Sistemas Operativos

TP1 - Memoria virtual en JOS

Gabriel Robles – 95897

Ariel Windey – 97893

page2pa

La función `page2pa` se enecuentra definida en el archivo `pmap.h`:

```
static inline physaddr_t
page2pa(struct PageInfo *pp)
{
	return (pp - pages) << PGSHIFT;
}
```

Para entender su comportamiento es necesario comprender que representa cada tipo de dato:

- `typedef uint32_t physaddr_t:` el tipo de dato `physaddr_t` es un entero sin signo de 32 bits, utilizado para representar el valor de una dirección de memoria física.
- `struct PageInfo:` como se indica en el enunciado son estructuras con información asociada a las páginas de memoria física.
- `struct PageInfo *pages:` es el arreglo de páginas de memoria física, es decir es un puntero al primer `struct PageInfo` que está asociado a la primer página de memoria física

Entonces `(pp - pages)` es una cuenta que realiza aritmética de punteros en la que da el resultado del índice de la página de memoria física a la que corresponde la variable `pp`. Finalmente a este índice se le realiza un shift a izquierda de 12 posiciones (el valor de `PGSHIFT`), que es equivalente a multiplicar por la potencia 12 de 2, es decir `4096`, que es precisamiente el tamaño en bytes de cada página.

boot_alloc_pos

a) Partiendo desde KERNBASE, ubicado en `0xf0000000` (memoria virtual), el `kernel` es mapeado a partir del próximo `MB` desde esta posición, es decir en:

`KERNBASE + 0x00100000 = 0xf0000000 + 0x00100000 = 0xf0100000`

A partir de esta posición de memoria irá el `kernel`. Para determinar que posición de memoria devolverá el `boot_alloc(0)` antes de alocar memoria, es decir el valor con que se inicializá la variable `nextfree`, podemos averiguarlo de dos modos:

1. Corriendo el comando `size` sobre el binario, determinamos el tamaño del `kernel`:

```
➜  TP1-SisOp git:(master) ✗ size obj/kern/kernel
   text    data     bss     dec     hex filename
  34506   41728    1616   77850   1301a obj/kern/kernel
```

Como vemos ocupa `77850` bytes (`0x0001301a` en hexadecimal). Por lo tanto sumamos este valor a la posición memoria donde empieza el `kernel`:

`0xf0100000 + 0x0001301a = 0xf011301a`

Con lo cuál sabiendo que `nextfree` se inicializa en la dirección de memoria virtual de la página siguiente a la última página del `kernel`, deducimos que se inicializará en `0xf0114000`.

2. Otro modo es ejecutar el comando `nm` sobre el binario, con la opción `-n` para obtener los símbolos del mismo ordenados según su posición en memoria:

```
➜  TP1-SisOp git:(master) ✗ nm -n obj/kern/kernel
0010000c T _start
f010000c T entry
...
...
...
f0113948 B kern_pgdir
f011394c B pages
f0113950 B end
```

Podemos ver que el último símbolo `end` (que de hecho es el que se utiliza para inicializar `nextfree`) se ubica en `0xf0113950`, con lo cual volvemos a deducir que `nextfree` estará en `0xf0114000`.

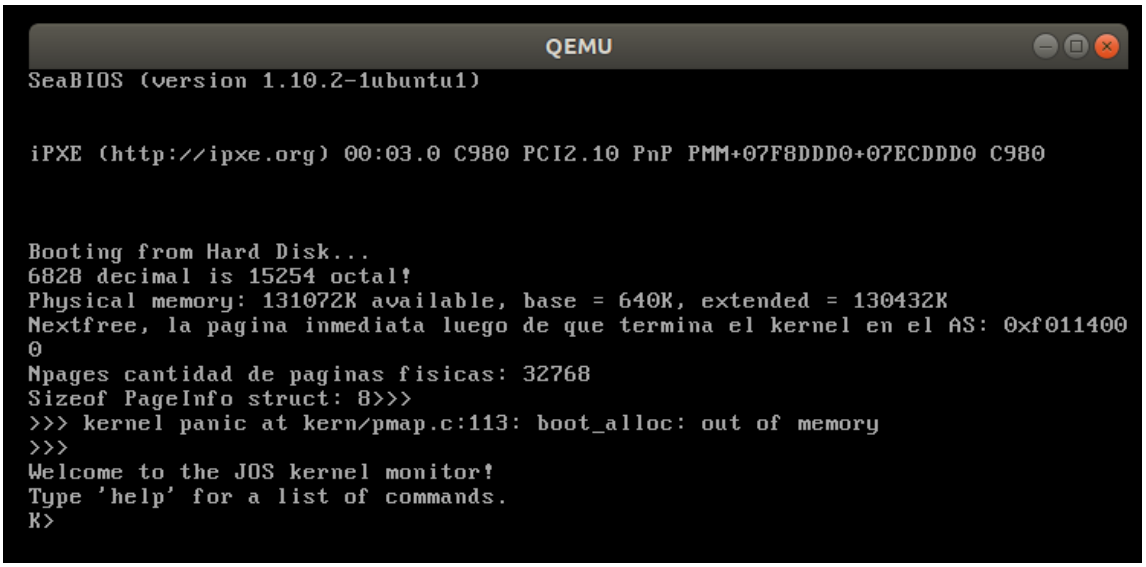
Para comprobar esto se agregó el siguiente código tras implementar la función `boot_alloc()`:

```
void
mem_init(void)
{
        uint32_t cr0;
        size_t n;

        // Find out how much memory the machine has (npages & npages_basemem).
        i386_detect_memory();

        // Remove this line when you're ready to test this function.
        cprintf("Nextfree, la pagina inmediata luego de que termina el kernel
en el AS: %p \n", boot_alloc(0));
        .
        .
        .
```

Ejecutando el `kernel` se obtiene lo siguiente:



b) A continuación se puede ver una sesión de `gdb` con lo que pide el enunciado y además comprueba lo formulado en el inciso anterior

```
➜  TP1-SisOp git:(master) ✗ make gdb
gdb -q -s obj/kern/kernel -ex 'target remote 127.0.0.1:26000' -n -x .gdbinit
Leyendo símbolos desde obj/kern/kernel...hecho.
Remote debugging using 127.0.0.1:26000
aviso: No executable has been specified and target does not support
determining executable automatically.  Try using the "file" command.
0x0000fff0 in ?? ()
.gdbinit: No existe el archivo o el directorio.
(gdb) b boot_alloc
Punto de interrupción 1 at 0xf0100995: file kern/pmap.c, line 98.
(gdb) c
Continuando.

Breakpoint 1, boot_alloc (n=0) at kern/pmap.c:98
98              if (!nextfree) {
(gdb) p nextfree
$1 = 0x0
(gdb) n
100                     nextfree = ROUNDUP((char *) end, PGSIZE);
(gdb) p (char*)&end
$2 = 0xf0113950 "\020"
(gdb) n
112             if ((uintptr_t)ROUNDUP(nextfree + n, PGSIZE) > (KERNBASE + (4
<< 20))) {
(gdb) p nextfree
$3 = 0xf0114000 ""
(gdb) n
116             if (n > 0) {
(gdb) n
123     }
(gdb) p nextfree
$4 = 0xf0114000 ""
(gdb) n
mem_init () at kern/pmap.c:145
```

page_alloc

¿En qué se diferencia `page2pa()` de `page2kva()`?

El comportamiento de la función `page2pa()` fue descrito en la primer parte. La función `page2kva()`, hace uso de la misma pero en vez de retornar la dirección física asociada al `struct PageInfo` pasado por parámetro, a esta dirección física le aplica la macro `KADDR` que devuelve la dirección virtual correspondiente (siempre y cuando corresponde a una dirección del kernel, caso contrario ejecuta un `panic`). ...

map_region_large

¿Cuánta memoria se ahorró de este modo? ¿Es una cantidad fija, o depende de la memoria física de la computadora?

El uso de Large Pages tiene un ahorro de memoria. Lo podemos ver con el siguiente análisis:

Para referenciar `4 MiB` de memoria física **sin** large pages necesitamos:

- Un `PDE (Page Directory Entry)` equivalente a `4 bytes`.
- Una `Page Table` con todas sus entradas (1024 entradas de `4 bytes`) las cuales referencian cada una a una página de memoria física de `4096 bytes`. Entonces tenemos `1024 x 4096 bytes = 4 MiB`.

Para referenciar `4MiB` de memoria física **con** large pages necesitamos:

- Un `PDE (Page Directory Entry)` equivalente a `4 bytes`. Con ese `PDE` ya referenciamos a los `4 MiB` de memoria física.

Entonces el ahorro de memoria, **por cada large page**, es lo que ocupa la `Page Table`: `4096 bytes`.

Con esto concluimos que dependiendo de cuánta memoria física tengamos distinta será la cantidad que tengamos que referenciar con estas estructuras. Utilizando la siguiente ecuación:

```
Ahorrado = (Mem_fís_total / 4 MiB) * 4 KiB = MiB_fis_total * KiB
```

Tenemos los siguientes resultados para distintas memorias físicas de máquinas virtuales en las que corremos `JOS`:

- `64 MiB`: nos ahorramos `64 KiB`.
- `128 MiB`: nos ahorramos `128 KiB`.
- `256 MiB`: nos ahorramos `256 KiB`.

Este cálculo es aproximado ya que despreciamos el tamaño que ocupa la `Page Directory`.

Git diff

```
diff --git a/kern/entry.S b/kern/entry.S
index 6c58826..025b11f 100644
--- a/kern/entry.S
+++ b/kern/entry.S
@@ -57,6 +57,13 @@ entry:
      # is defined in entrypgdir.c.
      movl  $(RELOC(entry_pgdir)), %eax
      movl  %eax, %cr3
+
+  # Configuro el registro cr4
+  # para large pages
+  movl %cr4, %eax
+  orl $(CR4_PSE), %eax
+  movl %eax, %cr4
+
      # Turn on paging.
      movl  %cr0, %eax
      orl   $(CR0_PE|CR0_PG|CR0_WP), %eax
diff --git a/kern/entrypgdir.c b/kern/entrypgdir.c
index 4f324d1..3c8d81c 100644
--- a/kern/entrypgdir.c
+++ b/kern/entrypgdir.c
@@ -21,14 +21,15 @@ __attribute__((__aligned__(PGSIZE)))
 pde_t entry_pgdir[NPDENTRIES] = {
      // Map VA's [0, 4MB) to PA's [0, 4MB)
      [0]
-          = ((uintptr_t)entry_pgtable - KERNBASE) + PTE_P,
+          = (0) + PTE_P + PTE_PS,
      // Map VA's [KERNBASE, KERNBASE+4MB) to PA's [0, 4MB)
      [KERNBASE>>PDXSHIFT]
-          = ((uintptr_t)entry_pgtable - KERNBASE) + PTE_P + PTE_W
+          = (0) + PTE_P + PTE_W + PTE_PS
 };

 // Entry 0 of the page table maps to physical page 0, entry 1 to
 // physical page 1, etc.
+#if 0
 __attribute__((__aligned__(PGSIZE)))
 pte_t entry_pgtable[NPTENTRIES] = {
      0x000000 | PTE_P | PTE_W,
@@ -1056,4 +1057,4 @@ pte_t entry_pgtable[NPTENTRIES] = {
      0x3fe000 | PTE_P | PTE_W,
      0x3ff000 | PTE_P | PTE_W,
 };
-
+#endif
diff --git a/kern/pmap.c b/kern/pmap.c
index 88608e7..b215169 100644
--- a/kern/pmap.c
+++ b/kern/pmap.c
@@ -106,7 +106,20 @@ boot_alloc(uint32_t n)
      //
      // LAB 2: Your code here.

-     return NULL;
+     // Están mapeados menos de 4 MB
+     // por lo que no podemos pedir
+     // más memoria que eso
+     if ((uintptr_t)ROUNDUP(nextfree + n, PGSIZE) > (KERNBASE + (4 << 20))) {
+          panic("boot_alloc: out of memory");
+     }
+
+     result = nextfree;
+
+     if (n > 0) {
+          nextfree = ROUNDUP(nextfree + n, PGSIZE);
+     }
+
+     return result;
 }

 // Set up a two-level page table:
@@ -127,9 +140,6 @@ mem_init(void)
      // Find out how much memory the machine has (npages & npages_basemem).
      i386_detect_memory();

-     // Remove this line when you're ready to test this function.
-     panic("mem_init: This function is not finished\n");
-
      //////////////////////////////////////////////////////////////////////
      // create initial page directory.
      kern_pgdir = (pde_t *) boot_alloc(PGSIZE);
```

```
@@ -154,7 +164,9 @@ mem_init(void)
      // to initialize all fields of each struct PageInfo to 0.
      // Your code goes here:

-
+     pages = (struct PageInfo *) boot_alloc(npages * sizeof(struct PageInfo));
+     memset(pages, 0, npages * sizeof(struct PageInfo));
+
      //////////////////////////////////////////////////////////////////////
      // Now that we've allocated the initial kernel data structures, we set
      // up the list of free physical pages. Once we've done so, all further
@@ -165,7 +177,12 @@ mem_init(void)

      check_page_free_list(1);
      check_page_alloc();
+
+     // Remove this line when you're ready to test this function.
+     // panic("mem_init: This function is not finished\n");
+
      check_page();
+

      //////////////////////////////////////////////////////////////////////
      // Now we set up virtual memory
@@ -178,6 +195,13 @@ mem_init(void)
      //     - pages itself -- kernel RW, user NONE
      // Your code goes here:

+     // Mapeo en kern_pgdir, UVPT - UPAGES direcciones virtuales a partir de
UPAGES
+     // a direcciones físicas a partir de donde comienza el struct page info
pages.
+
+     //page_insert    (pde_t *pgdir, struct PageInfo *pp, void *va, int perm)
+     //boot_map_region(pde_t *pgdir, uintptr_t va, size_t size, physaddr_t pa,
int perm)
+     boot_map_region(kern_pgdir, UPAGES, ROUNDUP(npages * sizeof(struct
PageInfo), PGSIZE), PADDR(pages), PTE_U | PTE_P);
+
      //////////////////////////////////////////////////////////////////////
      // Use the physical memory that 'bootstack' refers to as the kernel
      // stack.  The kernel stack grows down from virtual address KSTACKTOP.
@@ -189,6 +213,7 @@ mem_init(void)
      //       overwrite memory.  Known as a "guard page".
      //     Permissions: kernel RW, user NONE
      // Your code goes here:
+    boot_map_region(kern_pgdir, KSTACKTOP - KSTKSIZE, KSTKSIZE,
PADDR(bootstack), PTE_W | PTE_P);

      //////////////////////////////////////////////////////////////////////
      // Map all of physical memory at KERNBASE.
@@ -198,6 +223,7 @@ mem_init(void)
      // we just set up the mapping anyway.
      // Permissions: kernel RW, user NONE
      // Your code goes here:
+     boot_map_region(kern_pgdir, KERNBASE, 0xffffffff - KERNBASE + 1, 0, PTE_W
| PTE_P);

      // Check that the initial page directory has been set up correctly.
      check_kern_pgdir();
@@ -239,6 +265,31 @@ mem_init(void)
 void
 page_init(void)
 {
+     // Hay paginas prohibidas y paginas libres.
+     // Las páginas prohibidas son todas las que ya estan ocupadas hasta este
punto.
+     // Mas las que se indiquen en los comentarios en inglés de abajo.
+     // Las paginas prohibidas se ponen en 0 y en NULL
+     // En 0 porque si se intentan liberar tirará kernel panic
+     // Y en null porque no forman parte de la lista enlazada
+     // Entonces hay que enlazar todas las páginas menos las prohibidas
+     // Poniendolas en 0 (pues son libres) y enalzando los punteros
+     // Las ocupadas que habrá en el futuro si van a tener su valor en 1
+     // Pero su puntero estará en NULL pues no formaran mas parte de la lista
libre
+     // Hasta que sean liberadas.
+
+     // Rocomienda dato: Que el for que viene ya hecho, poner if (condicion)
continue;
+     // y luego las lineas originales de la funcion. Esa condicion es la que
me dice
+     // si es una página prohibida, osea if(prohibida)
+     // Una manera muy facil es decir:
+     /*
```

```
+           physaddr_t addr = 0
+           if (i = 1; i < npages; i++) { // i empieza en 1 para saltear la
primera página
+                   if (addr >= boot_alloc(0) || addr < io_phys_mem) {
+                        entonces no es prohibida
+                   }
+                   addr += PGSIZE;
+           }
+     */
      // The example code here marks all physical pages as free.
      // However this is not truly the case.  What memory is free?
      //  1) Mark physical page 0 as in use.
@@ -252,15 +303,21 @@ page_init(void)
      //     Some of it is in use, some is free. Where is the kernel
      //     in physical memory?  Which pages are already in use for
      //     page tables and other data structures?
+     // Aca empieza el kernel
+     // Estan ocupadas todas las paginas
+     // desde EXTPHYSMEM hasta boot_alloc(0)
      //
      // Change the code to reflect this.
      // NB: DO NOT actually touch the physical memory corresponding to
      // free pages!
-     size_t i;
-     for (i = 0; i < npages; i++) {
-           pages[i].pp_ref = 0;
-           pages[i].pp_link = page_free_list;
-           page_free_list = &pages[i];
+     physaddr_t paddr;
+     for (size_t i = 1; i < npages; i++) {
+           paddr = i * PGSIZE;
+           if (paddr >= PADDR(boot_alloc(0)) || paddr < IOPHYSMEM) { // Si no
es una dirección prohibida
+                   // pages[i].pp_ref = 0; // Fue seteado con memset
+             pages[i].pp_link = page_free_list;
+             page_free_list = &pages[i];
+           }
      }
 }

@@ -280,7 +337,21 @@ struct PageInfo *
 page_alloc(int alloc_flags)
 {
      // Fill this function in
-     return 0;
+     if (page_free_list) {
+           struct PageInfo * page = page_free_list;
+       page_free_list = page->pp_link;
+       page->pp_link = NULL;
+
+       if (alloc_flags & ALLOC_ZERO) {
+                   // Seteamos a cero la pagina fisica
+                   // no el struct PageInfo
+                   memset(page2kva(page), 0, PGSIZE);
+           }
+
+           return page;
+     }
+
+     return NULL; // No free pages
 }

 //
@@ -293,6 +364,16 @@ page_free(struct PageInfo *pp)
      // Fill this function in
      // Hint: You may want to panic if pp->pp_ref is nonzero or
      // pp->pp_link is not NULL.
+     if (pp->pp_link) {
+           panic("page_free: try to free page with pp_link set\n");
+     }
+
+     if (pp->pp_ref) {
+           panic("page_free: try to free page with pp_ref's\n");
+     }
+
+     pp->pp_link = page_free_list;
+     page_free_list = pp;
 }

 //
@@ -328,11 +409,65 @@ page_decref(struct PageInfo *pp)
 // Hint 3: look at inc/mmu.h for useful macros that mainipulate page
 // table and page directory entries.
 //
+
```

```
+/*
+     Recibe siempre como parámetro un pde_t * que es un puntero a una tira de
1024 words de 4 bytes.
+     pde_t * es accesible con corchetes [].
+     Es una estructura que sirve de Page Directory. Cada entrada tiene 32
bits. Los 20 bits mas altos
+     son una dirección física donde se ubica la Page Table en particular. Los
12 bits resntes son
+     bits de presencia.
+
+     De la casilla saco la dirección física, la conveierto en virtual y con
eso referencio la Page Table
+     que quiero.
+
+     Esta funcion es una funcion de soporte que permite llegar a la página que
interesa.
+     Hay que chequear si el bit de presencia esta a cero (en ese caso la
entrada dell page
+     directory no tendra nada). Si esta en cero y flag de create, hay que
alocar un page table y asignarselo
+     en esa posición con la dirección física de  la page table alocada y
ponerle los bits que
+     corresponda.
+     Si aloca una pagina, hay que hacer pp_ref++ a cada
+
+     Retorna un puntero (direccion virtual) a la page table
+*/
 pte_t *
 pgdir_walk(pde_t *pgdir, const void *va, int create)
 {
-     // Fill this function in
-     return NULL;
+     // Obtengo la entrada en la PD sumando a pgdir el indice de la VA
+     pde_t * pde = pgdir + PDX(va);
+
+     if ((*pde & PTE_P)) {
+           // Obtengo la direccion virtual del PT base register
+           pte_t * ptbr = KADDR(PTE_ADDR(*pde));
+
+           // Si ya existe retornamos el PTE correspondiente
+           return ptbr + PTX(va);
+     } else if (create) {
+           // Si la page table buscada no está presente y el flag de create
esta activado
+           struct PageInfo * new_pt_page = page_alloc(ALLOC_ZERO);
+
+           if (!new_pt_page) {
+                 return NULL;      // Fallo el page alloc porque no había mas
memoria
+           }
+
+           // Obtengo la direccion física de la entrada a la page table
alocada
+           physaddr_t pt_phyaddr = page2pa(new_pt_page);
+
+           // Escribimos la direccion fisica y los flags correspondientes
+           *pde = (pt_phyaddr | PTE_P | PTE_W | PTE_U);
+
+           // Marco como referenciado la page info asociada a la pagina fisica
alocada para la page table
+           new_pt_page->pp_ref++;
+
+           // Obtengo la direccion virtual del PT base register
+           pte_t * ptbr = KADDR(PTE_ADDR(*pde));
+
+           // Devolvemos el puntero a PTE
+           return ptbr + PTX(va);
+     } else {
+           // No está presente la page table
+           // buscada y el flag de create está desactivado
+           return NULL;
+     }
 }

 //
@@ -345,11 +480,48 @@ pgdir_walk(pde_t *pgdir, const void *va, int create)
 // above UTOP. As such, it should *not* change the pp_ref field on the
 // mapped pages.
 //
+
+// boot_map_region(kern_pgdir, UPAGES, npages, PADDR(pages), PTE_U | PTE_P);
+
 // Hint: the TA solution uses pgdir_walk
 static void
 boot_map_region(pde_t *pgdir, uintptr_t va, size_t size, physaddr_t pa, int
```

```
perm)
 {
-     // Fill this function in
+  #ifndef TP1_PSE
+     assert(va % PGSIZE == 0);
+     assert(pa % PGSIZE == 0);
+     assert(size % PGSIZE == 0);
+     assert(perm < (1 << PTXSHIFT));
+
+     for (size_t i = 0; i < size/PGSIZE; i++, va+=PGSIZE, pa+=PGSIZE) {
+           pte_t * pte = pgdir_walk(pgdir, (const void *) va, 1);
+           *pte |= pa | perm | PTE_P;
+     }
+
+  #else
+     if (va % PTSIZE == 0 && size % PTSIZE == 0 && pa % PTSIZE == 0) {
+           // Es una Large Page
+           for (size_t i = 0; i < size/PTSIZE; i++, va += PTSIZE, pa +=
PTSIZE) {
+                 // Obtengo la PDE
+                 pde_t * pde = pgdir + PDX(va);
+                 // Escribo la dirección fisica de la página larga en la PDE,
+                 // seteando los flags perm, PTE_PS (large page) y PTE_P
(present)
+                 *pde = pa | perm | PTE_PS | PTE_P;
+           }
+     } else {
+           // Es una Short Page
+           assert(va % PGSIZE == 0);
+           assert(pa % PGSIZE == 0);
+           assert(size % PGSIZE == 0);
+           assert(perm < (1 << PTXSHIFT));
+
+           for (size_t i = 0; i < size/PGSIZE; i++, va+=PGSIZE, pa+=PGSIZE) {
+                 pte_t * pte = pgdir_walk(pgdir, (const void *) va, 1);
+                 *pte |= pa | perm | PTE_P;
+           }
+     }
+
+  #endif
 }

 //
@@ -380,7 +552,35 @@ boot_map_region(pde_t *pgdir, uintptr_t va, size_t size,
physaddr_t pa, int perm
 int
 page_insert(pde_t *pgdir, struct PageInfo *pp, void *va, int perm)
 {
-     // Fill this function in
+     pte_t * pte = pgdir_walk(pgdir, va, 1);
+
+     if (pte == NULL) {
+           // pgdir_walk pudo fallar por falta de memoria
+           return -E_NO_MEM;
+     }
+
+     // Actualizamos el estado de PageInfo
+     // Antes de page_remove ya que esta funcion
+     // puede llegar a liberar la pagina si es la ultima
+     // referencia. Esto evita el caso borde
+     pp->pp_ref++;
+
+     if (*pte & PTE_P) {
+           // Si ya estaba ocupada la removemos
+           page_remove(pgdir, va);
+     }
+
+     // Obtenemos la direccion fisica del struct PageInfo
+     physaddr_t padrr = page2pa(pp);
+
+     // No hace falta el shift porque los 12 bits de phadrr son 0
+     // pues las paginas estan alineadas a multiplos de 4096
+     // seteamos la direccion fisica y los permisos
+     *pte = padrr | perm | PTE_P;
+
+     // pp_link ya fue puesto a null en la llamada
+     // correspondiente a page_alloc
+
      return 0;
 }

@@ -395,11 +595,32 @@ page_insert(pde_t *pgdir, struct PageInfo *pp, void *va,
int perm)
 //
 // Hint: the TA solution uses pgdir_walk and pa2page.
```

```
 //
+
+/*
+     Dada una dirección virtual nos da un PageInfo
+     pgdir_walk(VA) = direccion virtual de la entrada a la página
+     pte_t * p = pgdir_walk(va)
+     phys f = PTE_ADR(*p)          // me da la dirección fisica
+     pa2page(f) -> Me retorna la página de la dirección física y retornamos
esto
+*/
+
 struct PageInfo *
 page_lookup(pde_t *pgdir, void *va, pte_t **pte_store)
 {
-     // Fill this function in
-     return NULL;
+     pte_t * pte = pgdir_walk(pgdir, va, 0);
+
+     if (pte == NULL || !(*pte & PTE_P)) {
+           // No hay pagina mapeada para va
+           return NULL;
+     }
+
+     if (pte_store) {
+           // Guardamos en pte_store la direccion de PTE
+           *pte_store = pte;
+     }
+
+     physaddr_t page_paddr = PTE_ADDR(*pte);
+     return pa2page(page_paddr);
 }

 //
@@ -417,10 +638,29 @@ page_lookup(pde_t *pgdir, void *va, pte_t **pte_store)
 // Hint: The TA solution is implemented using page_lookup,
 //   tlb_invalidate, and page_decref.
 //
+
+/*
+     Recibe un VA y hace dos cosas:
+     - decref(pagina) (es una función que ya esta implementada)
+           decrementa el pageref y si queda en cero llama a free de la pagina
automaticamente.
+     - limpiar PTE (Pone la page table entry a cero)
+*/
 void
 page_remove(pde_t *pgdir, void *va)
 {
-     // Fill this function in
+     pte_t * pte;
+
+     // Conseguimos el struct PageInfo asociado y guardamos su PTE
+     struct PageInfo * page_to_remove = page_lookup(pgdir, va, &pte);
+
+     // Decrementamos pp_ref y liberamos si es necesario
+     page_decref(page_to_remove);
+
+     // Escribimos PTE en 0
+     *pte = 0;
+
+     // Realizamos la invalidacion de la entrada de la TLB
+     tlb_invalidate(pgdir, va);
 }

 //
@@ -671,7 +911,6 @@ check_page(void)
      void *va;
      int i;
      extern pde_t entry_pgdir[];
-
      // should be able to allocate three pages
      pp0 = pp1 = pp2 = 0;10
      assert((pp0 = page_alloc(0)));
```