



Procesado Digital de Señal con Coldfire®

Por Luis Casado

Luis Casado
Freescale Semiconductor
www.freescale.com

El módulo Multiplicador-Acumulador (MAC/EMAC) presente en la familia de Microprocesadores y Microcontroladores Coldfire® de Freescale le permiten añadir funcionalidad de procesamiento digital de señal DSP fácilmente y a muy bajo coste en sus productos. Muchas aplicaciones necesitan procesar datos procedentes de sensores, aunque la función principal del producto o aplicación no sea el procesamiento digital de esos datos, sino el uso inteligente de los mismos. Muchas aplicaciones aparentemente de procesamiento digital realmente no lo son y el procesamiento supone una parte mínima de la carga total de la CPU. Un DSP tradicional puede que no sea necesariamente la mejor opción para ejecutar solo un 20% de código totalmente dedicado al procesamiento, mientras que seguirá necesitando el soporte de un procesador adicional para el resto de tareas. Los módulos de procesamiento digital MAC/EMAC y las herramientas de Freescale, proporcionan a los usuarios de Coldfire® la posibilidad de realizar avanzadas y sofisticadas aplicaciones de procesamiento digital suponiendo sólo un 2-3% de carga de CPU de su aplicación, y todo ello sin coste adicional.

y periféricos. Además su conjunto de instrucciones de longitud variable le permite una optimización de código nativa sin sacrificar de ningún modo las prestaciones del procesador. Los módulos MAC y el más avanzado EMAC forman parte del núcleo de los procesadores de la familia Coldfire V2/V3/V4, proporcionando soporte para algoritmos de procesamiento digital de señal sin coste adicional alguno. En la figura 1 se muestra de forma muy resumida la familia y su evolución inminente.

Los módulos MAC/EMAC son una extensión del multiplicador básico contenido en otras arquitecturas de 32 bits. El objetivo de esta extensión hardware es proporcionar la ejecución nativa de operaciones de procesamiento digital lo más rápido y eficientemente posible dentro de los límites establecidos por la aplica-

La arquitectura Coldfire está diseñada para abordar aplicaciones avanzadas tanto del mundo industrial como aplicaciones generales de consumo. Está presente desde hace 15 años en el mercado y representa la familia de procesadores de 32 bits

más extensa y con más opciones de conectividad. Nuevos miembros continúan apareciendo para ajustarse a las nuevas necesidades de nuestros clientes. El tamaño del núcleo es lo suficientemente reducido para permitir la alta integración de memoria

Información Adicional

Para obtener más información, puede consultar los Manuales de Referencia y Notas de Aplicación citadas a continuación en la web de Freescale (www.freescale.com) o contactar con su red de distribuidores.
CFPRM: ColdFire® Family Programmer's Reference Manual.
CFLMOPM: Library of Macros for Optimization Using eMAC and MAC. Programmer's Manual.
DSPLIBUM: Digital Signal Processing Libraries Using the ColdFire® eMAC and MAC. User's Manual
CFLMOPMSW, DSPLIBUMSW: Software asociado a las anteriores librerías.

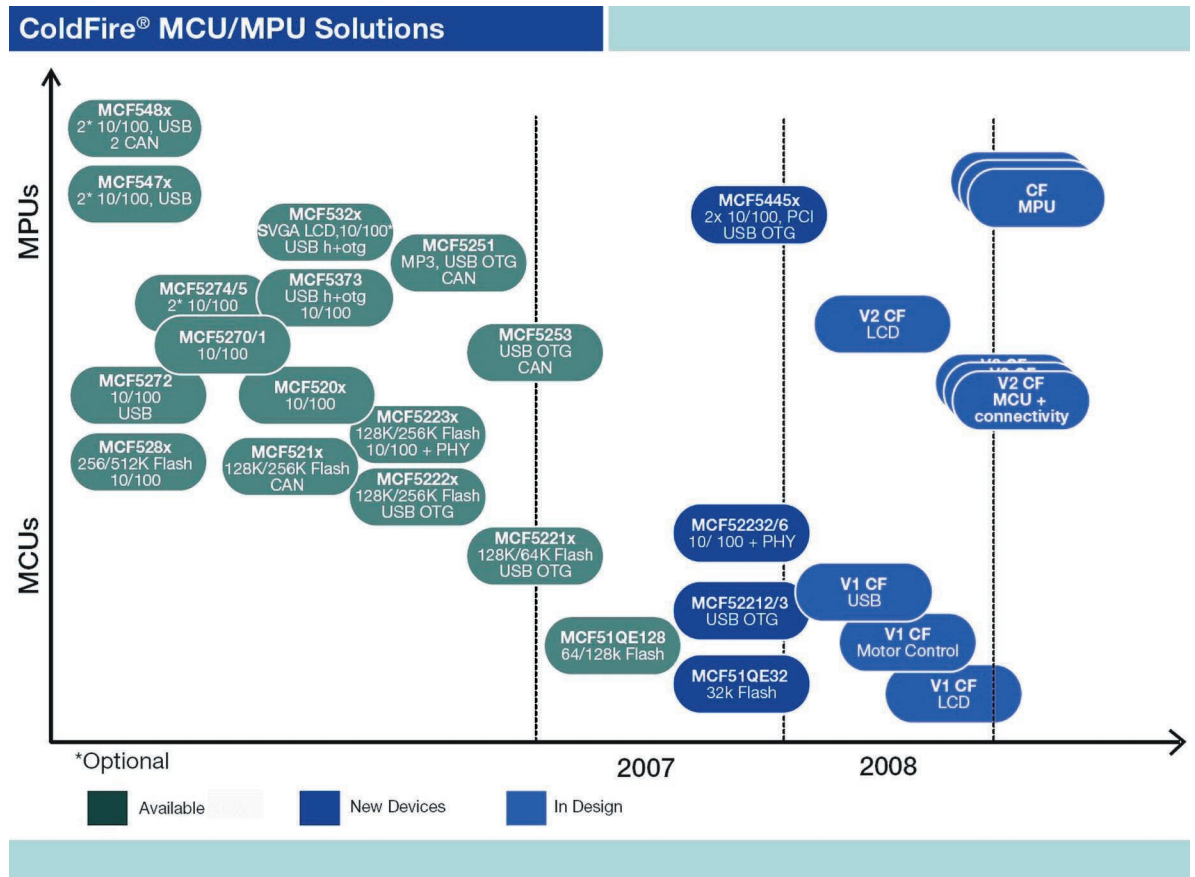


Figura 1. Roadmap de microcontroladores Coldfire

ción. Por ejemplo, un pequeño filtro digital puede tolerar la variación de tiempo de ejecución del algoritmo, mientras que un transformada FFT o DCT necesitará más velocidad, memoria y precisión. Obviamente la arquitectura Coldfire no fue diseñada para procesado digital de alta velocidad, pero del mismo modo un DSP de altas prestaciones podría ser excesivo dentro de muchas aplicaciones embebidas. Coldfire con la adición del módulo MAC/EMAC ocupa el lugar intermedio entre velocidad, complejidad de diseño y funcionalidad. MAC/EMAC esta optimizado para ejecutar una serie de operaciones que incluyen multiplicación y acumulación. Específicamente la matriz de multiplicación esta optimizada para realizar multiplicaciones de 16 x 16 bits en un solo ciclo y la correspondiente acumulación en el siguiente. En paralelo a estas operaciones la CPU principal ejecutará ciclos de búsqueda de operandos para incrementar las prestaciones globales de ciertas operaciones de procesado de señal.

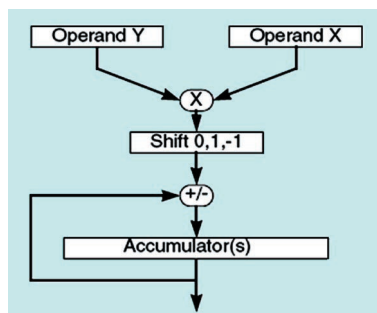
Modulo EMAC

Vamos a estudiar un poco mas en detalle la arquitectura del módulo EMAC por ser el más avanzado de los dos y posteriormente mostraré las diferencias existentes entre ambos módulos.

El módulo EMAC proporciona a Coldfire un conjunto de operaciones que pueden ser utilizadas para mejorar las prestaciones de código embebido aportando fundamentalmente, multiplicación-acumulación además de desplazamiento y control de saturación de resultados.

- Este módulo proporciona avanzada funcionalidad en tres áreas:
- Multiplicación de enteros con o sin signo.
- Operaciones de Multiplicación-Acumulación soportando operandos enteros o fraccionales. Operaciones misceláneas sobre registros.

El EMAC tiene una 'pipeline' de cuatro etapas optimizada para manejar operandos de 32 bits, con una estructura para multiplicaciones de 32 x 32 y cuatro acumuladores de 48 bit.



Los módulos MAC/EMAC aceleran la ejecución de las instrucciones de multiplicación de enteros (MULS y MULU) y añaden funcionalidad de multiplicación-acumulación.

Las instrucciones que manejan estos módulos están incluidas en los conjuntos de instrucciones de Coldfire ISA. Esto hace posible la multiplicación de dos números seguida de la adición o sustracción del producto al valor almacenado en el Acumulador. Opcionalmente el producto puede ser desplazado a la derecha o izquierda 1 bit antes de la suma o resta con el valor del acumulador.

Command	Mnemonic	Description
Multiply Signed	MULS <ea>y,Dx	Multiplies two signed operands yielding a signed result
Multiply Unsigned	MULU <ea>y,Dx	Multiplies two unsigned operands yielding an unsigned result
Multiply Accumulate	MAC Ry,Rx,SF,ACCx MSAC Ry,Rx,SF,ACCx	Multiplies two operands and adds/subtracts the product to/from an accumulator
Multiply Accumulate with Load	MAC Ry,Rx,<ea>y,Rw,ACCx MSAC Ry,Rx,<ea>y,Rw,ACCx	Multiplies two operands and combines the product to an accumulator while loading a register with the memory operand
Load Accumulator	MOVL (Ry,#imm),ACCx	Loads an accumulator with a 32-bit operand
Store Accumulator	MOVL ACCx,Rx	Writes the contents of an accumulator to a CPU register
Copy Accumulator	MOVL ACCy,ACCx	Copies a 48-bit accumulator
Load MACCSR	MOVL (Ry,#imm),MACSR	Writes a value to MACCSR
Store MACCSR	MOVL MACSR,Rx	Write the contents of MACSR to a CPU register
Store MACSR to CCR	MOVL MACSR,CCR	Write the contents of MACSR to the CCR
Load MAC Mask Reg	MOVL (Ry,#imm),MASK	Writes a value to the MASK register
Store MAC Mask Reg	MOVL MASK,Rx	Writes the contents of the MASK to a CPU register
Load AccExtensions01	MOVL (Ry,#imm),ACCext01	Loads the accumulator 0,1 extension bytes with a 32-bit operand

El módulo también soporta aritmética para el control de la saturación para minimizar el software asociado a la detección de 'overflows' en los cálculos.

La Multiplicación- Acumulación soporta operandos de 16 o 32 bits en los siguientes formatos:

- Enteros con signo
- Enteros sin signo
- Números fraccionales con signo en coma fija

Todas las operaciones aritméticas usan los registros para la entrada de operandos y los resultados intermedios son almacenados en el acu-

mulador. Por lo tanto, instrucciones adicionales de movimiento de datos son necesarias para almacenar los datos en los registros.

Nuevas y existentes instrucciones de la arquitectura Coldfire solucionan estos requisitos. La instrucción MOVEM puede mover grandes bloques de datos con mucha eficiencia. La habilidad del Coldfire para simultáneamente mover un operando de memoria a un registro y ejecutar una instrucción MAC hace que operaciones de procesado digital como el filtrado y convolución sean abordables.

Además disponemos de un registro de 16 bits (MASK) que opcionalmente puede ser usado para generar una nueva dirección de operando mientras se ejecuta MAC + MOVE. El uso de este registro con el modo de direccionamiento con auto-incremento hace eficiente el uso de 'buffers' circulares. Y por último, disponemos del registro MACSR con las banderas de estado del módulo y el control del 'overflow' y saturación.

Figura 2. Operación típica a realizar por el MAC/EMAC

Figura 3. Conjunto de Instrucciones disponibles para el EMAC

Diferencias entre el módulo MAC y EMAC

En la tabla de la figura 4 podemos ver las diferencias fundamentales entre el módulo MAC y el mas avanzado EMAC.

MAC	<ul style="list-style-type: none"> • Three-Stage execution Pipeline • Optimized for 16-bit Operands • Single 32-bit Accumulator • Integer + Fractional
eMAC	<ul style="list-style-type: none"> • Four-Stage execution Pipeline • Optimized for 32-bit Operands • Four 48-bit Accumulators • Integer + Fractional

Figura 4. Diferencias entre MAC y EMAC



Herramientas Software

Las herramientas software que proporciona Freescale de forma totalmente gratuita, y descargable directamente de nuestra web son:

Figura 6. Estructura de las librerías de Macros para MAC/EMAC

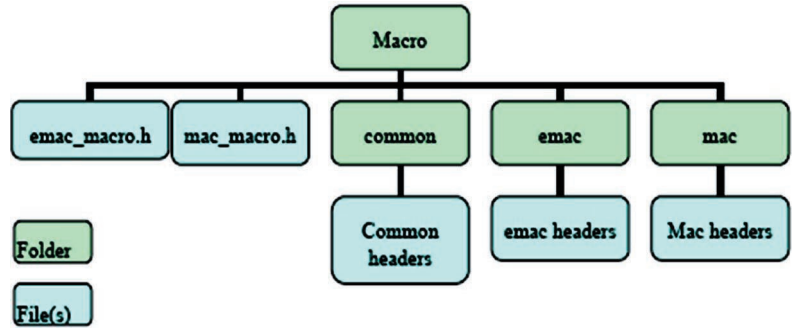
Librería DSP:

Esta librería está desarrollada para trabajar con el MAC/EMAC de cualquier miembro de la familia Coldfire. Incluye tres de las aplicaciones más comunes dentro del procesamiento digital de señal:

1. Fast-fourier transform (FFT)
2. Finite impulse filter (FIR)
3. Infinite impulse filter (IIR)

En la figura 5 pueden verse las funciones implementadas y optimizadas para su uso con los módulos MAC/EMAC, junto con proyectos de ejemplo de su funcionamiento y utilización.

Figura 5. Estructura de la librería DSP para MAC/EMAC



Cada una de las partes incluidas está dividida en cuatro secciones para las diferentes operaciones de cálculo soportadas:

- 1D array operations
- 2D array operations
- DSP algorithms
- Mathematical functions

Asociado a esta librería disponemos de un proyecto de CodeWarrior para Coldfire que nos facilita su utilización.

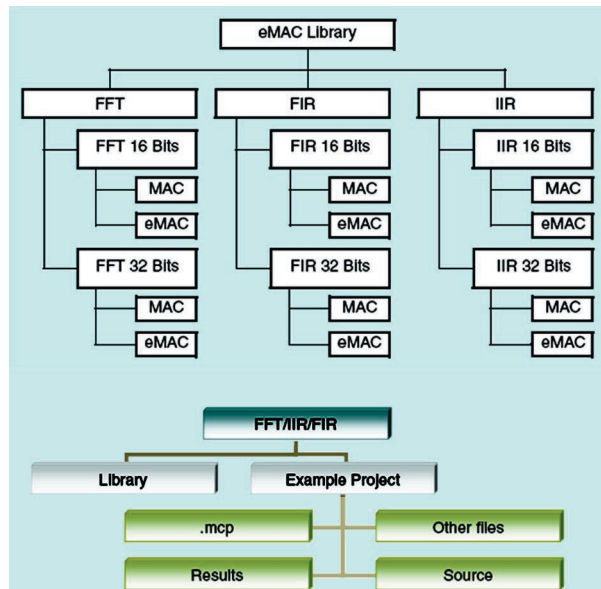
Estos cursos nos facilitan el aprendizaje y la integración de estos algoritmos y nos permiten evaluar su eficiencia.

Para cerrar el círculo, podemos utilizar las placas de evaluación estándar y de bajo coste de Freescale para Coldfire, como la M5213EVB o M5282EVB, y utilizar la versión gratuita del CodeWarrior para Coldfire, Special Edition, que nos permite generar hasta 128 Kbytes de código.

Formación

De forma complementaria a estas librerías y su software asociado, disponemos de dos cursos prácticos demostrativos en los que se permite evaluar las prestaciones de diferentes variantes de Coldfire y su capacidad de procesamiento digital.

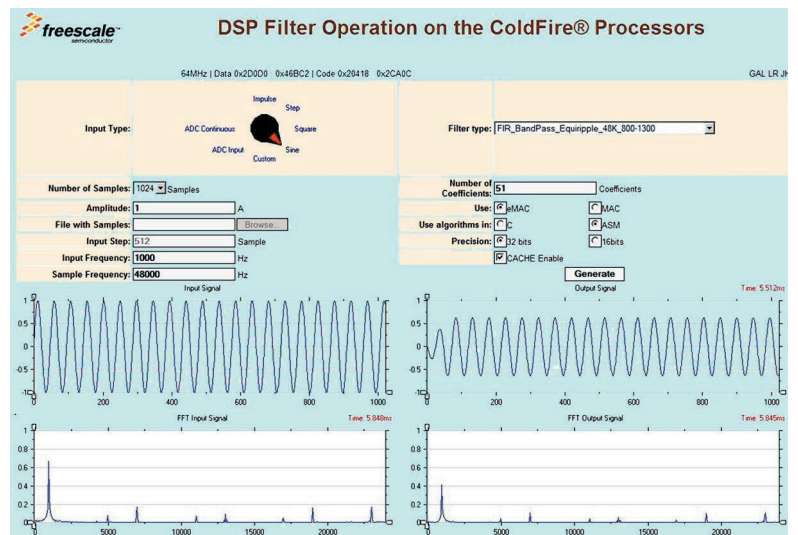
El primero de ellos, además para la correcta visualización de los resultados, incluye además un proyecto utilizando la herramienta software también gratuita FreeMaster de Freescale. Se incluye un ejemplo de medida de frecuencia mediante el cálculo de la FFT.



Librería de Macros DSP:

La librería de macros (fig. 6) cubre el uso de los módulos MAC y EMAC por separado, con su propio fichero de cabecera "mac_macro.h" y "emac_macro.h" respectivamente.

Figura 7. Aplicación de FreeMaster para la evaluación de filtros digitales



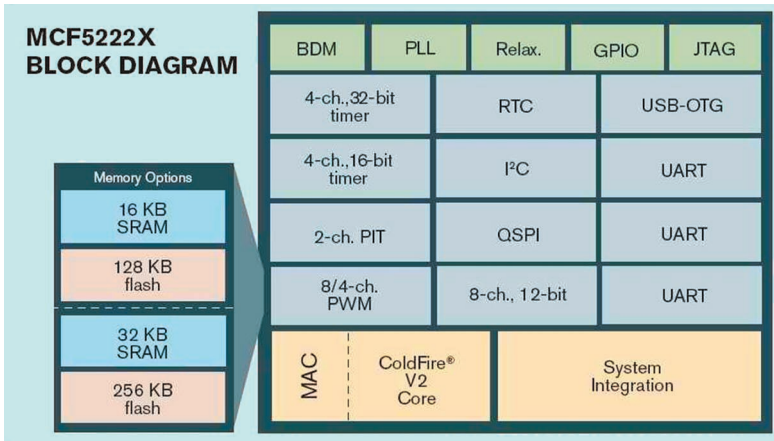
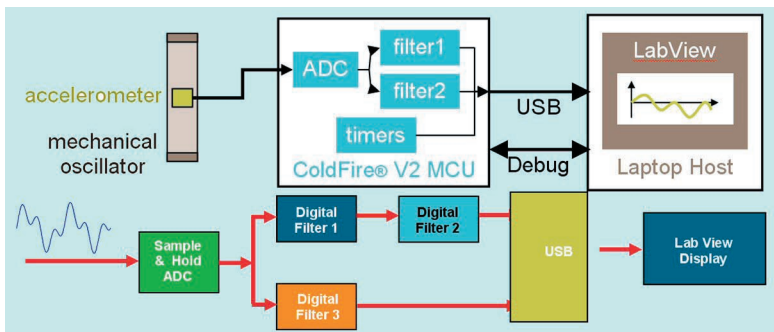


Figura 8. Diagrama de bloques del MC5222X



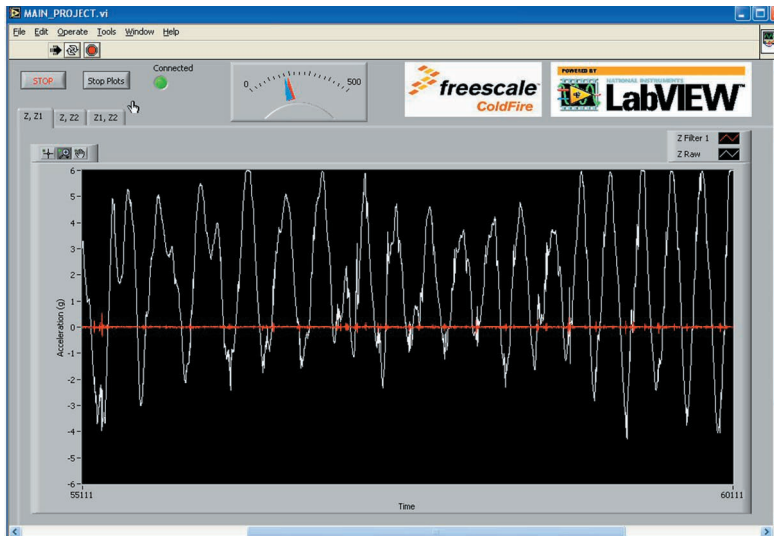
eficientes 'forward' del filtro, Q es el orden 'feedback' y ai los coeficientes 'feedback' del filtro. Además x(n) es la señal de entrada e y(n) es la señal de salida. Otra manera mas condensada de ver la ecuación del filtro es:

$$y(n) = \sum_{i=0}^P b_i x(n-i) + \sum_{k=1}^Q a_k y(n-k)$$

La implementación en el Coldfire usando la librería DSPLIB sería como sigue:

- Definimos tres matrices de datos en formato Fraccional, una para la señal de entrada, otra para la señal de salida y para los coeficientes del filtro. Y definimos una estructura de coeficientes.
- Definimos los coeficientes, donde CoefN es el número de coeficientes:
- Ejecutamos la función de filtro, donde N es el número de muestras:

Figura 9. Estructura de la herramienta de demostración y evaluación de filtros digitales



A continuación pueden verse dos gráficos con una comparativa de la resolución de un calculo de la FFT y de un filtro IIR sin usar el MAC/EMAC, y a su derecha una vez los usemos. Las comparativas se hacen tanto para MAC y EMAC, y en los modos de 16 y 32 bits.

Figura 10. Aplicación de Labview para la evaluación de filtros digitales

El segundo curso demostrativo, consiste en la implementación de diversos filtros FIR e IIR de los datos procedentes de un acelerómetro utilizando el MCF52221 (Fig. 8) en su placa DEMO. Los datos son capturados con el ADC del Coldfire, se ejecutan dos filtros digitales en paralelo y la salida filtrada y la original es enviada por USB al PC que ejecuta una aplicación de visualización y análisis desarrollada en LabView (Fig. 10). Pueden encadenarse más filtros en la aplicación y ser analizados gracias a la estructura de la librería. La configuración sería la mostrada en la figura 9.

Ejemplo de uso del módulo EMAC

Como ejemplo de la utilización de la librería DSPLIB, vamos a ver la implementación de un filtro IIR. La ecuación que define este tipo de filtro la podemos ver a continuación:

$$y(n) = b_0 x(n) + b_1 x(n-1) + \dots + b_P x(n-P) + a_1 y(n-1) + a_2 y(n-2) + \dots + a_Q y(n-Q)$$

en la que definimos como la señal de salida filtrada esta relacionada con la señal de entrada.

Siendo P el orden 'forward' del filtro a implementar, bi son los co-

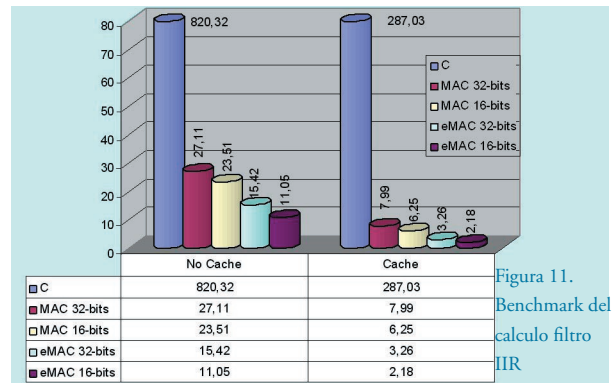


Figura 11. Benchmark del calculo filtro IIR

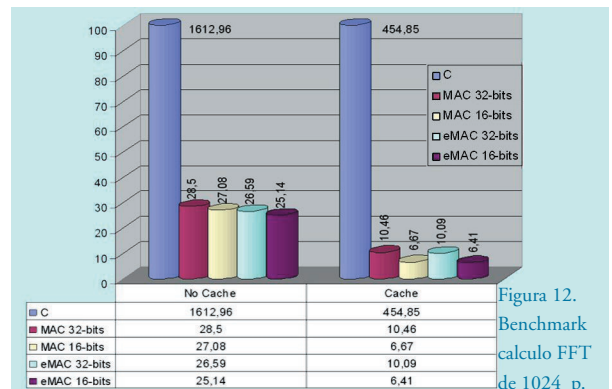


Figura 12. Benchmark calculo FFT de 1024 p.