

Andrey Machikhin/photos.com



**EDITORIAL
DIGITAL**
TECNOLÓGICO DE MONTERREY

INTRODUCCIÓN AL PROCESAMIENTO DIGITAL DE SEÑALES CON dsPIC Y COMPILADOR C30 VOLUMEN 1



DAVID
ANTONIO TORRES

Blaz Erzetic, Alexandr Mituc / photos.com

Editorial



EDITORIAL DIGITAL

TECNOLÓGICO DE MONTERREY

El Tecnológico de Monterrey presenta su primera colección de eBooks de texto para programas de nivel preparatoria, profesional y posgrado. En cada título, nuestros autores integran conocimientos y habilidades, utilizando diversas tecnologías de apoyo al aprendizaje.

El objetivo principal de este sello editorial es el de divulgar el conocimiento y experiencia didáctica de los profesores del Tecnológico de Monterrey a través del uso innovador de la tecnología. Asimismo, apunta a contribuir a la creación de un modelo de publicación que integre en el formato eBook, de manera creativa, las múltiples posibilidades que ofrecen las tecnologías digitales.

Con su nueva Editorial Digital, el Tecnológico de Monterrey confirma su vocación emprendedora y su compromiso con la innovación educativa y tecnológica en beneficio del aprendizaje de los estudiantes.

<http://www.ebookstec.com>

ebookstec@itesm.mx

Autor

DAVID
ANTONIO TORRES

Profesor del Tecnológico de Monterrey, Campus Puebla.

Se tituló como Ingeniero en Electrónica por el Instituto Tecnológico de Veracruz, obtuvo una Maestría en Ciencias con especialidad en Diseño de Circuitos Integrados por el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, así como un doctorado en Filosofía con especialidad en Diseño VLSI por la Universidad de Sussex en el Reino Unido.

Coautor del capítulo: Transaction Level Modelling and Graphical Simulation of Novel Display Controllers, en el libro: Proceedings of the First UK Embedded Forum, editado por la Universidad de Newcastle Upon Tyne. Asimismo, ha publicado diversos artículos en revistas y conferencias en las áreas de diseño de circuitos integrados, modelado y diseño de sistemas embebidos, modelado de imágenes y controladores de display y diseño VLSI digital usando FPGAs. Actualmente es miembro de la Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) y de la Society for Information Display.

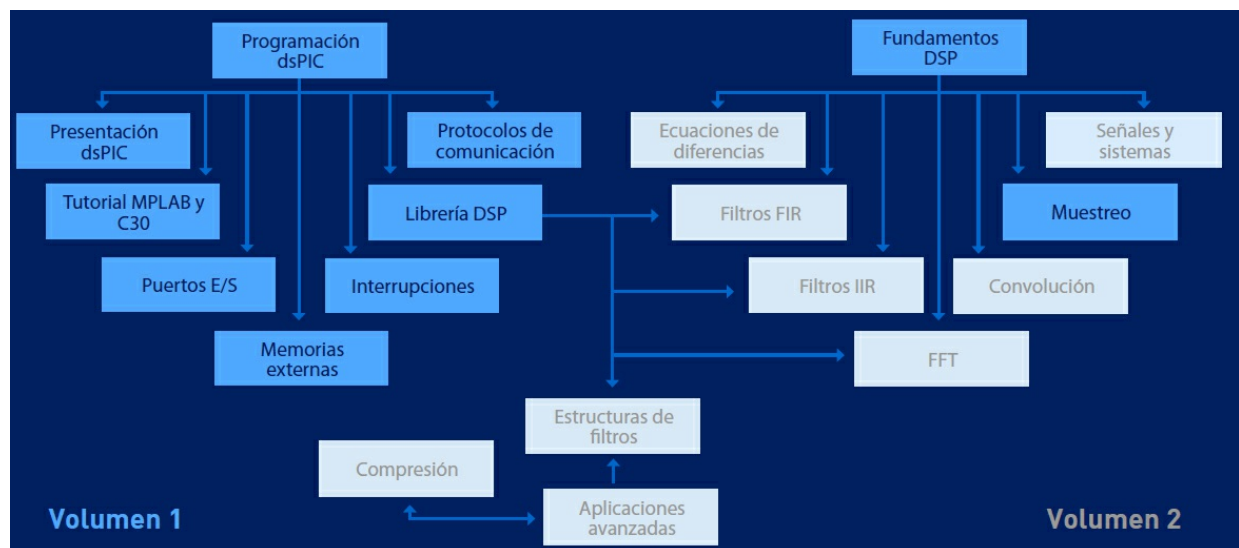
Mapa de contenidos

Volumen 1

- Programación dsPIC
 - [Presentación dsPIC](#)
 - [Tutorial MPLAB y C30](#)
 - [Puertos E/S](#)
 - [Interrupciones](#)
 - [Protocolos de comunicación](#)
 - [Memorias externas](#)
 - [Librería DSP](#)
 - [Muestreo](#)

Volumen 2

- Fundamentos DSP
 - Señales y sistemas
 - Convolución
 - Ecuaciones de diferencias
 - FFT
 - Filtros FIR
 - Filtros IIR
 - Estructuras de filtros
 - Compresión



vectoropenstock.com

Introducción del eBook

El área de Procesamiento Digital de Señales (DSP) está muy vigente en el desarrollo tecnológico que vive nuestro país y el mundo entero. En efecto, las áreas de telecomunicaciones, automotriz, entretenimiento y medicina son sólo algunas de las que se han visto beneficiadas por el avance de DSP y el desarrollo de circuitos integrados (CI). Telefonía digital, televisión 3D, procesamiento de imágenes médicas y la electrónica automotriz son sólo algunas aplicaciones que se han desarrollado en los últimos años gracias a los avances en los algoritmos DSP y microcontroladores de mejor desempeño, mejor conocidos como procesadores digitales de señales.

El material expuesto en este libro tiene la intención de facilitar la transición entre los aspectos teórico/matemáticos y la programación en lenguaje C del procesador digital de señales dsPIC de Microchip. Los tópicos están organizados en los siguientes temas:

- » Conceptos de señales, sistemas y frecuencia en tiempo discreto
- » Principios de muestreo y conversión analógico-digital
- » Suma de convolución y ecuaciones de diferencia
- » Transforma discreta de Fourier y la FFT
- » Principios de filtrado y tipos de filtros
- » Tópicos avanzados

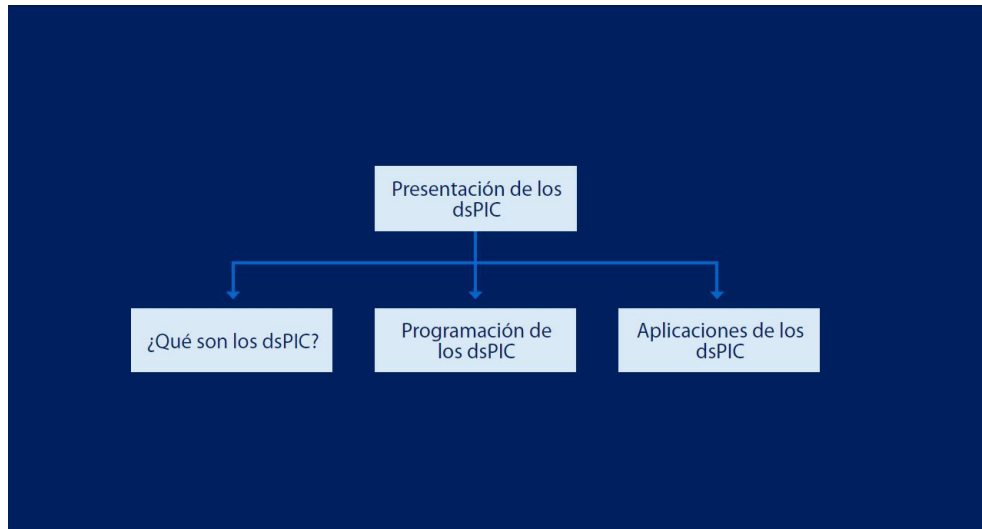
Cada tema será expuesto desde el punto de vista teórico y posteriormente se hará énfasis en cómo se puede programar en el dsPIC.

Capítulo 1. Presentación de los dsPIC

Organizador temático

Presentación de los dsPIC

- [¿Qué son los dsPIC?](#)
- [Programación de los dsPIC](#)
- [Aplicaciones de los dsPIC](#)



1.1 ¿Qué son los dsPIC?

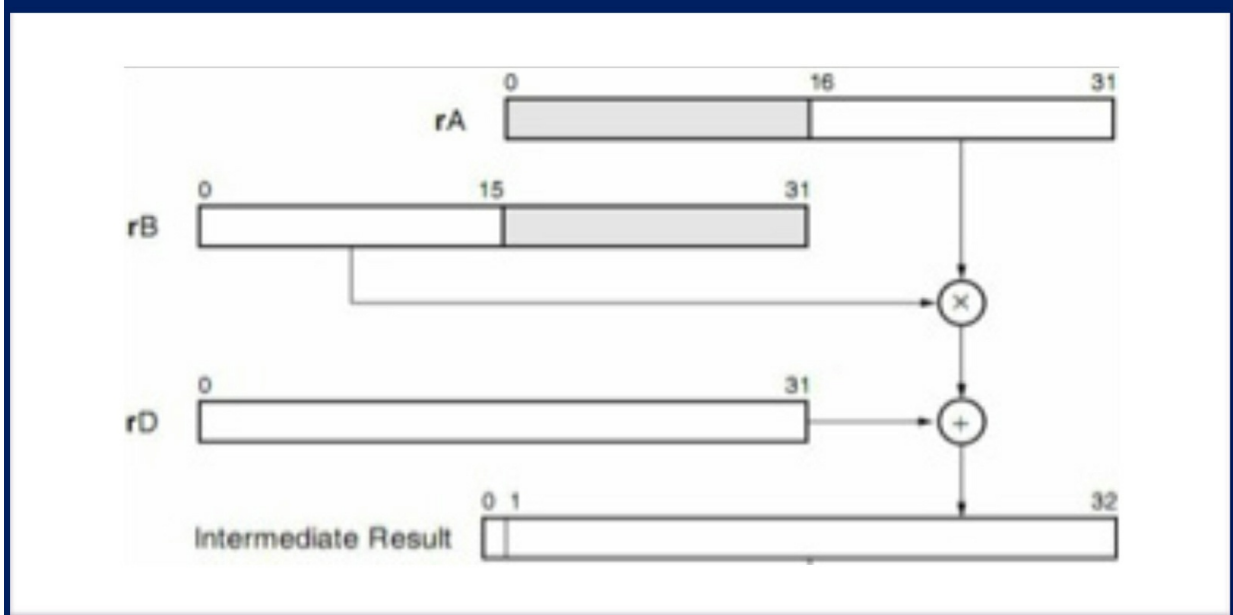
Los avances recientes en la fabricación de circuitos integrados han permitido que los sistemas electrónicos digitales sean cada vez más complejos y de menores dimensiones. En efecto, la tendencia actual en comunicación, educación y entretenimiento es que los dispositivos sean móviles, de bajo consumo de potencia y que procesen señales multimedia, como voz, internet, audio y video a la mayor velocidad posible.

Esta tendencia ha conducido a que compañías que fabrican circuitos integrados incorporen circuitos digitales más complejos en la arquitectura interna de los microcontroladores de propósito general, con la intención de que éstos sean capaces de cubrir los requerimientos de desempeño del procesamiento de señales multimedia. Estos circuitos digitales que se incorporan facilitan la realización y rápida ejecución de algoritmos de procesamiento de señales multimedia que antes eran imposibles de imaginar. Aquellos microcontroladores que se caracterizan por tales capacidades de procesamiento son denominados procesadores digitales de señales.

En términos de ejecución, los procesadores digitales de señales se diferencian de los microcontroladores de propósito general en que pueden realizar las operaciones de suma, resta, multiplicación y acumulación de una forma rápida y eficiente (ver [Figura 1.1](#)).

Dichas operaciones aritméticas, como se irá viendo a lo largo del libro, son las mínimas necesarias para realizar procesamiento de señales digitales.

Figura 1.1 Operación de acumulación de un procesador digital de señales



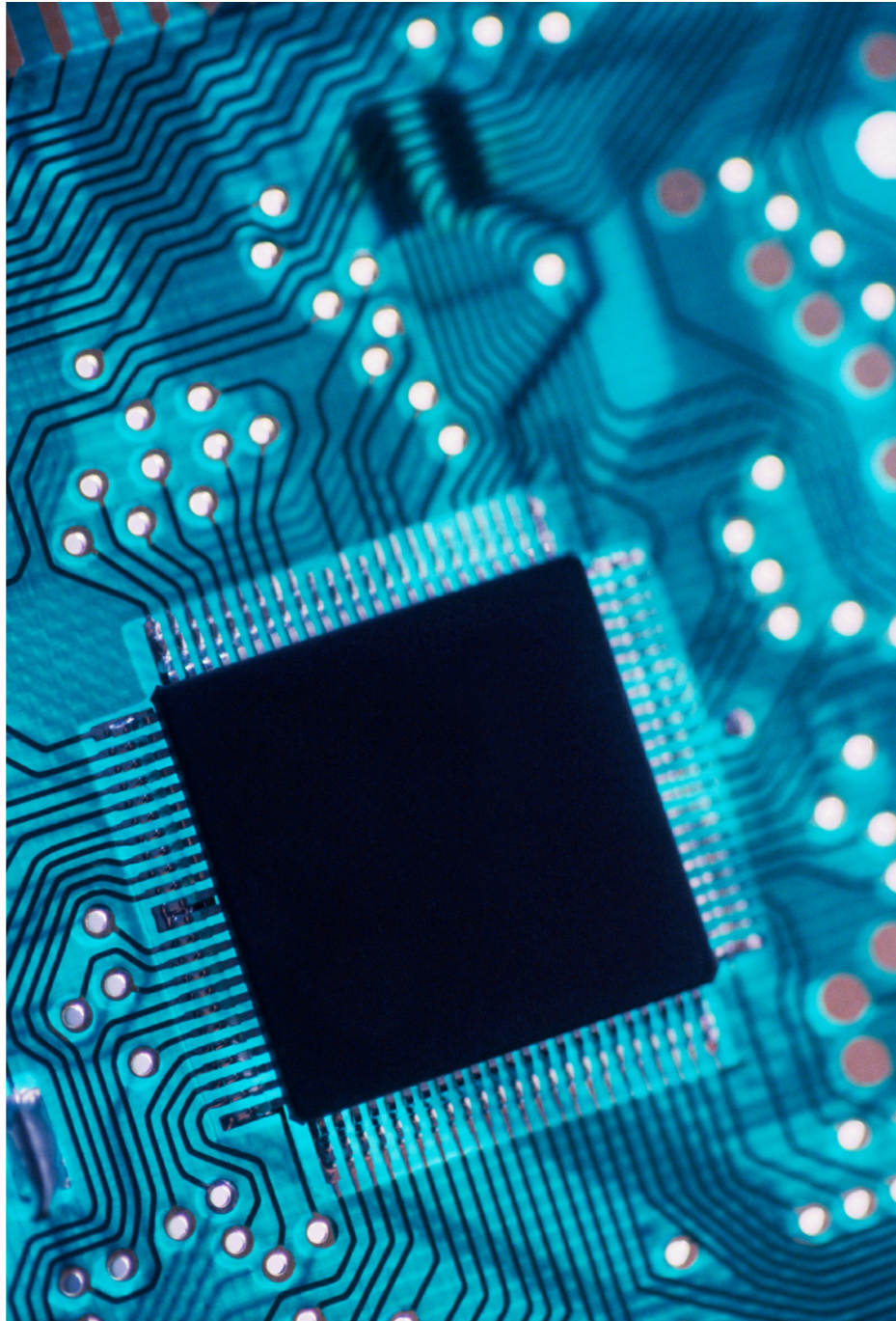
Uno de los bloques básicos digitales que se encuentran en un procesador digital de señales es el multiplicador/acumulador ([MAC](#)). El circuito MAC es capaz de ejecutar una suma y una multiplicación, involucrando hasta tres operandos, en un [ciclo de instrucción](#).

El circuito MAC será mencionado a lo largo de este libro, ya que su operación se encuentra presente en la realización de filtros digitales, la suma de convolución, ecuaciones de diferencias y la [FFT](#). Más información acerca de las instrucciones MAC del dsPIC33FJ256GP puede ser obtenida del [Manual de Referencia del Programador](#) disponible en la sección de Recursos abajo.

Ligas de interés

» Manual de Referencia del Programador

[\(documento en012820 \(Prog Ref Manual\).pdf\)](#)



Microchip ha entrado al mercado de los procesadores digitales de señales ofreciendo los [dsPIC](#). Los dsPIC son microcontroladores de 16 bits que resultan de la combinación de la arquitectura y la facilidad de programación de los microcontroladores de 8 bits y los circuitos digitales avanzados que caracterizan a los procesadores digitales de señales.

Con la introducción de los dsPIC, la intención de Microchip es aprovechar su enorme popularidad entre los programadores de microcontroladores de 8 bits y su conjunto de herramientas de programación gratuitas y de bajo costo.

Particularmente, en este libro se estará abordando el estudio y la programación del dsPIC33FJ256GP de la tarjeta de Microchip MPLAB Starter Kit for dsPIC. Asimismo, se asume que el lector tiene una mínima experiencia trabajando con los microcontroladores y las herramientas de Microchip.

Ligas de interés

» Hoja de especificaciones del dsPIC33FJ256GP

[\(70286c \(dspic datasheet\).pdf\)](#)

» Manual de usuario para la tarjeta de desarrollo del dsPIC

[\(dsPIC-DSCsStarterKitUsersGuide.pdf\)](#)

1.2 Programación de los dsPIC

En términos de programación, los dsPIC pueden ser tratados como cualquier otro microcontrolador de Microchip, compartiendo las siguientes características

El ambiente de desarrollo integrado [MPLAB](#) es la herramienta principal de programación

La creación de un proyecto de programación en MPLAB en el cual se indiquen las herramientas de programación que serán usadas y el tipo de microcontrolador o dsPIC que se estará programando

La programación misma del microcontrolador o dsPIC ya sea usando un programador universal o algún programador propietario de Microchip

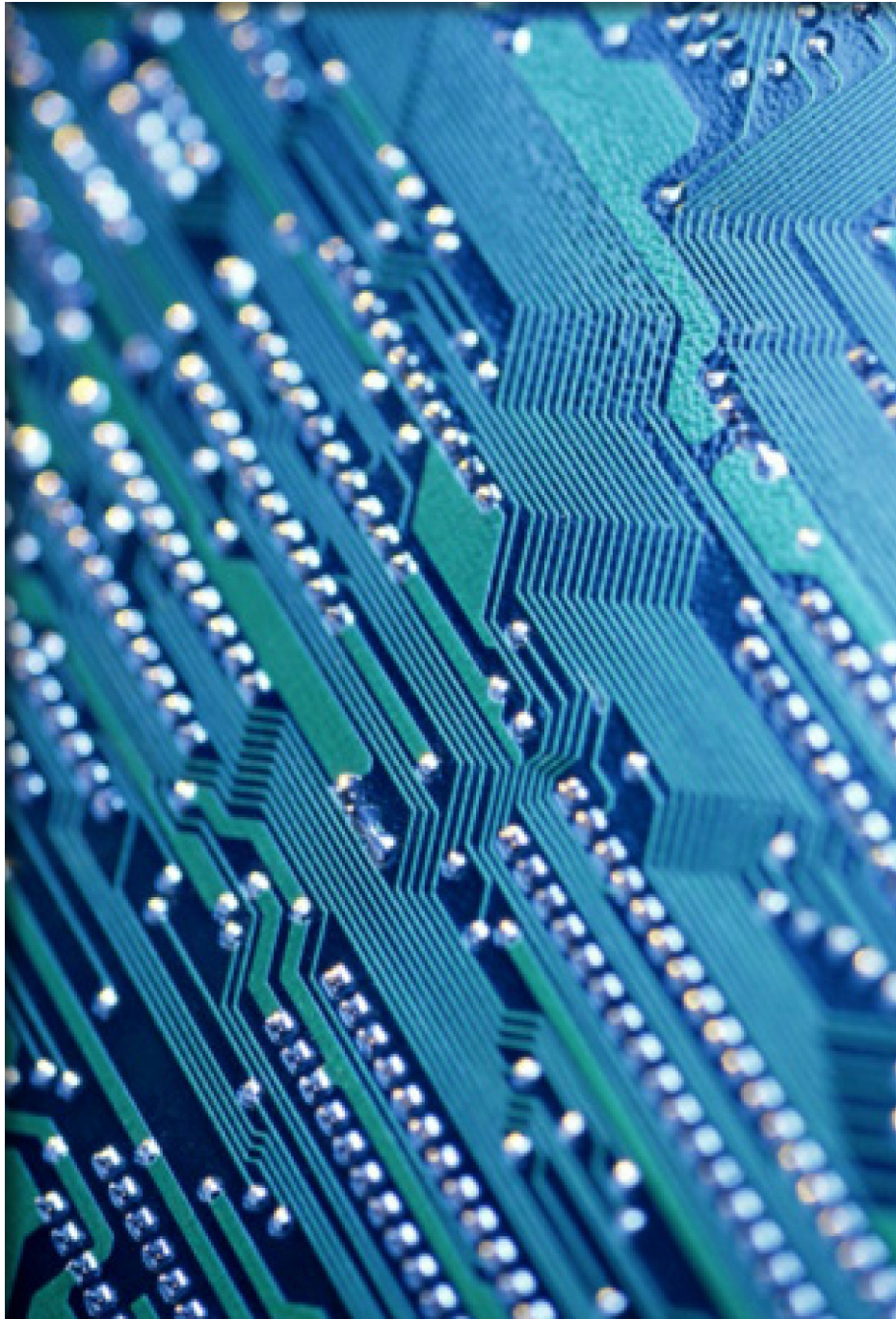
En particular, en este libro seguiremos la siguiente secuencia de programación para los dsPIC

MPLAB es el ambiente de codificación, simulación y búsqueda de errores

Las herramientas de programación se encuentran agrupadas bajo el compilador [C30](#) de Microchip

MPLAB Starter Kit for dsPIC es la tarjeta de desarrollo o entrenador que se estará usando a lo largo del libro, la cual puede ser programada directamente desde MPLAB

A continuación se discute con mayor detalle la programación de los dsPIC



Ligas de interés

» [Guía de usuario de MPLAB](#)

[\(51519c \(mplab user guide\).pdf\)](#)

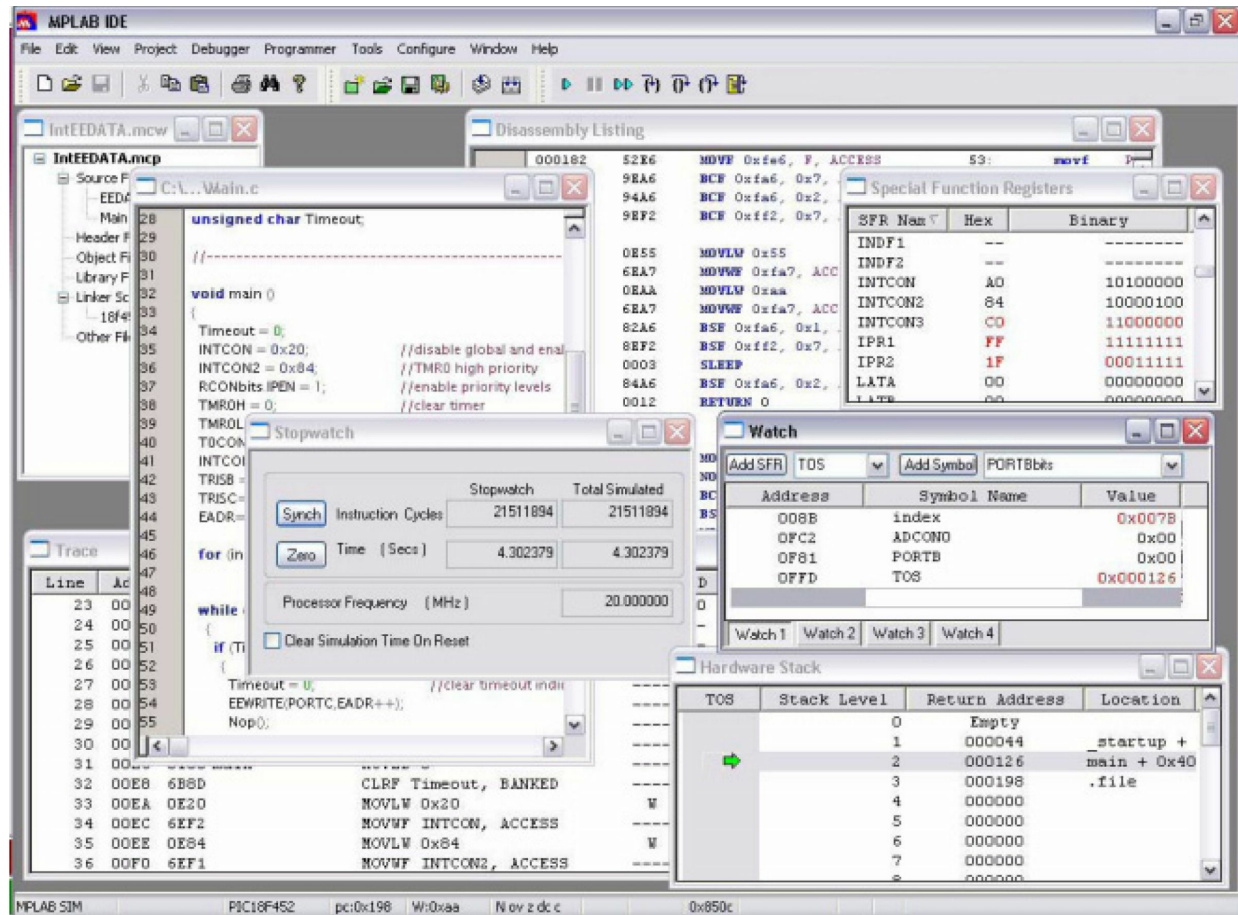
MPLAB es un ambiente de desarrollo de aplicaciones para los microcontroladores y dsPIC de Microchip. MPLAB integra un editor para código en lenguaje ensamblador o C, un debugger para la búsqueda de errores y un simulador para verificar la ejecución correcta de la aplicación. Así mismo, como ya ha sido mencionado anteriormente, MPLAB jugará también el papel de programador para el dsPIC con el que se trabajará (Ver [Figura 1.2](#)).

En general, una aplicación se desarrolla en MPLAB siguiendo los siguientes pasos:

1. Creación de un nuevo proyecto, donde se selecciona el tipo de microcontrolador o dsPIC y las herramientas de programación y compilación
2. Escribir el código y ejecutar el debugger
3. La simulación de la aplicación

Dependiendo de las condiciones y necesidades de la aplicación, diferentes herramientas de MPLAB pueden ser invocadas a lo largo del desarrollo de la aplicación. Detalles de cada una de las herramientas disponibles en MPLAB pueden consultados en su guía de usuario.

Figura 1.2 MPLAB y sus herramientas



Todas las aplicaciones que serán desarrolladas a lo largo del libro serán escritas en lenguaje C. El compilador que se estará usando es el C30 de Microchip (este compilador también es conocido como MPLAB C Compiler for [DSCs](#)).

Ventajas del compilador C30 de Microchip con respecto a otros para programar dsPICs:

Completamente integrado con MPLAB

Versión académica completamente gratis

Librería de periféricos para fácil programación

Librería para el procesamiento de señales (llamada de aquí en adelante librería DSP)

Integración con herramientas comerciales para el diseño de filtros digitales como dsPICWorks y dsPICFDLite

Librerías para la compresión de voz

Las aplicaciones al procesamiento digital de señales que serán demostradas en este libro están basadas en el compilador C30 y las librerías antes mencionadas.

Su instalación y una guía paso a paso para la creación de proyectos con el compilador C30 se encuentran detalladas en la guía de usuario.

Uno de los principales objetivos de este libro es motivar al estudiante a verificar en hardware todos los algoritmos para el procesamiento digital de señales que serán estudiados. Con ese propósito, se usará la tarjeta de desarrollo o entrenador MPLAB Starter Kit for dsPIC de Microchip. Las principales ventajas de esta tarjeta son:

Completamente integrada con MPLAB y el compilador C30 en términos de programación y debugging

Orientada al procesamiento de audio y voz

Bajo costo y fácil de usar

Mientras que existen en el mercado tarjetas de desarrollo de mayor capacidad de procesamiento, éstas imponen un mayor nivel de complejidad en su programación. Las aplicaciones que se expondrán a lo largo del libro demostrarán que la tarjeta seleccionada es la más adecuada, ya que proporciona el balance perfecto entre facilidad de programación y nivel medio de complejidad, mientras permite al estudiante visualizar la relación entre los algoritmos de procesamiento de señales y su programación en hardware.

Ligas de interés

» Guía de usuario Compilador C30

[\(70094E \(16-bit Getting Started\).pdf\)](#)

1.3 Aplicaciones de los dsPIC

Las aplicaciones de los dsPIC están relacionadas con tareas que involucran la manipulación de señales digitales siguiendo algoritmos que se basan en un tratamiento matemático intensivo. Una de las últimas tendencias en procesamiento de señales es el procesamiento multimedia embebido, el cual involucra una o más de las siguientes tareas.

- Compresión y descompresión de voz
- Procesamiento de audio y decodificación MP3
- Procesamiento de imágenes y decodificación JPG
- Comunicaciones alámbricas e inalámbricas

Otra importante área de aplicaciones es en sistemas de potencia y control, cuyas tareas requieren

- Control automático de motores
- Control de sensores
- Convertidores DC/DC

Otras áreas de aplicación pueden ser consultadas en las referencias que se incluyen al final del capítulo. Sin embargo, es importante mencionar que en este libro se hará énfasis en las aplicaciones que permite la tarjeta [DSP](#) que se ha seleccionado.

Como ha sido mencionado anteriormente, la tarjeta dsPIC con la que se trabajará a lo largo del libro está enfocada a aplicaciones de procesamiento de audio y voz. Algunas aplicaciones que serán desarrolladas en capítulos posteriores son listadas a continuación

- Generadores de formas de onda
- Uso de ecuaciones diferenciales para la generación de ecos
- Filtros digitales para la eliminación de algunas frecuencias de interés
- Análisis espectral usando la FFT
- Compresión y descompresión de voz

Mientras que estas aplicaciones se consideran elementales, la particularidad que demuestran es que pueden ser usadas como tareas básicas para aplicaciones más complejas.

Microchip identifica algunas aplicaciones para los dsPIC en el área de procesamiento de audio y voz. Estas son listadas en la sección Audio and Speech en el apartado Applications and Markets de su página en internet.

Ligas de interés

» Página principal de Microchip

www.microchip.com

Ejercicio integrador del capítulo 1

Ejercicio integrador

1. ¿Cuál de las siguientes operaciones ejecuta más eficientemente un dsPIC que un microcontrolador de propósito general?
 - a. Escribir a puerto.
 - b. Inicializar registros internos.
 - c. Complemento de registros.
 - d. Multiplicación de registros.
2. Usar el Manual de Referencia del Programador del dsPIC y listar las dos instrucciones MAC que permiten calcular el cuadrado de un número. (Refiérase a la sección 4.14 para más información).
 - a. MAC y MPY
 - b. ED, EDAC y MSC
3. ¿Qué tipo de avance tecnológico ha permitido el desarrollo de procesadores digitales de señales como circuitos integrados?
 - a. Las computadoras personales.
 - b. El internet.
 - c. Los circuitos integrados.
 - d. Los sistemas operativos.
4. Usando el manual de usuario de la tarjeta dsPIC (MPLAB Starter Kit for dsPIC) identifica los dos periféricos del dsPIC que reciben al audio de entrada en la tarjeta. (Refiérase al [capítulo 4](#) del manual para más información).
 - a. ADC y DCI
 - b. SPI y DCI
 - c. SPI y OC1
5. ¿Cuál de las siguientes operaciones MPLAB no puede realizar con el dsPIC de la tarjeta MPLAB Starter Kit for dsPIC?

- a. Introducir señales de audio.
 - b. Borrar su programa.
 - c. Cargar una nueva aplicación.
 - d. Poner en pausa una aplicación.
6. Los cuatro pasos para desarrollar una aplicación de software en MPLAB son: (refiérase a la guía de usuario de MPLAB en su parte I).
- a. 1. Crear el diseño en alto nivel, 2. Compilar, ensamblar y ligar, 3. Probar el código y 4. Quemar el código en un microcontrolador.
 - b. 1. Escribir código, 2. Probar código, 3. Conectar programador y 4. Programar microcontrolador.
7. ¿Cuál de las librerías listadas a continuación no es soportada por el compilador C30 para los dsPIC?
- a. Librería de periféricos.
 - b. Librería dsPICWorks.
 - c. Librería DSP.
 - d. Librería de compresión de voz.
8. Determinar la máxima velocidad de operación del dsPIC33FJ256GP dada en Millones de Instrucciones por Segundo o MIPS sabiendo que la máxima frecuencia de reloj soportada por el dispositivo es de 80MHz y que dos ciclos de reloj conforman un ciclo de instrucción (Refiérase a la)
- a. 40 MIPS
 - b. 80 MIPS
9. Usando la imagen de MPLAB y sus herramientas (ver [Figura 1.2](#)), ¿cuáles son las tres herramientas para el desarrollo de aplicaciones?
- a. Editor, watch, y stopwatch.
 - b. Microcontrolador, programador y debugger.
10. ¿Cuál de las siguientes aplicaciones no es catalogada como procesamiento multimedia embebido realizado por los dsPIC?
- a. Procesamiento de voz.
 - b. Comunicaciones inalámbricas.
 - c. Control de sensores.
 - d. Decodificación MP3.

Las respuestas correctas:

1.
 - d. Multiplicación de registros. (La ejecución de las operaciones matemáticas se encuentran optimizadas en los dsPIC.)
2.
 - a. MAC y MPY (Elevan al cuadrado el dato contenido en un registro o en un acumulador.)
3.
 - c. Los circuitos integrados. (Al mejorar la fabricación de los circuitos integrados, los microcontroladores han podido evolucionar hasta alcanzar niveles de complejidad como los procesadores digitales de señales.)
4.
 - a. ADC y DCI
5.
 - a. Introducir señales de audio. (MPLAB no tiene las prestaciones para introducir audio a la tarjeta. Esto requiere manipulación directa de la tarjeta.)
6.
 - a. 1. Crear el diseño en alto nivel, 2. Compilar, ensamblar y ligar, 3. Probar el código y 4. Quemar el código en un microcontrolador.
7.
 - b. Librería dsPICWorks. (dsPICWorks es un programa independiente al compilador C30 para la evaluación de filtros digitales y algoritmos de procesamiento de señales.)
8.
 - b. 80 MIPS (Ya que cada dos ciclos de reloj se ejecuta una instrucción, para un reloj de 80MHz hasta 40 millones de instrucciones se pueden ejecutar en un segundo.)
9.
 - a. Editor, watch, y stopwatch.
10.
 - c. Control de sensores. (El control de sensores puede ser realizado por los dsPIC pero no se clasifica como procesamiento multimedia.)

Conclusión del capítulo 1

Capítulo 1. Presentación de los dsPIC

Los procesadores digitales de señales son microcontroladores cuya arquitectura interna ha sido mejorada para aumentar su desempeño en la realización de algoritmos que requieran tratamientos matemáticos intensivos. Los dsPIC son los procesadores de señales comercializados por Microchip. Entre las principales ventajas de los dsPIC con respecto a otros procesadores comerciales son su facilidad de programación, herramientas de programación gratuitas y tarjetas de desarrollo de bajo costo.

La propuesta de programación de Microchip para los dsPIC son MPLAB como el ambiente de programación integrado, el compilador C30 para programar a los dsPIC en lenguaje C y el MPLAB Starter Kit for dsPIC como tarjeta de desarrollo y evaluación. Estos tres elementos de programación serán usados a lo largo del libro para demostrar los diversos algoritmos para el procesamiento digital de señales.

Mientras que los procesadores de señales pueden ser usados para el procesamiento de imágenes, audio, voz, comunicaciones inalámbricas, control de motores y sensores, entre otros, los algoritmos de procesamiento digital de señales que serán demostrados en este libro están orientados al procesamiento de audio y voz.

En los siguientes capítulos se mostrará la filosofía de programación de los dsPIC a través de los periféricos involucrados en el procesamiento de audio y voz, para que posteriormente se estudien los algoritmos de procesamiento digital de señales tanto teóricamente como su programación con los dsPIC.

Glosario del capítulo 1

C

C30

Compilador de lenguaje C para la programación de los procesadores digitales de señales comercializados por Microchip (Véase también dsPIC).

CI

Siglas para circuito integrado.

Ciclo de instrucción

Número de ciclos de reloj que un microcontrolador necesita para ejecutar una instrucción.

D

DSC

Procesador digital de señales comercializado por Microchip (Véase también dsPIC).

DSP

Siglas en inglés para el procesamiento digital de señales (Digital Signal Processing).

dsPIC

Procesador digital de señales comercializado por Microchip.

F

FFT

Siglas en inglés para la transformada rápida de Fourier (Fast Fourier Transform).

M

MAC

Instrucción de bajo nivel que ejecuta la operación de multiplicación y acumulación en un solo ciclo de instrucción.

MPLAB

Ambiente de programación para microcontroladores y dsPIC de Microchip

Procesador digital de señales

Microcontrolador con arquitectura interna mejorada para la ejecución de algoritmos con tratamiento matemático intensivo.

Recursos del capítulo 1

Microchip Technology Inc. (2010). 16-bit Microcontrollers and dsPIC.

http://www.microchip.com/stellent/idcplg?IdcService=SS_GET_PAGE&nodeId=75

Microchip Technology Inc. (2010).

<http://www.microchip.com>