Introducción al multithreading con `pthreads`

Sergio Romano

Sistemas Operativos · DC · FCEyN · UBA

Primer cuatrimestre de 2016

Breve repaso

Procesos y threads

¿Qué es un proceso?

- Un programa en ejecución.
- Una *instancia* de cierto programa en ejecución.
- Algo elemental en un SO, necesario hasta para poder imprimir "`Hola, mundo`".

¿Qué es un *thread*?

- Un proceso "light".
- Un "mini-proceso" dentro de un proceso clásico.
- Algo opcional, que nunca nos hizo falta para poder imprimir "`Hola, mundo`".

Información asociada con un proceso

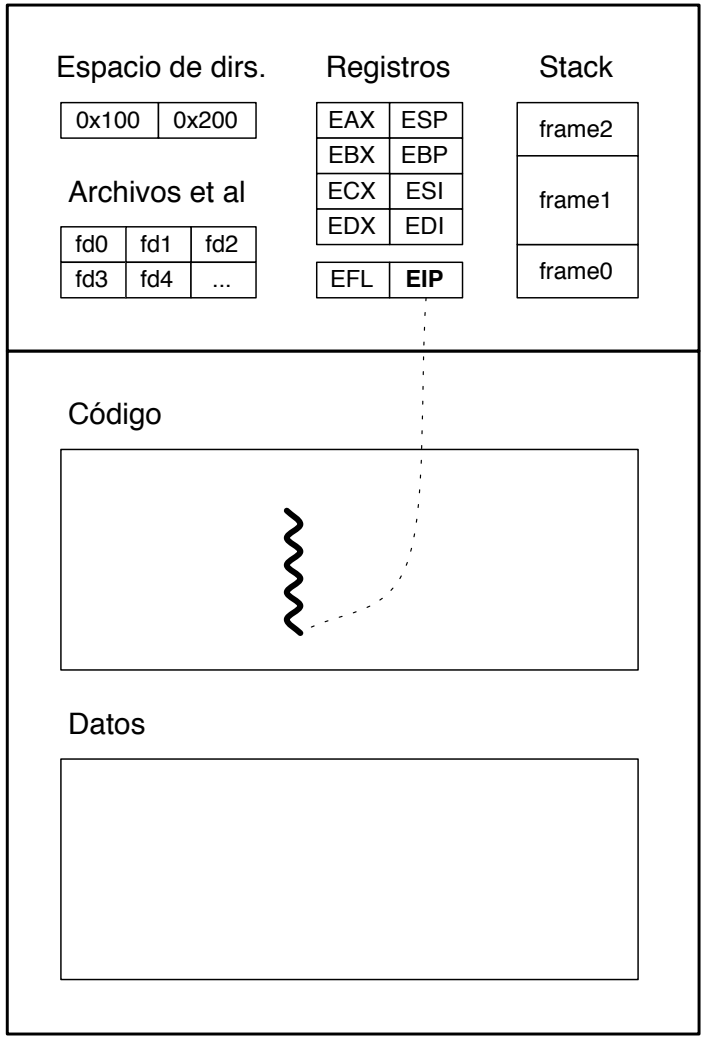
Sigamos repasando:

- PID y PPID.
- Prioridad (scheduling).
- Privilegios (seguridad).

- Espacio de memoria.
- Archivos y sockets abiertos.
- Dispositivos y otros recursos.

- Estado de los registros.
- Pila de llamados a función.

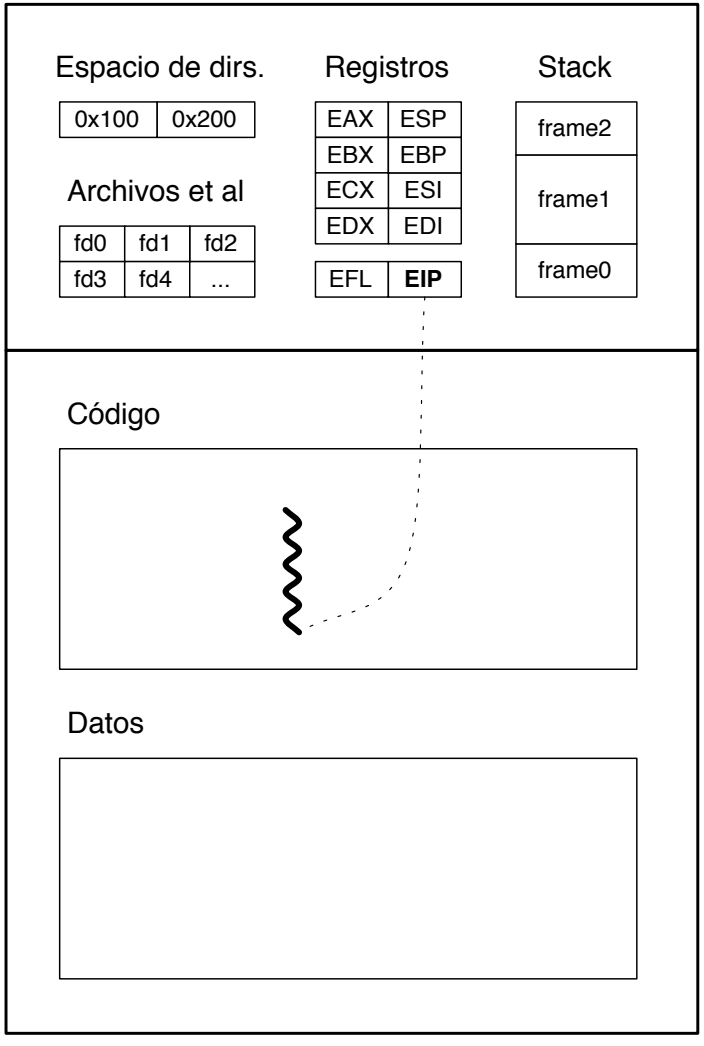
$\Rightarrow$ **Un único flujo de control.**

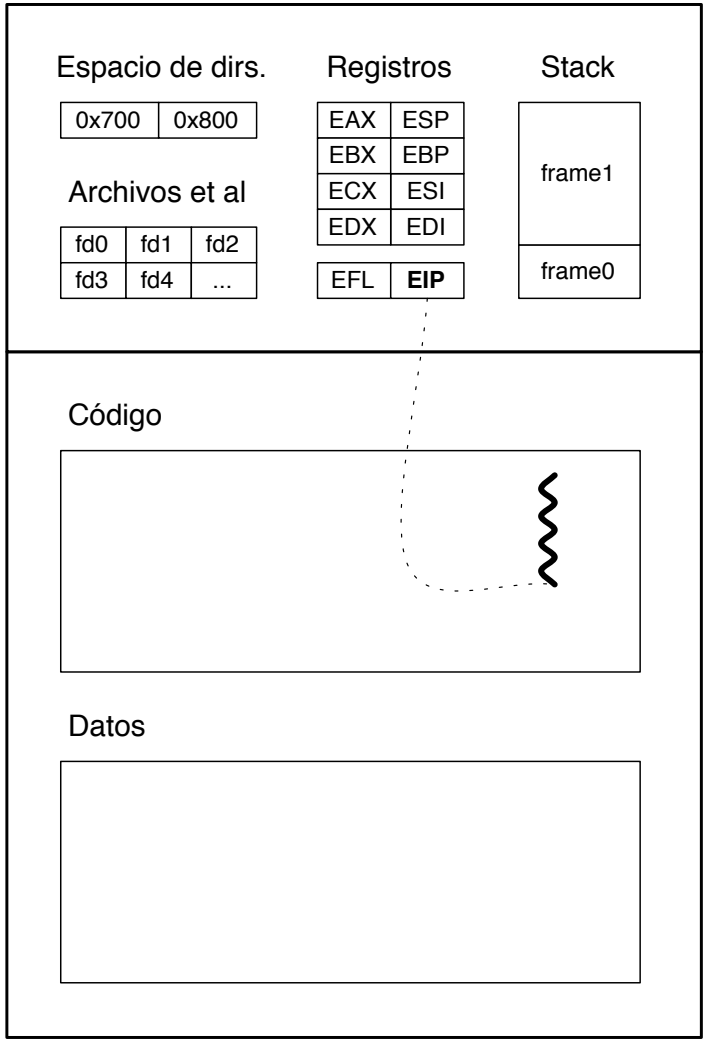


Pero a veces eso no alcanza...

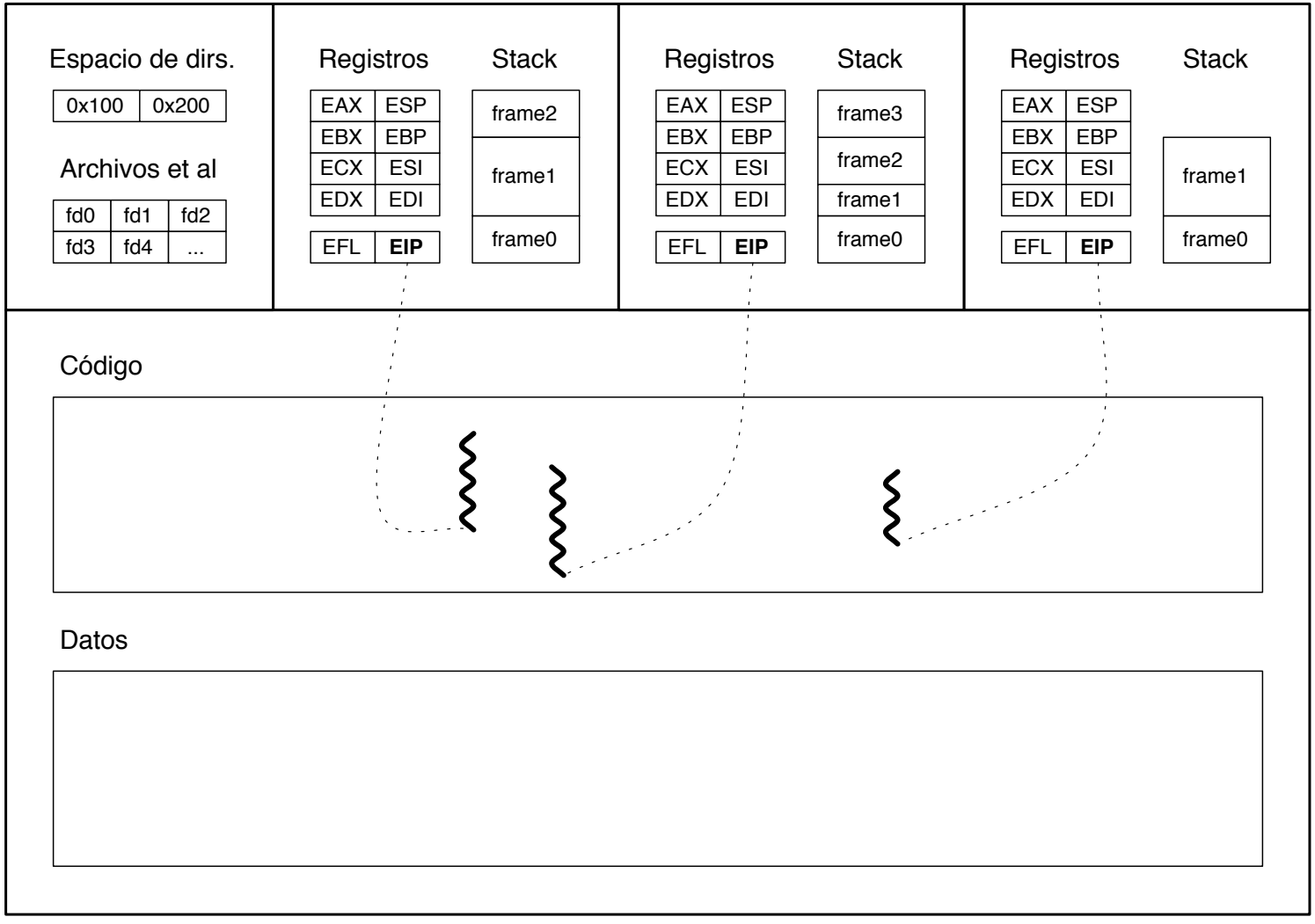
- "Un único flujo de control" implica que nuestro programa, en todo momento, está haciendo **tal** (y ninguna otra) cosa.
- ¿Y si queremos poder hacer dos o más cosas a la vez?
- Ya vimos una manera de lograrlo:
  - **Multitasking**: `fork()`ear uno o más procesos adicionales.
  - Usar algún mecanismo de IPC adecuado para coordinarlos.
- Ahora veremos otra alternativa:
  - **Multithreading**: lanzar uno o más threads adicionales.
  - Hace falta una biblioteca de threads (usaremos `pthreads`).

Concurrencia usando `fork()` (*N* procesos distintos con 1 "hilo" c/u)





Concurrencia usando threads (*N* hilos dentro de un mismo proceso)



¿Por qué querríamos usar concurrencia?

Algunos ejemplos de proyectos que podrían "necesitarla" o aprovecharla:

Servidores como `httpd`

que deben poder atender pedidos simultáneos de miles de clientes

Frameworks p/GUI como Swing

que permiten crear múltiples ventanas manejando actualizaciones y eventos

Clientes como `pidgin`

capaces de mantener varias conexiones simultáneas a distintos servidores

Programas como `make`

que aprovechan los multiprocesadores compilando varios archivos a la vez

Shells como `bash`

que permiten lanzar diversas tareas en background y monitorear su ejecución

Programas como Photoshop

capaces de aprovechar tales equipos incluso al procesar un único archivo

¿Por qué querríamos **evitar** la concurrencia?

"INSANITY consists of doing the same thing over and over again, hoping for a different result."

¿Einstein? ¿Franklin? ¿Brown? ¿Mabley? ¿Anonymous?

- El comportamiento de un programa solía ser función de la entrada.
- Procesos interactuando en paralelo $\Rightarrow$ adiós determinismo.
- Threads interactuando en paralelo $\Rightarrow$ adiós determinismo.
- La entrada, la carga del sistema, el scheduling, la humedad...
- En tu cara computadora cuántica

Delicias de la vida concurrente

- No-determinismo.
- Race conditions.
- Bugs esquivos.
- Deadlock y livelock.
- Inversión de prioridad.
- Inanición.

- Leer código y deducir "qué hace" se vuelve mucho más difícil.
- Reproducir un bug se vuelve un problema complejo *per se*.

Y si además la memoria es compartida, las cosas se complican . . .

Delicias de la vida concurrente *y promiscua*

Usar threads ofrece una gran ventaja:

todos comparten los mismos datos

Pero también tiene un grave problema:

todos comparten los mismos datos

- Cuando la ventaja suena atractiva, ojo con subestimar el problema.
  - Cada dato compartido multiplica los riesgos.
  - Sincronizar correctamente no es fácil.
  - Correcta y eficientemente, menos.
  - Bibliotecas: 1 var. global/estática $\Rightarrow$ *thread-unsafe*.
- Si nuestros threads son cuasi-independientes (ej.: `httpd`),
  el problema no es grave, pero la ventaja tampoco es significativa.
- A mayor nivel de interacción necesario entre nuestros threads,
  las ventajas aumentan. . . y los problemas también.

Sugerencias para evitar sudor y lágrimas

- Ahora más que nunca: programación defensivo-paranoica.
  - Teorema: todo lo que "no puede pasar" sí puede pasar.
  - Ante la menor duda, poner un `assert()`.
- Evitar variables compartidas innecesarias.
- Usar nombres precisos. La ambigüedad se paga caro.
- Si la concurrencia es bonus, lujo o capricho, prescindir de ella.
- Considerar bibliotecas que encapsulen parte de la complejidad.
- Hacer los deberes antes de meterse con interacciones entre dos mecanismos complejos: el todo es mucho más feo que sus partes.

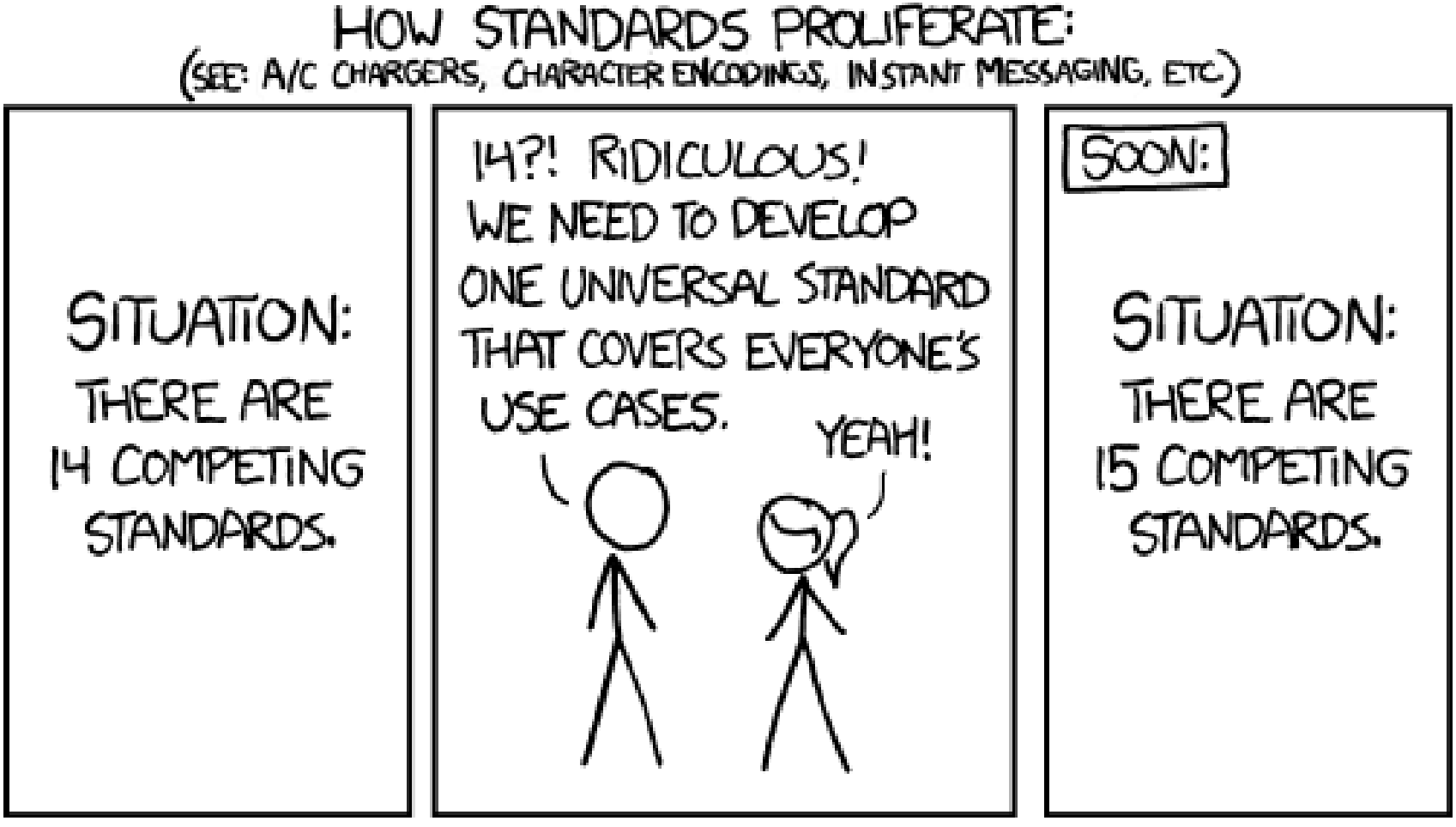
  Por ejemplo: threads y *signal handlers*, threads que hacen `fork()`, threads y message-passing, etc.

La única verdad es la realidad

Siglo XX: Cambalache en el mundo UNIX

2005	**PT**	Protothreads	Adam Dunkels
2006	**PM2 Marcel**	User-Level Threads	LaBRI/INRIA Futurs
2000	**ST**	SGI State Threads Library	Silicon Graphics
1984-2000	**CMU LWP**	CMU Lightweight Processes	Larry Raper et al
1999-2006	**Pth**	GNU Portable Threads	Ralf S. Engelschall
1998-2005	**NSPR**	Netscape Portable Runtime	Netscape Corporation
1997-1998	**pmp**	Patched MIT Pthreads	Humanfactor
1997-1999	**PTL**	Portable Thread Library	Kota Abe
1998-1999	**uthread**	FreeBSD User-Land Threads	John Birrell
1991-1997	**Cthreads**	A parallel programming library	Greg S. Eisenhauer
1996-1997	**OpenThreads**	Open Lightweight Threads	Matthew D. Haines
1996-1997	**RT++**	Higher Order Threads for C++	Wolfgang Schreiner
1996	**rsthreads**	Really Simple Threads	Robert S. Thau
1996	**bb_threads**	Bare-Bones Threads	Christopher Neufeld
1998	**jkthread**	Simple Kernel Threads for Linux	Jeff Koftinoff
1997	**NThreads**	Threads for Numerical Applications	Thomas Radke
1993	**RexThreads**	Light-weight Processes for Rex	Stephen Crane
	...	... y muchos más ...	...

¿Cómo solucionar el cambalache?



Siglo XXI: "Portability" se escribe con P de POSIX

- En 1995, la IEEE logró incorporar los threads al standard.

  Versión vigente: IEEE POSIX 1003.1c (2004).

- `pthreads` fue un paso crucial hacia la inter-compatibilidad.

  GNU/Linux, *BSD, OS X, AIX, IRIX, Solaris, Cygwin, Symbian ...

- `pthreads` es una **especificación**, no una implementación.

  Una API común. Semántica (casi) clara. Implementaciones (casi) intercambiables.

- En 2003, NPTL se afianzó como "la" implementación en Linux.

  Native POSIX Threads Library ("native" implica soporte a nivel del kernel).

$\Rightarrow$ El uso de threads se volvió aceptable en muchos más proyectos.

¿Cómo define "thread" el standard vigente?

De la sección *Base Definitions* de IEEE POSIX 1003.1c:

Thread (3.393) **A single flow of control within a process.**

Each thread has its own thread ID, scheduling priority and policy, errno value, thread-specific key/value bindings, and the required system resources to support a flow of control.

Anything whose address may be determined by a thread, including but not limited to static variables, storage obtained via `malloc()`, directly addressable storage obtained through implementation-defined functions, and automatic variables, are accessible to all threads in the same process.

Thread ID (3.394) Each thread in a process is uniquely identified during its lifetime by a value of type `pthread_t` called a thread ID.

La memoria colectiva

Resumen del modelo de memoria compartida de `pthreads`:

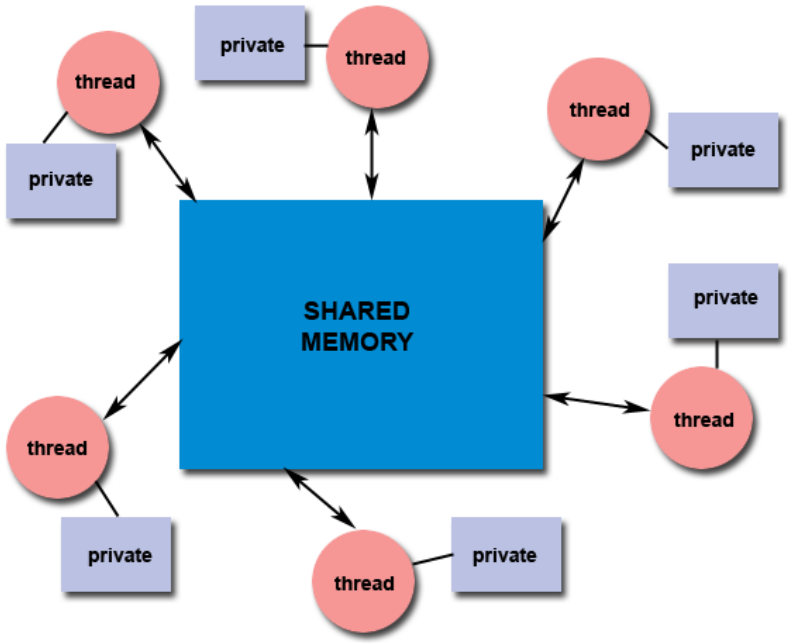
A priori, todo dato alcanzable por un thread es legalmente accesible.

Cualquier dato visible por dos threads se considera compartido.

El arbitraje de tales accesos es responsabilidad **del programador**.

La API de `pthreads` permite que cada thread mantenga sus datos privados en un diccionario.

Para más detalles buscar info sobre `TLS` (*thread-local storage*).



Introducción a la API

La API es grande pero el *core*-azón es chico

tipo de datos (tid)	`pthread_t`
crear thread	`pthread_create(thread, attr, startfn, arg)`
terminar thread	`pthread_exit(status)`
esperar exit	`pthread_join(thread, valptr)`
crear atributos	`pthread_attr_init(attr)`
destruir atributos	`pthread_attr_destroy(attr)`

Por concisión hemos omitido aquí las demás primitivas (unas 90) y abstraido bastante los tipos de los parámetros (casi todos son punteros-a-eso, etc). Para los detalles escabrosos de cada tipo y función, véase `man 3 pthread`.

Cómo pasar parámetros y usar atributos

crear atributos `pthread_attr_init(attr)`

crear nuevo thread `pthread_create(&thread, attrs, startfun, arg)`

attr Atributos. NULL ⇒ todos los attrs en valores por defecto.

startfun Puntero a una función que reciba 1 puntero a `void`.
No puede ser NULL. (¡Se necesita un punto de entrada!)

arg(s) Instancia de `void*` que recibirá `startfun(void* arg)`.
Puede ser NULL si `startfun()` no lo utiliza.

Para pasar estructuras más complejas . . .

1. definimos una `struct` con campos a gusto
2. al crear un thread, le pasamos un puntero-a-eso
3. el nuevo thread recibe ese puntero y . . . lo *castea* a lo macho.

Cómo compilar código que usa `pthreads`

Basta con agregar en el Makefile:

```
CFLAGS=-pthread
```

Es decir que los comandos pasarán a incluir el flag:

```
gcc -pthread -o test test.c
```

```
g++ -pthread -o test test.cpp
```

Eso agrega a los caminos de búsqueda de GCC:

- los `-I` necesarios para hallar los headers (y así poder compilar).
- los `-L` necesarios para hallar el código objeto (y así poder linkear).

Pasemos a los bifes. ¡Aloha honua!

Emoción casi maternal: ¡mi primer thread!

holamundo1.c

```
#include<pthread.h>
#include<stdio.h>

void *aloha_honua(void *vargp)
{
    printf("Aloha honua!\n");
    return NULL;
}

int main() {
    pthread_t tid;

    pthread_create(&tid, NULL, aloha_honua, NULL);
    pthread_join(tid, NULL);

    return 0;
}
```

Funciona, pero con un único thread, esto no resulta muy espectacular, ¿no?

Hilos de baba: ¡mi primer programa con *n* threads!

holamundo2.c

```
#include<pthread.h>
#include<stdio.h>

#define  CANT_THREADS  5

void *aloha_honua(void *p_minumero)
{
    int minumero = *((int *) p_minumero);
    printf("Aloha honua! Soy el thread nro. %d.\n", minumero);
    return NULL;
}

int main(int argc, char **argv)
{
    pthread_t thread[CANT_THREADS]; int tid;

    for (tid = 0; tid < CANT_THREADS; ++tid)
         pthread_create(&thread[tid], NULL, aloha_honua, &tid);

    for (tid = 0; tid < CANT_THREADS; ++tid)
         pthread_join(thread[tid], NULL);

    return 0;
}
```

Pánico y desilusión: ¡mi primera race condition!

- ¿Era tan complicado imprimir `hola mundo` cinco veces?
- ¿El no-determinismo nos pasó el trapo tan velozmente?
- ¿Dónde está el problema?
- ¿Cómo lo reparamos?

Nociones básicas de sincronización

API básica para exclusión mutua

tipo de datos	`pthread_mutex_t`
crear mutex	`pthread_mutex_init(mutex, attr)`
destruir mutex	`pthread_mutex_destroy(mutex)`
espera bloqueante	`pthread_mutex_lock(mutex)`
intento no bloqueante	`pthread_mutex_trylock(mutex)`
liberación (signal)	`pthread_mutex_unlock(mutex)`

Acá no hay nada demasiado sorprendente.

API básica para variables de condición

tipo de datos	`pthread_cond_t`
crear VC	`pthread_cond_init(cond, attr)`
destruir VC	`pthread_cond_destroy(cond)`
wait	`pthread_cond_wait(cond, mutex)`
signal	`pthread_cond_signal(cond)`
broadcast	`pthread_cond_broadcast(cond)`

Acá sí hay unas cuántas sorpresas. ¡Leer la documentación!

¿Para qué nacieron las variables de condición?

El problema

```
//THREAD A
listo = false
while (!listo) {
  pthread_mutex_lock(&mi_mutex);
    if ( contador >= MAXIMO)
      listo = true;
  pthread_mutex_unlock(&mi_mutex);
}


//THREAD B
while(true){
  producir();

  pthread_mutex_lock(&mi_mutex);
    contador += 1;
  pthread_mutex_unlock(&mi_mutex);
}
```

La solución?

```
//THREAD A
listo = false
while (!listo) {
  pthread_mutex_lock(&mi_mutex);
    if ( contador <= MAXIMO){
      pthread_mutex_unlock(&mi_mutex);
      pthread_mutex_lock(&otro_mutex);
      pthread_mutex_lock(&otro_mutex);
    }
  listo =  true;
  pthread_mutex_unlock(&mi_mutex);
}


//THREAD B
while(true){
  producir();

  pthread_mutex_lock(&mi_mutex);
    contador += 1;
    if(contador >= MAXIMO)
      pthread_mutex_unlock(&otro_mutex);
  pthread_mutex_unlock(&mi_mutex);
}
```

La verdadera solución: variables de condición

La solución

```
//Variable de condición es un tipo de datos
pthread_cond_t cv;
ret = pthread_cond_init(&cv, NULL);

//THREAD A
pthread_mutex_lock(&mi_mutex);
if (contador <= MAXIMO)
  pthread_cond_wait(&cv, &mi_mutex);
pthread_mutex_unlock(&mi_mutex);

//THREAD B
while(true){
  producir();

  pthread_mutex_lock(&mi_mutex);
    contador += 1;
    if(contador >= MAXIMO)
      pthread_cond_signal(&cv);
  pthread_mutex_unlock(&mi_mutex);
}
```

En realidad, esto tampoco anda (pero creanló por ahora)

¿Qué es una variable de condición?

1. Un mecanismo que permite "esperar" hasta que se "cumpla" una condición.
2. Un tipo de datos que se parece a un semáforo pero *NO* es un semáforo.
3. Un tipo de datos que siempre va de la mano con un mutex, pero *NO* es un mutex.
4. Algo que siempre va de la mano con un predicado, pero *NO* es un predicado.

Variables de condición

- Una VC siempre se usa en conjunto con un mutex.
- Cuando un thread **–que debe tener el mutex ya tomado–** llama a `wait()`, suelta el mutex y entra en espera bloqueante.
- Cuando un thread llama a `signal()`, *otro* thread en espera, de haberlo, se despierta de *su* `wait()` **con el mutex ya adquirido**.
- Si no hay ningún thread esperando en esa VC, tanto `signal()` como `broadcast()` **se ignoran**: no tienen efecto ni se acumulan.

Despertares espúrios y/o programadores dormidos

Pitfall #1: las variables de condición no son semáforos.

Pensarlo hasta entenderlo. ¿Cuál es la diferencia fundamental?

Pitfall #2: el standard nos aclara que . . .

`Spurious wakeups` from `pthread_cond_wait()` [. . .] may occur.

- Los errores por hábito "semaforil" son muy frecuentes.
- Los despertares espúrios son raros pero no imposibles.
- Podemos cubrirnos matando ambos pájaros de un tiro.

Cómo evitar problemas frecuentes

- Se llaman vars. "de condición" porque siempre van asociadas con una.
- Toda VC define un predicado (eso que estamos esperando que suceda).

⇒ Retornar de un `wait()` **no implica** que el predicado valga `true`.

⇒ El predicado debe ser **reevaluado** tras cada retorno.

Cualca

```
pthread_mutex_lock(&m)
pthread_cond_wait(&vc, &m)
hacer_algo(...);
pthread_mutex_unlock(&m)
```

Inseguro

```
pthread_mutex_lock(&m)
if(!condicion)
  pthread_cond_wait(&vc, &m)
hacer_algo(...);
pthread_mutex_unlock(&m)
```

Correcto

```
pthread_mutex_lock(&m)
while(!condicion)
  pthread_cond_wait(&vc, &m)
hacer_algo(...);
pthread_mutex_unlock(&m)
```

Referencias

- Tutorial del LLNL (muy recomendable).
  `https://computing.llnl.gov/tutorials/pthreads/`
- David R. Butehof, *Programming with POSIX threads.*
  Addison-Wesley Professional Computing series
- IEEE Online Standards: POSIX.
  `http://standards.ieee.org/catalog/olis/arch_posix.html`
  `http://www.unix.org/version3/ieee_std.html`
- Edward A. Lee., *The Problem with Threads.*
  Technical report, EECS Dept., University of California, Berkeley
  `http://www.eecs.berkeley.edu/Pubs/TechRpts/2006/EECS-2006-1.pdf`

Eso es todo por hoy. ¿Preguntas. . . ?