

Entrada/Salida

Organización del Computador I

Segundo Cuatrimestre 2022

Departamento de Computación - FCEyN
UBA

Introducción

Hasta ahora vimos:

- Representación de números enteros y decimales
- Circuitos combinatorios y secuenciales
- Un poco de programación en assembler de ORGA1
- Arquitectura y microarquitectura

Pero...

¿Podríamos conectarnos con el mundo exterior?

¿Tendría algún sentido?

¿Y cómo lo haríamos?

¡Interactuamos con el mundo exterior a través de los dispositivos de E/S!

- **Entrada:** teclado, mousepad, lector de huella, webcam, etc.
- **Salida:** monitor, placa de sonido, impresora, etc.
- **Entrada/Salida:** disco rígido, router, usb flash, etc.

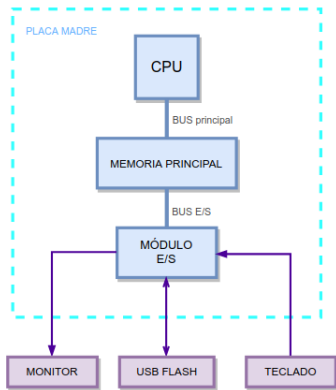
¿Cómo intercambiamos información con un dispositivo de E/S?

Intercambio de información con un dispositivo de E/S

Cada dispositivo de E/S tiene sus propios registros en los que la CPU puede leer o escribir datos.

Tipos de registro:

- **Lectura** (para dispositivos de Entrada)
- **Escritura** (para dispositivos de Salida)
- **Lectura/Escritura** (para E/S)



Métodos de acceso a los registros

¿Qué instrucciones nos permiten acceder a estos registros?

Hay dos maneras de referirse a ellos:

- E/S independiente (instrucciones especiales: IN y OUT).
Espacio de direcciones independiente
- E/S mapeado a direcciones de memoria.
Direcciones de memoria principal reservadas para E/S (Utilizaremos este en la práctica)

Es por eso que ORGA1 reserva las direcciones de memoria 0xFFFF0 a 0xFFFF para los dispositivos de E/S.

Métodos de control de E/S

¿Y cómo controlamos estos dispositivos? Primero pensemos un poco en problemas de la vida diaria:



Ir a beldía por el control del proyector



Ir al baño

Métodos de control de E/S



Ir a beldía por el control
del proyector

- Tengo que revisar constantemente si llegó o no el control para el proyector
- No necesito moverme de donde estoy o ir-me de la clase
- No me doy cuenta que el control llegó hasta que pregunto por este.



Ir al baño

- Tengo un aviso o interrupción cuando necesito ir al baño
- Necesito levantarme e ir físicamente al baño, dejando lo que estoy haciendo
- Al volver tengo que saber lo que estaba haciendo!

Volviendo a Orga1, podemos controlar la interacción con los dispositivos de E/S de dos formas:

- **Polling** (como el ejemplo de esperar a que llegue el control)
- **Interrupciones** (como el ejemplo de ir al baño)

Métodos de control de E/S: Polling

- El sistema posee al menos un registro exclusivo para cada dispositivo, la CPU los debe monitorear constantemente.
- Cuando la CPU *detecta* que en algún registro hay un dato de relevancia, entonces actúa según corresponda.
- Es el método más lento, pero que tiene una complejidad baja en cuanto al hardware. El Módulo de E/S se conecta solo con la Memoria, no tiene conexión con la CPU.

Métodos de control de E/S: Interrupciones

- La CPU no está constantemente monitoreando los registros.
- Cada dispositivo interrumpe a la CPU al enviar una señal de interrupción.
- Es por eso que hay una conexión entre el Módulo E/S y la CPU.
- La CPU debe interrumpir su tarea para atender al dispositivo. Para ello guarda la información del contexto actual, carga la dirección de la rutina de atención de interrupción, la ejecuta y al terminar restaura el estado anterior.

¿Y si quiero mover grandes volúmenes de datos?

- El Módulo de DMA controla la transferencia de datos entre el dispositivo E/S y la memoria sin pasar por el procesador.
- Puede avisarle al procesador que la transferencia está lista por medio de una interrupción, o se puede hacer polling sobre el dispositivo DMA para averiguarlo.
- Este controlador comparte el mismo BUS de datos con el que la CPU se comunica con la Memoria y además se conecta con la CPU para el envío de diferentes señales.

Estructura de manejo de E/S utilizando polling

¿En qué casos utilizamos polling?

- Se tiene un sensor que mide un valor de la realidad. Por ejemplo: temperatura, humedad, cantidad de veces que un objeto fue detectado por el sensor.
- Un sensor que no tiene memoria ni capacidad de interrumpir.
- La CPU no tiene otra cosa para hacer o disponemos de múltiples unidades de procesamiento (múltiples cores).
- Se conoce que el sensor muestra valores con cierta frecuencia. Los valores que no se leen en ese intervalo de tiempo, se pierden.

Estructura típica

Enunciado típico En el siguiente programa, monitoreamos la temperatura y cantidad de mediciones que nos da un sensor mapeado a la dirección 0xFFFF0. Los valores posibles de temperatura van en el rango 0x00 y 0xFF (0-255 decimal).

- Realizar el mapeo de registros.
- Dar una rutina en lenguaje ensamblador para acumular la suma de las temperaturas medidas y contar la cantidad de mediciones tomadas.

Mapeo de registros en memoria

Registro de lectura | Dirección 0xFFFF0 | Valores posibles: 0x00 - 0xFF

Programa

| | | |
|-------------------|--------------------|--------------------------------|
| comienzaPrograma: | MOV R0, 0x0000 | ;En R0 tengo las temperaturas |
| | MOV R1, 0x0000 | ;En R1 cuento las mediciones |
| GuardoMedición: | ADD R0, [0xFFFF0] | ;Sumo el valor de temperatura |
| | INC R1 | ;Cantidad de mediciones ++ |
| | JMP GuardoMedición | ;Continúo guardando mediciones |

¿Cómo venimos?

Interrupciones

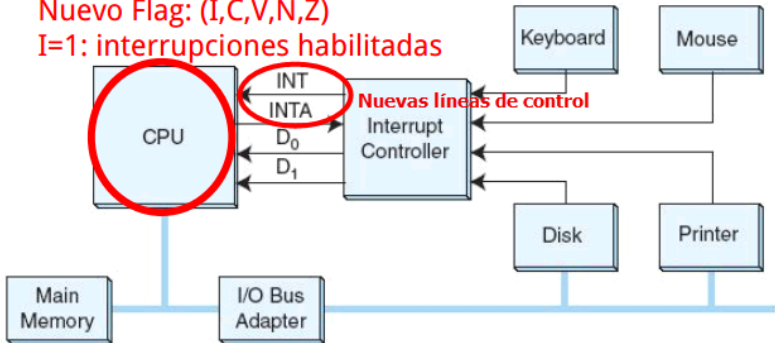
El procesador ORGA1i

El procesador ORGA1I es una extensión de ORGA1 con la capacidad de atender una única interrupción (enmascarable) de un dispositivo de E/S.

- **Nuevas señales:**
 - Entrada: INT (pedido de interrupción)
 - Salida: INTA (reconocimiento de interrupción)
- **Nuevo flag:** I, que indica si el procesador puede ser interrumpido.
- **Nuevo registro:** PSW (Program Status Word), donde se almacenan los flags.
- **Nuevas instrucciones:**
 - CLI y STI, que setean el flag I en 0 y 1 respectivamente.
 - PUSH Ri, cuyo efecto es $[SP] = Ri$ y luego $SP = SP - 1$.
 - POP Ri, cuyo efecto es $SP = SP + 1$ y luego $Ri = [SP]$.
 - IRET, cuyo efecto es $PC = [SP + 1]$, $PSW = [SP + 2]$ y $SP = SP + 2$.
- **Nueva dirección reservada:** 0x0000, donde se indica la dirección de la rutina de atención de las interrupciones.

El procesador ORGA1i

Nuevo Flag: (I,C,V,N,Z)
I=1: interrupciones habilitadas



¡Recuerden que esto está en la clase teórica!

¿Qué pasa cuando interrumpen a la CPU?

En el caso del procesador ORGA1I, si el dispositivo de E/S activa la señal de interrupción y el flag I vale 1, este termina de ejecutar la instrucción en curso y realiza los siguientes pasos

atómicamente:

- Asigna $[SP] = PSW$ y decrementa SP.
- Asigna $[SP] = PC$ y decrementa SP.
- Realiza $I \leftarrow 0$ para evitar que el procesador vuelva ser interrumpido.
- Asigna $PC = [0x0000]$.
- Activa la señal INTA para indicarle al dispositivo que atenderá su pedido.

Seguidamente comienza a ejecutarse la rutina de atención de la interrupción propiamente dicha.

Estructura de manejo de E/S utilizando interrupciones

¿En qué casos utilizamos interrupciones?

- Tenemos un dispositivo que puede enviar un mensaje de interrupción.
- Típicamente tiene asociado un controlador de interrupciones.
- El protocolo de comunicación está bien definido, nos interrumpen cada vez que hay un nuevo valor disponible.

Enunciado típico se quiere guardar los valores numéricos que genera un usuario a través de un teclado, solo se recibirán valores del 0 al 9 y se guardarán tan solo los últimos 4 dígitos presionados. Los distintos valores ingresados por el usuario estarán mapeados a memoria en el registro INPUT_USER. Se desean acumular los últimos 4 dígitos presionados en el registro R3.

Mapeo de registros en memoria INPUT_USER | 0xFFFF0 | Valores posibles: 0x0 - 0x9

Rutina de atención a la interrupción

```
rut_at_int:  PUSH R0 ; Guardamos el valor de R0
             MOV R0, [0xFFFF0] ; Obtenemos el nuevo valor
             SHL R3, 4 ; Movemos 4 bits a izquierda para acumular el nuevo valor
             ADD R3, R0 ; Sumamos el valor de R0 y acumulamos
             POP R0 ; Restauramos el valor original de R0
             IRET
```


Ejercicios

Ejercicio 1

Se tiene una computadora ORGA1i para monitorear el estado de una montaña rusa y actuar acorde a cada uno. Para ello, cuenta con dos dispositivos de E/S que actúan como sensores, una alarma y otro que efectúa una parada de emergencia.

Cada sensor posee un registro de E/S que reporta lo siguiente:

- Velocidad: Mide la velocidad del carrito de la montaña rusa (VEL_STATUS).
- Frenos: Mide el estado de los frenos (BR_STATUS).

Las etiquetas MAX_SPEED y MIN_BRAKES son constantes de 16 bits.

La alarma posee un registro ALARMA con el que se activan las alarmas al setearse algún bit en 1. El bit menos significativo representa la alarma de velocidad, que indica que el carrito está yendo muy rápido. El segundo bit representa el estado de los frenos comunes e indica que hubo un problema con ellos y se activarán los frenos de emergencia. Las alarmas se apagan manualmente por fuera del sistema.

El dispositivo de frenos de emergencia posee un registro de E/S de escritura (FRENOS_EM) que los activa al detectarse un problema con los frenos comunes. Para ello deben setearse todos sus bits en 1.

Ejercicio 1 (cont.)

1. Mapear los registros de E/S a direcciones de E/S de ORGA1I.
2. Realizar el código para sensor y activar las alarmas correspondientes.
3. Suponiendo que cada ciclo de instrucción del programa demora 3 ms y los valores máximos nunca son alcanzados ¿Cuál es la frecuencia (en Hz) de muestreo (lectura) de los sensores? ¿Y si todos los sensores sobrepasan los máximos?

Mapeo de registros:

- VEL_STATUS \mapsto 0xFFF0
- BR_STATUS \mapsto 0xFFF1
- ALARMA \mapsto 0xFFF2
- FRENOS_EM \mapsto 0xFFF3

Solución 1.b)

```
MIN_BRAKES:    DW ....
MAX_SPEED:     DW ....
senzarVel:     CMP [0xFFF0], [MAX_SPEED] ;¿se alcanzó velocidad máxima?
               JL sensaFrenos
               OR [0xFFF2], 0x0001
sensaFrenos:   CMP [0xFFF1], [MIN_BRAKES] ;¿hay problema con los frenos?
               JG sensaVel
               MOV [0xFFF3], 0xFFFF
               OR [0xFFF2], 0x0002
               JMP sensaVel
```

Solución 1.c)

De no alcanzarse los valores máximos, cada iteración ejecutará 4 instrucciones. Por lo tanto, cada iteración tardará $4 * 3$ ms.

Como sólo podemos realizar una lectura por iteración, cada señal será leída cada $4 * 3$ ms.

Finalmente (y sabiendo que $1000 \text{ ms} = 1 \text{ s}$), la frecuencia de muestreo será de $\frac{1000}{4*3} = 83,33 \text{ Hz}$.

En cambio, de sobrepasarse los valores máximos, cada iteración ejecutaría 8 instrucciones, tardando $8 * 3$ ms.

Cada señal se leería cada $8 * 3$ ms, dando una frecuencia de muestreo de $\frac{1000}{8*3} = 41,66 \text{ Hz}$.

Ejercicio 2

El dueño de la montaña rusa decidió invertir en un nuevo sensor para los frenos. Este nuevo sensor solicita una interrupción al detectar un inconveniente con los frenos comunes.

- a) Escribir la rutina de atención de la interrupción del sensor de frenos.
- b) Modificar el programa presentado para aprovechar esta característica y aumentar la frecuencia de muestreo.
- c) Calcular la nueva frecuencia de muestreo para el sensor de velocidad.
- d) ¿Cuál sería el estado de la memoria al cargar el programa si se pide que la rutina principal se cargue a partir de la posición 0xAAAA y la de atención de la interrupción 20 posiciones antes?

Rutina de atención de la interrupción

```
rut_at_int:  MOV [0xFFF3], 0xFFFF  
            OR  [0xFFF2], 0x0002  
            IRET
```

Modificación

```
sensaVel:  CMP [0xFFF0], [MAX_SPEED] ;¿se alcanzó la velocidad máxima?  
            JL sensaVel  
            OR  [0xFFF2], 0x0001  
            JMP sensaVel
```


Solución 2)

Muestreo

De no alcanzarse el valor máximo, cada iteración ejecutaría 2 instrucciones, resultando en una frecuencia de muestreo de $\frac{1000}{2*3} = 166,66$ Hz.

En cambio, de sobrepasarse este valor, cada iteración ejecutaría 4 instrucciones, dando una frecuencia de $\frac{1000}{4*3} = 83,33$ Hz.

Estado de la memoria

La rutina principal se cargaría a partir de la dirección 0xAAAA y la de atención de la interrupción a partir de 0xAA96.

Consecuentemente, en la posición 0x0000 cargaríamos 0xAA96, la dirección en que se cargó la rutina de atención.

Ejercicio 3

Se cuenta con un dispositivo capaz de almacenar agua en un tanque y dejarla pasar a través de una exclusiva cuando su operario lo disponga. El sistema es de llenado automático con una luz que avisa cuando el tanque está lleno. Se desea controlarlo con un procesador ORGA1I, notando que posee:

- un BOTÓN presionable por el usuario. Su estado se ve reflejado en el registro VAL_BOTON: de estar presionado vale 0xB010, si no 0x0000.
- un LED que debe encenderse cuando el tanque esté lleno para indicar que el sistema está listo para volver a utilizarse. Su registro es LED_STATE, para encenderlo se debe escribir 0xFFFF y para apagarlo, 0x0000.
- una EXCLUSIVA que permite dejar pasar el agua. Para abrirla se debe escribir continuamente el valor 0xAB1E en el registro SALIDA. En cambio, para cerrarla se debe escribir 0xCE11.
- un NIVEL que produce una interrupción cuando el agua sobrepasa los límites permitidos. Al producirse la interrupción, se escribe 0xA17A en el registro NIV_AGUA si el agua superó el límite superior, y 0xBA1A si superó el inferior.
- una CANILLA que deja entrar agua al tanque. La abrimos escribiendo 0xADE7 en el registro CANILLA_ST, y la cerramos escribiendo 0x00FF.

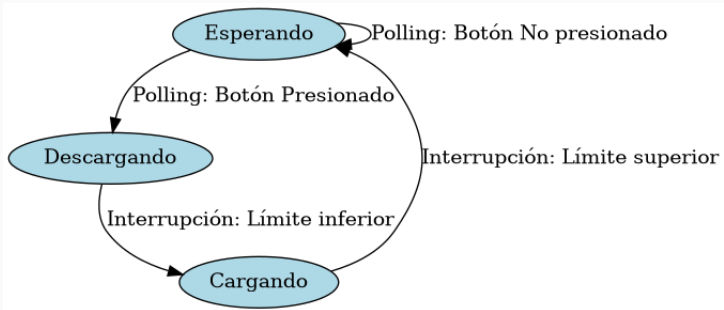
El dispositivo debe funcionar de la siguiente manera:

- Al presionarse el botón se debe abrir la exclusiva para dejar circular el agua, y apagar el LED.
- Se debe mantener este estado hasta que el dispositivo sea interrumpido por pasarse del límite inferior de agua. En ese momento debe cerrarse la exclusiva y abrirse la canilla.
- Tras ser interrumpido el dispositivo por haberse superado el límite superior de agua, debe cerrarse la canilla y prenderse el LED.

Se pide:

- a) Describir los estados por los que pasa el sistema.
- b) Mapear los registros de E/S a direcciones de E/S de la máquina ORGA1I.
- c) Escribir el pseudocódigo de cómo opera la máquina ORGA1I.
- d) Escribir en lenguaje ensamblador la rutina principal y la rutina de atención de interrupciones.

Solución 3.a - máquina de estados



:

Solución 3.a) y 3.b)

Estados:

- Esperando
- Descargando agua
- Cargando agua

Mapeo de registros:

- NIV_AGUA \mapsto 0xFFF0
- LED_STATE \mapsto 0xFFF1
- VAL_BOTON \mapsto 0xFFF2
- SALIDA \mapsto 0xFFF3
- CANILLA_ST \mapsto 0xFFF4

Pseudocódigo de la rutina principal

```
ESTADO = ESPERANDO;
while(true){
    if(ESTADO == ESPERANDO){
        SALIDA = 0xCE11;
        LED_STATE = 0xFFFF;
        CANILLA_ST = 0x00FF;
        if(VAL_BOTON == 0xB010){
            ESTADO = DESCARGANDO;
        }
    }
}

else if(ESTADO == DESCARGANDO){
    SALIDA = 0xAB1E;
    LED_STATE = 0x0000;
    CANILLA_ST = 0x00FF;
}

else if(ESTADO == CARGANDO){
    SALIDA = 0xCE11;
    LED_STATE = 0x0000;
    CANILLA_ST = 0xADE7;
}
}
```

Pseudocódigo de la rutina de atención de interrupciones

```
if(NIV_AGUA == 0xA17A){  
    ESTADO = ESPERANDO;  
}  
else if(NIV_AGUA == 0xBA1A){  
    ESTADO = CARGANDO;  
}  
IRET();
```

Solución 3.d) - Rutina principal

```
; R1 --> ESTADO: 0x000 (esperando)
; 0x0001 (descargando), 0x0002(cargando)

inicio:    MOV R1, 0x0000      ;
           CMP R1, 0x0000      ; ¿esperando?   descargando: MOV [0xFFFF3], 0xAB1E ; SALIDA
           JE esperando        ;               MOV [0xFFFF1], 0x0000 ; LED_STATE
           CMP R1, 0x0001      ; ¿descargando?   MOV [0xFFFF4], 0x00FF ; CANILLA_ST
           JE descargando      ;               JMP fin ;
           CMP R1, 0x0002      ; ¿cargando?       cargando:  MOV [0xFFFF3], 0xCE11 ; SALIDA
           JE cargando         ;               MOV [0xFFFF1], 0x0000 ; LED_STATE
           JMP fin             ;               MOV [0xFFFF4], 0xADE7 ; CANILLA_ST
esperando: MOV [0xFFFF3], 0xCE11 ; SALIDA         JMP fin ;
           MOV [0xFFFF1], 0xFFFF ; LED_STATE     cmb_estado: ADD R1, 0x0001 ;
           MOV [0xFFFF4], 0x00FF ; CANILLA_ST     fin:      JMP inicio ;
           CMP [0xFFFF2], 0xB010 ; ¿botón presionado?
           JE cmb_estado      :
           JMP fin            ;
```


Solución 3.d) Rutina de atención de interrupciones

```
rut_ate_int: CMP [0xFFFF0], 0xA17A ; NIV_AGUA
              JNE otro                ;
              MOV R1, 0x0000          ; cambiamos el estado a esperando
otro:         CMP [0xFFFF0], 0xBA1A ; NIV_AGUA
              JNE fin_int             ;
              MOV R1, 0x0002          ; cambiamos el estado a cargando
fin_int:      IRET                    ;
```

Cierre

Bibliografía:

- **Capítulo 7** *Computer Organization and Architecture* (Linda Null & Julia Lobur)

¿Cómo seguimos?

- Con esta clase ya tienen todo lo necesario para encarar el **Taller de Interrupciones.**