

# DISEÑO DE UN MICROPROCESADOR DE 8 BITS Y SU IMPLEMENTACIÓN EN UN DISPOSITIVO LÓGICO PROGRAMABLE PARA APLICACIONES DIDÁCTICAS

D. Benítez-Díaz y F.J. Peña-Sánchez

Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. Departamento de Informática y Sistemas.  
Campus Universitario de Tafira. 35017 Las Palmas. E-mail: domingo@fobos.ulpgc.es

**RESUMEN.-** En este trabajo se presenta una metodología docente para impartir la parte práctica de la asignatura denominada "Fundamentos de Computadores" que se ofertará comúnmente en el primer curso de las Ingenierías en Informática. La orientación propuesta se enfoca hacia la comprensión de los conceptos básicos involucrados en la construcción de los microprocesadores. Se propone al alumno diseñar una máquina que ejecuta un conjunto de 12 instrucciones con bus de datos de 8 bits, para luego sintetizarlo en un circuito programable tipo PLD. El trabajo de prácticas se divide en 11 tutoriales que se realizan en un cuatrimestre.

## 1.- INTRODUCCIÓN

Las ideas expuestas en este trabajo abundan en la dirección propuesta por Patterson y Hennessy [5]. En su libro introducen un conjunto de conocimientos sobre diseño lógico, los cuales se recomienda que el alumno adquiera antes de abordar los conceptos de organización y diseño de computadores. En nuestro trabajo describimos una metodología didáctica a utilizar en el laboratorio de la asignatura Fundamentos de Computadores correspondiente al primer curso de las Ingenierías en Informática, para reforzar los conocimientos teóricos del diseño lógico. Esta metodología intenta proporcionar una base sólida en diseño lógico y una introducción a la organización de computadores.

Varios trabajos que abordan la enseñanza del diseño lógico introduciendo conceptos de la construcción de los microprocesadores, y que tienen aspectos similares al nuestro aunque no iguales, han sido presentados anteriormente. Por ejemplo, A. Mejías propuso la realización de una CPU en un dispositivo programable de la familia 5000 de ALTERA [4]. El dispositivo que muestra adolece de una serie de características propias de un sistema de cómputo de propósito general. Estas son la no unificación de los buses de datos de entrada y salida en uno bidireccional de entrada/salida, o la no facilidad para poder implementar cualquier función lógica con las instrucciones que posee.

Por otro lado el diseño de microprocesadores ha sido objeto de prácticas en varios centros universitarios. El Profesor P. Gómez y su grupo han desarrollado un conjunto de prácticas donde se implementa en un ASIC una máquina reducida [5]. En nuestro caso no empleamos el diseño VLSI full-custom o semi-custom. Utilizamos tecnología de dispositivos programables y la herramienta software MAX+PLUS II que se ejecuta en computadores personales [1]. El Profesor G. Aranguren y su grupo han descrito en la literatura los objetivos de un conjunto de prácticas realizadas con dispositivos lógicos programables [2]. Entre los proyectos que describen se encuentra el de una arquitectura de una CPU con un conjunto reducido de instrucciones. Sin embargo, en este trabajo no se detalla su organización interna, la cual sí es objeto de una extensa descripción aquí.

En el siguiente apartado se mencionan los objetivos docentes que nos hemos propuesto en las prácticas de la asignatura Fundamentos de Computadores. En el apartado 3 se detallan la arquitectura del repertorio de instrucciones y la estructura interna del microprocesador de 8 bits. La división de nuestro proyecto docente en los objetivos operativos se desarrolla en el apartado 4. Y por último, en el apartado 5 proporcionamos las conclusiones más importantes.

## 2.- OBJETIVOS DOCENTES

El método docente y el desarrollo de las prácticas por parte de los alumnos intentan cumplir un conjunto de objetivos que relatamos a continuación. En primer lugar se pretende instruir al alumno en las etapas de diseño lógico: especificación del sistema digital, síntesis lógica, simulación, implementación y test del circuito. Todas estas etapas son aplicadas durante el diseño e implementación de un microprocesador de 8 bits.

En segundo lugar nos proponemos diseñar un conjunto de prácticas de la asignatura de carácter anual Fundamentos de Computadores. Estas deben poner en práctica conocimientos básicos de la organización de los computadores durante el segundo cuatrimestre, utilizando los conceptos sobre construcción de sistemas digitales adquiridos en el primer cuatrimestre. En tercer lugar instruimos al alumno en las etapas de procesamiento de bajo nivel que son necesarias para que un programa pueda ser ejecutado correctamente. Esta base se adquiere realizando un circuito que se encargue de ejecutar instrucciones.

Por último, queremos ayudar a impartir conceptos de la tecnología de los circuitos integrados. Al implementar el microprocesador en un circuito programable se verá obligado a manejar conceptos de tecnología electrónica, los cuales serán presentados a los alumnos con más profundidad durante el segundo año de carrera.

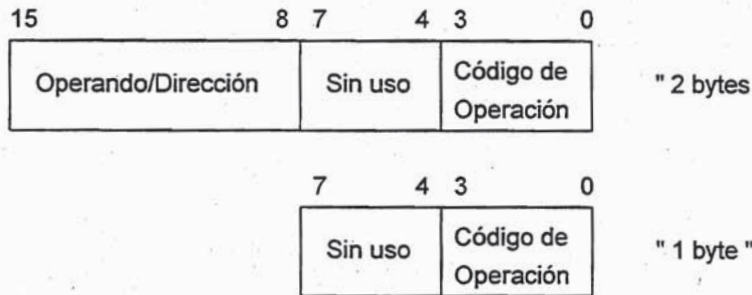
## 3.- ORGANIZACIÓN INTERNA DEL MICROPROCESADOR

La arquitectura del repertorio de instrucciones del microprocesador soporta un total de 12 instrucciones, dos modos de direccionamiento (inmediato y directo) y un modelo de programación simple con un sólo registro de propósito general (el acumulador). En la tabla I se encuentran descritas cada una de las instrucciones. En ella aparecen el nombre de la instrucción, el número de bytes que ocupa, el tipo de direccionamiento que utiliza, su código de operación y la función que realiza en el lenguaje de transferencia de registros.

TABLA I. Repertorio de Instrucciones.

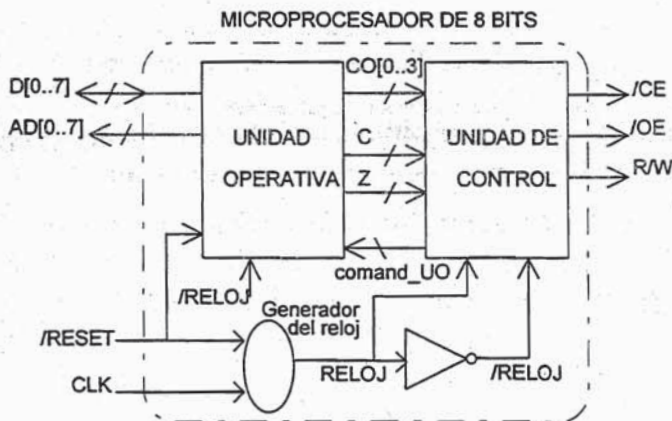
Nombre	Bytes	Dirección.	Sintaxis	Código	Función
CLC	1		CLC	0001	$C \leftarrow 0$
LDA	2	Inmediato	LDA 05	0010	$ACC \leftarrow 0x05H$
STA	2	Inmediato	STA 10	0011	$Memoria(0x10H) \leftarrow ACC$
JMP	2	Inmediato	JMP 48	0100	$PC \leftarrow 0x48H$
JC	2	Inmediato	JC 41	0101	$IF(C=1) PC \leftarrow 0x41H$ else $PC=PC+1$
HLT	1		HLT	0110	Stop
LDI	2	Directo	LDI 73	0111	$ACC \leftarrow Memoria(0x73H)$
ADD	2	Directo	ADD 54	1000	$ACC \leftarrow ACC + Memoria(0x54H) + C$
AND	2	Directo	AND 08	1001	$ACC \leftarrow ACC \&\& Memoria(0x08H)$
OR	2	Directo	OR 12	1010	$ACC \leftarrow ACC \parallel Memoria(0x12H)$
NOT	2	Directo	NOT 21	1011	$ACC \leftarrow ! Memoria(0x21H)$
JZ	2	Inmediato	JZ 35	1100	$IF(Z=1) PC \leftarrow 0x35H$ else $PC=PC+1$

El formato de las instrucciones aparece representado en la figura 1. Como se puede apreciar existen dos tipos de instrucciones: las de dos bytes y las de 1 byte. En ambos tipos, el byte menos significativo soporta el código de operación. En las de dos bytes, el byte más significativo representa bien al valor inmediato (modo de direccionamiento inmediato), o a la posición de memoria donde debe ir a buscar el dato que se necesita para realizar alguna operación (modo de direccionamiento directo).



**Figura 1.** Formato de las instrucciones del microprocesador.

En la figura 2 se encuentra la estructura interna de los principales bloques del microprocesador. Estas son: el Generador del reloj interno, la Unidad Operativa y la Unidad de Control. La conexión de estos bloques al exterior consiste en: un bus de datos de 8 bits ( $D[0..7]$ ), un bus de direcciones de 8 bits ( $AD[0..7]$ ), una señal de reloj de 40 MHz. ( $CLK$ ), una señal de reset activa a nivel bajo ( $/RESET$ ), y tres señales para control de la memoria externa ( $/CE$ ,  $/OE$ ,  $R/W$ ). Internamente la Unidad Operativa transmite a la Unidad de control el código de operación de la instrucción que se está ejecutando ( $CO[0..3]$ ), y los bits de estado del acarreo ( $C$ ) y de detección de resultado cero ( $Z$ ).



**Figura 2.** Diagrama de bloques de la estructura interna del microprocesador de 8 bits.

Tal como aparece representada en la figura 3, la Unidad Operativa consta de una unidad aritmético-lógica que realiza 4 operaciones sobre dos operandos de 8 bits cada uno: suma, AND, OR, e inversión de uno de los operandos. Además forman parte de ella 4 registros, tres de ellos utilizados para operaciones internas de esta unidad (registro de datos, registro de direcciones, registro de instrucciones), y el otro de propósito general accesible al programador (el acumulador).

La Unidad de Control tiene también una estructura interna definida tal como aparece en la figura 4. De ella forman parte: un contador de microprograma, la memoria del microprograma, el registro de microinstrucciones y un multiplexor de señales externas. El contador de microprograma indica la microinstrucción que se está ejecutando durante un ciclo del reloj interno. Este direcciona a una memoria donde reside el microprograma cuyo secuenciamiento viene determinado por el diagrama de la figura 5. El registro de

microinstrucciones guarda durante un ciclo de reloj una microinstrucción. Sus señales de salida se agrupan en cuatro campos: uno que controla la señal de condición externa que es introducida en el contador de microprograma a través del multiplexor, otro que proporciona la dirección de la próxima microinstrucción en el caso de producirse un salto dentro del microprograma, otro campo compuesto por señales que controla la Unidad Operativa (control\_UO), y el último que agrupa a las señales que interactúan con la memoria externa (/CE, /OE, R/W).

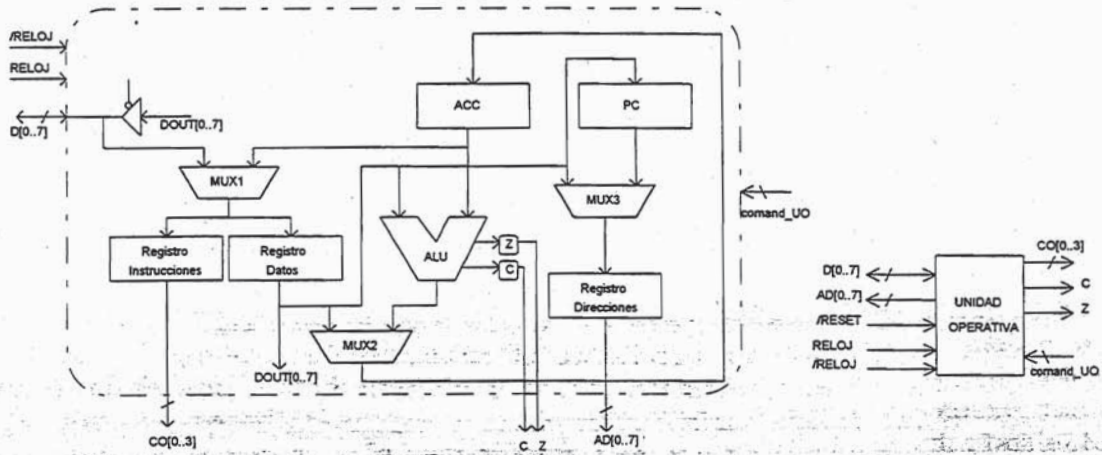


Figura 3. Estructura interna de la Unidad Operativa.

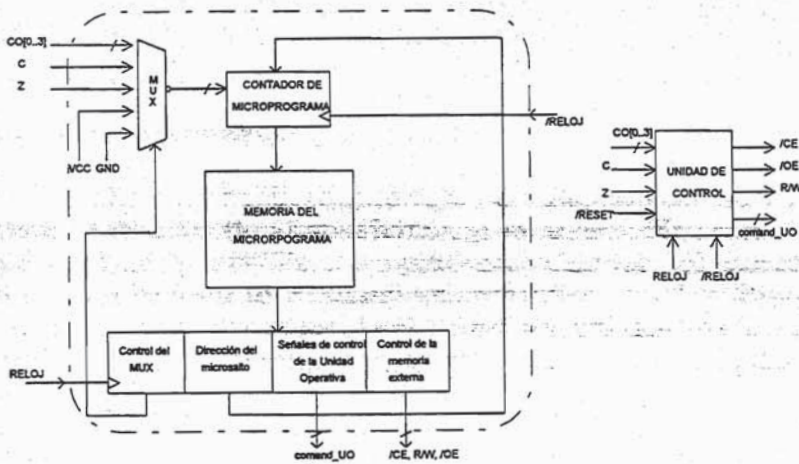


Figura 4. Estructura interna de la Unidad de Control.

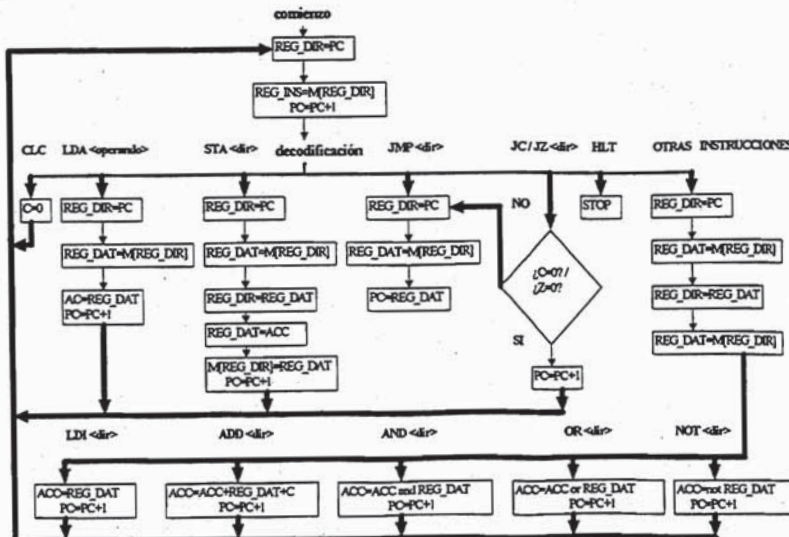


Figura 5. Diagrama de bloques del microprograma

Otro tipo de información que el alumno recibe durante el desarrollo de las prácticas es la que hace referencia a la forma de onda de la señal de reloj interna (RELOJ) la cual aparece representada en la figura 6. Esta señal debe ser generada a partir de la señal CLK externa de 40 MHz. Como se puede apreciar, RELOJ se mantiene a nivel alto durante 150 ns. y a nivel bajo durante 125 ns. En el flanco de subida el registro de microinstrucciones se inicializa con una microinstrucción. Durante el tiempo que RELOJ permanece a nivel alto, la Unidad Operativa realiza las operaciones determinadas por el campo de microinstrucción que la controla, o la memoria externa realiza una operación de lectura o escritura. En el flanco de bajada de RELOJ el contador de microprograma se actualiza apuntando a la siguiente microinstrucción, y los registros de la Unidad Operativa se inicializan con los datos de entrada correspondientes. Durante el tiempo que RELOJ está a nivel bajo las entradas del registro de microinstrucciones y las de la ALU se estabilizan.

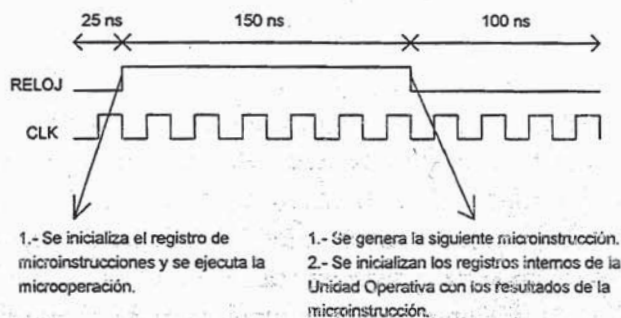


Figura 6. Señal de reloj que controla la ejecución de las microinstrucciones. Su periodo es igual a 275 ns lo que equivale a una frecuencia de 3.64 MHz.

#### 4.- METODOLOGÍA DOCENTE

El diseño del microprocesador cuyas especificaciones técnicas se describieron en la sección anterior se divide en diez etapas a las que denominamos tutoriales. Cada tutorial tiene asociado un conjunto de objetivos operativos que conducen en conjunto a la construcción final del microprocesador. La complejidad de cada uno de ellos es tal que se asegura que el alumno puede realizar todos los requerimientos del tutorial en un máximo de una o dos semanas, dedicando un total de 4 horas de trabajo personal por semana.

En cada tutorial diferenciamos las siguientes secciones: Objetivos Operativos, Plan de Trabajo y Evaluación Parcial. Los objetivos operativos consisten en la realización con éxito de un conjunto de tareas determinadas al principio de cada tutorial. Por ejemplo el diseño y simulación del contador de programa, o la realización de la memoria de microprograma. El plan de trabajo está constituido por las diferentes etapas que el alumno debe ir llevando a cabo para conseguir cumplimentar los objetivos operativos. En la mayoría de los tutoriales esta sección es donde se encuentran los esquemas de las partes del microprocesador que se propone desarrollar. Finalmente, la evaluación parcial consiste en introducir al circuito que el alumno cree que ha completado de diseñar, un conjunto de vectores de test que el profesor proporciona para simularlo. El alumno no sabe qué es lo que está simulando, a no ser que lo descubra analizando dichos vectores de test. El resultado de la simulación debe ser entregado al profesor con una memoria descriptiva. La realización del siguiente tutorial está condicionada a que el resultado de este test sea correcto.

A continuación se describen cada uno de los tutoriales en los que hemos desmembrado la construcción del microprocesador. Se ha añadido el tiempo asignado a cada tutorial para que los resultados de la evaluación parcial sean entregados al profesor.

- Tutorial 1. Introducción al MAX+PLUS II (1 semana).
- Tutorial 2. Diseño lógico con MAX+PLUS II (1 semana).
- Tutorial 3. Búsqueda de la instrucción y del dato (2 semanas).
- Tutorial 4. El contador de programa (1 semana).
- Tutorial 5. El acumulador (1 semana).
- Tutorial 6. La Unidad Aritmético Lógica (ALU) (2 semanas).
- Tutorial 7. La Unidad Operativa (1 semana).
- Tutorial 8. La Unidad de Control I (1 semana).
- Tutorial 9. La Unidad de Control II (2 semanas).
- Tutorial 10. Simulación de la CPU (1 semana).

Para completar este proyecto nos hemos propuesto próximamente incluir una undécima práctica donde el alumno debe configurar una placa que estamos desarrollando y verificar, esta vez no por medio de simulación, el correcto funcionamiento del programa que ha diseñado.

Tutorial 11. Programación y test del hardware del sistema mínimo (2 semanas). En esta última práctica se sintetiza el hardware. Por una parte el microprocesador debe ser emulado a través del dispositivo EPM7160LC84-20 de ALTERA [1], y por otra, el programa ejemplo debe ser introducido en una memoria EPROM. Ambos circuitos son conectados en una placa donde existen dos zócalos en los que se insertan el microprocesador y la memoria EPROM. Además existe una memoria RAM de lectura y escritura en cuyas posiciones de memoria se pueden guardar valores intermedios. Se concluye verificando el correcto funcionamiento del programa ejemplo.

## 5.- CONCLUSIONES

En este trabajo se ha propuesto un método de impartición de la parte práctica de una asignatura de la Ingeniería Informática denominada Fundamentos de Computadores. Su orientación se basa en adiestrar al alumno a realizar diseño de circuitos digitales con aplicación a la construcción de un microprocesador. La programación propuesta consta de un total de 15 semanas lo cual indica que pueden ser seguidas en un cuatrimestre. Nuestra experiencia indica que el alumno encuentra de gran atractivo este enfoque ya que aplica los conocimientos teóricos que ha aprendido durante todo el curso sobre sistemas digitales y organización de computadores a un sistema hardware real.

## 6.- REFERENCIAS

- [1] ALTERA. "Data Book. 1993". Ed. ALTERA, 1993.
- [2] Aranguren, G., Martín, J.L. y Olabe, X. "Aplicación docente del MAX+PLUS II". Libro de Actas de TAAE'94, pp.139-147, 1994.
- [3] Gómez, P., Díaz, A., Gallardo, J.M., Rodellar, V., Nieto, V., Alonso, L., Liébaña, M. y Pérez, O. "Diseño de una máquina reducida para aplicaciones didácticas usando una herramienta de celdas estándar". Libro de Actas de TAAE'94, pp.121-130, 1994.
- [4] Mejías Barrero, A. "Diseño y realización de una CPU con dispositivos lógicos programables". Revista española de electrónica, noviembre 1993, pp.20-26.
- [5] Patterson, D.A. y Hennessy, J.L. "Computer Organization. The hardware/software interface". Ed. Morgan Kaufmann, 1994.