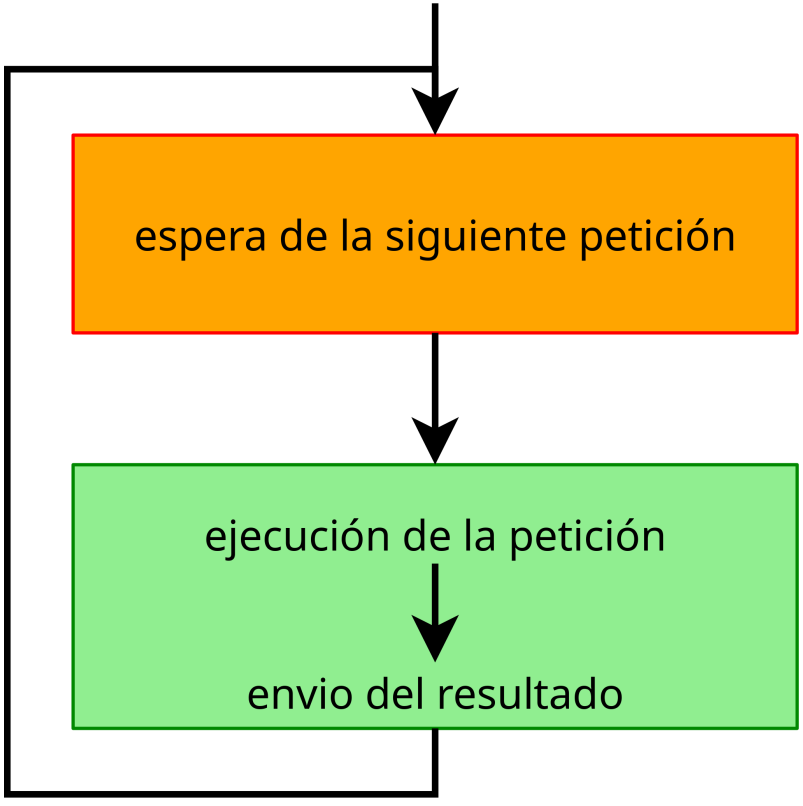
- Es cuestión de diseño y no de implementación si existe un único estado bloqueado para todos los tipos de eventos...

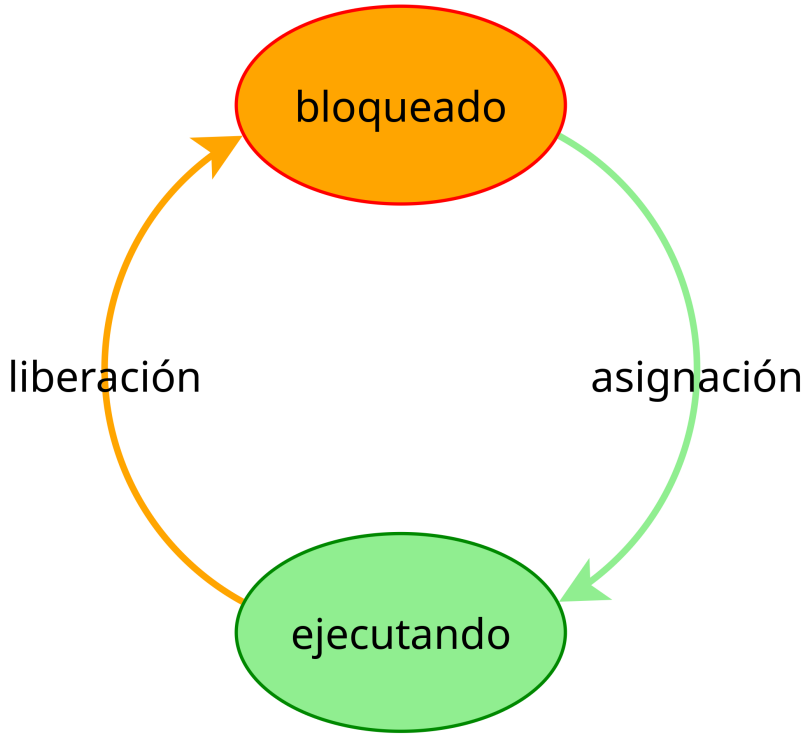
Modelo de tres estados



- ... o si existe un estado bloqueado diferente por cada tipo de evento, habitualmente más eficiente.

Modelando la E/S (controladores) como hebras





- ¿Por qué no se incluye el estado **preparado**? → no es necesario ni deseable.

nuevo

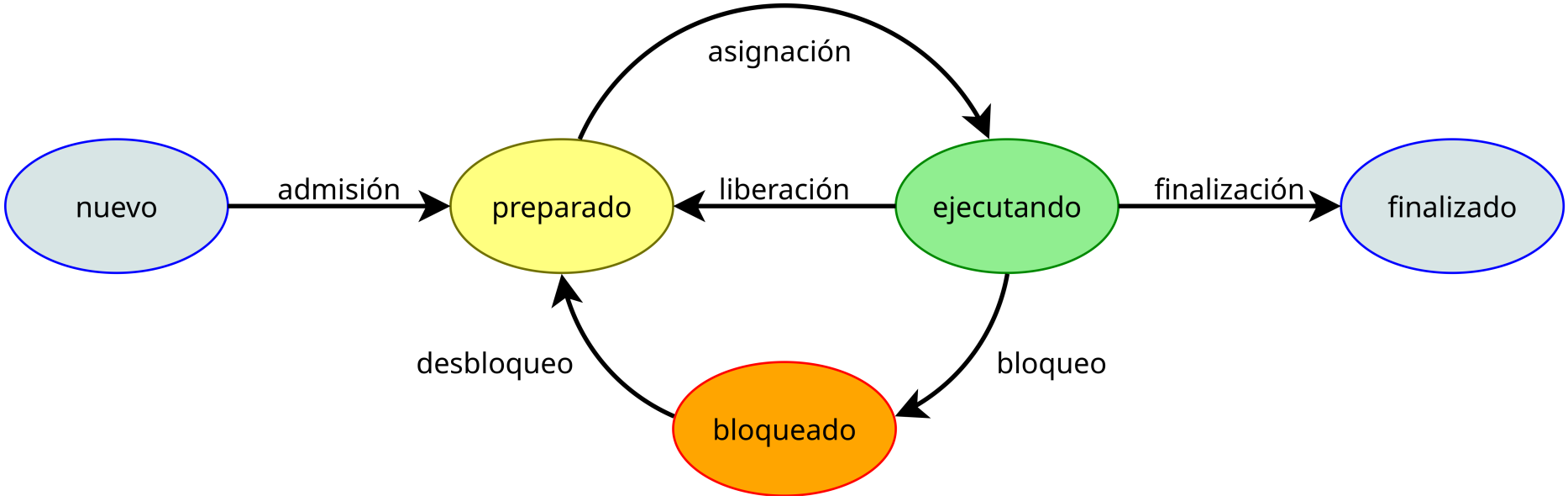
- Cuando el SO crea una nueva hebra tipo núcleo...
  - crea un identificador de hebra único.
  - obtiene espacio para el TCB para gestionar la hebra.
  - crea un espacio de direcciones (tablas de páginas).
  - crea e inicializa otras estructuras de control de recursos.
- ... pero todavía no hace que la hebra se pueda ejecutar, no es **admitida**[1], debido a...
  - falta de recursos
  - restricciones de temporización

[1] algunos autores defienden que todo SO necesita control de admisión

finalizado

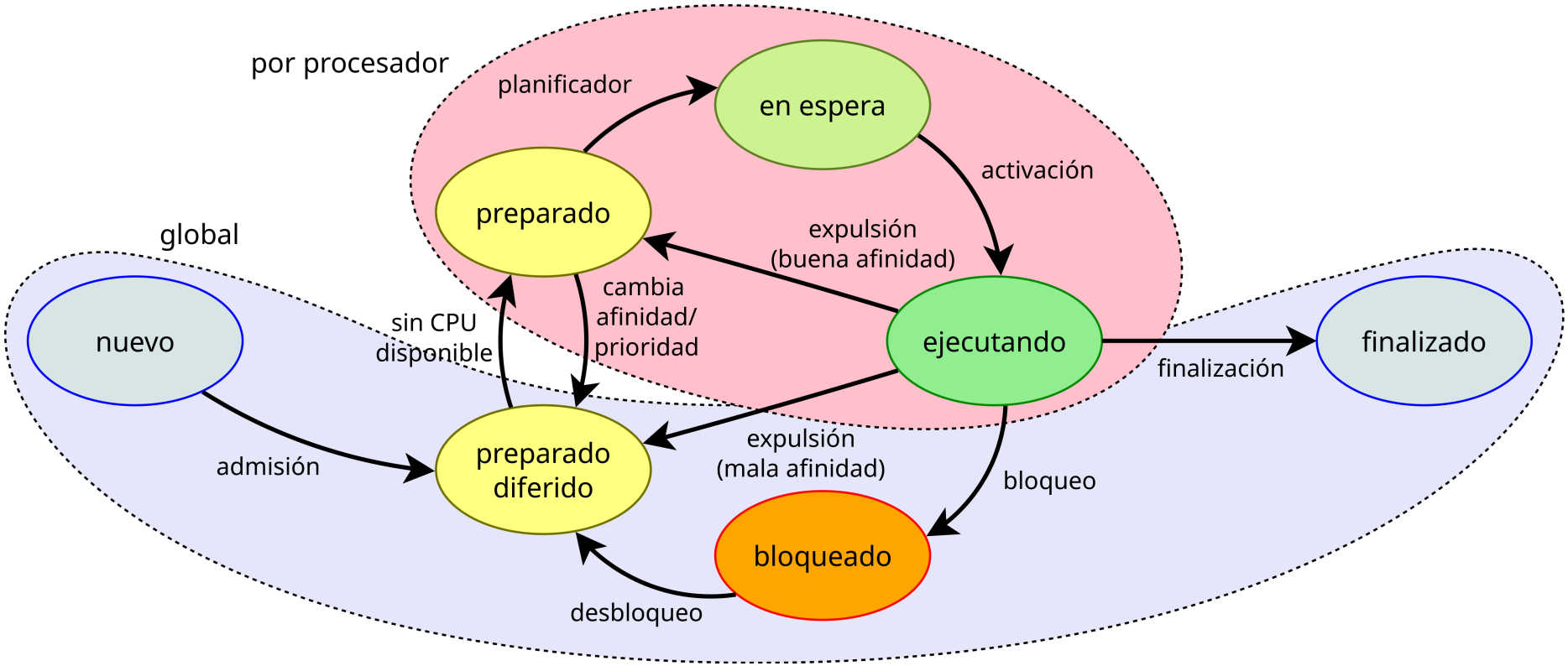
- La hebra deja de ser elegible para ejecución.
- El TCB se guarda para ciertas tareas:
  - contabilizar el uso de recursos: facturación a clientes.
  - facilitar la creación y ejecución de hebras nuevas: reciclaje.
  - depuración: resolución de fallos.
- ¿Cuándo borrar un TCB?
  - No necesito el **contenido**.
  - No necesito reutilizar su **estructura**.

Modelo de 5 estados



- Existen motivos para incluir estados adicionales, sin embargo hay que evitar modelos demasiado complejos.
- 1ª Regla de diseño: mantener simples las cosas simples.
- 2ª Regla de diseño: considerar la escalabilidad y la eficiencia.

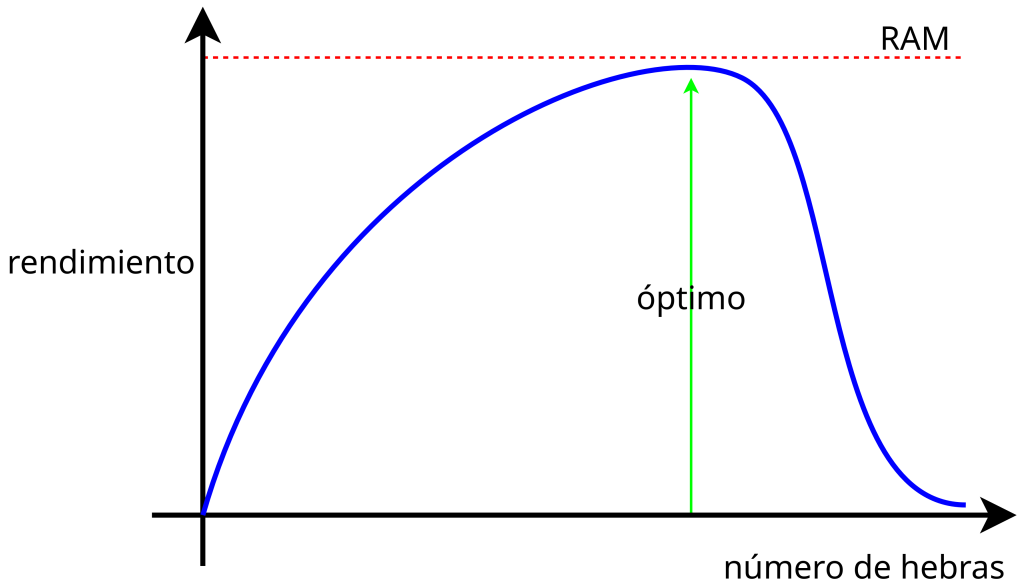
Modelo de 7 estados de Windows



- preparado = preparado + preparado diferido + en espera.
- los nuevos estados mejoran:
  - cambiar de hebra más fácil y rápidamente (escalable).
  - mejorar la gestión de afinidades y prioridades.

La necesidad del **intercambio** (“*swapping*”)

- En la mayoría de los SO las hebras residen **siempre** en memoria principal → no disponen del estado **suspendido**.
- Cuando demasiadas hebras son admitidas el rendimiento disminuye considerablemente debido al fenómeno conocido como **hiperpaginación** (“*thrashing*”).
- La hiperpaginación se produce cuando la sobrecarga de E/S del intercambio prima sobre el trabajo útil.



Implementación del estado una hebra

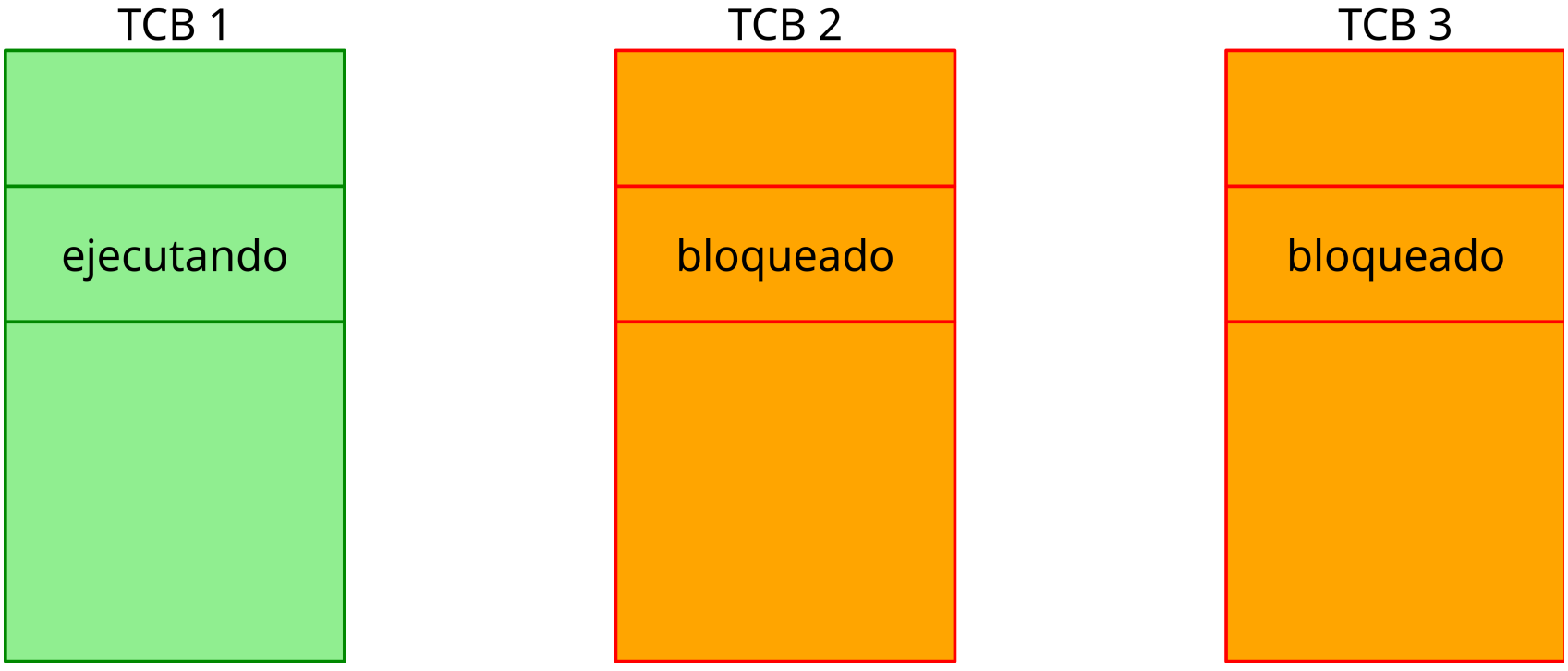
Método de implementación:

- **Explícito**: nuevo atributo en el TCB.
- **Implícito**: enlazando los TCB.
  - vector
  - lista simple o doblemente enlazada
  - árbol

En algunos sistemas se usan ambos... ¿Por qué?

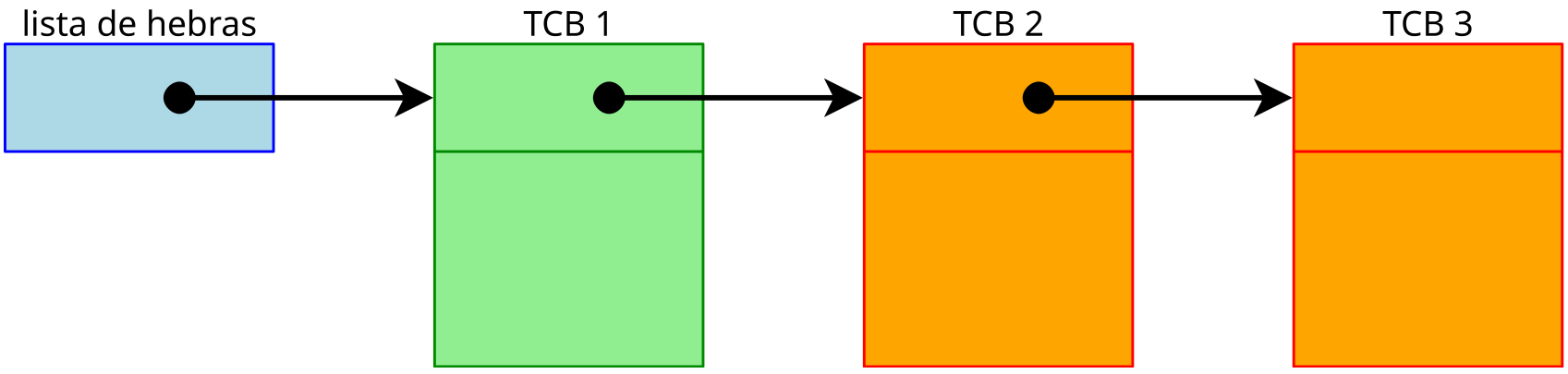
- por redundancia: mejora la robustez del sistema.
- por eficacia: transiciones perezosas, reducción de la sobrecarga.

Estado como atributo en el TCB



Hebra siguiente = búsqueda lineal $\Longrightarrow$ eficiencia: O(n).

Estado como estructura de datos



Hebra siguiente = primera hebra de la lista de preparadas $\Longrightarrow$ eficiencia: O(1).

Análisis (1)

Implementación:

- 1001 hebras, todas ellas en una única lista.
- **Sin atributo** "estado de hebra"*dentrodelTCB*.**Sin estructura de datos***especficaparahebrasejecutables*.

- Sólo la hebra actual es ejecutable, las demás esperan algún evento.

Sobrecarga de planificación justa:

- supongamos un coste de cambio de hebra de $1\mu s$.

Resultado:

Realizamos 1000 cambios de hebra en vano hasta que la única hebra ejecutable es planificada de nuevo para su ejecución.

$$\mathbf{sobrecarga = 1ms = 1000\mu s = 1000000ns}$$

Análisis (2)

Implementación:

- 1001 hebras, todas ellas en una única lista.
- **Atributo** "estado de hebra"$_{dentro del TCB}$. **Sin estructura de datos**$_{específica para hebras ejecutables}$.
- Sólo la hebra actual es ejecutable, las demás esperan algún evento.

Sobrecarga de planificación justa:

- el coste del cambio de hebra es $1\mu s$
- el coste de comparar 2 entradas de la lista es $0.1\mu s$

Resultado:

Realizamos 1000 comparaciones hasta dar con la única hebra ejecutable

$$\textbf{sobrecarga} = 0{,}1\textbf{ms} = 101\mu\textbf{s} = 101000\textbf{ns}$$

Análisis (3)

Implementación:

- 1001 hebras repartidas en varias listas según su estado
- **listas** específicas para hebras ejecutables y no ejecutables
- Sólo la hebra actual es ejecutable, las demás esperan por eventos

Sobrecarga de planificación justa:

- el coste del cambio de hebra es $1\mu s$.
- el coste de comparar 2 entradas de la lista es $0.1\mu s$.

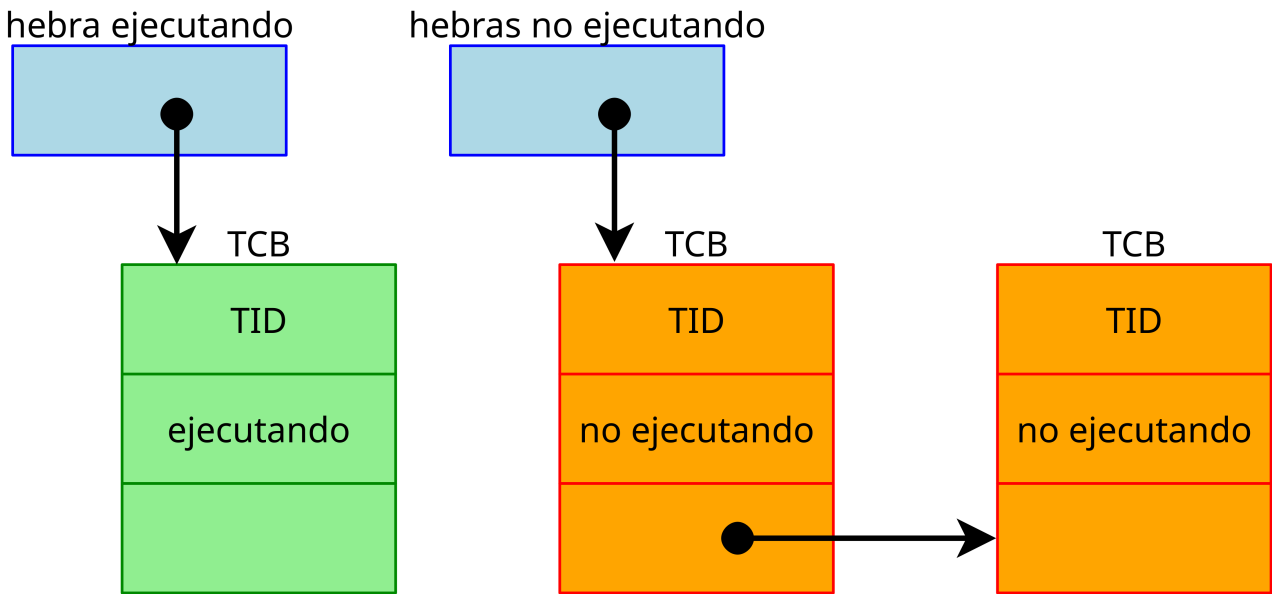
Resultado:

1 búsqueda en la cabeza de la lista nos indica que no hay otra hebra preparada $\Longrightarrow$ no realizamos ningún cambio de hebra

$$\mathbf{sobrecarga = 0.0001ms = 0.1\mu s = 100ns}$$

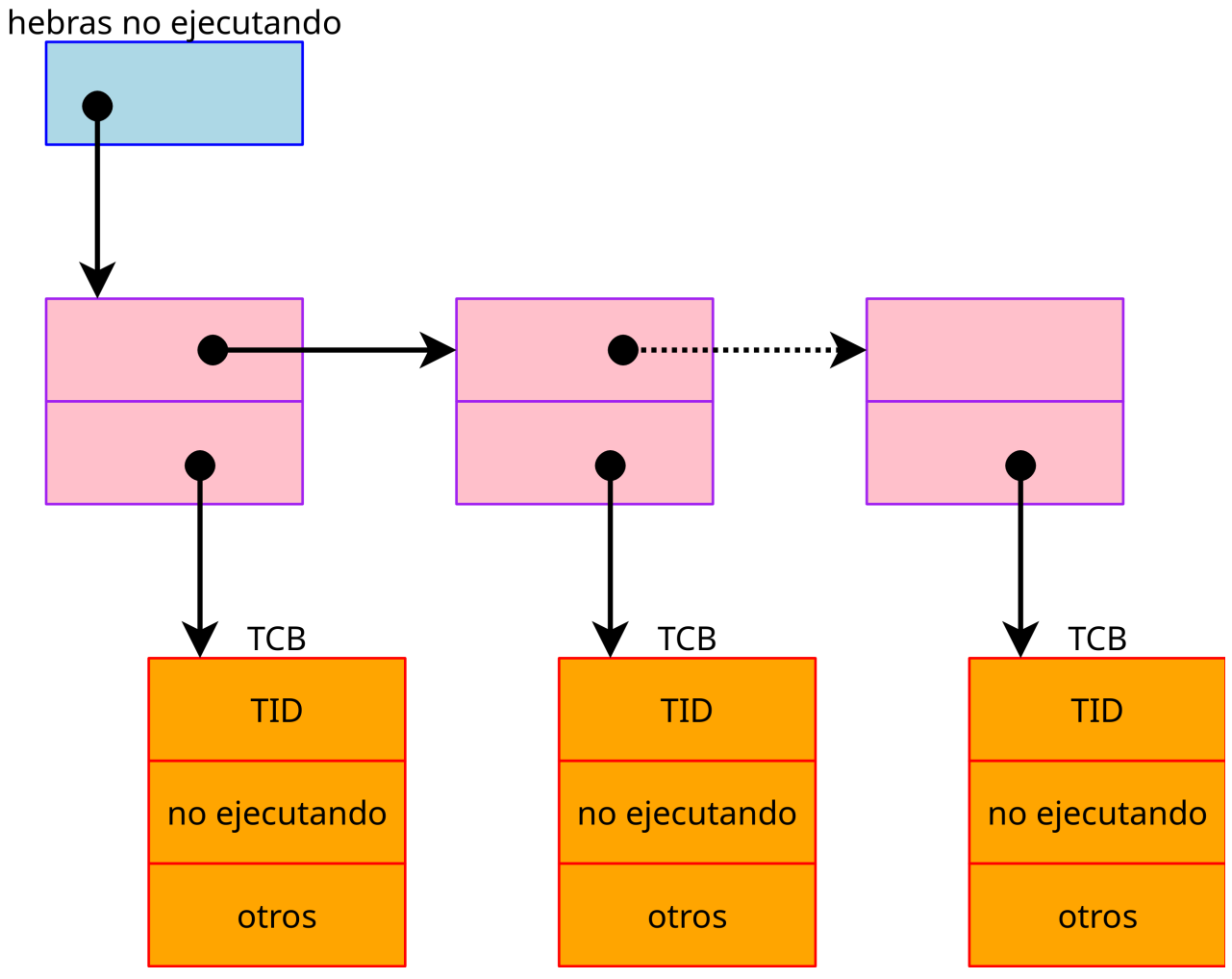
Punteros **dentro** del TCB

- Para el modelo de 2 estados son necesarias:
  - 2 estructuras de datos ⟶ una lista enlazada no suele ser una buena elección.
  - 2 apuntadores a dichas estructuras de datos.
- Estado ejecutando: un apuntador por procesador.
- Estado no ejecutando: una única cola global/por procesador.



Punteros **fuera** del TCB

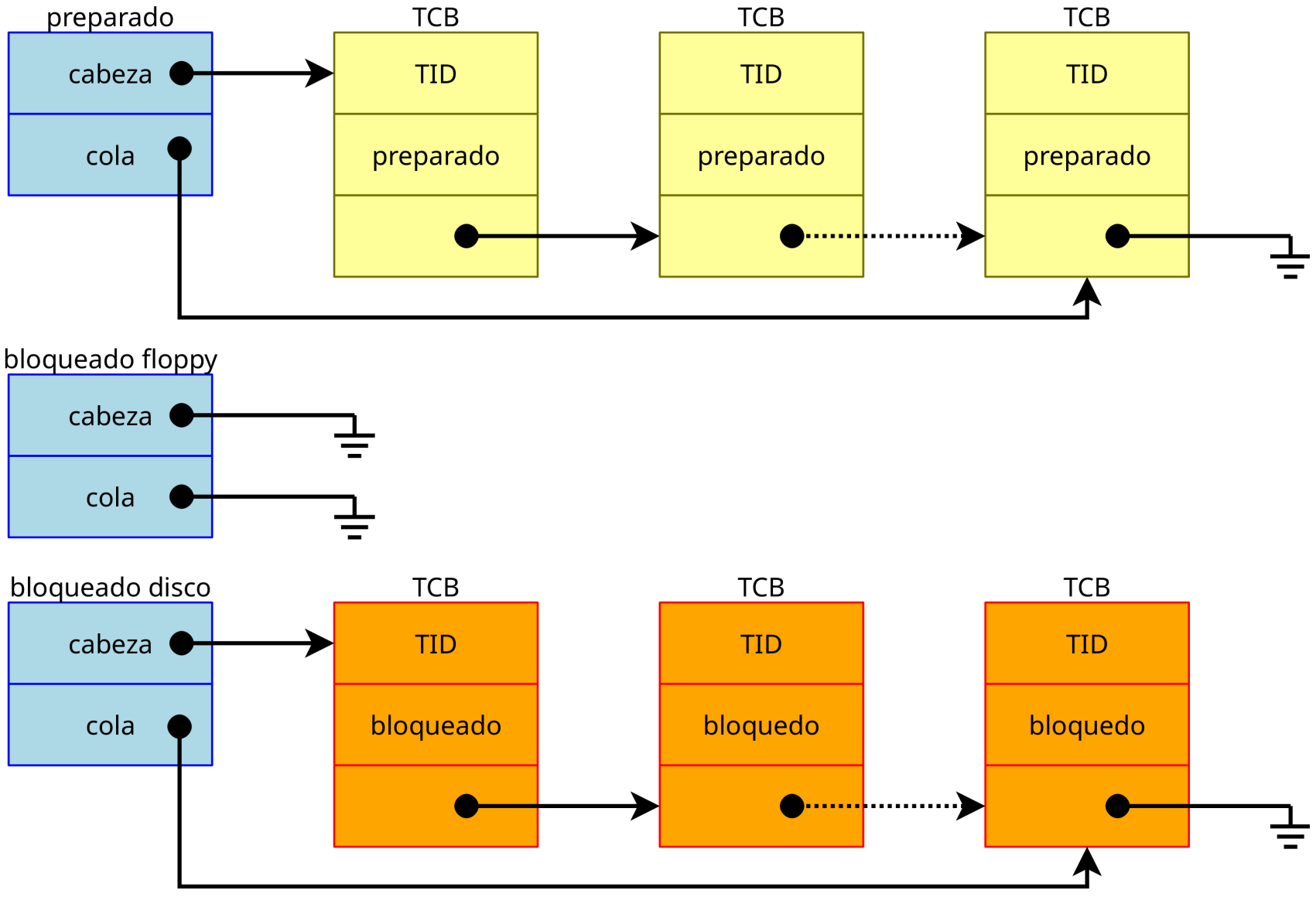
¿De qué quieres llenar tu caché?



En resumen...

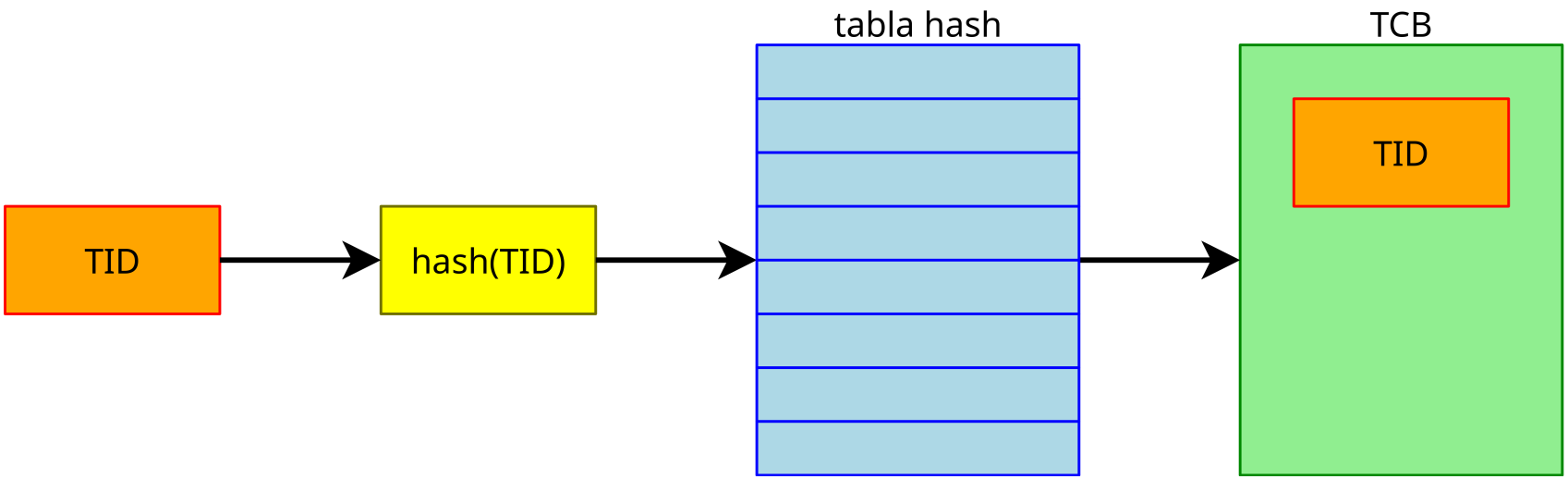
- No escoger estructuras de datos adecuadas para operaciones muy frecuentes $\longrightarrow$ pobre rendimiento.
- Lo bueno para un pequeño número de hebras puede ser un desastre para un grán número debido a la falta de escalabilidad.
  - ejemplo: algoritmos de búsqueda.
- Si insertar/borrar en cualquier posición de las listas es necesario, una lista enlazada será una mala elección.
  - ejemplo: planificación mediante prioridades.
- Un buen diseñador de sistemas considerará no sólo los requisitos actuales sino también los futuros.

Implementación realista



Del TID al TCB

- Algunas llamadas al sistema necesitan el TID como parámetro.
- ¿Cómo encontramos el TCB de una hebra a partir de su TID?
  - `TID = &TCB` ⟶ es única / no reciclable



Relación entre estados de procesos y hebras tipo **núcleo**

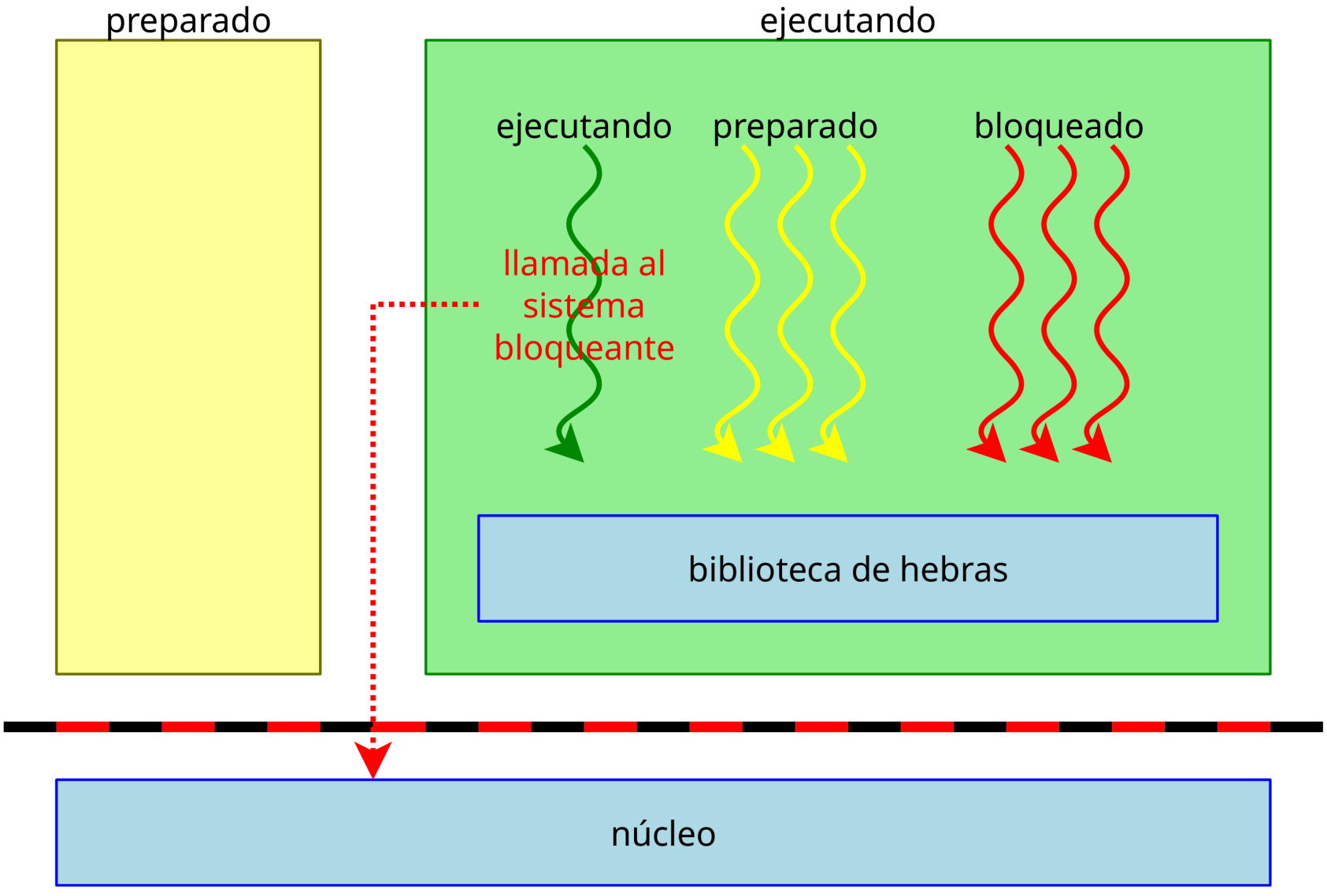
- Supongamos que un proceso tiene **t** hebras de las que **t-1** están bloqueadas y sólo **1** está preparada o ejecutándose.
- ¿En que estado está el proceso: ejecutándose, preparado o bloqueado?
- Establezcamos la siguiente relación en base al procesador:

  ejecutando ≥ **preparado** ≥ **bloqueado**
- Mientras una **hebra** esté **ejecutándose** el **proceso** permanecerá en el estado **ejecutando** independientemente de cuántas hebras posea en otros estados.
- Un proceso está preparado si al menos una de sus hebras está preparada.
- Un proceso está bloqueado si, y sólo si, todas sus hebras están bloqueadas.

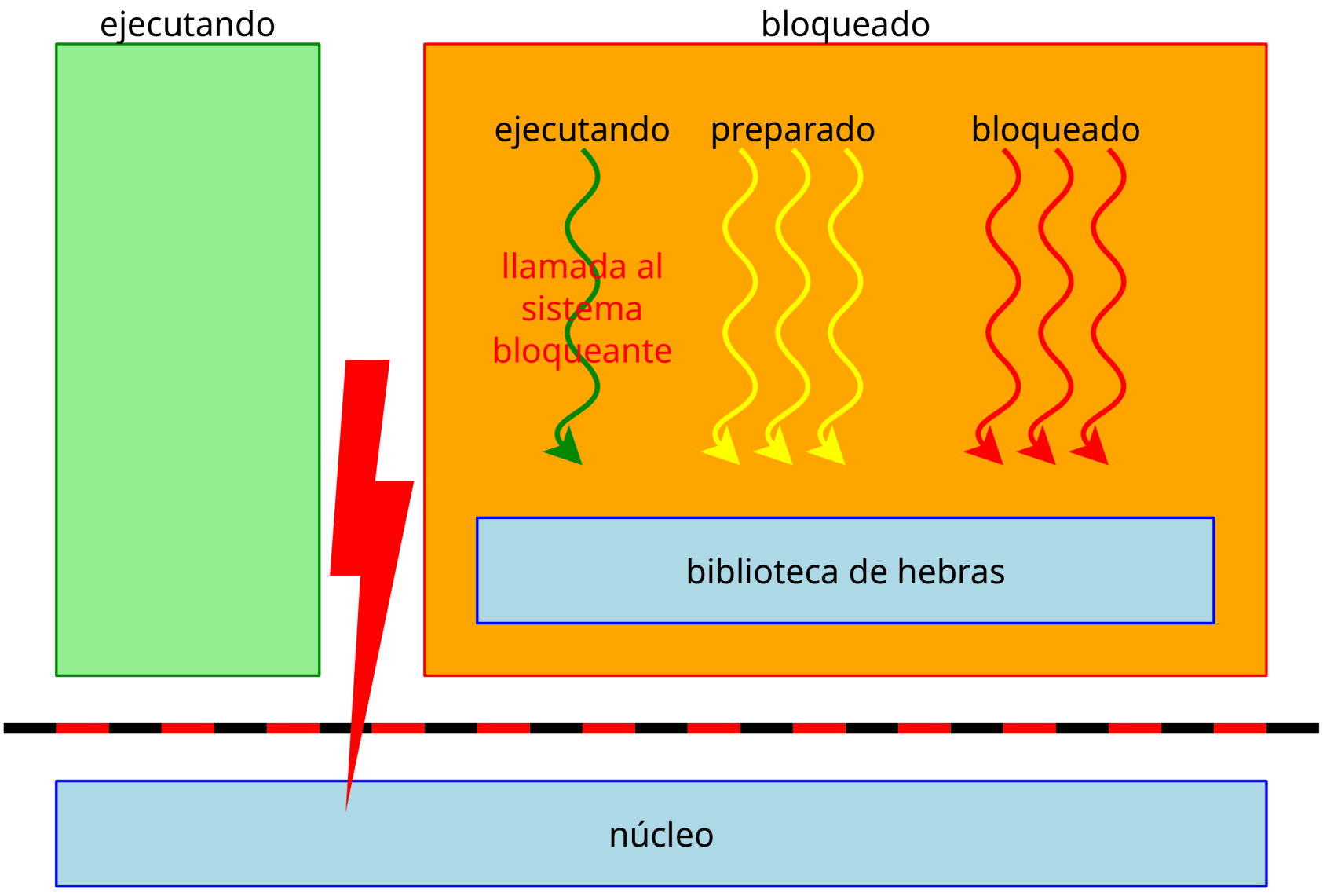
Procesos y hebras tipo **usuario**

- Aunque el núcleo no es consciente de la existencia de las hebras de usuario es responsable de gestionar la actividad de su proceso anfitrión.
- Ejemplo: cuando una hebra de usuario realiza una llamada al sistema bloqueante el proceso que la contiene debe bloquearse dentro del núcleo.
- Desde el punto de vista de la biblioteca de hebras, la hebra llamadora sigue en estado ejecutando, al menos virtualmente a nivel de usuario.
- Conclusión: el **estado** de una hebra tipo **usuario** es **independiente** del estado de su **proceso** anfitrión.

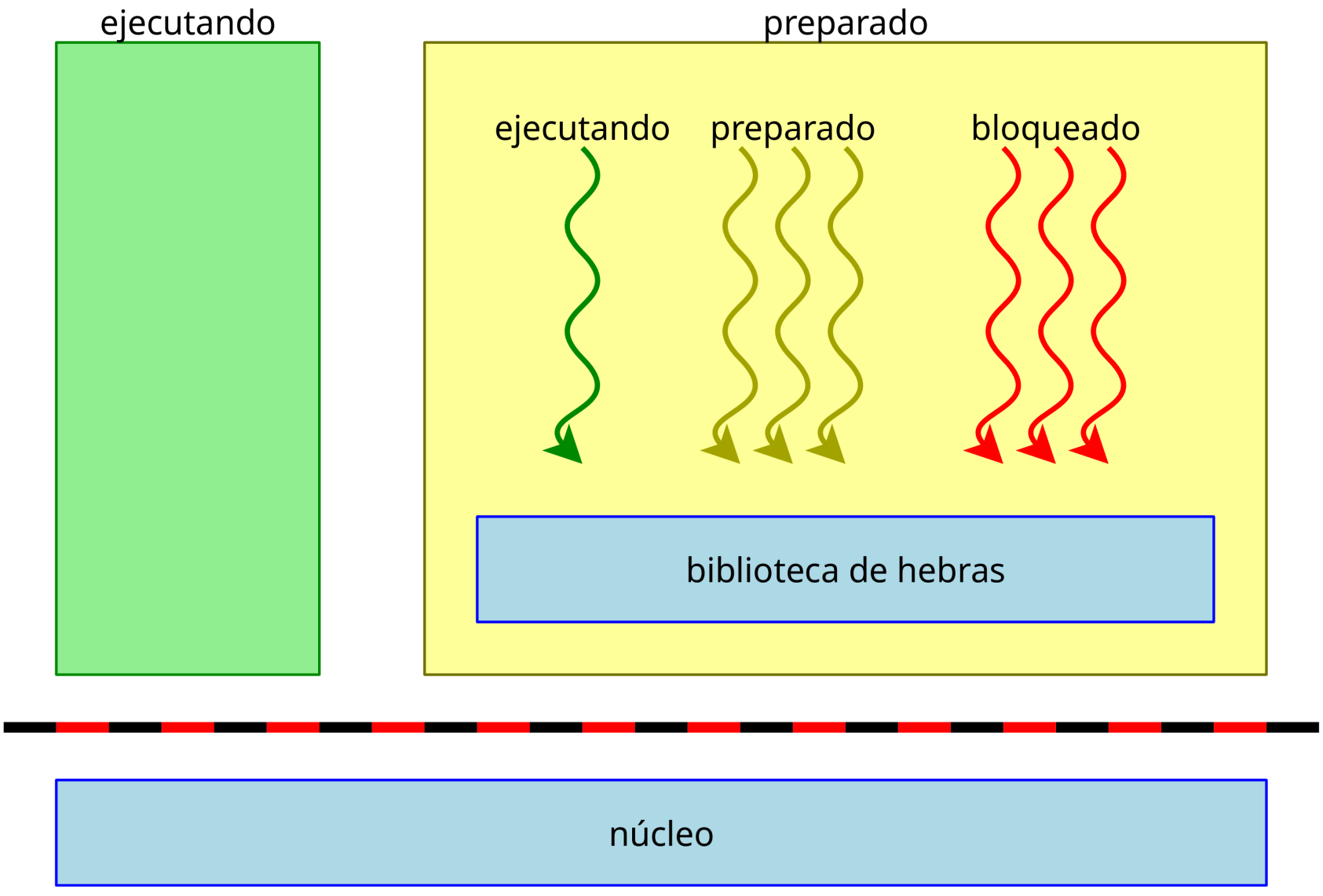
Independencia entre estados de hebras y procesos (1)



Independencia entre estados de hebras y procesos (2)



Independencia entre estados de hebras y procesos (3)



¿Cómo se bloquea una hebra de usuario?

- Hay funciones de la biblioteca de hebras que permiten bloquear y desbloquear una hebra:
  - C: temporal: `pthread_yield()`, definitiva: `pthread_join()`.
  - C++: temporal: `yield()`, definitiva: `join()`.
  - Java: temporal: `notify()`, definitiva `wait()`.
- La llamada a una de estas funciones bloquea sólo a la hebra llamadora y provoca la ejecución del planificador de la biblioteca para que seleccione otra hebra que ejecutar.
- ¿Qué hacer si no existe ninguna otra hebra preparada? $\Longrightarrow$ devolver el control al núcleo para que pueda ejecutar otro proceso con `sched_yield()`.

Expulsión de hebras tipo usuario

¿Cómo prevenir que una hebra tipo usuario acapare el procesador?

- Cooperación:
  - las hebras debe devolver el control periódicamente.
  - mecanismo ya estudiado: `yield()`.
- Apropiación/Expulsión (“*preemtion*”):
  - La biblioteca de hebras solicita una señal periódica al núcleo.
  - La señal permite escoger otra hebra para ejecutar.

- Ventajas:
  - El núcleo conoce que existen y puede gestionarlas eficazmente.
  - Puede asignar diferente prioridad a cada una.
  - Puede cambiar entre hebras de un mismo proceso.
- Inconvenientes:
  - Su gestión requiere de llamadas sistema.
  - Las operaciones serán más costosas.

¿Qué aproximación es mejor? hebras tipo usuario

- Ventajas:
  - Las operaciones son entre 10 y 100 veces más rápidas.
  - El estado de las hebras es muy pequeño: procesador y pila.

- Inconvenientes:
  - Cualquier evento en cualquier hebra bloquea el proceso completo.
  - No podemos utilizar varios procesadores de forma simultánea.
    - El núcleo sólo conoce un contexto de ejecución.
  - El núcleo no puede tomar buenas decisiones de planificación:
    - podría planificar un proceso con todas sus hebras bloqueadas u ociosas.
    - podría quitar el procesador a una hebra que posea un cerrojo.

Resumen

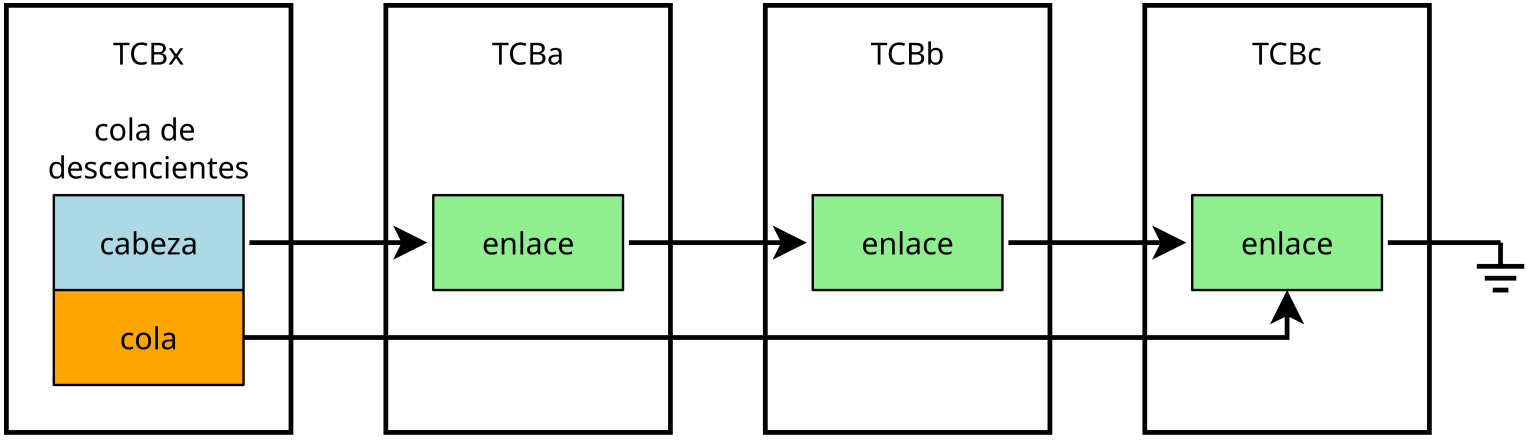
- Establecer **estados** si y sólo si estos son **útiles**.
- Los estados de las **hebras** y de los **procesos** son **diferentes**.
- Una **hebra tipo usuario** puede estar en estado **ejecutando** mientras el **proceso** que la contiene está **bloqueado**.
- Una **hebra tipo núcleo** puede estar **bloqueada** mientras otras hebras tipo núcleo del mismo **proceso** están **ejecutándose**.

Creación de hebras

- `thread()`, `pthread_create()` no es igual que la llamada `fork()` de UNIX.
  - `fork()` crea un nuevo proceso así que tendrá que crear un nuevo espacio de direcciones.
- Crear una hebra es como una **llamada a procedimiento asíncrona**.
  - ejecuta un procedimiento en otra hebra.
  - la hebra llamadora no debe esperar a que finalice.
  - si quiere esperar debe hacerlo de forma explícita: `join()`, `pthread_join()`.
- ¿Y si la hebra quiere finalizar?
  - `~thread()`, `pthread_exit()` y `exit()` hacen básicamente lo mismo.

Espera de la finalización de una hebra

- Una hebra puede esperar a que otra finalice mediante `join()`, `pthread_join()`.
  - La hebra cuya finalización se espera debe ser colocada en la lista de espera de la hebra que llama a `join()`.
- ¿Cuál es el sítio más lógico para colocar esta cola de espera?
  - El interior del TCB de la hebra que ejecutó `join()`.



- Muy parecido a la llamada al sistema `wait()` de UNIX.
  - Permite esperar la finalización de descendientes.

Comparación hebra/procedimiento

- Ejemplo: llamada a `b()` desde `a()`:

```
a() { b(); }
b() { trabajo útil; }
```

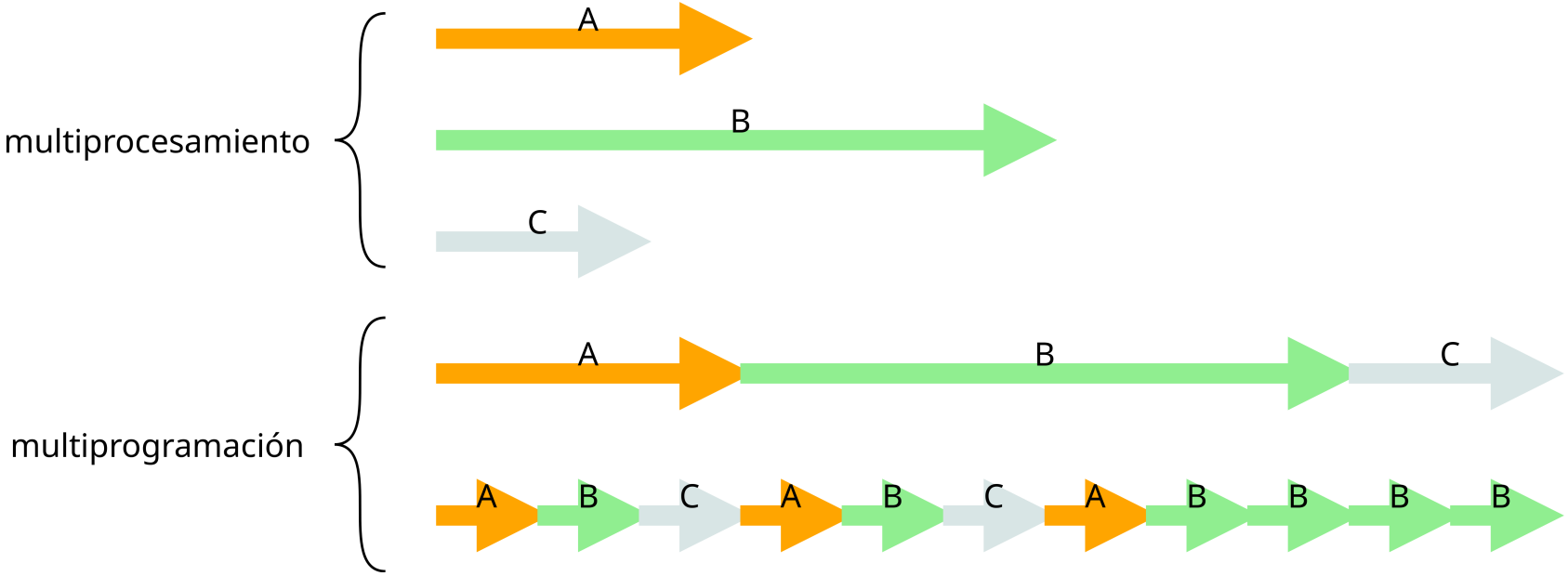
- Podemos transformar `a()` en `a2()` de las siguientes formas:

```
auto a2 = std::async(a);
std::thread a2([]{ a(); });
a2() { pthread_create(id, b); pthread_join(id); }
```

- ¿Por qué no hacer esto para cada procedimiento?
  - Por la sobrecarga del cambio de contexto → tiempo.
  - Por la sobrecarga del uso de memoria para pilas → espacio.
  - Por la sobrecarga para sincronización → comunicaciones.

Modelos de actividad

- Recordemos las definiciones de...
  - Multiprocesamiento: múltiples procesadores.
  - Multiprogramación: múltiples procesos.
  - Multihebra: múltiples hebras por proceso.
- ¿Qué significa ejecutar dos hebras concurrentemente?
  - Desconocemos el orden de planificación.



Hebras, concurrencia y corrección

- Los programas deben funcionar correctamente independientemente del orden de ejecución de las hebras:
  - ¿Sabrías comprobar esto?
- Las hebras **independientes**, al igual que los procesos,...
  - no comparten su estado con otras.
  - son **deterministas** → las entradas determinan las salidas.
  - son **reproducibles** → reproduciendo las condiciones iniciales obtendremos siempre los mismos resultados.
  - el orden de planificación no es importante.
- Las hebras **cooperativas**...
  - comparten su estado.
  - son **no-deterministas**.
  - son **no-reproducibles**.
- El no-determinismo y la no-reproducibilidad propiciarán la **aparición de errores** y **dificultarán su resolución**.

Las interacciones complican la depuración

- ¿Es todo proceso de verdad independiente?
  - Todo proceso comparte los recursos del sistema: ficheros, red...
  - Ejemplo: un controlador defectuoso puede hacer que una hebra A haga fallar a otra hebra independiente B.
- Probablemente no os habréis dado cuenta de lo mucho que dependemos de la reproducibilidad para encontrar fallos.
  - `x = y / rand(); // mejor con srand(0)`
- Los errores no deterministas son difíciles de encontrar.
  - mapa de memoria del núcleo y los programas de usuario.
    - depende de la planificación y la versión del SO.
  - E/S peculiar:
    - forma de teclear de como método de identificación.

¿Por qué permitir que las hebras cooperen?

- La gente coopera, así que es normal que los ordenadores lo hagan también.
  - El no-determinismo y la no-reproducibilidad de las personas es un problema notable.
- 1ª ventaja: **recursos compartidos**.
  - Un ordenador, muchos usuarios.
  - Una cuenta bancaria, muchos cajeros automáticos → ¿qué pasaría si los cajeros sólo se sincronizasen una vez al día?
- 2ª ventaja: **aumento de velocidad**.
  - Permite solapar E/S y cómputo.
  - Multiprocesadores: división del trabajo para su ejecución paralela.
- 3ª ventaja: **modularidad**.
  - Es más importante de lo que pueda pensarse.
  - Dividir una problema en partes más simples.

Ejemplo: servidor web

- Un servidor web atiende peticiones.
- Pseudocódigo de una versión **no cooperativa**:

```
while(true)
{
    conexión = aceptar_conexión();
    if (fork() == 0)
    {
        servir_página(conexión);
        exit(0);
    }
}
```

- ¿Qué ventajas y desventajas tiene esta técnica?

Ejemplo: servidor web multihebra

- pseudocódigo de una versión **cooperativa**:

```
while(true)
{
    conexión = aceptar_conexión();
    pthread_create(servir_página, conexión);
}
```

- Ventajas:
  - Compartir la caché de ficheros en memoria
  - Menor sobrecarga por petición dado la velocidad de creación.
- Inconvenientes:
  - Tolerancia a fallos en el servicio.
- ¿Tendría sentido utilizar hebras tipo usuario?
  - ¿Qué pasará cuando una hebra intente leer una página web desde el disco?
- ¿Cómo afecta un ataque de denegación de servicio?

Ejemplo: servidor web con un grupo de hebras (1)

- Problema de versiones anteriores: peticiones ilimitadas.
  - los sitios web muy famosos ven decaer su rendimiento.
- Solución: limitar el número de hebras.
- Nuevo problema: tamaño de la cola de peticiones.

```
maestra()
{
    for(int i = 0; i < N; ++i)
        pthread_create(trabajadora);

    while(true)
    {
        conexión = aceptar_conexión();
        cola.meter(conexión);
    }
}
```

```
trabajadora()
{
    while(true)
    {
        cola.sacar(conexión);
        servir_página(conexión);
    }
}
```

Ejemplo: servidor web con un grupo de hebras (2)

Ventajas:

- Crear muchas hebras consume mucho espacio y tiempo.
- Destruir hebras consume mucho tiempo.
- La lenta creación de nuevas hebras incrementa el tiempo de espera por petición.
- La lenta destrucción de hebras puede impedir el normal progreso de otros procesos por falta de recursos.