Sistemas Operativos
Proyecto UNIX Shell

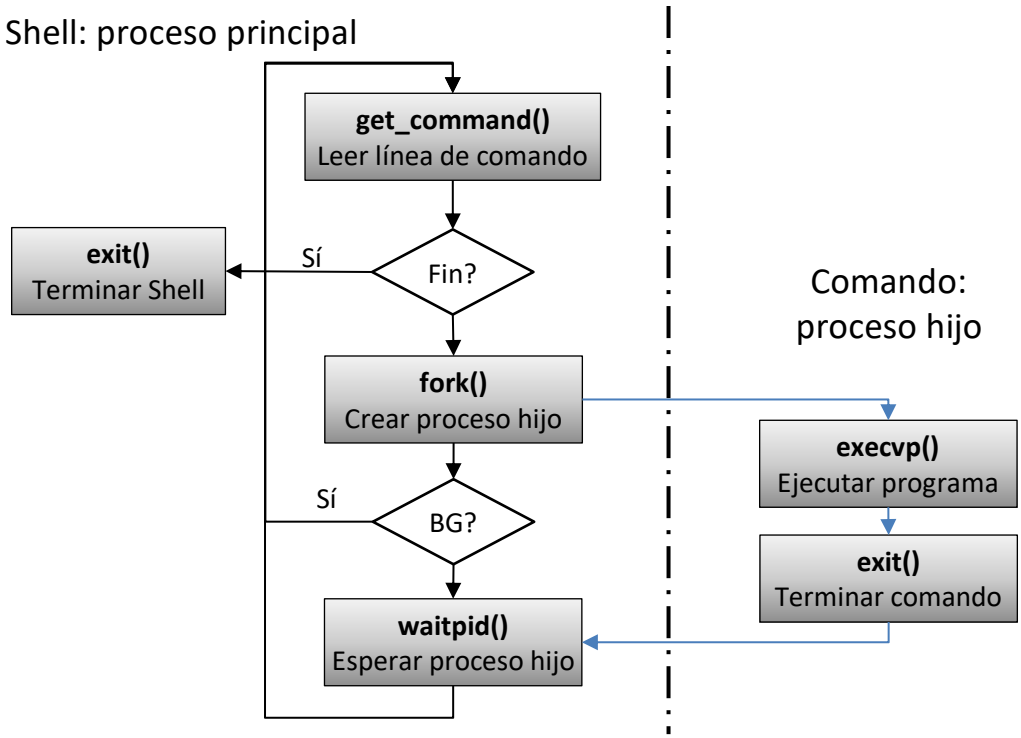
Grados de Informática, Computadores y Software
Departamento de Arquitectura de Computadores – Universidad de Málaga

Abril 2023

El objetivo del *shell* es servir como intérprete de comandos. Actúa como interfaz entre el usuario y el sistema. El usuario utilizará el *shell* para lanzar sus programas y ejecutar comandos ofrecidos por el sistema operativo.

En este proyecto se desarrollará un *shell* que lea comandos tecleados por el usuario y cree procesos que ejecuten dichos comandos. Para implementar este programa se debe hacer uso de las llamadas al sistema: **fork** (crea un proceso hijo), **execvp** (ejecuta un programa), **waitpid** (espera a la terminación de un proceso hijo) y **exit** (termina un proceso). Consultar la ayuda en línea de **linux** (**man**) para detalles sobre el funcionamiento de éstas y otras funciones.

Esquema simplificado de funcionamiento del *shell*:



En el código fuente `Shell_project.c`, disponible en el campus virtual, está codificado el *shell* que vamos a usar como base para nuestra práctica. Este código de partida servirá para implementar un *shell* con control de tareas siguiendo los conceptos que aparecen en la siguiente sección (inicialmente sólo será implementada la ejecución de tareas muy simplificada). Para la implementación deben usarse las funciones disponibles en el módulo job_control (`job_control.c` y `job_control.h` suministrados junto a `Shell_project.c`) que se describen al final de este documento.

Fundamentos del control de tareas (job control) en UNIX

El propósito fundamental de un *shell* interactivo es leer comandos desde el terminal (del usuario) y crear procesos para ejecutar los programas especificados por esos comandos. Como ya hemos visto, el *shell* puede hacer esta función mediante las llamadas al sistema `fork` y `exec`.

Cuando se lanza a ejecutar un comando, todos los procesos que realizan esta tarea (y los hijos de estos procesos) forman parte de lo que se llama un **grupo de procesos** (*process group*) o **tarea** (*job*). Por ejemplo, un simple comando de compilación como `gcc -c shFSO.c` puede lanzar varios procesos para su ejecución (*preprocessing, compilation, assembly, linking*) que completan la tarea (*job*) de compilación.

Todos los procesos pertenecen a un grupo de procesos. Cuando se crea un proceso con *fork*, éste será miembro del mismo grupo de procesos que su proceso padre. Se puede poner un nuevo proceso en otro grupo de procesos usando la llamada al sistema `setpgid`.

En UNIX existe una agrupación de procesos aún más grande que la tarea: **la sesión**. Una nueva sesión se crea cuando hacemos *login* en el sistema y el *shell* se convierte en el primer proceso (*leader*) de la sesión. Todas las tareas (grupos de procesos) que cree el *shell* formarán parte de su sesión. Asociado a cada sesión existe un **terminal**, un dispositivo de entrada/salida que permitirá a las tareas de la sesión comunicarse con el usuario a través de la entrada y salida estándar (teclado y pantalla).

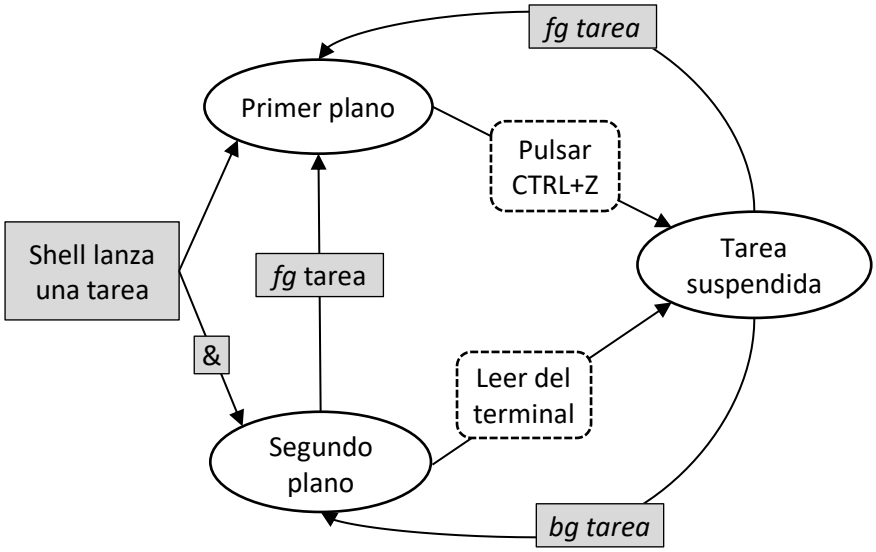
Un *shell* de UNIX con control de tareas debe gestionar y ordenar qué tarea puede usar el terminal en cada momento para realizar su entrada/salida. Si no fuese así, podrían coincidir varias tareas tratando de leer del terminal a la vez y se produciría una indeterminación acerca de qué tarea recibiría finalmente la entrada tecleada por el usuario en el terminal. Para prevenir estas confusiones, el *shell* debe asignar el uso del terminal de forma apropiada mediante la función `tcsetpgrp`.

El *shell* le dará acceso y uso ilimitado del terminal a un sólo grupo de procesos (tarea) en cada instante. A este grupo de procesos que está en uso del terminal se le conoce como **tarea de primer plano** (*foreground job*). Los otros grupos de procesos que ha lanzado el *shell* y que se ejecutan sin acceso al terminal se conocen como **tareas en segundo plano** (*background jobs*). Por lo tanto, en una sesión sólo puede haber una tarea activa en primer plano. El *shell* será la tarea de primer plano mientras acepta los comandos del usuario y después el propio *shell* es el encargado de transferir el control del terminal a cada tarea que vaya a ejecutar en primer plano. Cuando una tarea de primer plano termina o se suspende, el *shell* se encarga de recuperar el control del terminal y se convierte de nuevo en la tarea de primer plano para leer el siguiente comando del usuario.

El *shell* además de controlar qué tareas tiene corriendo en primer y segundo plano, debe controlar cuándo una tarea se encuentra **suspendida**. Si una tarea en segundo plano intenta leer del terminal (al que no tiene acceso por ser de segundo plano), el *driver* del terminal suspenderá la tarea (si el modo de funcionamiento del terminal `TOSTOP` está activo, también se suspenderá al intentar escribir en el terminal desde segundo plano). Además, el usuario puede suspender la tarea de primer plano pulsando el carácter `SUSP` (CTRL+Z) en el teclado, y un programa puede suspender cualquier tarea enviándole la señal `SIGSTOP`. Es responsabilidad del *shell* notificar el momento en que las tareas se suspenden y facilitar

mecanismos para permitir de forma interactiva al usuario continuar tareas suspendidas y decidir si una tarea debe continuar en primer o segundo plano (mediante los comandos: `fg`, `bg` y `jobs`).

Veamos un esquema de cómo funcionará el control de tareas de nuestro *shell*:



Será responsabilidad del *shell* colocar una tarea en primer o segundo plano al lanzarla, asignándole o no el control del terminal. Cuando una tarea es suspendida por el terminal (al pulsar CTRL+Z o al intentar leer del terminal en segundo plano) el *shell* tiene que detectar este evento (analizando el valor `status` que devuelve `wait`) y notificar la suspensión de la tarea mediante un mensaje. El *shell* deberá implementar los comandos internos:

- `jobs`, para listar las tareas en segundo plano, indicando si están ejecutándose o suspendidas (una tarea suspendida puede provenir de primer plano y debe ser listada).
- `fg`, para continuar ejecutado una tarea en primer plano (la tarea estaba suspendida o ejecutando en segundo plano).
- `bg`, para continuar ejecutando una tarea en segundo plano (la tarea estaba suspendida).

Por último, recalcar que todos los procesos agrupados en una tarea (grupo de procesos), pueden ser controlados en grupo mediante señales. Por ejemplo, cuando pulsamos CTRL+C (carácter INTR) el *driver* del terminal manda a todos los procesos que forman parte de la tarea de primer plano la señal SIGINT para finalizarlos. De igual forma el resto de las señales que tienen que ver con control de tareas son enviadas al conjunto de procesos que forman una tarea (grupo de procesos). Algunas de estas señales son:

`SIGINT`	Carácter `INTR` (CTRL+C) *interrupt* desde el terminal
`SIGQUIT`	Carácter `QUIT` (CTRL+\) *quit* desde el terminal
`SIGTSTP`	Carácter `SUSP` (CTRL+Z) *stop* desde el terminal
`SIGTTIN`	Tarea en *background* intentando leer del terminal
`SIGTTOU`	Tarea en *background* intentando escribir en el terminal

Proyecto

A continuación, se relacionan las tareas a realizar en este proyecto de laboratorio. Estas tareas constituyen la especificación básica del proyecto y deben de ser entregadas siguiendo las instrucciones del profesor para su evaluación.

Tarea 1

El código de partida que se suministra (`Shell_project.c` listado al final de este enunciado) entra en un bucle donde se leen y analizan líneas de comando desde el teclado. En esta primera etapa simplificaremos el problema y nos centraremos en la tarea esencial de crear un proceso y ejecutar un nuevo programa. Se debe añadir el código necesario al programa inicial para:

1. Ejecutar los comandos en un proceso independiente.
2. Esperar o no a la finalización del comando dependiendo de si el comando era de primer o de segundo plano (*foreground*/*background*).
3. Dar un mensaje que informe de la terminación o no del comando y de sus datos identificativos.
4. Continuar con el bucle para tratar el siguiente comando.

En esta tarea será necesario usar las llamadas al sistema *fork*, *execvp*, *waitpid* y *exit*. Los mensajes con información sobre los comandos ejecutados deben presentar la siguiente información para procesos en primer plano: *pid*, nombre, tipo de terminación y código de terminación o señal responsable.

Por ejemplo:

```
Foreground pid: 5615, command: ls, Exited, info: 0
Foreground pid: 5616, command: vi, Suspended, info: 20
```

Para los comandos de segundo plano habrá que informar de su *pid*, nombre e indicar que se continúan ejecutando en segundo plano mientras el *shell* continua simultáneamente con la ejecución de nuevos comandos. Por ejemplo:

```
Background job running... pid: 5622, command: sleep
```

Para comandos no encontrados, que no se pueden ejecutar, hay que dar el mensaje de error correspondiente:

```
Error, command not found: lss
```

Para compilar el programa usar:

```
gcc Shell_project.c job_control.c –o Shell
```

Para ejecutarlo:

```
./Shell
```

Para salir pulsar CTRL+D (^D).

Tarea 2

En un *shell* hay que diferenciar entre los comandos o aplicaciones externas que se pueden ejecutar y los comandos internos que implementa y ofrece el propio *shell*. Nuestro Shell hasta ahora no ofrece comandos internos. Implementar el comando interno `cd` para permitir cambiar el directorio de trabajo actual (usar la función `chdir`).

Cada comando externo que ejecute Shell debe estar en su propio grupo de procesos independiente para que el terminal pueda asignarse a una sola tarea en cada momento (la de primer plano). Por tanto, se asignarán a los **procesos hijos del *shell* un *id* de grupo de procesos (*gpid*) diferente al del padre** usando la función `new_process_group` (macro que envuelve a `setpgid`).[1]

En el caso de que un **proceso hijo** se ejecute en primer plano, éste debe ser el único **dueño del terminal,** ya que el padre quedará bloqueado en el `waitpid`. El terminal debe ser cedido y recuperado por Shell usando la función `set_terminal` (macro que envuelve a `tcsetpgrp`). Si la tarea se envía a segundo plano **no se le debe asociar el terminal** ya que es Shell el que debe seguir leyendo del teclado (Shell queda en primer plano).[1]

Para que nuestro Shell funcione correctamente cediendo el terminal a las tareas de primer plano es necesario que al comienzo del programa se ignoren todas las señales relacionadas con el terminal mediante la función `ignore_terminal_signals()`. Cuando se crea un nuevo proceso y antes de ejecutar el comando se deben restablecer esas señales a su funcionamiento por defecto (dentro del proceso hijo) con la función `restore_terminal_signals()`.

Examinando el valor de la variable `status` devuelta por `waitpid` se puede **averiguar si el proceso hijo ha terminado o está parado**. Para tener en cuenta también la suspensión de un hijo es necesario añadir la opción `WUNTRACED` a la función `waitpid`. Asegúrese de que los procesos de primer plano suspendidos son reportados por Shell.

Tarea 3

Si nos fijamos, los comandos enviados a segundo plano que son desatendidos por Shell quedan en estado *zombie* al terminar (aparecen marcados con `<defunct>` al usar el comando *ps*).

Vamos a instalar un manejador a la señal `SIGCHLD` para tratar la terminación y la suspensión de las tareas en segundo plano de forma asíncrona (usando la función `signal`). Para ello crearemos una lista de tareas (usando `job_control`) y añadiremos a esta lista cada comando lanzado en segundo plano.

Al activarse el manejador de la señal `SIGCHLD` habrá que revisar cada entrada de la lista para comprobar si algún proceso en segundo plano ha terminado o se ha suspendido. Para comprobar si un proceso ha terminado sin bloquear a Shell hay que añadir la opción `WNOHANG` en la función `waitpid`.

En este apartado debemos conseguir que las tareas de segundo plano no queden *zombies* y que Shell notifique su terminación/suspensión. Cuando una tarea se termina o se suspende hay que actualizar la lista de tareas de forma adecuada.

[1] Téngase en cuenta la posible condición de carrera que se crea entre el padre y el hijo por el hecho de ser dos procesos independientes (uno se puede planificar antes que el otro)

Tarea 4

Se debe implementar de forma segura **la gestión de tareas en segundo plano o *background*** (las tareas lanzadas con &). Si la tarea se envía a segundo plano **no se le debe asociar el terminal** ya que es Shell el que debe seguir leyendo del teclado (el *shell* queda en primer plano). Añadir la lista para el control de tareas (usar los tipos y funciones disponibles en el módulo `job_control`).

Se deben controlar en la lista varias tareas ejecutándose en segundo plano, así como varias tareas suspendidas. Las tareas suspendidas pueden proceder de tareas en primer plano suspendidas (CTRL+Z) o tareas en segundo plano que fueron suspendidas tras intentar leer del terminal (la señal `SIGSTOP` también suspenderá a cualquier tarea de primer o segundo plano).

Ha de tenerse en cuenta, así mismo, que una tarea suspendida (`STOPPED`) que se reanude como consecuencia de recibir la señal `SIGCONT` (no porque pase a primer plano) debe cambiar su estado a *background*.

El código que estamos diseñando es reentrante (mientras se está ejecutando el código del Shell puede llegar la señal `SIGCHLD` y lanzar el manejador). Para evitar problemas de coherencia en el acceso a la lista de procesos, se debe bloquear esta señal cuando se vaya a acceder a las regiones de código que manejan o actualizan la lista de procesos. En cualquier parte del código del Shell donde se acceda a la lista de procesos de sebe bloquear la señal usando las funciones disponibles en `job_control` (`block_SIGCHLD`, `unblock_SIGCHLD`).

El *shell* debe incluir los siguientes comandos internos:

- **Implementar el comando interno *jobs*,** que imprima una lista de tareas en segundo plano y suspendidas, o un mensaje si no hay ninguna. La lista de *jobs* debe incluir tanto la lista de tareas enviadas de forma explícita a segundo plano (con &), como las tareas que se encuentren suspendidas (paradas). Ya existe una función en `job_control` para imprimir una lista de tareas.
- **Implementar el comando interno *fg*** para, trabajando con la lista de tareas, **poner en primer plano una tarea de las que están en segundo plano o suspendida**. El argumento de dicho comando debe ser el identificador del lugar que ocupa esa tarea en la lista (1, 2, ...). Si no se indica argumento deberá aplicarse a la primera tarea de la lista (la última que ingreso a la lista). Es importante que las señales se envíen al grupo de procesos completo usando `killpg()` (la función `kill` con el `pid` en negativo sería equivalente, ver la ayuda en línea).
    - **Nota**: las operaciones que se deben realizar sobre el proceso en segundo plano, una vez localizado en la lista, deben ser: cederle el terminal (que hasta ese momento lo tenía el padre), cambiar lo necesario de su estructura *job* y enviarle una señal para que continúe (por si estuviera suspendido, por ejemplo, esperando a tener el terminal).
- **Implementar un comando interno *bg*** para, trabajando con la lista de tareas, **poner a ejecutar en segundo plano una tarea que está suspendida.** El argumento de dicho comando debe ser el identificador del lugar que ocupa ese proceso en la lista (1, 2, 3, ...). Si no se indica argumento deberá aplicarse a la primera tarea de la lista (la última que ingreso a la lista).

Tarea 5

Se pide implementar **las redirecciones simples de entrada estándar (stdin) desde fichero y de salida estándar (stdout) a fichero**, con los operadores comúnmente utilizados, esto es, el símbolo < para la redirección de entrada y el símbolo > para la redirección de salida.

La sintaxis será la habitual empleada en *bash*, por lo que las siguientes entradas de comando deben ser válidas:

- redirección simple de salida estándar a fichero:

```
echo hola > hola.txt
```

- redirección simple de entrada estándar desde fichero:

```
wc < /etc/passwd
```

- ambas redirecciones en una sola línea de comando:

```
wc < /etc/passwd > /tmp/nusers.txt
```

```
wc -l > /tmp/count.txt < /proc/cpuinfo
```

- puede haber argumentos entre las redirecciones, las cuales pueden aparecer en cualquier lugar de la línea de comando:

```
grep < /proc/cpuinfo cpu -E > /tmp/cpu.txt –i
```

En caso de que exista un error de sintaxis con la redirección, por ejemplo, una redirección inacabada (`echo hola >`) o no se pueda abrir el fichero por alguna razón o falle la redirección, se mostrará un mensaje de error por la salida de error (stderr) y el shell continuará a la espera del siguiente comando, ignorándose el comando introducido con el error de sintaxis.

Apéndice I. Programa Fuente: `Shell_project.c`

```
/**
UNIX Shell Project Sistemas Operativos
Grados I. Informatica, Computadores & Software
Dept. Arquitectura de Computadores - UMA
Some code adapted from "Fundamentos de Sistemas Operativos", Silberschatz et al.
To compile and run the program:
  $  gcc Shell_project.c job_control.c -o Shell
  $  ./Shell
     (then type ^D to exit program)
**/
#include "job_control.h" /* remember to compile with module job_control.c  */
#define MAX_LINE 256     /* 256 chars per line per command, should be enough. */
// ---------------------------------------------------------------------------
//                                       MAIN
// ---------------------------------------------------------------------------
int main(void)
{
  char inputBuffer[MAX_LINE]; /* Buffer to hold the command entered */
  int background;             /* Equals 1 for commands followed by char '&' */
  char *args[MAX_LINE/2];     /* Command line (of 256) has 128 arguments max */
  // probably useful variables:
  int pid_fork, pid_wait;     /* PID for created and waited process */
  int status;                 /* Status returned by wait */
  enum status status_res;     /* Status processed by analyze_status() */
  int info;                   /* Info processed by analyze_status()  */

  /* Program terminates normally inside get_command() after ^D is typed */
  while(1)
  {
    printf("COMMAND--->");    /* Print prompt */
    fflush(stdout);
    /* Get next command */
    get_command(inputBuffer, MAX_LINE, args, &background);
    if(args[0]==NULL)
      continue                /* Do nothing if empty command */
    /*The steps are:
           (1) Fork a child process using fork()
           (2) The child process will invoke execvp()
           (3) If background == 0, the parent will wait, otherwise continue
           (4) Shell shows a status message for processed command
           (5) Loop returns to get_commnad() function
    */
  } // End while
}
```

Apéndice II. Descripción del módulo `job_control`

A continuación, se describen los tipos, funciones y macros más relevantes disponibles en el módulo `job_control`:

get_command

```
void get_command(char inputBuffer[], int size, char *args[], int *background);
```

Devuelve en `args` el array de argumentos del comando leído, por ejemplo para el comando `ls -l`, tendremos `args[0]="ls"`, `args[1]="-l"` y `args[2]=NULL`. La variable `background` se pondrá a 1 (true) si el comando termina con &. Necesita como entrada un buffer de caracteres y su tamaño para trabajar sobre él (`inputBuffer` y `size`). Hay un ejemplo de uso en `Shell_project.c`.

status, job_state, status_strings, state_strings

```
enum status {SUSPENDED, SIGNALED, EXITED, CONTINUED};
enum job_state {FOREGROUND, BACKGROUND, STOPPED};
static char* status_strings[] = {"Suspended","Signaled","Exited","Continued"};
static char* state_strings[] = {"Foreground","Background","Stopped"};
```

Estos son dos tipos enumerados para identificar la causa de terminación de una tarea y el estado actual de la misma respectivamente. Se han definido dos *arrays* de cadenas para permitir su impresión por pantalla de forma más directa, por ejemplo, siendo `estado` una variable de tipo `status` podríamos informar de su valor así:

```
printf("Motivo de terminación: %s\n", status_strings[estado]);
```

analyze_status

```
enum status analyze_status(int status, int *info);
```

Esta función analiza el entero `status` devuelto por la llamada `waitpid` y devuelve la causa de terminación de una tarea (como un enumerado `status`) y la información adicional asociada a dicha terminación (`info`).

job

```
typedef struct job_
{
       pid_t pgid;           /* group id = process leader id */
       char * command;       /* program name */
       enum job_state state;
       struct job_ *next;    /* next job in the list */
} job;
```

El tipo `job` se usa para representar las tareas y enlazarlas en la lista de tareas. Una lista de tareas será un puntero a `job` (`job *`) y un nodo de la lista se manejará también como un puntero a `job` (`job *`).

new_job

```
job * new_job(pid_t pid, const char * command, enum job_state state);
```

Para crear una nueva tarea. Se proporciona como entrada a la función el *pid*, el nombre del comando y el estado (BACKGROUND o FOREGROUND).

new_list, list_size, empty_list, print_job_list

```
job * new_list(const char * name);
int list_size(job * list);
int empty_list(job *  list);
void print_job_list(job * list);
```

Estas funciones se utilizan para crear una nueva lista (con una cadena como nombre), para averiguar el tamaño de la lista, para comprobar si la lista está vacía (devuelve 1 si está vacía) y para pintar el contenido de una lista de tareas por pantalla. En realidad, están implementadas como macros.

add_job, delete_job, get_item_bypid, get_item_bypos

```
void add_job(job * list, job * item);
int delete_job(job * list, job * item);
job* get_item_bypid(job * list, pid_t pid);
job* get_item_bypos(job * list, int n);
```

Estas funciones trabajan sobre una lista de tareas. Las dos primeras añaden o eliminan una tarea a la lista (`delete_job` devuelve 1 si la eliminó correctamente). Las dos últimas buscan y devuelven un elemento de la lista por `pid` o por posición. Devolverán `NULL` si no lo encuentran. Un ejemplo de uso de `add_job` podría ser:

```
job * my_job_list = new_list("Tareas Shell");
...
add_job(my_job_list, new_job(pid_fork, args[0], background) );
```

new_process_group

```
void new_process_group(pid_t pid)
```

Esta macro permite crear un nuevo grupo de procesos para el proceso recién creado. Debe realizarlo el *shell* después de hacer `fork()`.

set_terminal

```
void set_terminal(pid_t pid)
```

Esta macro asigna el terminal al grupo de procesos identificados por `pid`. Debe cederse el terminal a las tareas de primer plano y recuperarse para el *shell* cuando esta termina o se suspende.

ignore_terminal_signals, restore_terminal_signals

```
void ignore_terminal_signals()
void restore_terminal_signals()
```

Estas funciones (en realidad macros) se utilizan para desactivar o activar las señales relacionadas con el terminal (`SIGINT`, `SIGQUIT`, `SIGTSTP`, `SIGTTIN`, `SIGTTOU`). El *shell* debe ignorar estas señales, pero el comando creado con `fork()` debe restaurar su comportamiento por defecto.

block_SIGCHLD, unblock_SIGCHLD

```
void block_SIGCHLD()
void unblock_SIGCHLD()
```

Estas macros nos son de utilidad para bloquear la señal `SIGCHLD` en las secciones de código donde el *shell* modifique o acceda a estructuras de datos (la lista de tareas) que pueden ser accedidas desde el manejador de esta señal y así evitar riesgos de acceso a datos en estados no válidos o no coherentes.

Apéndice III. Parsing para las redirecciones

Se facilita la siguiente función que permite obtener los nombres de ficheros correspondientes a las redirecciones simples (operadores > y <). Esta función ha de ser llamada inmediatamente después a la invocación de `get_command()`. Las cadenas por referencia, `file_in` y `file_out`, contienen los nombres del fichero asociado a las redirecciones < y > respectivamente, siendo NULL si dicha redirección no está presente.

```
// ---------------------------------------------------------------------
// Parse redirections operators '<' '>' once args structure has been built
// Call immediately after get_commad()
//    get_command(..);
//    char *file_in, *file_out;
//    parse_redirections(args, &file_in, &file_out);
//
// For a valid redirection, a blank space is required before and after
// redirection operators '<' or '>'
// ---------------------------------------------------------------------
void parse_redirections(char **args,  char **file_in, char **file_out){
    *file_in = NULL;
    *file_out = NULL;
    char **args_start = args;
    while (*args) {
        int is_in = !strcmp(*args, "<");
        int is_out = !strcmp(*args, ">");
        if (is_in || is_out) {
            args++;
            if (*args){
                if (is_in)  *file_in = *args;
                if (is_out) *file_out = *args;
                char **aux = args + 1;
                while (*aux) {
                   *(aux-2) = *aux;
                   aux++;
                }
                *(aux-2) = NULL;
                args--;
            } else {
                /* Syntax error */
                fprintf(stderr, "syntax error in redirection\n");
                args_start[0] = NULL; // Do nothing
            }
        } else {
            args++;
        }
    }
}
```