

# El diseño como técnica para la docencia de microprocesadores

P. J. Sotorrío Ruiz, F. D. Trujillo Aguilera, A. Pozo Ruz, F. J. Sánchez Pacheco

*Departamento de Tecnología Electrónica, Universidad de Málaga (UMA),  
Escuela de Ingenierías, Campus de Teatinos, C/ Dr. Ortiz Ramos, 29071 Málaga, [pjsotorrio@uma.es](mailto:pjsotorrio@uma.es)*

**Resumen.** La formación en hardware de microprocesadores es una materia con una dificultad particular para muchos estudiantes. Una de las razones de ello es la utilización de dispositivos comerciales como elementos docentes. Esta metodología permite que los estudiantes aprendan a utilizar los dispositivos. Sin embargo la docencia en Ingeniería Electrónica, no puede ser que los estudiantes aprendan a usar los dispositivos. Utilizando dispositivos comerciales exclusivamente para la docencia, los estudiantes no ven los esquemas de las distintas partes del  $\mu$ P puesto que los fabricantes no lo suministran. En este trabajo se describe cómo la técnica de diseño es útil para que los estudiantes puedan realizar su propio  $\mu$ P. Con ello se logra que tengan un conocimiento profundo del funcionamiento y la arquitectura del mismo. Este método se utiliza en la EPS de la Universidad de Málaga hace años y los resultados son excelentes.

**Palabras Clave:** PBL,  $\mu$ P, aprendizaje activo

## 1. INTRODUCCIÓN

**Actualmente**, los microprocesadores ( $\mu$ P) y microcontroladores ( $\mu$ C) constituyen elementos fundamentales en la industria en general gracias a la diversidad de sus aplicaciones y a sus bajos costes. Es de conocimiento popular su utilización en el campo de la automoción, comunicaciones, doméstico o médico, por citar algunos. Por ello se hace necesario disponer de una formación adecuada en estos dispositivos en la formación de ingenieros con especialidad electrónica.

De entre las técnicas docente que se utilizan hoy en día, la técnica PBL (Problem Based Learning) (Hmelo-Silver, 2004) (García-Robles, 2009) es el método más recomendable para la formación en materia de hardware y software de bajo nivel de los  $\mu$ P (Savery, 2006). Una de las características principales de PBL es que fomenta el aprendizaje activo de los estudiantes (Pejcinovic, 2013). Así, los estudiantes se involucran en su propio proceso de

formación “haciendo” y no solo “oyendo” o “leyendo”.

La docencia en  $\mu$ P, es el nivel siguiente a la de Electrónica Digital, debe estar basada en ella. La formación de los estudiantes en ingeniería electrónica no se acaba al finalizar la docencia de los dispositivos y sistemas básicos como son los dispositivos combinacionales y secuenciales, para saltar a continuación a sistemas más complejos, como los  $\mu$ P y  $\mu$ C, tratados éstos como elementos diferentes a los anteriores. Esto es lo que se hace en muchos casos cuando la docencia se basa exclusivamente en dispositivos comerciales (Kim, 2012) (Floyd, 2000) ya que los fabricantes no aportan detalles de los circuitos de cada parte de los dispositivos sino un esquema general de bloques simplificado y en ocasiones algún esquema de partes específicas (Zilog, 2005) (Texas Instruments, 2012).

La realidad debe de ser que no haya diferencias entre una parte y otra ya que los  $\mu$ P se construyen utilizando los dispositivos básicos descritos durante docencia de Electrónica Digital. Así, los  $\mu$ P constituyen la evolución racional de la electrónica digital básica. En este proceso evolutivo se han de introducir algunos conceptos nuevos sobre arquitecturas digitales y también hay que dar uso a muchos de los conocimientos que ya tienen los estudiantes, como el concepto de triestado o de transferencia entre registros.

Es muy frecuente que para la docencia en  $\mu$ P se utilicen dispositivos comerciales. En estos casos, la docencia se desarrolla en **base** a un modelo específico. Esta es una opción válida para aprender el manejo de los dispositivos siguiendo la descripción que realiza el fabricante del mismo. Pero esto es solamente una parte de lo que los estudiantes deben aprender en una asignatura dedicada a la docencia de la electrónica de los  $\mu$ P. Aprender a utilizar un dispositivo no implica conocer la ingeniería del mismo de forma similar a que saber conducir un coche no implica saber de mecánica de automoción.

La docencia en  $\mu$ P utilizando el diseño

electrónico como técnica es posible aplicarla gracias a los conocimientos que ya tienen los estudiantes. Con estos conocimientos se construyen cada uno de los elementos que forman un  $\mu\text{P}$ . La ventaja de utilizar esta forma de hacer es que la nueva materia surge en los estudiantes como una evolución sobre los conocimientos que ya disponen. Esto aporta beneficios para los estudiantes; por un lado reutilizan los recursos que tienen (los conocimientos ya adquiridos) y por otro les sirve de experiencia en cuanto a aplicaciones de los mismos. El conjunto de ambos les aporta seguridad y un conocimiento profundo de la materia. La propuesta de este trabajo es hacer que los estudiantes se implique en el diseño de un  $\mu\text{P}$ , su propio  $\mu\text{P}$ .

## 2. IMPLEMENTACIÓN

Para utilizar el diseño como herramienta docente se establece un punto de partida creando las especificaciones de los objetivos a alcanzar, o de diseño del sistema. Es necesario que los estudiantes puedan visualizar el objetivo a conseguir. En esta etapa, tan importante es que los estudiantes participen en la definición de estas especificaciones, como que el docente oriente, defina, justifique y limite lo más claramente posible las prestaciones de las distintas partes. De esta forma se logra la complicidad entre docente y estudiantes.

Las especificaciones contienen una parte dedicada al hardware y otra al juego de instrucciones (software) que ha de ejecutar el dispositivo. Esta relación hardware-software hace que los estudiantes entiendan mejor el funcionamiento y la necesidad de las distintas estructuras físicas.

En la práctica no es posible realizar de forma totalmente independiente el diseño de la circuitería y el de las instrucciones, ya que algunos circuitos tienen dependencia de cómo se definen las instrucciones y muchas instrucciones serán posible de realizar según sean los circuitos disponibles.

Las especificaciones se generan estableciendo un esquema básico de bloques de un  $\mu\text{P}$ . A partir de él se definen y especifican tanto los elementos en cada bloque como las instrucciones que debe disponer el dispositivo. El paso siguiente es la realización de cada uno de los bloques.

### 2.1 Nomenclatura

El número de elementos en un  $\mu\text{P}$  es siempre elevado, lo cual implica la necesidad de un gran número de señales. Para poner orden en la identificación de las señales y de las instrucciones, antes de comenzar las especificaciones se establece la

nomenclatura utilizada en los esquemas y cronogramas. Esta nomenclatura es simple, intuitiva y coherente. De esta forma los estudiantes pueden leer fácilmente los documentos de trabajo (esquemas, cronogramas y programas).

#### 2.1.1 Nomenclatura de las señales

Cada señal se identifica por medio de una etiqueta cuyo texto contiene información sobre de la función que realiza, el nivel o flanco con el que se realiza la función y el elemento al que pertenece. Aplicando este criterio se utiliza la siguiente nomenclatura:

- Niveles: Dado que los dispositivos digitales tienen mayor inmunidad al ruido en el nivel alto que en el bajo, el nivel de reposo de las señales es el nivel alto (H). Cuando una señal es activa por nivel (nivel bajo) se indica con una barra inclinada (“/”) al principio del texto de la etiqueta. Por uniformidad se establece que todas las señales que van precedidas por “/” son activas por nivel.

- Flancos: Las señales que son activas por flancos, lo son siempre por medio del flanco ascendente. Estas señales no llevan la barra inclinada en sus etiquetas a pesar de que para generar un flanco ascendente la señal ha de estar previamente a nivel bajo.

- Nombres: Los nombres de las señales se relacionan con su función. Se dispone de cuatro tipos de señales; WR (WRite), escritura en registro, es activa con el flanco ascendente; /OE (Output Enable), lectura de registro, es activa a nivel bajo; CK (Clock), reloj de contador, es activa con el flanco ascendente; señales de control que reciben diferentes nombre según sea su función. Así, /INC hace que un contador funcione en modo de cuenta ascendente (/INC=L) o descendente (/INC=H); /BH hace que un registro se conecte (como entrada o como salida) a la parte alta del bus interno, MSB (/BH=L) o a la parte baja LSB (/BH=H).

- Elementos: Para identificar el elemento al que pertenece una señal se añade al nombre de la señal un guión bajo y a continuación un acrónimo del nombre del elemento. De esta forma, la señal de escritura del registro contador de programa (PC, Program Counter) se denomina WR\_PC y la señal de lectura del registro puntero de la pila (SP, Stack Pointer) se denomina /OE\_SP.

#### 2.1.2 Nomenclatura de las instrucciones

De forma similar a lo dicho en el apartado anterior, la nomenclatura para identificar y describir

las instrucciones es simple y coherente. La que se utiliza en este trabajo es la siguiente:

- Los datos son siempre de 8 bits (un byte) y se representa como “d”. Cuando es necesario proporcionar datos de 16 bits, se representa como “dd”.
- Para los nombres de las instrucciones se utiliza un nemónico (en Español o en Inglés) relacionado con la función que hacen. Así las instrucciones de carga de registros se identifican con el nemónico LD (Load), las de saltos con JP (Jump), la de sumar con ADD (ADDITION), etc.
- Un número o un nombre entre paréntesis significa que se está haciendo referencia al contenido de la dirección dada por ese número o nombre. Así pues, cuando se usa la forma “dd” se refiere a una información (dato) de 16 bits, mientras que si la forma es “(dd)”, se refiere al contenido de la dirección dada por “dd”, que es un dato de 8 bits.

## 2.2 Esquema de bloques

La figura 1 muestra un esquema de bloques básico de un microprocesador con una arquitectura simple tipo Von Neumann (Ceruzzi, 2003). En ella, se puede ver que consta de cuatro bloques funcionales interconectados por medio de dos buses denominados BIT, Bus Interno de Transferencias y BIC, Bus Interno de Control (Sotorrío, 2004). Las características de estos buses son:

**BIT:** Bus homogéneo de 16 bits (BIT15-BIT0), bidireccional y compartido por desconexión (triestado). Por medio de este bus se transfiere información de 8 o 16 bits entre los registros internos del procesador.

**BIC:** Bus heterogéneo que contiene todas las señales de control de las distintas partes del microprocesador. Dado que cada señal es específica para su función (lectura, escritura, etc.)

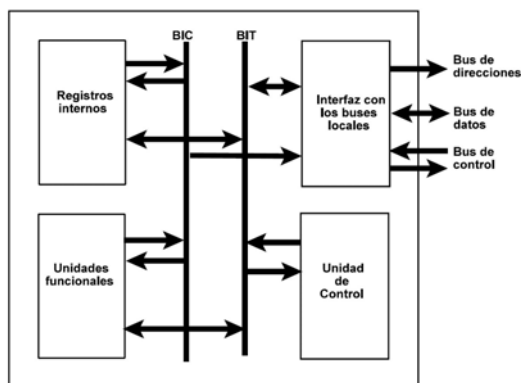


Figura 1. Esquema de bloques del  $\mu$ P.

y para cada elemento, no es bidireccional ni compartido. La mayoría de las señales de este bus nacen en la Unidad de Control (UC) del  $\mu$ P.

La figura 1 también representa las conexiones externas del  $\mu$ P. Se trata de una forma clásica compuesta por tres buses: bus de direcciones (A15-A0) homogéneo y unidireccional; bus de datos (D7-D0) homogéneo, bidireccional y compartido por desconexión; y bus de control, compuesto por señales como /RD, /WR, /MEM, /ES, etc., heterogéneo y unidireccional.

## 2.3 Especificación y diseño de los circuitos

El diseño de los distintos bloques funcionales es la parte de docencia a desarrollar entre los alumnos y el docente. Cada bloque representado en la figura 1 se compone de varias partes funcionalmente diferentes. En el caso concreto del bloque de registros internos la especificación es como sigue: Cinco registros de 8 bits con salida triestado denominados A, B, C, D y E. Todos ellos transfieren información por medio del LSB (Least Significant Byte) del BIT. El registro A actúa como acumulador del  $\mu$ P, siendo origen de dato y destino de resultado en las funciones de la ULA. Los registros B y D tienen la posibilidad de conectarse al LSB o al MSB (Most Significant Byte) del BIT. En esta especificación de los registros internos no se hace mención a cómo funcionan ni a cuáles son sus señales de control. Esto último se deduce utilizando la nomenclatura descrita en los párrafos anteriores. Es decir, cada registro para poder transferir información dispone de una señal de escritura (WR\_x) y una señal de lectura (/OE\_x). La figura 2 muestra, a modo de ejemplo, una propuesta de esquema digital para realizar los registros B y D cumpliendo con las especificaciones. El elemento de almacenamiento en sí es un dispositivo del tipo 74LS374 que se escribe con el flanco ascendente de la señal WR\_x. El resto del esquema son dispositivos tipo 74LS244 y puertas lógicas que permiten hacer que el registro pueda conectarse a la parte alta (MSB) o baja (LSB) del BIT. Utilizar estos tipos de elementos tiene la ventaja de que los estudiantes conocen sus características funcionales tanto eléctricas como temporales a partir de las hojas de características suministradas por los fabricantes. A su vez, esto define las características del  $\mu$ P que está siendo diseñado.

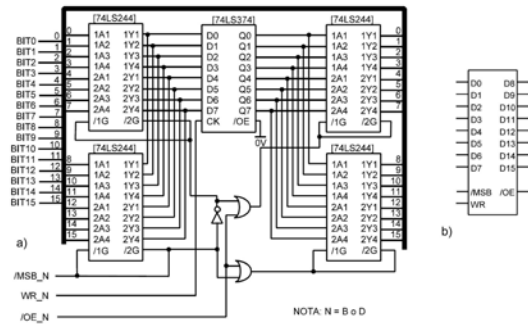


Figura 2. Registros B y D. a) Esquema. b) Símbolo.

La figura 3 ilustra el funcionamiento del circuito de la figura 2. En ella se han representado los cuatro casos posibles: dos de lectura (al LSB o MSB del BIT) y dos de escritura (del LSB o MSB del BIT). Así mismo se han marcado las relaciones causa-efecto en las señales afectadas. Estos dos documentos son ejemplos de realización de las partes del  $\mu P$ .

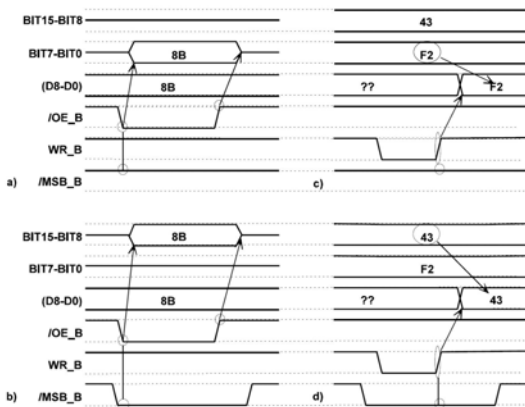


Figura 3. Cronogramas funcionales del registro B. a) Lectura al LSB del BIT. b) Lectura al MSB del BIT. c) Escritura del LSB del BIT. d) Escritura del MSB del BIT.

## 2.4 Especificación y diseño de las instrucciones

Para entender el funcionamiento de un  $\mu P$  no es necesario que éste ejecute instrucciones complejas. Por eso se especifican instrucciones simples como las siguientes: Carga de registros (de 8 y 16 bits); Saltos (incondicionales y condicionales); Instrucciones aritméticas (suma, resta, incremento y decremento); Lógicas (AND, OR, Inversión, desplazamientos y rotaciones) e instrucciones de control (NOP, activar y desactivar la máscara de la interrupción, activar y desactivar del bit de arrastre, etc.). La especificación de cada instrucción contiene la siguiente información: Identificación de la instrucción (nemónico); función que realiza; cómo la realiza; el origen y destino de la

Tabla 1. Especificación de una instrucción de carga en registro.

Nemónico	Función	Descripción	Longitud (bytes)	Ciclos máquina
LD A, (dd)	$A \leftarrow (dd)$	Escribe en el registro A el contenido de la dirección dada.	3: Cod.Op., LSB, MSB	4: B, L, L, L

información (cuando es necesario); la longitud de la instrucción (número de bytes que ocupa en la memoria) y los distintos tipos de ciclos máquina que requiere para su ejecución. Así, la instrucción LD A, (dd) y la instrucción PUSH B se especifican por medio de las tablas 1 y 2. La nomenclatura para los ciclo máquina es como sigue: B, ciclo de búsqueda del código de operación; L, ciclo de lectura (en memoria o en entrada/salida); E, ciclo de escritura (en memoria o en entrada/salida).

Tabla 2. Especificación de una instrucción PUSH.

Nemónico	Función	Descripción	Longitud (bytes)	Ciclos máquina
PUSH B	$(SP) \leftarrow B$ $SP \leftarrow SP-1$	Guarda en la pila el contenido del registro B	1: Cod.Op.	2: B, E

La ejecución de las instrucciones la realiza la Unidad de Control (ver la figura 1). Se trata de una unidad secuenciadora basada en una memoria ROM (Read Only Memory) cuyo contenido refleja el estado de cada una de las señales de control del BIC. El contenido de esta memoria ROM es lo que hay que diseñar para que las instrucciones puedan ser ejecutadas. Este microprograma (o firmware) se obtiene de los cronogramas funcionales que se deducen de las especificaciones de las instrucciones.

La figura 4 muestra uno de los cronogramas de la UC (el del ciclo de búsqueda del código de operación) a partir del cual se obtiene el contenido de la memoria ROM. Como puede verse en esta figura, por cada periodo del reloj CLK (reloj del  $\mu P$ ) hay cuatro periodos de otro reloj, CK4, interno al  $\mu P$ . La UC evoluciona con cada flanco ascendente de CK4. Por lo tanto, leyendo el valor de las señales de este cronograma en cada línea vertical coincidente con los flancos ascendente de esta señal, se obtienen los valores (binarios) de la programación para este ciclo. Las señales que no intervienen en cada ciclo se mantienen en el estado de reposo, nivel H, según se describió antes.

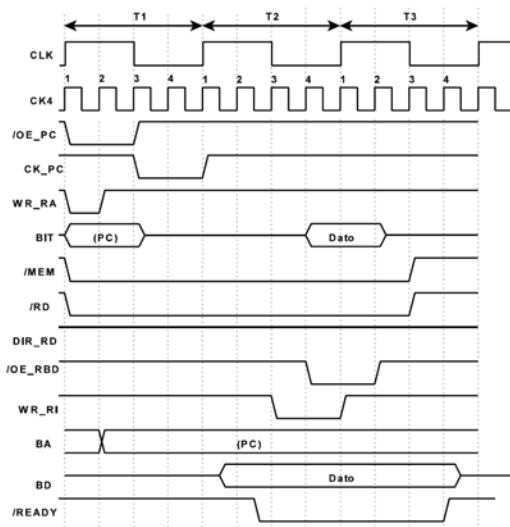


Figura 4. Cronograma del ciclo de búsqueda de una instrucción.

### 3. METODOLOGÍA

La aplicación de esta técnica significa una implicación elevada en el desarrollo de la materia tanto por parte de los estudiantes como por parte de los docentes. Sin embargo la experiencia ha demostrado que vale la pena utilizarla con la mayor intensidad posible ya que los resultados son muy buenos.

Actualmente, esta materia es una parte de un conjunto más amplio bajo la denominación “Sistema Electrónicos Digitales” que contiene otras materias como dispositivos periféricos y SBM (Sistemas Basados en Microprocesadores). El tiempo total de docencia es de 42 horas presenciales distribuidas a lo largo de 15 semanas. Dado que el tiempo disponible para esta sección es de 9 semanas (27 horas) y que la complejidad del objetivo es alta, es necesario dividir el contenido en partes y distribuir las entre los estudiantes agrupados por pares. Una vez establecidas las reglas de diseño (especificaciones y nomenclatura) cada grupo de trabajo se ocupa de un bloque funcional para lo cual generan la documentación correspondiente; esquemas, cronogramas funcionales y descripciones. El seguimiento de estos trabajos, por parte de los docentes es diario, sobre todo en la fase inicial de interpretación de las especificaciones. Este seguimiento se realiza utilizando medios TIC.

Al finalizar el periodo de ejecución de las tareas, los estudiantes han de realizar una presentación de los resultados obtenidos de forma que todos los

participantes dispongan de toda la documentación generada. Esta documentación se distribuye por medio del Aula Virtual. Cada estudiante realiza hasta cuatro tareas, dos sobre circuitería y dos sobre instrucciones. Las tareas comienzan a realizarse una vez que se han introducido los conceptos nuevos necesarios, se han discutido justificado las especificaciones y se han dado pautas específicas para realizar los diseños.

Algunos ejemplos de tareas de realización de circuitos son:

1. Realización de los registros de usuario: A, B, C, D y E.
2. Realización de los registros de funciones específicas: PC y SP.
3. Realización de la interfaz con el bus externo.
4. Realización de la UC (parte 1): Decodificación y direccionamiento de la ROM.
5. Realización de la UC (parte 2): Codificación de ciclos especiales.
6. Realización de la UC (parte 3): Arbitración de ciclos.
7. Realización de los registros auxiliares.
8. La ULA (parte 1): Funciones lógicas.
9. La ULA (parte 2): Funciones aritméticas.

En el caso de las tareas de instrucciones, la propuesta genéricas es como sigue: Obtener el contenido de la ROM para las diferentes instrucciones definidas.

La transferencia de documentos entre docente y estudiante se realiza exclusivamente utilizando medios TIC (aula virtual de la asignatura), no hay papel en circulación.

### 4. EVALUACIÓN

Los trabajos entregados y expuestos por los estudiantes son evaluados y calificados por los docentes. Cada tarea entregada aporta hasta el 15% de la calificación final de esta materia. El 85% restante se reparte entre dos tipos de evaluaciones: tres evaluaciones parciales de seguimiento (25%) y una evaluación final (60%).

Como se ha dicho en el apartado anterior, esta materia representa el 60% del total de la asignatura. El 40% restante se evalúa por medio de un examen parcial que aporta hasta el 25% de la calificación de esta parte y uno final que aporta hasta el 75% restante.

### 5. RESULTADOS

Durante el tiempo que se lleva utilizando esta técnica docente se han detectado dos problemas

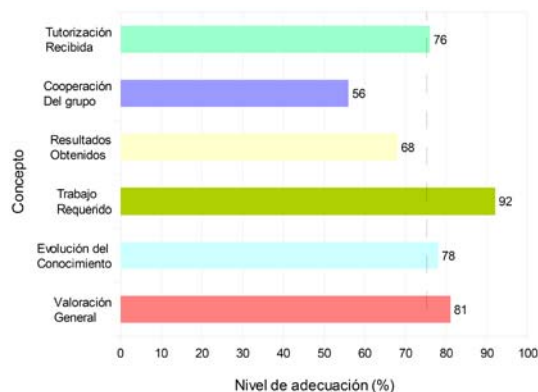


Figura 6. Resumen de las encuestas realizadas.

importantes. Por un lado hay estudiantes con una base técnica deficiente, tanto en electrónica como en electricidad y por otro hay falta de interés en algunos estudiantes. El primero se ha podido encaminar ajustando algunos contenidos de otras asignaturas y suministrando documentación complementaria de ayuda. El segundo problema suele ser resultado de actitudes personales. En algunos casos los estudiantes comentan que su objetivo es aprobar y nada más. En esta situación es difícil aportar una solución.

Para poder tener una traza de la efectividad y la aceptación de este método, en los últimos seis años se han realizado encuestas anónimas a los estudiantes que han participado activamente en la docencia/aprendizaje de esta materia para conocer la valoración que ellos dan al método. La figura 6 es el resumen de estas encuestas. El indicador de mayor valor corresponde al tiempo requerido para las tareas, que se corresponde con el trabajo necesario para realizarlas. El indicador de menor valor es el correspondiente al de cooperación en el grupo. La valoración general que dan los estudiantes es del 81%. La figura 7 resume los resultados de las encuestas de satisfacción de los estudiantes. En ella están representadas las opiniones sobre los conceptos antes y después de aplicar la técnica.



Figura 7. Resultados de la encuesta de opinión de los estudiantes.

## 6. CONCLUSIONES

La información que aporta las encuestas es que el método parece adecuado en cuanto a la satisfacción entre los estudiantes. Por otro lado, analizando trabajos posteriores como los Proyectos de Fin de Carrera y los Trabajos de Fin de Grado, se observa que los estudiantes se manejan con soltura en esta materia.

## 7. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por la Universidad de Málaga en el marco del Campus de Excelencia Internacional Andalucía Tech.

## REFERENCIAS

1. P. E. CERUZZI, A History of Modern Computing, The MIT Press, Massachusetts (2003) p. 23.
2. T. L. FLOYD, Fundamentos de Sistemas Digitales, Pearson Educación S.A. Madrid (2000). ISBN 84-205-2994-X.
3. R. GARCIA-ROBLES, F. Diaz-del-Río, S. Vicente-Diaz, and A. Linares-Barranco, An eLearning Standard Approach for Supporting PBL in Computer Engineering, IEEE Transactions on Education, Vol. 52, nº. 3, (2009) p. 328.
4. C. E. HMELO-SILVER, Problem-Based Learning: What and How Do Students Learn?, Educational Psychology Review, Vol. 16, no. 3, (2004) p. 235.
5. J. KIM, An Ill-Structured PBL-Based Microprocessor Course Without Formal Laboratory, IEEE Transactions on Education, Vol. 55, nº. 1, (2012) p. 145.
6. B. PEJCINOVIC, Engineering Education: Where We Are And Where We Go from Here, Information & Communication Technology Electronics & Microelectronics (MIPRO), 36th International Convention on, Opatija, Croatia, (2013).
7. J. R. SAVERY, Overview of Problem-based Learning: Definitions and Distinctions, Interdisciplinary Journal of Problem-based Learning, Vol. 1 Issue 1, (2006) p. 6.
8. P. J. SOTORRÍO y E. Ruiz, Sistemas Basados en Microprocesadores, SPICUM, Málaga (2004). ISBN 84-9747-009-5.
9. TEXAS INSTRUMENTS, MSP430x2xx Family User's Guide. (2012) p. 26.
10. ZILOG. Z80 Family CPU User Manual. User Manual. (2005) p. 2.