

## PRÁCTICA 1: DESARROLLO DE CÓDIGO PARA EL PROCESADOR ARM

### INTRODUCCIÓN

Este documento es el guion para la realización de la primera práctica de la asignatura Proyecto Hardware del Grado en Ingeniería Informática de Escuela de Ingeniería y Arquitectura la Universidad de Zaragoza.

En esta primera práctica vamos a optimizar el rendimiento de un juego acelerando las funciones computacionalmente más costosas. A partir del código facilitado en C, se desarrollará código para un procesador ARM y se ejecutará tanto sobre un procesador real en la placa de desarrollo como sobre un emulador en el PC. Para ello, tendremos que aprender a trabajar con el entorno de desarrollo Eclipse + gcc del laboratorio y con la placa (Embest S3CEV40). En esta placa el procesador está acompañado de múltiples dispositivos, principalmente de entrada/salida.

También se deberá entender la funcionalidad del código suministrado y realizar una versión en ensamblador ARM optimizando las funciones críticas. Se medirá el rendimiento respecto al código optimizado generado por el compilador y se documentarán los resultados.

Se medirá tamaño en bytes, número de instrucciones ejecutadas y tiempo de ejecución. Para medir el tiempo se programarán los temporizadores internos de la placa. Se verificará que todas las versiones del código den un resultado equivalente.

Introducción .....	1
Objetivos .....	2
Conocimientos previos necesarios .....	2
Entorno de trabajo .....	2
Material adicional.....	3
Estructura de la práctica.....	3
El juego: Reversi .....	4
¿Cómo funciona el código facilitado? .....	9
Apartado opcional 1: .....	12
Apartado opcional 2: .....	12
Evaluación de la práctica .....	13
Anexo 1: Realización de la memoria .....	13
Anexo 2: Entrega de la memoria .....	13

## OBJETIVOS

- Interactuar con una placa real y ser capaces de ejecutar en ella y sobre el simulador
- Profundizar en la interacción C / Ensamblador.
- Ser capaces de depurar el código ensamblador que genera un compilador a partir de un lenguaje en alto nivel.
- Gestionar la entrada/salida con dispositivos básicos, asignando valores a los registros internos de la placa desde un programa en C (utilizando las librerías de la placa).
- Aprender a desarrollar en C las rutinas de tratamiento de interrupción.
- Aprender a utilizar periféricos reales, como los temporizadores internos de la placa.
- Conocer la estructura segmentada en tres etapas del procesador ARM 7, uno de los más utilizados actualmente en sistemas empuotrados.
- Familiarizarse con el entorno Eclipse sobre Windows7, con la generación cruzada de código para ARM y con su depuración.
- Desarrollar código en ensamblador ARM: adecuado para optimizar el rendimiento.
- **Optimizar** código tanto en ensamblador ARM como utilizando el las opciones del compilador optimizador.
- Entender la finalidad y el funcionamiento de las **Application Binary Interface**, ABI, en este caso el estándar **AATPCS** (*ARM Application Procedure Call Standard*), y combinar de manera eficiente código en ensamblador con código en C.
- Saber depurar código siguiendo el estado arquitectónico de la máquina: contenido de los registros y de la memoria.
- Gestionar el tiempo de trabajo del proyecto correctamente en función de la disponibilidad de acceso al sistema específico.

## CONOCIMIENTOS PREVIOS NECESARIOS

En esta asignatura cada estudiante necesitará aplicar contenidos adquiridos en asignaturas previas, en particular, Arquitectura y Organización de Computadores I y II.

## ENTORNO DE TRABAJO

Esta práctica se realiza con **Eclipse**, que está instalado en el laboratorio 0.5b reservado para la asignatura, junto con las herramientas de **gcc** para compilación cruzada y el complemento (*plug-in*) para simular procesadores ARM7TDMI.

Ejecutaremos nuestro código también directamente en la placa **Embest S3CEV40**. Para ello, se incluye un soporte especial que facilita conectarse a la placa de desarrollo a través del puerto **JTAG** permitiendo la ejecución paso a paso y acceso en tiempo real al estado tanto del procesador (incluyendo palabra de estados y registro) y memoria.

En el apartado **Depuración sobre la placa ARM** del documento **GuiaEntorno.pdf** se detallan los pasos a seguir para conectarnos a las placas y depurar el código en ellas.

**IMPORTANTE:** Las placas sólo pueden usarse en el **laboratorio 0.5b** durante el horario reglado de la asignatura, hay partes de esta práctica requieren hardware específico y **no se puede hacer fuera del laboratorio**.

Los pasos a seguir para configurar el entorno de trabajo (*workspace*) están detallados en el archivo: "**guía del entorno**" (el código que se usa es distinto, pero los pasos a seguir son los mismos). En concreto, en la página 3 se indica la creación de un proyecto y en la página 16 "depuración sobre el simulador". Dadas las características concretas de nuestro laboratorio existen pequeñas diferencias:

- Es preciso añadir a la variable de entorno **PATH** el camino correcto al compilador (antes del punto 9 de la página 4) y al depurador (al final del punto 2 de la página 17). Este paso está detallado en la documentación publicada en la web de la asignatura.
- No es recomendable trabajar en local (que es lo que indica la guía del entorno en el punto 2). Debéis trabajar en un directorio en el que tengáis permisos de lectura y escritura y trabajar con *paths* cortos (Eclipse no reconoce los *paths* largos). Por ejemplo **D:\Workspace\%USERNAME%** es una buena elección.

#### MATERIAL ADICIONAL

En el curso Moodle de la asignatura puede encontrarse el siguiente material de apoyo:

- Cuadernos de prácticas de una asignatura de la Universidad Complutense que usa el mismo entorno de trabajo y las mismas placas.
  - **EntradaSalida.pdf**: Describe los principales elementos de entrada salida que tiene la placa, incluyendo los que vamos a utilizar en esta práctica. **Debéis estudiarlo en detalle.**
  - **P2-ec.pdf**: Describe la gestión de excepciones y el mapa de memoria que vamos a usar. **Debéis estudiarlo en detalle.**
- Breve resumen del repertorio de instrucciones ARM.
- Manual de la arquitectura ARM.
- Fuentes del juego.
- Directrices para redactar una memoria técnica, imprescindible para redactar la memoria de la práctica.
- Un proyecto de ejemplo que utiliza el **timer 0** de la placa.
- Documentación original de la placa (proporcionada por la empresa desarrolladora): muy útil para ver más detalles sobre la entrada / salida.

#### ESTRUCTURA DE LA PRÁCTICA

La práctica completa se debe realizar en 3 sesiones y será la base para la práctica siguiente, la 4ª semana tendrá lugar la entrega presencial del trabajo y una semana

después la memoria a través de Moodle. Las fechas concretas se anunciarán en el sitio web de la asignatura (Moodle).

Hay partes de esta práctica que requieren la placa para poder ser realizadas, otras no. El trabajo de la asignatura se realiza tanto dentro del laboratorio, como fuera del mismo.

Antes de la primera sesión es imprescindible haberse leído este guión y conocer la documentación suministrada. Para entrar en la segunda sesión de prácticas es necesario traer el código fuente de los apartados 3, 4 y 7 lo más avanzados posible. La tercera sesión se debería dedicar a realizar las métricas de los apartados 8 y 9, por lo que se deberá mostrar antes de empezar el correcto funcionamiento de todo lo anterior.

## EL JUEGO: REVERSI

El **Reversi** (también conocido como Othello) es uno de los juegos de tablero más populares en el mundo. La clave de su éxito es que las reglas son muy sencillas, aunque jugar bien es muy difícil.

Cierta empresa quiere lanzar un sistema que juegue al Reversi contra una persona y que se ejecutará en un procesador ARM7. Como primer paso han escrito una versión beta del programa en C (como versión beta está sujeta a fallos, avisad si veis alguno). Pero no están contentos con el tiempo de cálculo del código y os piden que lo reduzcáis. Para ello os proponen acelerar la función más crítica del código: **patron\_volteo()**.

## TAREAS A REALIZAR

En esta primera práctica nos centraremos en la implementación eficiente de las que en principio se consideran las funciones más críticas.

Por tanto, tenéis que:

**Paso 1: Estudiar la documentación.**

**Paso 2: Estudiar y depurar el código inicial del juego.**

Estudiar el código inicial en C y la especificación de las funciones **patron\_volteo()** y **ficha\_valida()** -esta última es invocada desde **patron\_volteo()**-.

- Crear los proyectos para poder ejecutar, tanto sobre la placa, como sobre el simulador.
- Debéis monitorizar la **ejecución de ambas funciones en C, verificando** sobre el tablero en memoria **la correcta ejecución**.
- Observar el código en ensamblador generado por el compilador y depurarlo paso a paso, prestar atención a los cambios en memoria y en los registros del procesador.

**Paso 3: Realizar `patron_volteo_arm_c()` en ensamblador ARM.** Realiza una función equivalente a `patron_volteo()` en ensamblador ARM, aplicando las optimizaciones que consideres oportuno, pero manteniendo la llamada a la función en C `ficha_valida()` original.

El código ARM debe tener la misma estructura que el código C: cada función, cada variable o cada condición que exista en el código C debe poder identificarse con facilidad en la versión de ensamblador. Para ello se deberán incluir los comentarios oportunos.

**IMPORTANTE: DEBE MANTENERSE LA MODULARIDAD DEL CÓDIGO.** Es decir no se puede eliminar la llamada a la función `ficha_valida()` e integrarla dentro de la función `patron_volteo_arm_c()`. No se puede eliminar la llamada, o eliminar el paso de parámetros. Tampoco se puede acceder a las variables locales de una función desde otra. Esto último es un fallo muy grave que implica un suspenso en la práctica.

Cuando hagáis la llamada en ensamblador debe ser una llamada convencional a una función. Es decir, hay que pasar los parámetros, utilizando el estándar **AATPCS** (*ARM Application Procedure Call Standard*), a través de los registros correspondientes. No sirve hacer un salto sin pasar parámetros.

El marco de pila (o bloque de activación) de las distintas combinaciones debe ser idéntico al creado por el compilador para que la comparación sea justa. La descripción del marco de pila utilizado deberá aparecer convenientemente explicado en la memoria.

En todos los casos se debe garantizar que una función no altere el contenido de los registros privados de las otras funciones.

**Paso 4: Realizar una nueva función `patron_volteo_arm_arm()`.** La función `ficha_valida` ha sido creada por el programador como función independiente por claridad y legibilidad del código. Sin embargo, solo se le llama desde `patron_volteo`, por ello se puede eliminar dicha llamada incrustando (inlining) el código de la misma en vuestra función en ARM. De esa forma nos evitamos el llamar a la subrutina y las sobrecargas asociadas a esta operación.

Crea una nueva función `patron_volteo_arm_arm()` con esta configuración.

**IMPORTANTE: DEBE MANTENERSE EL ALGORITMO DEL CÓDIGO.** Es decir no se puede modificar en las versiones ARM el algoritmo realizado en C. Por ejemplo pasar de recursivo a iterativo. En caso de querer hacer pequeñas modificaciones en el algoritmo es mejor consultarlo primero con el profesor.

Dejamos como apartado opcional el realizar `patron_volteo` iterativo en ensamblador, pero en ese caso se debe crear una versión en alto nivel equivalente para compararlas. (Consultar apartados opcionales al final del guión)

**Paso 5: Verificación automática y comparación de resultados.** Los procesos de verificación y optimización son una parte fundamental del desarrollo del software y deben de tenerse en cuenta desde el principio del tiempo de vida del software.

Tenemos diversas implementaciones de **patron\_volteo** (C-C, C-ARM-C, C-ARM). Como durante la fase de desarrollo del código en ARM es muy fácil que se cometa algún error **no** fácilmente **detectable al depurar** a mano. Vuestro código debe **verificar que las combinaciones generan la misma salida**. Este proceso lo tendréis que realizar múltiples veces, por lo que **se debe automatizar**.

Crear una nueva función **patrón\_volteo\_test** con las mismas entradas y salidas que **patrón\_volteo** original. Dentro de esta función se llamará a las diferentes versiones (**patron\_volteo**, **patron\_volteo\_arm\_c** y **patron\_volteo\_arm\_arm**) comprobando que el resultado coincide. Si no coinciden, la función indicará el error, se quedará en un bucle infinito y no retornará.

No tiene sentido probar cada vez todas las posibles combinaciones de entradas. Sin embargo, sí que es deseable realizar las comprobaciones en un conjunto pequeño, pero representativo de todos los posibles casos. Diseñar un conjunto o vector de pruebas que cubra los principales escenarios. Razonar los experimentos.

El día de la corrección se debe realizar la verificación automática.

**Paso 6: Estudiar el proyecto ejemplo** del contador **timer0** que os proporcionamos.

- o Debéis entender cómo se controlan estos dispositivos, y cómo se comunican con el procesador a través de las interrupciones.
- o Debéis ejecutar paso a paso el ensamblador que se genera a partir del código C de las rutinas de tratamiento de interrupción.

El **timer0** se gestionará utilizando **interrupciones IRQ**. Las rutinas de tratamiento de interrupción se desarrollarán en C siguiendo la misma estructura que en el proyecto que os damos. El compilador se ocupará de algunos de los detalles a bajo nivel, pero debéis ser capaces de entender el código ensamblador que genera el compilador y explicar qué hace en cada paso. De nuevo, la descripción del marco de pila utilizado deberá aparecer convenientemente explicado en la memoria.

**Paso 7: Medidas de tiempo.** Debéis desarrollar una sencilla biblioteca que permita utilizar el **timer 2** para medir tiempos. La biblioteca constará de las siguientes funciones, esquematizadas en la Fig. 1:

- **void timer2\_inicializar():** configura el **timer 2** para que trabaje a la **máxima precisión** posible. El **reloj de la placa** está configurado a **64MHz**. Para aumentar el rango del contador, el temporizador generará una **interrupción** cada vez que haga una **cuenta completa** (queremos que la cuenta sea lo mayor posible para no sobrecargar en exceso al sistema con interrupciones). La biblioteca dispondrá de la variable interna **timer2\_num\_int**, compartida entre la interrupción y el resto de funciones de ese módulo, que llevará la cuenta de los periodos completos del temporizador. Al acabar la cuenta completa el temporizador se reinicia automáticamente al valor inicial y seguirá contando.
- **void timer2\_empezar():** reinicia la cuenta de tiempo (contador y la variable), y comienza a medir.
- **unsigned int timer2\_leer():** lee la cuenta actual del temporizador y el número de interrupciones generadas. Devuelve el tiempo transcurrido en microsegundos.

- **unsigned int timer2\_parar():** para la cuenta actual del temporizador y devuelve el tiempo transcurrido en microsegundos. El contador se parara no provocando más interrupciones (hasta que no se ponga en marcha de nuevo).

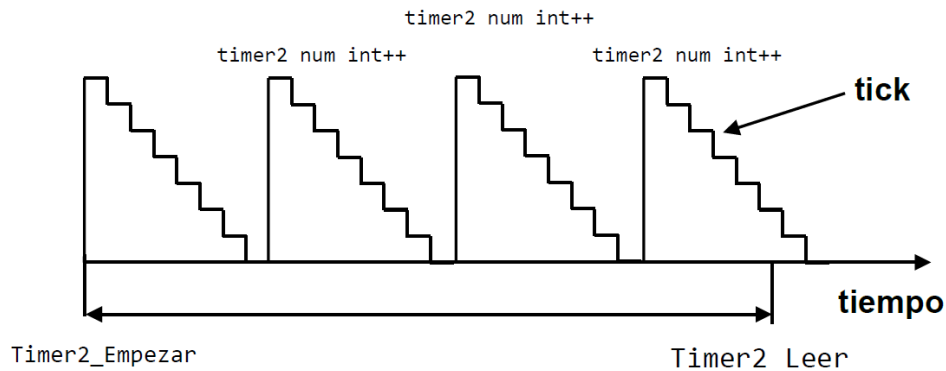


Fig. 1 Esquema del funcionamiento del timer 2

**IMPORTANTE:** comprobar que vuestra librería de medición está bien calibrada utilizando la función **Delay()** que podéis encontrar en **44b1ib.c**. Medid distintos retardos (1 ms, 10 ms, 1 s, 10 s) y aseguraos de que los resultados son parecidos. No tienen que ser idénticos dado que **Delay()** es una aproximación y por tanto es menos preciso que el método que vais a desarrollar. **Durante la corrección de la práctica deberéis tener todo preparado para hacer estas mediciones.**

**Paso 8: Medidas de rendimiento.** Una vez comprobado que vuestro código funciona bien en la placa y que vuestra biblioteca mide bien los tiempos, vamos a medir los tiempos de ejecución reales sobre el procesador de la placa.

Debéis **adaptar el juego** que habéis desarrollado en la primera parte, siguiendo el mismo esquema que en el proyecto que os hemos proporcionado e incluyendo vuestro código fuente de la parte anterior.

Estamos interesados en medir las funciones críticas (no en todo el programa completo). Debéis comparar el **tamaño del código** en **bytes** de cada versión de las funciones realizadas (C original, ARM, etc). También queremos **evaluar el tiempo de ejecución** de cada una de estas configuraciones al realizar el cálculo de ficha negra en fila 2 - columna 3. Calcular las métricas de las combinaciones y **razonar los resultados obtenidos**.

Los valores del tamaño de código, instrucciones ejecutadas y tiempos de ejecución debéis presentarlos en la entrega de la práctica **el día de la corrección**.

**Paso 9: Optimizaciones del compilador.** Por defecto el compilador de C genera un código seguro y fácilmente depurable (*debug*<sup>1</sup>) facilitando la ejecución paso a paso en alto nivel. Esta primera versión es buena para depurar, pero es muy ineficiente. Los compiladores disponen de diversas opciones de compilación o *flags* que permiten configurar la generación de código. En concreto hay un conjunto de opciones que permiten aplicar heurísticas de optimización de código buscando mejorar la velocidad

<sup>1</sup> Te sorprendería saber la cantidad de software comercial generado sin optimizar y en modo debug.



o el tamaño. Estas configuraciones se suelen especificar con los *flags* -00, -01, -02, -03, -0s.

**Estudiar el impacto en el rendimiento del código C de los niveles de optimización** (-00, -01, -02, -03, -0s) y compararlo con las otras versiones en rendimiento, tamaño y número de instrucciones ejecutadas. Como los cambios en el nivel de optimización solo afectan al código de alto nivel hecho en C, sólo es obligatorio hacer el estudio para la combinación C-C de funciones **patron\_volteo()** y **ficha\_valida()**. Siendo opcional en la combinación **patron\_volteo\_arm\_c** ya que os puede servir para verificar que vuestro código sigue correctamente el AAPCS.

**Compararlo con los resultados anteriores** y razonar la respuesta. Para ello, todos estos resultados deben estar disponibles **el día de la corrección** y quedar claramente reflejados y comentados **en la memoria**.

#### ALGUNOS CONSEJOS DE PROGRAMACIÓN EFICIENTE PARA OPTIMIZAR EL CÓDIGO

A la hora de evaluar este trabajo se valorará que cada estudiante haya sido capaz de optimizar el código ARM. **Cuanto más rápido** y pequeño sea el código (y menos instrucciones se ejecuten), **mejor será la valoración de la práctica**. También se valorará que se reduzcan los accesos a memoria.

Algunas ideas que se pueden aplicar son:

- No comencéis a escribir el código en ensamblador hasta tener claro cómo va a funcionar. Si diseñáis bien el código a priori, el número de instrucciones será mucho menor que si lo vais escribiendo sobre la marcha.
- Optimizar el uso de los registros. Las instrucciones del ARM trabajan principalmente con registros. Para operar con un dato de memoria debemos cargarlo en un registro, operar y, por último, y sólo si es necesario, volverlo a guardar en memoria. Mantener en los registros algunas variables que se están utilizando frecuentemente permite ahorrar varias instrucciones de lectura y escritura en memoria. Cuando comencéis a pasar del código C original a ensamblador debéis decidir qué variables se van a guardar en registros, tratando de minimizar las transferencias de datos con memoria.
- Utilizar instrucciones de transferencia de datos múltiples como LDMIA, STMIA, PUSH o POP que permiten que una única instrucción mueva varios datos entre la memoria y los registros.
- Utilizar instrucciones con ejecución condicional, también llamadas instrucciones predicadas. En el repertorio ARM gran parte de las instrucciones pueden predicarse. Por ejemplo, el siguiente código:

```
if (a == 2) { b++ }  
  
else { b = b - 2 }
```

Con instrucciones predicadas sería:

```
CMP    r0, #2           #compara con 2
```



```
ADDEQ r1,r1,#1          #suma si r0 es 2
SUBNE r1,r1,#2          #resta si r0 no es 2
```

Mientras que sin predicados sería:

```
CMP    r0, #2          #compara con 2
BNE    resta          # si r0 no es 2 saltamos a la resta
ADD    r1,r1,#1        #suma 1
B      cont          #continuamos la ejecución sin restar
Resta: SUBNE    r1,r1,#2    #resta 2
Cont:
```

Hay otros ejemplos útiles en las transparencias de la práctica.

- Utilizar instrucciones que realicen más de una operación. Por ejemplo la instrucción MLA r2,r3,r4,r5 realiza la siguiente operación:  $r2 = r3 \cdot r4 + r5$ .
- Utilizar las opciones de desplazamiento para multiplicar. Las operaciones de multiplicación son más lentas (introducen varios ciclos de retardo). Para multiplicar/dividir por una potencia de dos basta con realizar un desplazamiento que además puede ir integrado en otra instrucción. Por ejemplo:
  - $A = B + 2 \cdot C$  puede hacerse sencillamente con `ADD R1, R2, R3, lsl #1`
  - $A = B + 10 \cdot C$  puede hacerse sencillamente con `ADD R1, R2, R3, lsl #3` y `ADD R1, R1, R3, lsl #1` ( $A = B + 8 \cdot C + 2 \cdot C$ )

Sacar partido de los modos de direccionamiento registro base + offset en los cálculos de la dirección en las instrucciones load/store. Por ejemplo, para acceder a A[4] podemos hacer `LDR R1, [R2, #4]` (si es un array de elementos de tipo char) o `LDR R1, [R2, #16]` (si es un array de enteros).

**NOTA:** como el código a desarrollar es pequeño es probable que alguna de estas optimizaciones no sea aplicable a vuestro código, pero muchas sí que lo serán y os animamos a utilizarlas.

## ¿CÓMO FUNCIONA EL CÓDIGO FACILITADO?

El código que nos dan permite jugar a una versión reducida del Reversi en un tablero de 8x8.

Las casillas centrales empiezan con una diagonal ocupada por dos piezas negras y la otra por dos piezas blancas. El procesador jugará con las blancas y el jugador usará las negras. El primer movimiento lo hacen las negras (funciona al revés que el ajedrez).

Las reglas de Reversi son sencillas:

- Cada jugador coloca sus piezas turnándose de una en una.
- Sólo puedes colocar tu pieza en una posición si al hacerlo rodeas a una o varias fichas del rival en alguna dirección (norte-sur, este-oeste, o alguna de las dos diagonales).
- Las fichas rodeadas cambian de color. En la figura 1 se puede ver el tablero inicial, los posibles movimientos que tiene el jugador negro (en gris), y el tablero resultante tras mover el jugador negro a la fila 1, columna 2.
- Si no hay ninguna posición libre tienes que pasar.
- Cuando ningún jugador pueda mover se acaba el juego. El que tenga más fichas de su color gana la partida.

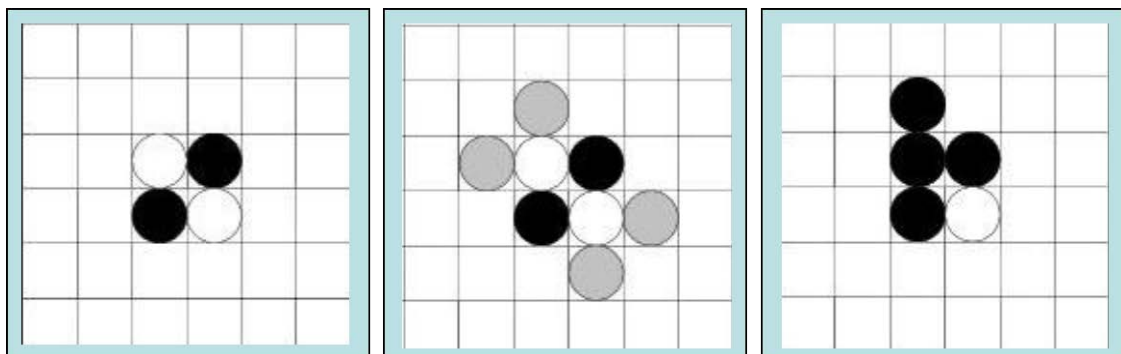


Figura 1: (a) Tablero inicial

(b) Posibles movimientos

(c) Tablero tras mover en 1-2

Como en esta versión todavía no hay ningún dispositivo de entrada/salida, el jugador debe realizar sus movimientos escribiendo directamente en memoria. El funcionamiento es el siguiente:

1. Pon un **breakpoint** en la función `reversi8` en la línea en la que se invoca a la función `esperar_mov(ready)`. Con esto se consigue que cada vez que le toque mover al jugador el simulador pare y nos deje introducir nuestro movimiento. Después de esto puedes darle a ejecutar.
2. Mira en tu código dónde está el `array tablero` y pon un monitor de memoria en esa dirección. Te da varias opciones para representar los datos de la memoria; elige **hex integer**. Pulsa el botón derecho sobre el monitor y elige **format**. Configúralo tal y como aparece en la figura 2. Se verán 8 columnas. Si la dirección no es múltiplo de 8 el tablero no se verá bien. Se ha solucionado con una directiva de alineamiento. De esta forma el tablero es visible para el jugador. En el tablero cada byte representa una posición: las posiciones con 0 están vacías, las que tienen un 1 contienen fichas blancas, y las que tienen un 2 contienen fichas negras (ver figura 2).
3. Justo después de tablero hay tres posiciones de memoria que se corresponden con las variables tipo `char`: **fila**, **columna** y **ready**. Fila y columna se usan para que el jugador especifique su movimiento escribiendo directamente en memoria, y **ready** para avisar al procesador de que ya se ha movido. Para mover, coloca el cursor en la posición de memoria en la que quieras escribir y

teclea el valor. Después de hacer tu movimiento dale otra vez a ejecutar. Tras varios segundos verás como el tablero se actualiza con tu movimiento y también el del rival. Sigue jugando hasta que termine la partida. En la figura 3 se puede ver cómo se visualiza el tablero inicial, cómo se realiza un movimiento y cómo queda tras el movimiento.

4. Si no puedes mover, introduce como movimiento fila 8 columna 8. Como las filas y columnas van numeradas de 0 a 7, el procesador comprenderá que no puedes mover.
5. El código no comprueba que tus movimientos sean válidos. De hecho, escribiendo en memoria podéis hacer tantas trampas como queráis por ejemplo cambiando el tablero. Esto puede ser útil para depurar ya que podéis escribir el tablero que os interese sin tener que jugar hasta llegar a él. Los movimientos del procesador si que deben ser correctos en todo momento.

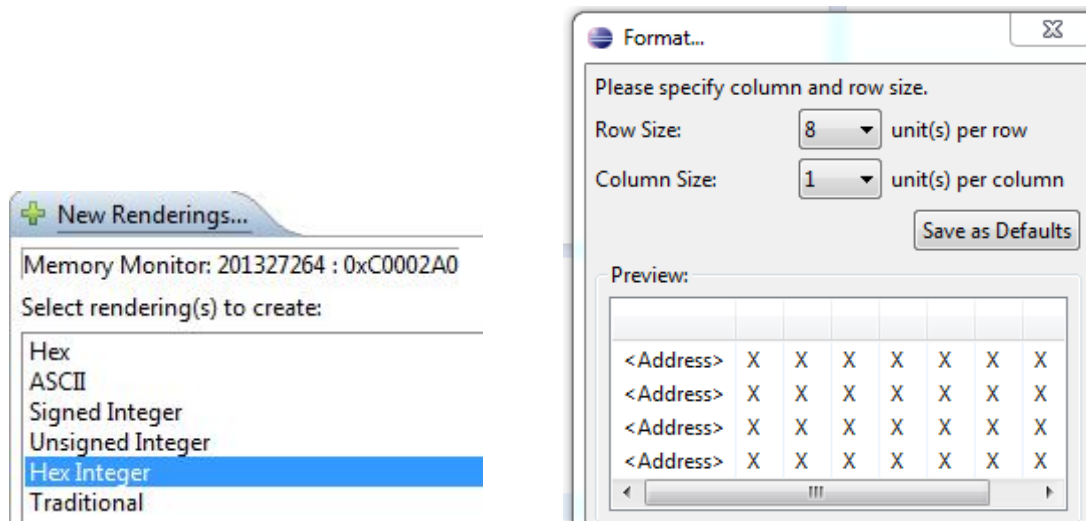


Figura 2: configurando el tablero en Eclipse

Address	0	1	2	3	4	5	6	7
0C000F0	00	00	00	00	00	00	00	00
0C000F8	00	00	00	00	00	00	00	00
0C00100	00	00	00	00	00	00	00	00
0C00108	00	00	00	01	02	00	00	00
0C00110	00	00	00	02	01	00	00	00
0C00118	00	00	00	00	00	00	00	00
0C00120	00	00	00	00	00	00	00	00
0C00128	00	00	00	00	00	00	00	00
0C00130	00	00	00	00	00	00	00	00
0C00138	00	00	00	00	00	00	00	00

Figura 3: (a) tablero inicial tal y como debe verse tras ejecutarse "init\_table"

Address	0	1	2	3	4	5	6	7
0C0000F0	00	00	00	00	00	00	00	00
0C0000F8	00	00	00	00	00	00	00	00
0C000100	00	00	00	00	00	00	00	00
0C000108	00	00	00	01	02	00	00	00
0C000110	00	00	00	02	01	00	00	00
0C000118	00	00	00	00	00	00	00	00
0C000120	00	00	00	00	00	00	00	00
0C000128	00	00	00	00	00	00	00	00
0C000130	02	03	01	00	00	00	00	00
0C000138	00	00	00	00	00	00	00	00

(b) Se solicita el movimiento fila 1, columna 2

Address	0	1	2	3	4	5	6	7
0C0000F0	00	00	00	00	00	00	00	00
0C0000F8	00	00	00	00	00	00	00	00
0C000100	00	00	00	02	00	00	00	00
0C000108	00	00	00	02	02	00	00	00
0C000110	00	00	00	02	01	00	00	00
0C000118	00	00	00	00	00	00	00	00
0C000120	00	00	00	00	00	00	00	00
0C000128	00	00	00	00	00	00	00	00
0C000130	02	03	00	00	00	00	00	00
0C000138	00	00	00	00	00	00	00	00

(c) El tablero se actualiza con el movimiento indicado y la respuesta del programa

#### APARTADO OPCIONAL 1:

Hemos estudiado el impacto en el rendimiento del código C de las opciones compilación con optimización (-O1, -O2...). La gran ventaja de que sea el compilador el que aplique las optimizaciones es que nos permite mantener claridad y portabilidad en el código fuente, mientras obtenemos rendimiento en el ejecutable. Si hay algún cambio, lo único que deberemos hacer es recompilar para sacar de nuevo partido.

Conforme el compilador aplica las heurísticas el código se hace menos claro. Mira el manual y el código en ensamblador generado por el compilador. Explica qué técnicas ha aplicado en cada versión y como las ha empleado.

Busca optimizar tus funciones ARM aplicando las mismas técnicas. ¿Eres capaz de mejorar el rendimiento obtenido por el compilador?

En algunos casos, nosotros tenemos información sobre el algoritmo o la implementación que el compilador desconoce o debe ser conservador. ¿Eres capaz de optimizar las funciones en C para ayudar al compilador a generar "mejor" código?

#### APARTADO OPCIONAL 2:

Realizar la función **patron\_volteo** iterativa. Se deberán crear las funciones en C y en ARM equivalentes. Al cambiar el algoritmo se pueden hacer todas las optimizaciones que se consideren oportunas, siempre y cuando el algoritmo implementado sea el mismo en ambas funciones y el resultado de la ejecución sea correcto.

Las nuevas funciones se deberán incorporar tanto en la verificación automática, como en el análisis de rendimiento a las realizadas en la práctica.

## EVALUACIÓN DE LA PRÁCTICA

La práctica se presentará en el laboratorio **aproximadamente** el 22 de Octubre.

La memoria habrá que presentarla **aproximadamente** el 27 de Octubre.

**Las fechas y horarios definitivos se publicarán en la página web de la asignatura (moodle).**

## ANEXO 1: REALIZACIÓN DE LA MEMORIA

La memoria de la práctica tiene diseño libre, pero es obligatorio que incluya los siguientes puntos:

1. Resumen ejecutivo (una cara como máximo). El resumen ejecutivo es un documento independiente del resto de la memoria que describe brevemente qué habéis hecho, por qué lo habéis hecho, qué resultados obtenéis y cuáles son vuestras conclusiones.
2. Marcos de pila.
3. Código fuente del apartado B comentado. Además, cada función debe incluir una cabecera en la que se explique cómo funciona, qué parámetros recibe y dónde los recibe y para qué usa cada registro (por ejemplo, en el registro 4 se guarda el puntero a la primera matriz...).
4. Descripción de las optimizaciones realizadas al código ensamblador.
5. Resultados de la comparación entre las distintas versiones de las funciones.
6. Descripción de los problemas encontrados en la realización de la práctica y sus soluciones.
7. Conclusiones

Se valorará que el texto sea **claro y conciso**. Cuánto más fácil sea entender el funcionamiento del código y vuestro trabajo, mejor. **Utilizad el documento de recomendaciones para la redacción de una memoria técnica** disponible en la página web de la asignatura (moodle).

## ANEXO 2: ENTREGA DE LA MEMORIA

La entrega de la memoria será a través de la página web de la asignatura (*moodle* en <http://add.unizar.es>). Debéis enviar un fichero comprimido en formato ZIP con los siguientes documentos:

1. Memoria en formato PDF.
2. Código fuente de los apartados A y B en formato texto.

Se debe mandar un único fichero por pareja. El fichero se nombrará de la siguiente manera:

p1\_NIP-Apellidos\_Estudiente1\_NIP-Apellidos\_Estudiente2.zip

Por ejemplo: p1\_345456-Gracia\_Esteban\_45632-Arribas\_Murillo.zip

Los ficheros independientes deben también identificar los nombres de la pareja.