

Seminario 1: Programación multihebra y semáforos

1. Concepto e implementación de hebras
2. Hebras en C++11
3. Sincronización básica en C++11
4. Introducción a los semáforos
5. Semáforos en C++11



1. Concepto e Implementaciones de Hebras

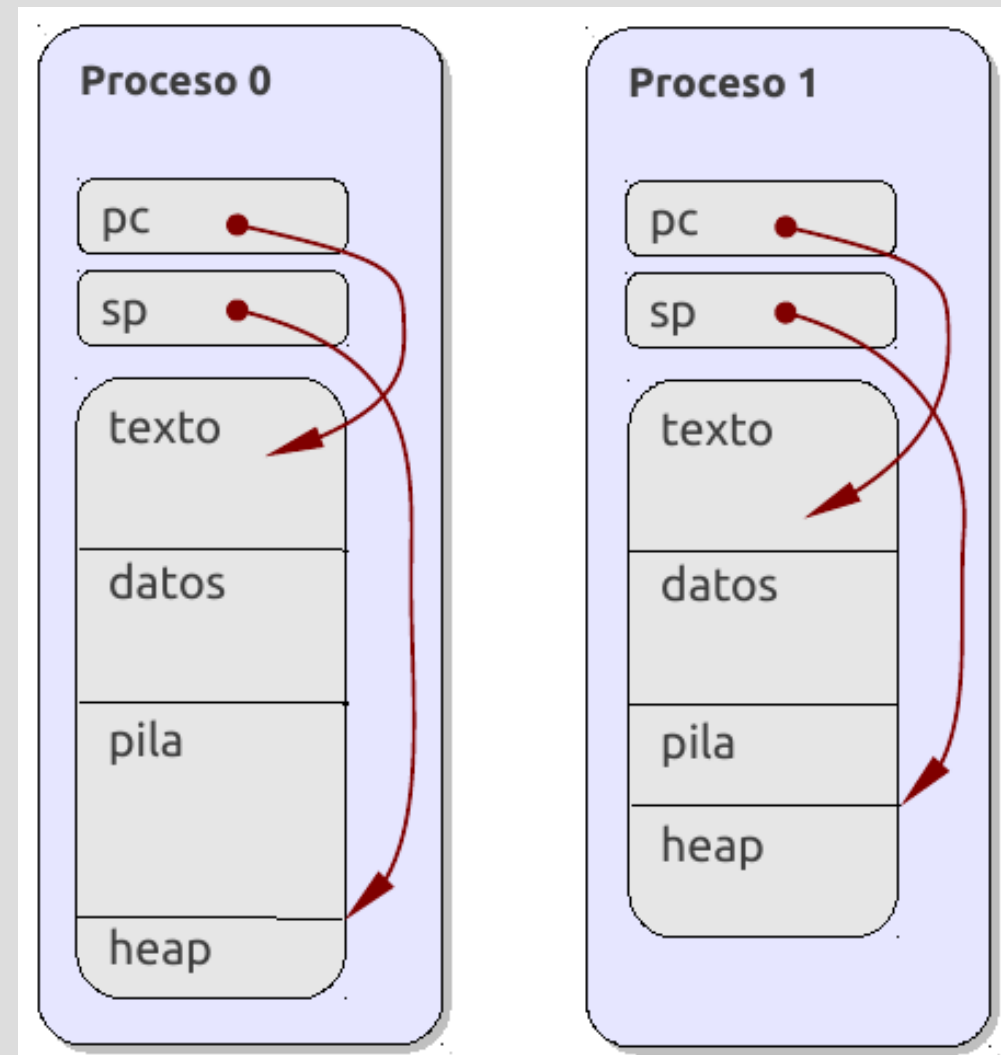
Procesos: Estructura

Zonas de memoria en un proceso:

- **Texto** (tamaño fijo): Instrucciones programa.
- **Datos** (tamaño fijo): variables globales.
- **Pila** (tamaño cambiante): variables locales.
- **Heap** (mem. dinámica): variables dinámicas.

Datos asociados:

- **Contador de Programa (pc):** dirección mem. (en texto) de la siguiente instrucción a ejecutar.
- **Puntero de pila (sp):** dirección última posición ocupada por pila.



1. Concepto e Implementaciones de Hebras

Ejemplo de proceso en ejecución

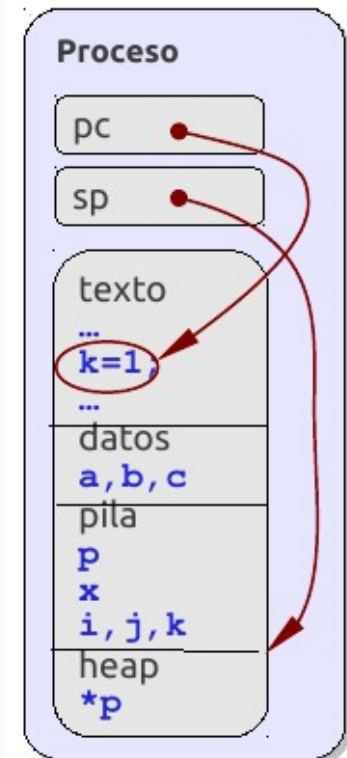
Estado de un proceso al ejecutar $k=1$

```
int a,b,c ; // variables globales

void subprograma1()
{
    int i,j,k ; // vars. locales (1)
    k = 1 ;
}

void subprograma2()
{
    float x ; // vars. locales (2)
    subprograma1() ;
}

int main()
{
    char * p = new char ; // "p" local
    *p = |a| ; // "*p" en el heap
    subprograma2() ;
}
```



1. Concepto e Implementaciones de Hebras

Motivación del uso de hebras

Gestión de varios procesos cooperantes es muy útil pero **consume mucho** tiempo y memoria del SO: reparto CPU, datos y comunicaciones entre procesos.

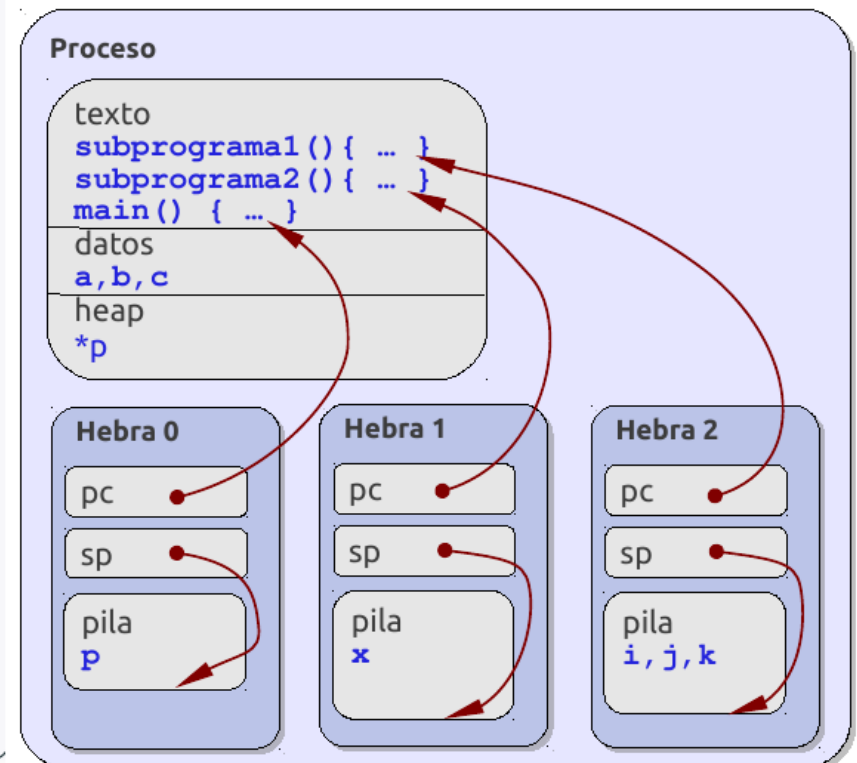
Uso de hebras permite mejorar eficiencia:

- **1 proceso** puede contener 1 o **varias hebras**.
- **Hebra: flujo de control** en texto del proceso.
- Cada hebra tiene su **propia pila** (vacía al inicio)
- **Hebras del mismo proceso comparten texto + datos + heap.**

```
int a,b,c ;

void subprograma1()
{
    int i,j,k ;
    // ...
}
void subprograma2()
{
    float x ;
    // ...
}

int main()
{
    char * p = new char ;
    // crear hebra (subprog.1)
    // crear hebra (subprog.2)
    // ...
}
```



1. Concepto e Implementaciones de Hebras

Inicio y finalización de hebras

Inicio ejecución programa, existe una **única hebra** (ejecutaría main en C/C++).

Una **hebra A en ejecución puede crear otra hebra B** en el mismo proceso de A:

- **designando una función del texto** (y opcionalmente sus parámetros)
- después continúa su ejecución.

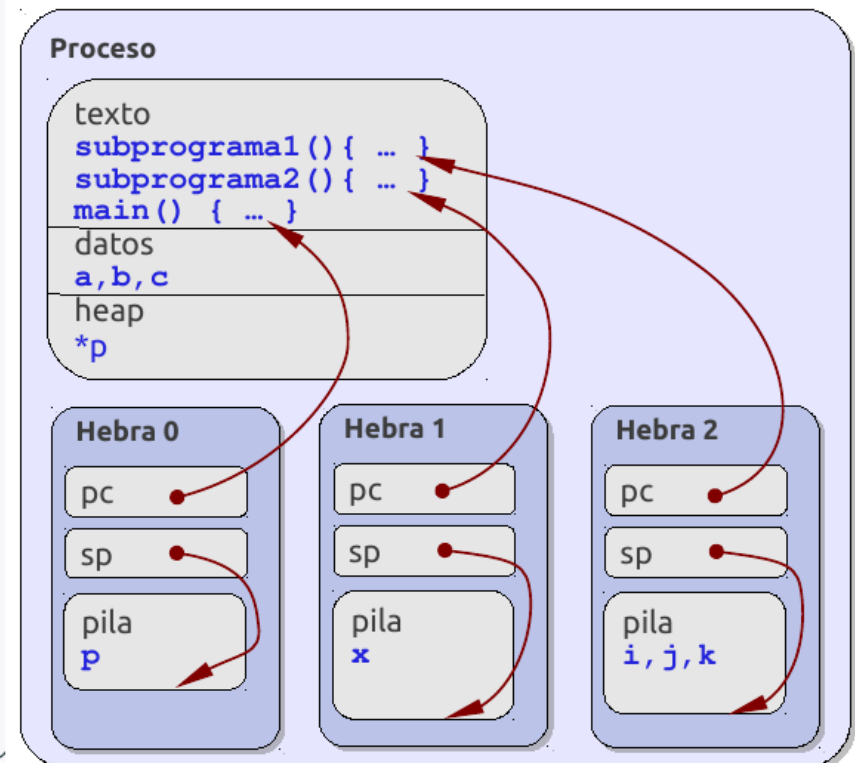
- **Hebra B:** ejecuta f concurrentemente con resto de hebras.
- **Termina** normalmente cuando finaliza ejecución de f.
- Una hebra podría **esperar** a que finalice otra.

```
int a,b,c ;

void subprograma1()
{
    int i,j,k ;
    // ...
}

void subprograma2()
{
    float x ;
    // ...
}

int main()
{
    char * p = new char ;
    // crear hebra (subprog.1)
    // crear hebra (subprog.2)
    // ...
}
```



2. Hebras en C++11

2.1. Introducción

2.2. Creación y finalización

2.3. Sincronización mediante unión

2.4. Paso de parámetros y obtención de resultado

2.5. Vectores de hebras y futuros

2.6. Medición de tiempos

2.7. Ejemplo: cálculo numérico de integrales

2. Hebras en C++11

Introducción

Seguiremos el estándar C++11:

- C++11: versión del lenguaje de programación C++ publicada por ISO en Septiembre de 2011. <https://www.iso.org/standard/50372.html>
- Incluye funcionalidad para gestión de hebras: tipos de datos, clases y funciones.
- Los fuentes C++ que usan este estándar son portables a Linux, macOS y Windows.

Funcionalidad que veremos:

- Crear nueva hebra concurrente, y esperar su finalización.
- Declaración de variables de tipos atómicos.
- Sincronización de hebras para exclusión mutua o sobre condiciones.
- Bloqueo de una hebra durante intervalo de tiempo, o hasta instante de tiempo.
- Generación de números aleatorios.
- Medición tiempos reales y de proceso, con alta precisión.

2. Hebras en C++11

Creación de hebras

El tipo **std::thread** permite definir objetos de tipo hebra. Un objeto (variable) de este tipo puede contener información sobre una hebra en ejecución.

- En **declaración de la variable**, se indica el nombre de la función a ejecutar y se comienza ejecución concurrente de dicha función por una nueva hebra.

- En declaración se pueden especificar **parámetros**.

- La variable thread permite referenciar la hebra posteriormente.

ejemplo01.cpp

```
#include <iostream>
#include <thread>      // declaraciones del tipo std::thread
using namespace std ; // permite acortar la notación

void funcion_hebra_1( ) // función que va a ejecutar la hebra primera
{ for( unsigned long i = 0 ; i < 5000 ; i++ )
    cout << "hebra 1, i == " << i << endl ;
}

void funcion_hebra_2( ) // función que va a ejecutar la hebra segunda
{ for( unsigned long i = 0 ; i < 5000 ; i++ )
    cout << "hebra 2, i == " << i << endl ;
}

int main()
{
    thread hebra1( funcion_hebra_1 ), // crear hebra1 ejecutando funcion_hebra_1
                 hebra2( funcion_hebra_2 ); // crear hebra2 ejecutando funcion_hebra_2

    // ... finalizacion ....
}
```


2. Hebras en C++11

Declaración e inicio separados

Ejemplo anterior: Hebras **se lanzan al declarar** las variables.

```
thread hebra1( funcion_hebra_1 ), // crear hebra1 ejecutando funcion_hebra_1
             hebra2( funcion_hebra_2 ); // crear hebra2 ejecutando funcion_hebra_2
```

Posible **declarar las variables y después lanzar** las hebras → En la declaración no incluimos la función:

```
thread hebra1, hebra2 ; // declaraciones (no se ejecuta nada)
....
hebra1 = thread( funcion_hebra_1 ); // hebra1 comienza funcion_hebra_1
hebra2 = thread( funcion_hebra_2 ); // hebra2 comienza funcion_hebra_2
```

2. Hebras en C++11

Compilación con línea de órdenes

Compilación y enlace

```
g++ -std=c++11 -o ejecutable -lpthread fuente1.cpp fuente2.cpp .. fuenteN.cpp
```

- En algunos entornos, puede que no sea necesario indicar -lpthread, o incluso que sea un error.

Compilación separada y enlace:

```
g++ -std=c++11 -c fuente1.cpp
g++ -std=c++11 -c fuente2.cpp
.....
g++ -std=c++11 -c fuenteN.cpp
g++ -o ejecutable fuente1.o fuente2.o .... fuenteN.o -lpthread
```

2. Hebras en C++11

Finalización de Hebras

Una hebra A, ejecutando función f, finaliza cuando:

- Llega al final f.
- Ejecuta return en f.
- Se lanza excepción que no se captura en f ni en ninguna función llamada desde f.
- Se destruye variable asociada (a evitar).

Todas las hebras de un programa finalizan cuando:

- Cualquiera de ellas llama a la función exit() (o abort, o terminate) provocando también la terminación del proceso.
- La hebra principal termina de ejecutar main (Error a evitar, visto en ejemplo01.cpp).

```
int main()
{
    thread hebra1( funcion_hebra_1 ), // crear hebra1 ejecutando funcion_hebra_1
                 hebra2( funcion_hebra_2 ); // crear hebra2 ejecutando funcion_hebra_2

    // ... finalizacion ....
}
```

- Es necesario que la hebra ppal. espera la terminación de hebra1 y hebra2.

2. Hebras en C++11

Operación de unión

C++11 provee diversos **mecanismos de sincronización**: **unión**, mutex y variables condición.

Operación de unión (join):

- Permite que una **hebra A espere a que otra hebra B termine**.
- **Hebra A invoca** la unión, y B es la hebra objetivo.
- **Al finalizar** llamada, hebra **B ha terminado** con seguridad.
- Si B ya ha terminado, no pasa nada pero si la espera es necesaria, la **hebra A queda suspendida** sin consumir CPU hasta que B termina.
- La hebra A debe **invocar el método join** sobre la variable thread asociada a B.
- **Hebra B debe ser una hebra activa**:
 - está en ejecución o
 - Finalizada pero no se ha invocado join sobre ella.



2. Hebras en C++11

Operación de unión. Ejemplo

ejemplo02.cpp

```
void funcion_hebra_1( ) // función que va a ejecutar la hebra primera
{ for( unsigned long i = 0 ; i < 5000 ; i++ )
    cout << "hebra 1, i == " << i << endl ;
}
void funcion_hebra_2( ) // función que va a ejecutar la hebra segunda
{ for( unsigned long i = 0 ; i < 5000 ; i++ )
    cout << "hebra 2, i == " << i << endl ;
}
int main()
{
    thread hebra1( funcion_hebra_1 ), // crear hebra1 ejecutando funcion_hebra_1
                hebra2( funcion_hebra_2 ); // crear hebra2 ejecutando funcion_hebra_2

    hebra1.join(); // la hebra principal espera a que hebra1 termine
    hebra2.join(); // la hebra principal espera a que hebra2 termine
}
```

2. Hebras en C++11

Parámetros y resultados de una hebra

Hasta ahora solo hemos visto hebras que ejecutan funciones sin parámetros.

- Se pueden usar **funciones con parámetros**: Se deben de **especificar los valores de los parámetros al iniciar** la hebra.

```
void funcion_hebra_1( int a, float x ) { .... }  
void funcion_hebra_2( char * p, bool b ) { .... }
```

```
thread hebra1( funcion_hebra_1, 3+2, 45.678 ),    // a = 5, x=45.678  
             hebra2( funcion_hebra_2, "hola!", true ); // p = "hola", b = true
```

- Con declaración e inicio separados:

```
thread hebra1, hebra2 ;  
...  
hebra1 = thread( funcion_hebra_1, 3+2, 45.678 );    // a = 5, x = 45.678  
hebra2 = thread( funcion_hebra_2, "hola!", true ); // p = "hola", b = true
```

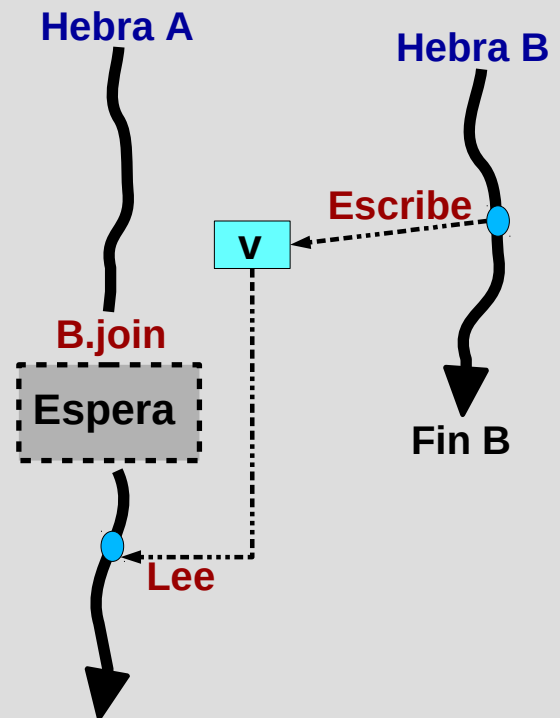
- Si la función devuelve un valor de un tipo distinto de void, dicho valor es ignorado cuando se hace join.

2. Hebras en C++11

Obtención de valores resultados

Opciones para leer resultado de hebra B que ejecuta función f desde una hebra A:

- **Mediante una variable global v compartida:** la función f (la hebra B) escribe el valor resultado en v y la hebra A lo lee tras hacer join. Esto constituye un efecto lateral (no recomendable).
- **Mediante un parámetro de salida en f (puntero o referencia).** f escribe en ese parámetro. Hebra A lee resultado tras hacer join.
 - También produce un efecto lateral.
- **Mediante futuros:** la función f devuelve el valor resultado mediante **return**. La hebra A inicia B mediante la **función async** que devuelve un **objeto de tipo future**. El objeto “future” permitirá recuperar el valor resultado cuando la hebra haya terminado.
 - Opción más simple y legible, sin efectos laterales.



2. Hebras en C++11

Uso de variables globales

Queremos que 2 hebras **calculen concurrentemente el factorial de 2 números**, usando **función factorial**:

```
// declaración de la función factorial (parámetro int, resultado long)
long factorial( int n ) { return n > 0 ? n*factorial(n-1) : 1 ; }
```

ejemplo03.cpp

```
.....
// variables globales donde se escriben los resultados
long resultado1, resultado2 ;

// funciones que ejecutan las hebras
void funcion_hebra_1( int n ) { resultado1 = factorial( n ) ; }
void funcion_hebra_2( int n ) { resultado2 = factorial( n ) ; }

int main()
{
    // iniciar las hebras
    thread hebra1( funcion_hebra_1, 5 ), // calcula factorial(5) en resultado1
               hebra2( funcion_hebra_2, 10 ); // calcula factorial(10) en resultado2

    // esperar a que terminen las hebras,
    hebra1.join() ; hebra2.join() ;

    // imprimir los resultados:
    cout << "factorial(5) == " << resultado1 << endl
         << "factorial(10) == " << resultado2 << endl ;
}
```


2. Hebras en C++11

Uso de un parámetro de salida

ejemplo04.cpp

```
.....  
// función que ejecutan las hebras  
void funcion_hebra( int n, long & resultado) { resultado= factorial(n); }  
  
int main()  
{  
    long resultado1, resultado2 ; // variables (locales) con los resultados  
  
    // iniciar las hebras (los parámetros por referencia se ponen con ref)  
    thread hebra1( funcion_hebra, 5,  ref(resultado1) ), // calcula fact.(5)  
                hebra2( funcion_hebra, 10, ref(resultado2) ); // calcula fact.(10)  
  
    // esperar a que terminen las hebras,  
    hebra1.join() ; hebra2.join() ;  
  
    // imprimir los resultados:  
    cout << "factorial(5)  == " << resultado1 << endl  
         << "factorial(10) == " << resultado2 << endl ;  
}
```

2. Hebras en C++11

Obtención de valores resultado mediante futuros

La función que ejecuta la hebra devuelve el resultado usando return.

- **Lanzamiento de hebra:** mediante una llamada a la función **async**, especificando:
 - **Modo:** constante que especifica que se lanzará una hebra específica para ejecutar la función.
 - **Nombre de la función y sus parámetros.**
- **Obtención del resultado:** **async** devuelve un objeto de tipo **future** con un método **get** que permite, tras la terminación de la hebra, leer el resultado generado.

```
#include <future>          // declaracion de std::thread, std::async, std::future

// iniciar las hebras y obtener los objetos future (conteniendo un long)
// (el valor launch::async indica que se debe usar una hebra concurrente
// para evaluar la función):
future<long> futuro1 = async( launch::async, factorial, 5  ),
             futuro2 = async( launch::async, factorial, 10 );

// esperar a que terminen las hebras, obtener resultado e imprimirlos
cout << "factorial(5)  == " << futuro1.get() << endl
      << "factorial(10) == " << futuro2.get() << endl ;
```

ejemplo05.cpp

2. Hebras en C++11

Vectores de Hebras/Futuros

Frecuente: Diferentes hebras ejecutan la misma función pero sobre distintos datos

- Cada hebra debe recibir **parámetros distintos**.
- Cada hebra suele recibir un **número de orden** (un entero) que lo identifica.
- Se puede usar un **vector de variables de tipo thread (o future)**.

```
.....  
const int num_hebras = 8 ; // número de hebras  
// función que ejecutan las hebras: (cada una recibe i == índice de la hebra)  
void funcion_hebra( int i )  
{  
    int fac = factorial( i+1 );  
    cout <<"hebra número " <<i <<"", factorial(" <<i+1 <<"") = " <<fac <<endl;  
}  
int main()  
{ // declarar el array de variables de tipo 'thread'  
    thread hebras[num_hebras] ;  
    // poner en marcha todas las hebras (cada una de ellas imprime el result.)  
    for( int i = 0 ; i < num_hebras ; i++ )  
        hebras[i] = thread( funcion_hebra, i ) ;  
    // esperar a que terminen todas las hebras  
    for( int i = 0 ; i < num_hebras ; i++ )  
        hebras[i].join() ;
```

ejemplo06.cpp

2. Hebras en C++11

Ejemplo de Vector de Futuros

- Usamos un **vector de futuros** para resolver el problema anterior
- Hebra principal imprime secuencialmente los resultados.

ejemplo07.cpp

```
.....

const int num_hebras = 8 ; // número de hebras

int main()
{
    // declarar el array de variables de tipo future
    future<long> futuros[num_hebras] ;

    // poner en marcha todas las hebras y obtener los futuros
    for( int i = 0 ; i < num_hebras ; i++ )
        futuros[i] = async( launch::async, factorial, i+1 ) ;

    // esperar a que acabe cada hebra e imprimir el resultado
    for( int i = 0 ; i < num_hebras ; i++ )
        cout << "factorial(" << i+1 << ") = " << futuros[i].get() << endl ;
}
```

2. Hebras en C++11

Medición de tiempos en C++11

Objetivo: Medir **duración** de un intervalo de tiempo en una fase de ejecución del programa.

Las mediciones se basan en **2 tipos de datos** (en `std::chrono`):

- **Instantes de tiempo (`time_point`):** representa tiempo desde un instante de inicio con un reloj concreto.
- **Duraciones de intervalos de tiempo (`duration`):** duración es la diferencia entre dos instantes de tiempo.
 - Puede representarse con enteros o flotantes, y en cualquier unidad de tiempo (nanosegundos, milisegundos, segundos, minutos, etc...).

En C++11 se definen **tres clases para tres relojes distintos**:

- **Reloj del sistema:** (tipo `system_clock`). Tiempo indicado por la hora/fecha del sistema.
- **Reloj monotónico:** (tipo `steady_clock`). Mide tiempo real desde un instante en el pasado. No sufre saltos, por lo que será el que usemos.
- **Reloj de alta precisión:** (tipo `high_precision_clock`). reloj de máxima precisión en el sistema. Podría ser cualquiera de los dos anteriores.

2. Hebras en C++11

Medición de tiempos con steady_clock

ejemplo08.cpp

```
#include <iostream>
#include <chrono> // incluye now, time_point, duration
using namespace std ;
using namespace std::chrono;

int main()
{
    // leer instante de inicio de las instrucciones
    time_point<steady_clock> instante_inicio = steady_clock::now() ;
    // aquí se ejecutan las instrucciones cuya duración se quiere medir
    // .....
    // leer instante final de las instrucciones
    time_point<steady_clock> instante_final = steady_clock::now() ;
    // restar ambos instantes y obtener una duración (en microsegundos, flotantes)
    duration<float,micro> duracion_micros = instante_final - instante_inicio ;
    // imprimir los tiempos usando el método count
    cout << "La actividad ha tardado : "
         << duracion_micros.count() << " microsegundos." << endl ;
}
```

2. Hebras en C++11

Ejemplo. Cálculo numérico de integrales

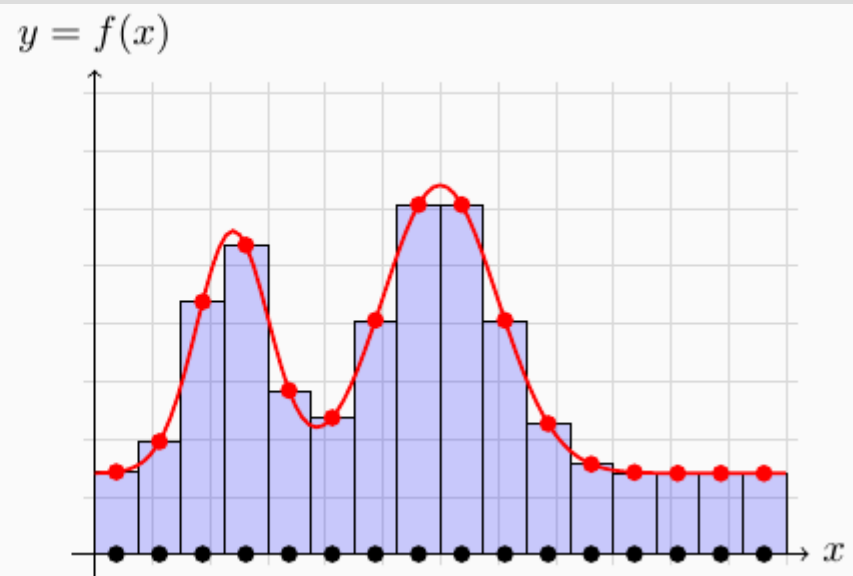
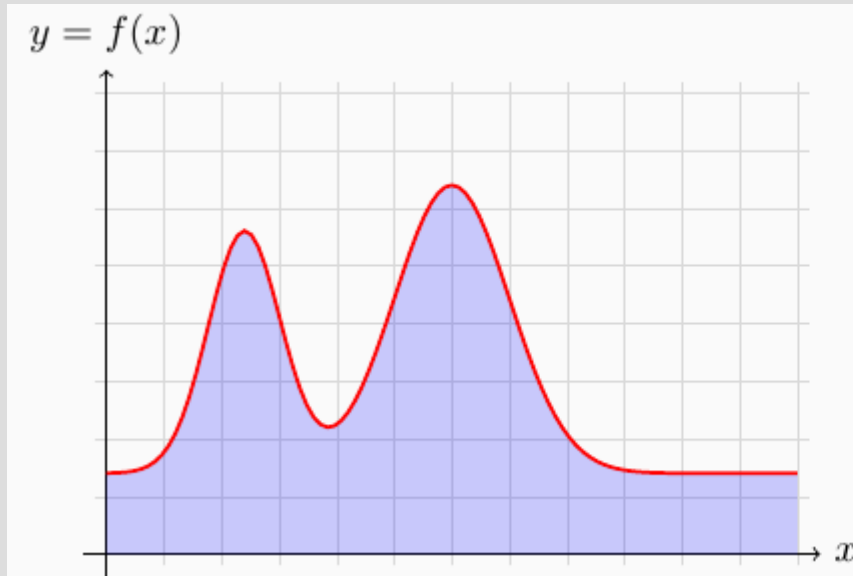
La programación concurrente puede ser usada para **acelerar la resolución** de multitud de problemas, entre ellos algoritmos numéricos.

Ejemplo típico: Cálculo de la integral I de una función f de variable real.

- **Cuadratura numérica:** Evaluar la función f en un conjunto de m puntos uniformemente espaciados en el intervalo $[0, 1]$, y aproximar I como la media de todos esos valores:

$$I = \int_0^1 f(x) dx$$

$$I \approx \frac{1}{m} \sum_{i=0}^{m-1} f(x_i) \quad \text{donde: } x_i = \frac{i + 1/2}{m}$$



2. Hebras en C++11

Ejemplo. Aproximación del número π

Usaremos una integral de valor conocido:

$$I = \pi = \int_0^1 \frac{4}{1+x^2} dx$$

Implementación Secuencial

```
const long m = ..., n = ...; // el valor m es alto (del orden de millones)
// implementa función f
double f( double x )
{ return 4.0/(1+x*x) ;      // f(x) = 4/(1+x^2)
}
// calcula la integral de forma secuencial, devuelve resultado:
double calcular_integral_secuencial( long m ) // m == núm. muestras
{
    double suma = 0.0 ;           // inicializar suma
    for( long i = 0 ; i < m ; i++ ) // para cada i entre 0 y m-1:
        suma += f( (i+double(0.5))/m ); // añadir f(x_i) a la suma actual
    return suma/m ;               // devolver valor promedio de f
}
```

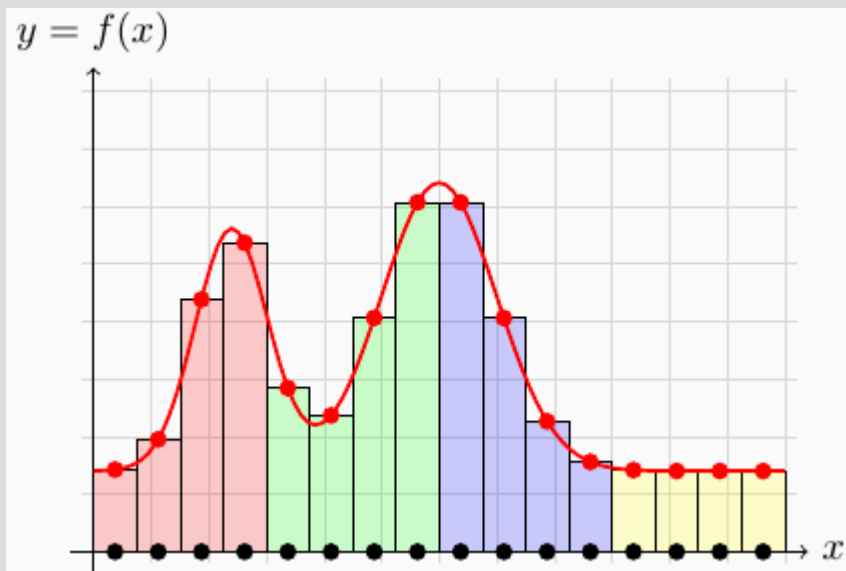

2. Hebras en C++11

Ejemplo. Versión concurrente. Estrategia de Reparto

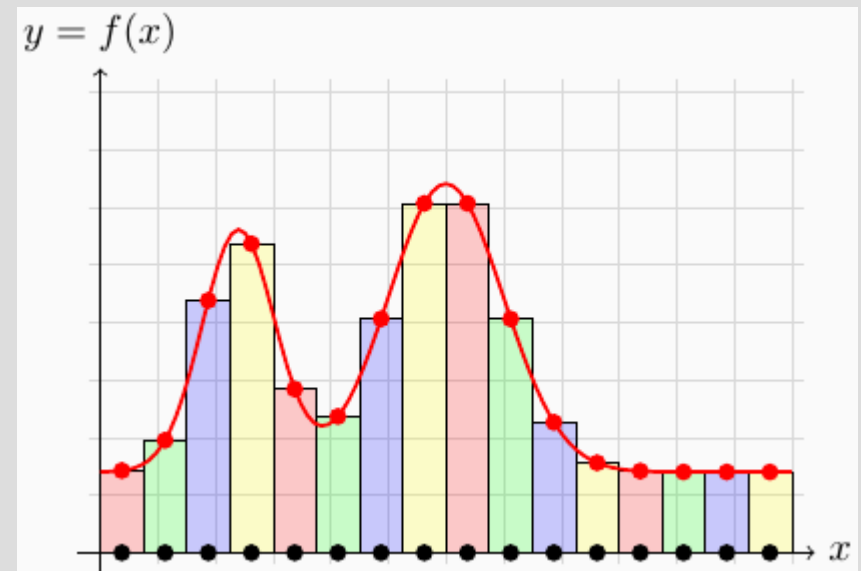
El cálculo se puede **repartir entre n hebras idénticas** (asumimos que m es múltiplo de n):

- Cada hebra evalúa f en m/n puntos del dominio y calcula la suma parcial de los valores de $f \rightarrow$ Cálculos independientes.
- La **hebra principal recoge** las sumas parciales y calcula la suma total.
- **Con k procesadores** \rightarrow hasta k veces más rápido si m es mucho mayor que n .

Asignación por bloques contiguos



Asignación cíclica



2. Hebras en C++11

Ejemplo. Implementación concurrente

- La función que ejecutará cada hebra recibe `ih`, el índice de la hebra, (desde 0 hasta $n - 1$). Devuelve la sumatoria parcial correspondiente a las muestras calculadas:

```
double funcion_hebra( long ih )  
{ .....  
}
```

- Una función debe lanzar n hebras (con `async`), y crea un vector de `future`. La hebra principal espera que vayan acabando, obtiene sumas parciales y devuelve la suma total:

```
double calcular_integral_concurrente( )  
{ .....  
}
```

- La función `main` tiene la forma mostrada en archivo `ejemplo09-plantilla.cpp`:

```
...  
const double pi_sec = calcular_integral_secuencial( );  
...  
  
...  
const double pi_conc = calcular_integral_concurrente( );
```

ACTIVIDAD PROPUESTA

Implementación concurrente del cálculo y medición de tiempos

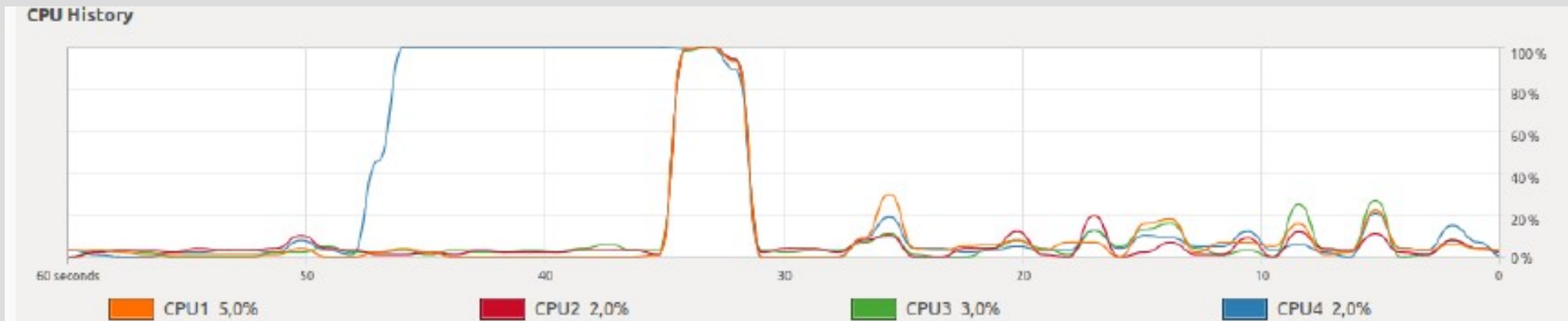
- **Completar la plantilla en ejemplo09.cpp** con la implementación del cálculo concurrente del número π , tal y como se ha descrito.
- **Salida:** se presentará:
 - El valor exacto de π y el calculado de las dos formas.
 - La **duración del cálculo concurrente**, del secuencial y el porcentaje de tiempo concurrente respecto del secuencial:

```
Número de muestras (m)      : 1073741824
Número de hebras (n)        : 4
Valor de PI                  : 3.14159265358979312
Resultado secuencial         : 3.14159265358998185
Resultado concurrente        : 3.14159265358978601
Tiempo secuencial           : 11576 milisegundos.
Tiempo concurrente          : 2990.6 milisegundos.
Porcentaje t.conc/t.sec.    : 25.83%
```

ACTIVIDAD PROPUESTA

Resultados esperados

- **Figura:** Captura de **system monitor** mostrando evolución de porcentajes de uso de cada CPU al ejecutar programa con 4 hebras:
- **Parte secuencial:** la hebra principal ejecuta la versión secuencial, y ocupa al 100 % de 1 CPU (CPU4, línea azul).
- **Parte concurrente:** 4 hebras creadas por la ppal ocupan cada una CPU al 100 %, la principal espera.
- Cálculo concurrente tardaría algo más de 1/4 del secuencial.

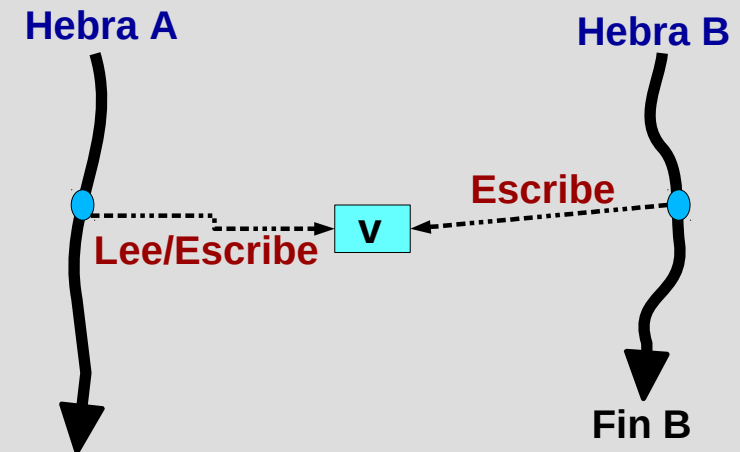


3. Sincronización básica en C++11

Introducción

Veremos algunos **mecanismos básicos** que ofrece C++11 para sincronización de hebras que acceden a variables compartidas asegurando **Exclusion Mutua**:

- **Tipos atómicos**: tipos de datos (típicamente enteros) cuyas variables se pueden actualizar de forma atómica.
 - Ejemplo: al decrementar/incrementar una variable entera por parte de varias hebras.
- **Objetos mutex**: incluyen operaciones que permiten garantizar la EM en la ejecución de trozos de código (secciones críticas)
 - Ejemplo: al realizar dos inserciones concurrentes de nodos en una lista.



Existen **otros tipos de mecanismos** de sincronización en C++11 que veremos más adelante.

3. Sincronización básica en C++11

Tipos atómicos C++11

Para cada tipo entero posible T (char, int, long, unsigned, etc.) existe un correspondiente tipo atómico: **atomic<T>** o **atomic_T**.

- Las operaciones se suelen implementar con **instrucciones hardware atómicas** específicas.
- Para una variable atómica k, las siguientes operaciones se hacen de forma atómica: **k=expresion; k++; k--; k+=expresion; k-=expresion;**

(si expresión no es literal simple, su evaluación no ocurre atómicamente junto con actualización).

ejemplo10.cpp

```
const long  num_iters = 10000000l ; // número de incrementos a realizar
int         contador_no_atom ;      // contador compartido (no atómico)
atomic<int> contador_atom ;          // contador compartido (atómico)

void funcion_hebra_no_atom( ) // incrementar el contador no atómico
{ for( long i = 0 ; i < num_iters ; i++ )
    contador_no_atom ++ ; // incremento no atómico de la variable
}

void funcion_hebra_atom( ) // incrementar el contador atómico
{ for( long i = 0 ; i < num_iters ; i++ )
    contador_atom ++ ; // incremento atómico de la variable
}
```

3. Sincronización básica en C++11

Tipos atómicos C++11. Ejemplo

```
// poner en marcha dos hebras que hacen los incrementos atómicos
contador_atom = 0 ; // inicializa contador atómico compartido
thread hebra1_atom = thread( funcion_hebra_atom ),
      hebra2_atom = thread( funcion_hebra_atom );
hebra1_atom.join();
hebra2_atom.join();

// poner en marcha dos hebras que hacen los incrementos no atómicos
contador_no_atom = 0 ; // inicializa contador no atómico compartida
thread hebra1_no_atom = thread( funcion_hebra_no_atom ),
      hebra2_no_atom = thread( funcion_hebra_no_atom );
hebra1_no_atom.join();
hebra2_no_atom.join();
```

valor esperado	: 2000000
resultado (atom.)	: 2000000
resultado (no atom.)	: 1202969
tiempo atom.	: 35.2199 milisegundos.
tiempo no atom.	: 6.50903 millisegundos.

3. Sincronización básica en C++11

Objetos Mutex

Operaciones complejas sobre estructuras de datos compartidas → Exclusion Mutua en trozos de código llamados **Secciones críticas**

Se pueden usar un **objeto mutex o cerrojo** (Locks) para cada sección crítica (**tipo `std::mutex`**) diferente. Un objeto mutex soporta dos operaciones:

- **lock**: al inicio de SC. La hebra espera si ya hay otra ejecutando dicha SC. Si hay espera, la hebra queda bloqueada sin gastar CPU.
- **Unlock**: al final de la SC para indicar que se ha terminado de ejecutarla.

Entre lock y unlock, la hebra ha adquirido el mutex. El método **lock** permite **adquirir el mutex**, y **unlock** permite **liberarlo**. Un mutex está libre o adquirido por una única hebra.

```
mutex mtx ; // declaración de la variable compartida tipo mutex      ejemplo12.cpp

void funcion_hebra_m( int i ) // función que ejecutan las hebras (con mutex)
{
    int fac = factorial( i+1 );
    mtx.lock(); // adquirir el mutex
    cout <<"hebra número " <<i <<"", factorial(" <<i+1 <<"") = " <<fac <<endl;
    mtx.unlock(); // liberar el mutex
}
```


3. Sincronización básica en C++11

Objetos Mutex. Comparación con tipos atómicos

En **ejemplo11.cpp** se comparan los tiempos de cálculo del ejemplo del contador, pero ahora usando también objetos mutex. Se obtienen estos resultados:

```
valor esperado      : 2000000
resultado (mutex)    : 2000000
resultado (atom.)    : 2000000
resultado (no atom.) : 1222377
tiempo mutex         : 7001.01 milisegundos
tiempo atom.         : 39.5807 milisegundos.
tiempo no atom.      : 7.67227 millisegundos.
```

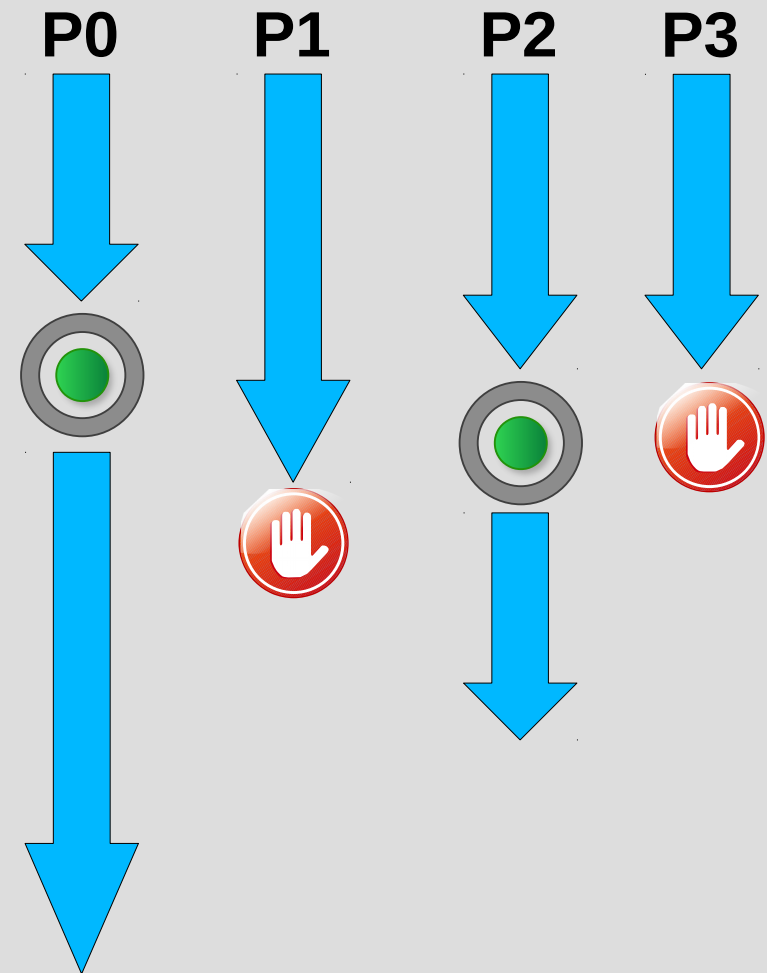
El **tiempo para objetos mutex es mucho mayor** que con instrucciones atómicas.

4. Introducción a los Semáforos

Concepto

Semáforos: mecanismo que aminora problemas de soluciones de bajo nivel, y tiene un ámbito de uso más amplio.

- No se usa espera ocupada, sino **bloqueo de procesos** (Más eficiente).
- Resuelven fácilmente la **Exclusión Mutua**.
- Permiten resolver cualquier **problema de sincronización** (aunque los esquemas de uso pueden ser complejos).
- Se implementa mediante instancias de una **estructura de datos** accesible únicamente mediante **subprogramas específicos** ⇒ aumenta la seguridad y simplicidad.



4. Introducción a los Semáforos

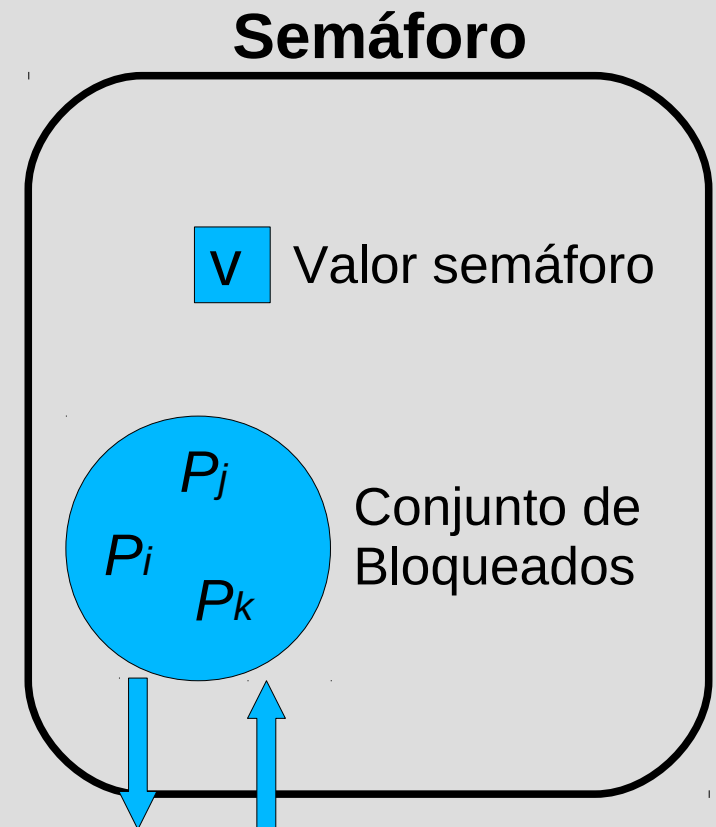
Estructura de un semáforo

Un semáforo es un **instancia de una estructura de datos** que contiene los siguientes elementos en memoria compartida:

- **Conjunto de procesos bloqueados** (“esperando al semáforo”).
- **Valor del semáforo:** valor entero no negativo.

Al **inicio de un programa** que usa un semáforo, debe poder inicializarse:

- Su **conjunto** de procesos esperando estará **vacío**
- Se debe indicar un **valor inicial** del semáforo



4. Introducción a los Semáforos

Operaciones sobre un semáforo

Además de inicialización, solo hay dos operaciones:

sem_wait(s)

```
If (s.valor == 0)
    Bloquea proceso
s.valor = s.valor - 1;
```

sem_signal(s)

```
s.valor = s.valor + 1;
If (hay procesos esperando s)
    reanuda uno;
```

- **s.valor nunca es negativo**, ya que antes de decrementar se espera a que sea 1.
- Solo puede haber procesos esperando s cuando **s.valor** es 0.
- Estas operaciones se ejecutan **en exclusión mutua** sobre cada semáforo (excluyendo periodo bloqueo wait),

4. Introducción a los Semáforos

Invariante de un semáforo

- Dado un **semáforo** s , que se **inicializó a v_0** , con valor v_t en un instante de tiempo, se verifica:

$$v_t = v_0 + n_s - n_w \geq 0$$

donde:

- n_s es el número de llamadas a `sem_signal` completadas y
 - n_w es el número de llamadas a `sem_wait` completadas.
- Los 4 valores son **enteros no negativos**.
- La **igualdad** se deriva de que `sem_signal` siempre incrementa el valor y `sem_wait` siempre lo decrementa (pero espera antes cuando es 0).
- Se mantiene cuando no se está ejecutando `sem_wait` o `sem_signal`.
- Solo **cuentan llamadas a `sem_wait` completadas totalmente** en t .

4. Introducción a los Semáforos

Patrones de uso sencillos

- **Espera única:** Un proceso, antes de ejecutar una sentencia, debe esperar a que otro proceso complete otra sentencia (típicamente cuando un proceso debe leer una variable escrita por otro proceso).
- **Exclusión Mutua:** acceso a una sección crítica por parte de un número arbitrario de procesos.
- **Productor/Consumidor:** un proceso escribe sucesivos valores en una variable, y cada uno de ellos debe ser leído una única vez por otro proceso.

4. Introducción a los Semáforos

Espera Única. problema

```
{ variables compartidas y valores iniciales }  
var x          : integer ;           { variable escrita por Productor }  
    puede_leer : semaphore := 0 ; { 1 si x ya escrita y aun no leída }
```

```
process Productor ; { escribe 'x' }  
    var a : integer ;  
begin  
    a := ProducirValor() ;  
    x := a ; { sentencia E }  
end
```

```
process Consumidor { lee 'x' }  
    var b : integer ;  
begin  
    b := x ; { sentencia L }  
    UsarValor(b) ;  
end
```

- Sentencias E y L son atómicas.
- Correctas interfoliaciones en las que E antes que L.

4. Introducción a los Semáforos

Espera Única. Solución con semáforo

```
{ variables compartidas y valores iniciales }  
var x          : integer ;      { variable escrita por Productor }  
    puede_leer : semaphore := 0; { 1 si x ya escrita y aun no leída }
```

```
process Productor ; { escribe 'x' }  
    var a : integer ;  
begin  
    a := ProducirValor() ;  
    x := a ; { sentencia E }  
    sem_signal( puede_leer ) ;  
end
```

```
process Consumidor { lee 'x' }  
    var b : integer ;  
begin  
    sem_wait( puede_leer ) ;  
    b := x ; { sentencia L }  
    UsarValor(b) ;  
end
```


4. Introducción a los Semáforos

Exclusión Mutua. Solución con semáforo

```
{ variables compartidas y valores iniciales }
var sc_libre : semaphore := 1 ; { 1 si SC está libre, 0 si SC ocupada }
                                   { (núm. de procs. que pueden entrar a SC) }

process P[ i : 0..n ];
begin
  while true do begin

    { esperar hasta que sc_libre sea 1, entonces ponerla a 0 }
    sem_wait( sc_libre ) ;

    { seccion critica: ..... }

    { poner sc_libre a 1, y desbloquear un proceso en espera si hay alguno }
    sem_signal( sc_libre ) ;

    { resto seccion: ..... }
  end
end
```

4. Introducción a los Semáforos

Productor-Consumidor. Problema

```
{ variables compartidas y valores iniciales }  
var x : integer ; { contiene cada valor producido y pte. de leer }
```

```
process Productor ; { calcula x }  
var a : integer ;  
begin  
    while true do begin  
        a := ProducirValor() ;  
        x := a ; { sentencia E }  
    end  
end
```

```
process Consumidor { lee x }  
var b : integer ;  
begin  
    while true do begin  
        b := x ; { sentencia L }  
        UsarValor(b) ;  
    end  
end
```

- Son correctas las interfoliaciones en las que E y L se alternan, comenzando en E.

4. Introducción a los Semáforos

Productor-Consumidor. Solución con semáforos

```
{ variables compartidas y valores iniciales }  
var x          : integer ;           { contiene cada valor producido }  
    puede_leer  : semaphore := 0 ; { 1 se puede leer x, 0 no }  
    puede_escribir : semaphore := 1 ; { 1 se puede escribir x, 0 no }
```

```
process Productor ; { escribe x }  
var a : integer ;  
begin  
    while true do begin  
        a := ProducirValor() ;  
        sem_wait( puede_escribir ) ;  
        x := a ; { sentencia E }  
        sem_signal( puede_leer ) ;  
    end  
end
```

```
process Consumidor { lee x }  
var b : integer ;  
begin  
    while true do begin  
        sem_wait( puede_leer ) ;  
        b := x ; { sentencia L }  
        sem_signal( puede_escribir ) ;  
        UsarValor(b) ;  
    end  
end
```

5. Semáforos en C++11

Tipos de datos y operaciones

Se ha diseñado un **tipo de datos en C++11** con la funcionalidad de los semáforos:

- Tipo **Semaphore** con 2 operaciones: **sem_wait** y **sem_signal**.
- **Inicialización**, obligatoriamente en la declaración
- Variables Semaphore se pueden pasar como parámetros pero no se pueden copiar mediante asignaciones. Se destruyen automáticamente.

Definición

```
Semaphore s1 = 34, s2 = 0 ;  
Semaphore s3(34), s4(5) ;
```

Uso

```
sem_wait( s1 );      s1.sem_wait();  
sem_signal( s1 );    s1.sem_signal();
```

- Generalmente se declaran como **variables globales** compartidas entre las hebras que los usan.

5. Semáforos en C++11

Programas con semáforos

- Necesario hacer **#include** y **using** en la cabecera:

```
#include <iostream>
#include <thread>
#include "Semaphore.h" // incluye tipo 'SEM::Semaphore'
using namespace std ; // permite acortar la notación (abc en lugar de std::abc)
using namespace SEM ; // permite 'Semaphore' en lugar de 'SEM::Semaphore'
```

Compilación y enlace

- Se debe de disponer de los archivos **Semaphore.h** y **Semaphore.cpp** en el **directorio de trabajo**.
- Se debe de **compilar y enlazar el archivo Semaphore.cpp**, junto con los fuentes que usan los semáforos:

```
g++ -std=c++11 -I. -o ejecutable fuente1.cpp Semaphore.cpp -lpthread
```


5. Semáforos en C++11

Productor-Consumidor simple. Cabecera

ejemplo13-s.cpp

```
#include <iostream>
#include <thread>
#include "Semaphore.hpp" // incluye tipo 'Semaphore'

using namespace std ; // permite acortar la notación (abc en lugar de std::abc)
using namespace SEM ; // permite usar 'Semaphore' en lugar de 'SEM::Semaphore'

// constantes y variables enteras (compartidas)
const int num_iter          = 100 ; // número de iteraciones
int      valor_compartido,    // variable compartida entre prod. y cons.
        contador            = 0 ;  // contador usado en 'ProducirValor'

// semáforos compartidos
Semaphore puede_escribir = 1 ,      // 1 si no hay valor pendiente de leer
        puede_leer       = 0 ;      // 1 si hay valor pendiente de leer

.....
```

5. Semáforos en C++11

Funciones de Hebra productora y consumidora

Las funciones **producir_valor** y **consumir_valor** se usan para simular la acción de generar valores y de consumirlos:

```
void funcion_hebra_productora( )
{
    for( unsigned long i = 0 ; i < num_iter ; i++ )
    {
        int valor_producido = producir_valor(); // generar valor
        sem_wait( puede_escribir ) ;
        valor_compartido = valor_producido ; // escribe el valor
        cout << "escrito: " << valor_producido << endl ;
        sem_signal( puede_leer ) ;
    }
}
```

```
void funcion_hebra_consumidora( )
{
    for( unsigned long i = 0 ; i < num_iter ; i++ )
    {
        sem_wait( puede_leer ) ;
        int valor_leido = valor_compartido ; // lee el valor generado
        cout << "          leído: " << valor_leido << endl ;
        sem_signal( puede_escribir ) ;
        consumir_valor( valor_leido );
    }
}
```

5. Semáforos en C++11

Hebra principal

```
.....  
// hebra principal (pone las otras dos en marcha)  
int main()  
{  
    // crear y poner en marcha las dos hebras  
    thread hebra_productora( funcion_hebra_productora ),  
           hebra_consumidora( funcion_hebra_consumidora );  
  
    // esperar a que terminen todas las hebras  
    hebra_productora.join();  
    hebra_consumidora.join();  
}
```