



**DEPARTAMENTO  
DE COMPUTACION**

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales - UBA

## Trabajo Práctico Final

### Modelo Navier Stokes 2D

1 de marzo de 2018

Organización del Computador II

Integrante	LU	Correo electrónico
Ventura, Martín Alejandro	249/11	venturamartin90@gmail.com
Muiño, María Laura	399/11	mmuino@dc.uba.com



**Facultad de Ciencias Exactas y Naturales**  
**Universidad de Buenos Aires**

Ciudad Universitaria - (Pabellón I/Planta Baja)

Intendente Güiraldes 2610 - C1428EGA

Ciudad Autónoma de Buenos Aires - Rep. Argentina

Tel/Fax: (+54 +11) 4576-3300

<http://www.exactas.uba.ar>

## 1. INTRODUCCIÓN

Los flujos son gobernados por ecuaciones diferenciales parciales, que representan las leyes de conservación de masa, momento y energía. La dinámica de fluidos computacional se encarga de resolver esas ecuaciones diferenciales utilizando técnicas de análisis numérico. Las computadoras son utilizadas para realizar los cálculos requeridos para simular la interacción entre líquidos, gases y superficies definidas por las condiciones de borde. Disponer de más poder computacional es útil para disminuir el tiempo requerido para realizar las simulaciones, o aumentar la calidad de los resultados.

Para poder aumentar el poder computacional disponible, se utilizan a menudo, técnicas de cómputo en paralelo, o de cómputo vectorial. En este trabajo nos centraremos en la tecnología de cómputo vectorial SIMD (Single Instruction Multiple Data) de Intel.

Concretamente se desarrollará código en assembler, que utilizando las instrucciones de vectorización de los procesadores Intel, logre un aumento de rendimiento. Luego se comparará ese aumento de rendimiento con técnicas automáticas de vectorización o paralelización, tales como OpenMP, una API para el procesamiento multinúcleo con memoria compartida, y las optimizaciones disponibles en los compiladores ICC (Intel C Compiler) y g++, que a su vez utilizan instrucciones SIMD.

Hay diversos problemas de flujo conocidos que son utilizados frecuentemente para testear aplicaciones de este estilo. En este trabajo utilizaremos cavity flow. **si llegamos... y channel flow.**

El problema conocido como Lid-Driven Cavity Flow ha sido largamente usado como caso de validación para nuevos códigos y métodos. La geometría del problema es simple y bidimensional, las condiciones de borde son también sencillas. El caso estandar consta de un fluido contenido en un dominio cuadrado con condiciones de borde de Dirichlet en todas las paredes, con tres lados estacionarios y un lado en movimiento (con velocidad tangente a la pared), que induce velocidad en el fluido.

## 2. DESARROLLO

**2.1. Discretización.** El problema de Navier Stokes es gobernado por la siguiente ecuación

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \vec{v}$$

Los operadores presentes en la primera ecuación presentada, al ser usados en su forma bidimensional, permiten una reescritura como la siguiente:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right)$$

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} = -\rho \left( \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial x} + 2 \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial y} \right)$$

Las primeras dos ecuaciones se corresponden con la velocidad en las direcciones en x e y, mientras que la tercera da cuenta de los efectos de la presión.

Comenzaremos con algunas definiciones. Al modelar con diferencias finitas, se utilizan ciertos reemplazos de los operadores diferenciales conocidos como discretizaciones. Como su nombre indica, estas son versiones discretas de los operadores, y se las usa bajo el supuesto de que en el límite se comportan de forma similar. Pasaremos ahora a definir algunas discretizaciones que serán utilizadas para modelar el problema.

Centradas de primer orden:

$$\frac{dU}{dx} = \frac{U_{i+1,j}^n - U_{i-1,j}^n}{2dx}$$

$$\frac{dU}{dy} = \frac{U_{i,j+1}^n - U_{i,j-1}^n}{2dy}$$

$$\frac{dU}{dt} = \frac{U_{i,j}^{n+1} - U_{i,j}^{n-1}}{2dt}$$

Centradas de segundo orden:

$$\frac{d^2 U}{dx^2} = \frac{U_{i+1,j}^n - 2*U_{i,j}^n + U_{i-1,j}^n}{dx^2}$$

$$\frac{d^2 U}{dy^2} = \frac{U_{i,j+1}^n - 2*U_{i,j}^n + U_{i,j-1}^n}{dy^2}$$

$$\frac{d^2 U}{dt^2} = \frac{U_{i,j}^{n+1} - 2*U_{i,j}^n + U_{i,j}^{n-1}}{dt^2}$$

Adelantadas de primer orden:

$$\frac{dU}{dx} = \frac{U_{i+1,j}^n - U_{i,j}^n}{dx}$$

$$\frac{dU}{dy} = \frac{U_{i,j+1}^n - U_{i,j}^n}{dy}$$

$$\frac{dU}{dt} = \frac{U_{i,j}^{n+1} - U_{i,j}^n}{dt}$$

Atrasadas de primer orden:

$$\frac{dU}{dx} = \frac{U_{i,j}^n - U_{i-1,j}^n}{dx}$$

$$\frac{dU}{dy} = \frac{U_{i,j}^n - U_{i,j-1}^n}{dy}$$

$$\frac{dU}{dt} = \frac{U_{i,j}^n - U_{i,j}^{n-1}}{dt}$$

Reemplazando estas discretizaciones en las ecuaciones semi-acopladas de Navier Stokes obtenemos:

$$\begin{aligned} \frac{u_{i,j}^{n+1} - u_{i,j}^n}{\Delta t} + u_{i,j}^n \frac{u_{i,j}^n - u_{i-1,j}^n}{\Delta x} + v_{i,j}^n \frac{u_{i,j}^n - u_{i,j-1}^n}{\Delta y} &= -\frac{1}{\rho} \frac{p_{i+1,j}^n - p_{i-1,j}^n}{2\Delta x} + \nu \left( \frac{u_{i+1,j}^n - 2u_{i,j}^n + u_{i-1,j}^n}{\Delta x^2} + \frac{u_{i,j+1}^n - 2u_{i,j}^n + u_{i,j-1}^n}{\Delta y^2} \right) + F_u \\ \frac{v_{i,j}^{n+1} - v_{i,j}^n}{\Delta t} + u_{i,j}^n \frac{v_{i,j}^n - v_{i-1,j}^n}{\Delta x} + v_{i,j}^n \frac{v_{i,j}^n - v_{i,j-1}^n}{\Delta y} &= -\frac{1}{\rho} \frac{p_{i,j+1}^n - p_{i,j-1}^n}{2\Delta y} + \nu \left( \frac{v_{i+1,j}^n - 2v_{i,j}^n + v_{i-1,j}^n}{\Delta x^2} + \frac{v_{i,j+1}^n - 2v_{i,j}^n + v_{i,j-1}^n}{\Delta y^2} \right) + F_v \\ \frac{p_{i+1,j}^n - 2p_{i,j}^n + p_{i-1,j}^n}{\Delta x^2} + \frac{p_{i,j+1}^n - 2p_{i,j}^n + p_{i,j-1}^n}{\Delta y^2} &= \rho \left[ \frac{1}{\Delta t} \left( \frac{u_{i+1,j}^n - u_{i-1,j}^n}{2\Delta x} + \frac{v_{i,j+1}^n - v_{i,j-1}^n}{2\Delta y} \right) \right] \end{aligned}$$

Aquí en la ultima ecuación podemos ver que no se reemplazó directamente cada operador mediante las ecuaciones de discretización, sino que se agregó un término temporal, sin que hubiera en principio información sobre el tiempo en la ecuación de la presión. Este cambio se hace con el objetivo de acoplar la ecuación de la presión con las ecuaciones de velocidad. El mecanismo por el cual la adición de este nuevo término acopla las ecuaciones, no se presentará en este trabajo.

Cabe aclarar que al discretizar, se puede modelar el sistema mediante un método implícito o explícito. Un método implícito, o parcialmente implícito, incluiría una ponderación entre los valores de las variables en la iteración  $n$ , y la iteración  $n+1$ . En este trabajo utilizaremos un método explícito, ya que el sistema de ecuaciones determinado por un método explícito es lineal, y resulta en relaciones donde un elemento en la iteración  $n+1$  depende de otros en la iteración  $n$ , pudiendo entonces realizarse los reemplazos en las matrices que representan el sistema de forma directa, y resultando así en una implementación con menor dependencia de datos. Un método implícito da como resultado un sistema no lineal, en el cual hay que hacer uso de algún método de resolución de sistemas no lineales, como punto fijo, lo cual aumenta la complejidad de la implementación.

**2.2. Implementación.** La implementación fue realizada completamente en C++, excepto por la sección donde es crítico el rendimiento, la cual fue programada en C++ y Assembler. Esta sección es la correspondiente a la función *calcVelocities*, que como su nombre indica, calcula las velocidades en cada punto.

El programa define las matrices  $U1$ ,  $U2$ ,  $V1$ ,  $V2$ ,  $P1$ ,  $P2$ , que representan el estado del sistema en una iteración para la velocidad en  $u$ , en  $v$ , y la presión, y luego estas mismas en la iteración siguiente.

Se definen las condiciones iniciales del problema, y luego se utiliza un método explícito para calcular los nuevos valores del sistema. Estos son guardados en  $U2$ ,  $V2$ , y  $P2$ . Seguido de esto, el programa reemplaza los valores de  $U1$ ,  $V1$ , y  $P1$ , por aquellos de  $U2$ ,  $V2$  y  $P2$ , quedado así preparado para la siguiente iteración.

Se implementó también una clase *mat2*, que representa una matriz, y que contiene un puntero a un arreglo de números de punto flotante de simple precisión y dos enteros que representan el tamaño en filas y columnas de la matriz. Además la clase cuenta con funciones que realizan la abstracción de indexar en el arreglo calculando la posición del elemento buscado como la columna pedida, más la fila pedida multiplicada por la cantidad de columnas.

En cuanto a la vectorización, como se comentó anteriormente se utilizó la tecnología SIMD de Intel, de la forma descripta a continuación:

- Mediante una directiva *DEFINE* presente en el *Makefile*, se elige si se desea compilar con soporte para SIMD, soporte para OpenMP, ambos, o ninguno.
- El programa define las matrices necesarias con los valores iniciales según lo estipulado por el método de discretización utilizado.
- La sección del programa que realiza el cálculo consta de tres ciclos consecutivos. El primero cicla en la variable  $t$ , que representa el tiempo, el segundo en la variable  $i$ , que representa la altura, y el tercero en la variable  $j$  que representa el ancho.
- La paralelización mediante OpenMP se realiza en la variable  $i$ .
- La vectorización mediante SIMD, se realiza en la variable  $j$ . Es decir, en un solo llamado a la versión de Assembler de la función de cálculo se procesan 4 elementos consecutivos en memoria.
- Además, al utilizar SIMD, cuando se llega a un valor de  $j$  menor al ancho de los registros XMM dividido por el tamaño del tipo de datos flotante de precisión simple, se cambia el procesamiento mediante SIMD por el de C++, hasta que  $j$  alcanza su valor máximo.
- Además, durante la simulación no se crean ni se destruyen matrices, sino que estas son reutilizadas cambiando los valores que contienen para no perder tiempo manejando memoria.

### 3. EXPERIMENTACION

Dedicamos este párrafo a describir las herramientas que usamos para experimentar en las próximas secciones. La herramienta que utilizamos para traducir el código de C++ a Assembler es *objdump*, en base a esto podemos hacer comparaciones entre el código de C++ y Assembler. Para medir tiempos de compilación y ejecución utilizamos el comando *time* y conservamos la medición de tiempo real, o sea, la correspondiente al tiempo que mide de un reloj de pared.

**DUDA: nos hacemos los boludos con lo de la memoria?**

**3.1. Análisis del código generado.** Usando la herramienta *objdump* sobre los archivos objeto (.o) del código de C++ (sin flags de optimización), obtuvimos y analizamos el código ensamblado por el compilador. Notamos las siguientes características del código generado que dan lugar a mejoras en el rendimiento:

- Dentro de la función *calcVelocities*, la función donde se realizan los cálculos que luego se vectorizarán, hay llamados a líneas consecutivas.
- Hay consultas a memorias innecesarias, por ejemplo, se pide un mismo valor a memoria varias veces, a pesar de haber sido guardado en un registro y nunca haber sido reemplazado con otro valor.
- Se manejan las variables locales almacenandolas en la pila, mientras que sólo se usan los registros de manera auxiliar para realizar operaciones.

Decidimos en consecuencia, analizar el mismo código de C++ aplicando algunas optimizaciones de compilador de GCC.

### 3.2. Optimizaciones del compilador.

**3.2.1. Optimizaciones -O1.** El compilador de GCC posee una gran cantidad de optimizaciones. Un grupo de estas optimizaciones es habilitado por el parámetro -O1. Con el uso de esta optimización, el compilador se centra en reducir el tamaño del código y el tiempo de ejecución, a expensas de tiempo de compilación. Esto es comparando con la versión que no usa flags (-O0). Entre algunos de ellos se encuentran los siguientes flags:

- *fdce*: Realiza eliminación de código muerto en RTL<sup>1</sup>, i.e. elimina instrucciones que no tienen efecto en la ejecución.
- *fdse*: Realiza eliminación de guardado muerto en RTL, e.g. valores que son escritos a memoria de manera innecesaria.
- *fsplit-wide-types*: Cuando se usa un tipo de datos que ocupa múltiples registros, como por ejemplo "long long" en un sistema de 32-bit, separa el dato y lo guarda de manera independiente. Esto, normalmente, genera mejor código para estos tipos de datos, pero hace más difícil el debuggeo.
- *fmerge-constants*: Intenta unir constantes idénticas (cadenas o flotantes) a través de unidades de compilación. Esta opción es la por defecto para la compilación optimizada si el ensamblador y linker la soportan.
- *fdelayed-branch*: No tiene efecto en el código pero causa la ejecución a priori en ramas de ejecución para aumentar la performance.

Analizamos los códigos generados por G++ con y sin flag de optimización -O1. Extrajimos la función *set*, que implementa el seteo de un valor a la posición (i,j) de una matriz y lo primero que notamos fue la diferencia en cantidad de las líneas de código.

Función *set* de *mat2*

18e: 55	<b>push</b>	rbp
18f: 48 89 e5	<b>mov</b>	rbp, rsp
192: 48 89 7d f8	<b>mov</b>	QWORD PTR [rbp-0x8], rdi
196: 89 75 f4	<b>mov</b>	DWORD PTR [rbp-0xc], esi
199: 89 55 f0	<b>mov</b>	DWORD PTR [rbp-0x10], edx
19c: f3 0f 11 45 ec	<b>movss</b>	DWORD PTR [rbp-0x14], xmm0
1a1: 48 8b 45 f8	<b>mov</b>	rax, QWORD PTR [rbp-0x8]
1a5: 48 8b 10	<b>mov</b>	rdx, QWORD PTR [rax]
1a8: 48 8b 45 f8	<b>mov</b>	rax, QWORD PTR [rbp-0x8]
1ac: 8b 40 0c	<b>mov</b>	eax, DWORD PTR [rax+0xc]
1af: 0f af 45 f4	<b>imul</b>	eax, DWORD PTR [rbp-0xc]

<sup>1</sup>Register Transfer Language. Es una representación intermedia (RI), similar a Assembler. Se utiliza para describir el transferencia de datos de una arquitectura a nivel registro

1b3:	89 c1	<b>mov</b>	<b>ecx , eax</b>
1b5:	8b 45 f0	<b>mov</b>	<b>eax ,DWORD PTR [rbp-0x10]</b>
1b8:	01 c8	<b>add</b>	<b>eax , ecx</b>
1ba:	48 98	<b>cdqe</b>	
1bc:	48 c1 e0 02	<b>shl</b>	<b>rax ,0x2</b>
1c0:	48 01 d0	<b>add</b>	<b>rax , rdx</b>
1c3:	f3 0f 10 45 ec	<b>movss</b>	<b>xmm0,DWORD PTR [rbp-0x14]</b>
1c8:	f3 0f 11 00	<b>movss</b>	<b>DWORD PTR [rax] ,xmm0</b>
1cc:	90	<b>nop</b>	
1cd:	5d	<b>pop</b>	<b>rbp</b>
1ce:	c3	<b>ret</b>	
1cf:	90	<b>nop</b>	

La versión sin optimizar, toma los parámetros cargados en registros, los guarda en la pila y luego vuelve a cargarlos a registros distintos. Incluso realiza accesos a memoria más de una vez en busca de un mismo dato. En cambio, la versión del código de C++ mediante la optimización, utiliza los registros para el manejo de variables locales y accede solo las veces necesarias a memoria. Este es un claro ejemplo de los efectos de los flags *fdse* y *fdce*.

#### Función set de mat2 con optimización -O1

d4:	0f af 77 0c	<b>imul</b>	<b>esi ,DWORD PTR [rdi+0xc]</b>
d8:	01 f2	<b>add</b>	<b>edx , esi</b>
da:	48 63 d2	<b>movsxd</b>	<b>rdx , edx</b>
dd:	48 8b 07	<b>mov</b>	<b>rax ,QWORD PTR [rdi]</b>
e0:	f3 0f 11 04 90	<b>movss</b>	<b>DWORD PTR [rax+rdx*4] ,xmm0</b>
e5:	c3	<b>ret</b>	

A pesar de las mejoras que notamos con el uso de la optimización, encontramos métodos donde no se eliminaban del todo los accesos innecesarios a memoria o los fragmentos de código sin utilidad. Tomamos otro extracto de código de la función *calcVelocities* (donde se realizan los cálculos más complejos) y la analizamos.

#### Función calcVelocities

1abe:	55	<b>push</b>	<b>rbp</b>
1abf:	48 89 e5	<b>mov</b>	<b>rbp , rsp</b>
1ac2:	48 83 ec 38	<b>sub</b>	<b>rsp ,0x38</b>
1ac6:	48 89 7d e8	<b>mov</b>	<b>QWORD PTR [rbp-0x18] , rdi</b>
1aca:	89 75 e4	<b>mov</b>	<b>DWORD PTR [rbp-0x1c] , esi</b>
1acd:	89 55 e0	<b>mov</b>	<b>DWORD PTR [rbp-0x20] , edx</b>
1ad0:	48 8b 45 e8	<b>mov</b>	<b>rax ,QWORD PTR [rbp-0x18]</b>
1ad4:	48 8d 88 e0 00 00 00	<b>lea</b>	<b>rcx , [rax+0xe0]</b>
1adb:	8b 55 e0	<b>mov</b>	<b>edx ,DWORD PTR [rbp-0x20]</b>
1ade:	8b 45 e4	<b>mov</b>	<b>eax ,DWORD PTR [rbp-0x1c]</b>
1ae1:	89 c6	<b>mov</b>	<b>esi , eax</b>
1ae3:	48 89 cf	<b>mov</b>	<b>rdi , rcx</b>
1ae6:	e8 00 00 00 00	<b>call</b>	<b>1aeb</b>
1aeb:	f3 0f 11 45 d8	<b>movss</b>	<b>DWORD PTR [rbp-0x28] ,xmm0</b>
1af0:	48 8b 45 e8	<b>mov</b>	<b>rax ,QWORD PTR [rbp-0x18]</b>
1af4:	48 8d 88 e0 00 00 00	<b>lea</b>	<b>rcx , [rax+0xe0]</b>
1afb:	8b 55 e0	<b>mov</b>	<b>edx ,DWORD PTR [rbp-0x20]</b>
1afe:	8b 45 e4	<b>mov</b>	<b>eax ,DWORD PTR [rbp-0x1c]</b>
1b01:	89 c6	<b>mov</b>	<b>esi , eax</b>
1b03:	48 89 cf	<b>mov</b>	<b>rdi , rcx</b>
1b06:	e8 00 00 00 00	<b>call</b>	<b>1b0b</b>
...	...	...	...
2400:	f3 0f 10 45 d8	<b>movss</b>	<b>xmm0,DWORD PTR [rbp-0x28]</b>

2405:	89 c6	<b>mov</b>	<b>esi , eax</b>
2407:	e8 00 00 00 00	<b>call</b>	240c
240c:	90	<b>nop</b>	
240d:	c9	<b>leave</b>	
240e:	c3	<b>ret</b>	
240f:	90	<b>nop</b>	

La diferencia que notamos de los dos extractos de código de *calcVelocities*, es el uso de la instrucción **nop**. El código de operación de **nop** corresponde a “no operation”, no tiene ningún tipo de efecto, con lo cual, en el código optimizado se hace eliminación de este. En la instrucción *lad0* se carga el registro *rax* con un valor, no se lo pisa y luego vuelve a cargarlo en *lad0*. Este tipo de instrucciones donde no es necesario volver a cargar de memoria datos, vuelve a ser eliminado con el uso del flag *fdse*.

Volvemos a notar que en el código de C++ con flag -O1, el manejo de memoria no tiene el comportamiento de volver a cargar algo desde memoria que previamente había sido cargado y guardado en registros. Sin embargo, y a pesar de las mejoras, vemos que aun repite movimientos de datos innecesarios entre registros. Observando más detalladamente, el código con la mejora, no utiliza al máximo los registros, ya que guarda ciertos datos a memoria.

#### Función *calcVelocities* con optimización -O1

12f0:	41 57	<b>push</b>	<b>r15</b>
...	...	...	...
12f9:	53	<b>push</b>	<b>rbx</b>
12fa:	48 83 ec 30	<b>sub</b>	<b>rsp , 0x30</b>
12fe:	48 89 fb	<b>mov</b>	<b>rbx , rdi</b>
1301:	89 f5	<b>mov</b>	<b>ebp , esi</b>
1303:	41 89 d4	<b>mov</b>	<b>r12d , edx</b>
1306:	4c 8d bf e0 00 00 00	<b>lea</b>	<b>r15 , [ rdi + 0xe0 ]</b>
130d:	4c 89 ff	<b>mov</b>	<b>rdi , r15</b>
1310:	e8 00 00 00 00	<b>call</b>	1315
1315:	0f 28 e0	<b>movaps</b>	<b>xmm4 , xmm0</b>
1318:	f3 0f 10 7b 1c	<b>movss</b>	<b>xmm7 , DWORD PTR [ rbx + 0x1c ]</b>
131d:	f3 0f 10 5b 14	<b>movss</b>	<b>xmm3 , DWORD PTR [ rbx + 0x14 ]</b>
1322:	f3 0f 11 7c 24 04	<b>movss</b>	<b>DWORD PTR [ rsp + 0x4 ] , xmm7</b>
1328:	0f 28 c7	<b>movaps</b>	<b>xmm0 , xmm7</b>
132b:	f3 0f 11 5c 24 10	<b>movss</b>	<b>DWORD PTR [ rsp + 0x10 ] , xmm3</b>
1331:	f3 0f 5e c3	<b>divss</b>	<b>xmm0 , xmm3</b>
1335:	0f 28 f0	<b>movaps</b>	<b>xmm6 , xmm0</b>
1338:	f3 0f 11 24 24	<b>movss</b>	<b>DWORD PTR [ rsp ] , xmm4</b>
133d:	f3 0f 59 f4	<b>mulss</b>	<b>xmm6 , xmm4</b>
1341:	f3 0f 11 74 24 08	<b>movss</b>	<b>DWORD PTR [ rsp + 0x8 ] , xmm6</b>
1347:	8d 45 ff	<b>lea</b>	<b>eax , [ rbp - 0x1 ]</b>
134a:	44 89 e2	<b>mov</b>	<b>edx , r12d</b>
134d:	89 44 24 14	<b>mov</b>	<b>DWORD PTR [ rsp + 0x14 ] , eax</b>
1351:	89 c6	<b>mov</b>	<b>esi , eax</b>
1353:	4c 89 ff	<b>mov</b>	<b>rdi , r15</b>
1356:	e8 00 00 00 00	<b>call</b>	135b
135b:	f3 0f 10 24 24	<b>movss</b>	<b>xmm4 , DWORD PTR [ rsp ]</b>
...	...	...	...
187a:	48 8d bb 30 01 00 00	<b>lea</b>	<b>rdi , [ rbx + 0x130 ]</b>
1881:	44 89 e2	<b>mov</b>	<b>edx , r12d</b>
1884:	89 ee	<b>mov</b>	<b>esi , ebp</b>
1886:	e8 00 00 00 00	<b>call</b>	188b
188b:	48 83 c4 30	<b>add</b>	<b>rsp , 0x30</b>
188f:	5b	<b>pop</b>	<b>rbx</b>
...	...	...	...
1897:	41 5f	<b>pop</b>	<b>r15</b>
1899:	c3	<b>ret</b>	



3.2.2. *Optimizaciones O2*. Las optimizaciones de -O2 realizan mejoras de velocidad y tamaño de código tal que las mejoras de una no comprometan a la otra. En comparación con -O1, aumenta aún más el tiempo de compilación y la mejora de performance del código generado. Algunos de los flags que -O2 activa son:

- *fcse-follow-jumps*: Se eliminan códigos que se acceden mediante saltos cuya condición nunca llega a cumplirse.
- *fgcse*: Busca instancias de expresiones idénticas (i.e. que evalúan al mismo valor) y analiza si vale la pena reemplazarlas por una única variable reteniendo el valor computado<sup>2</sup> de manera global. También realiza constant folding<sup>3</sup> y constant propagation<sup>4</sup>.
- *fgcse-lm*: Intenta reordenar instrucciones donde se produzcan sucesivas cargas/guardados que pisan valores de una misma variable. Esto permite en los loops pasar de tener una variable (registro) que se carga constantemente, a una carga fuera del loop con copias y guardados en el loop.
- *inline-small-functions*: Integra el código de funciones invocadas dentro de la función que realiza el llamado, siempre que el código resultante sea menos extenso.
- *fipa-cp, fipa-bit-cp, fipa-vrp, fipa-sra, fipa-icf*: Realizan distintos tipos de propagación de constantes y rangos, tanto en localizado como entre procedimientos.
- *fstore-merging*: Une guardados pequeños en memoria consecutiva. Esto hace que los guardados estén bien pegaditos, ocupando menos que el tamaño de una palabra. Perform merging of narrow stores to consecutive memory addresses. This pass merges contiguous stores of immediate values narrower than a word into fewer wider stores to reduce the number of instructions.
- *ftree-tail-merge*: Busca secuencias de código idénticas, y reemplaza las repetidas con un salto a una de ellas.
- *ftree-vrp*: Realiza Value Range Propagation en árboles. Es similar a la propagación de constantes, pero lo hace con rangos de valores. Esto permite remover chequeos innecesarios de rangos.

Notamos varios flags que aportan a la refactorización de código, que en consecuencia, ayudan a reducir su tamaño e incluso, con ayuda de los precálculos en tiempo de compilación, reducen el tiempo de ejecución. Algunos llegan hasta el punto de modificar el orden de ejecución del código para impedir, por ejemplo, esperas por datos que no están todavía disponibles.

Analizaremos ahora las diferencias entre el código resultado de compilar con optimizaciones -O1 y el que es generado por la compilación mediante optimizaciones -O2. Para eso tomaremos como objeto de estudio la función *setCavityFlowSpeeds*. Esta función es interesante ya que consiste de un único ciclo, dentro del cual presenta un llamado a una función con una pequeña operatoria aritmética. En particular lo que hace es recorrer el borde de cada matriz, y mediante un llamado a la función *set*, esta función concretamente multiplica el valor del índice *i* por el valor máximo que puede tomar la variable *j* y luego suma el valor de entrada de *j* a este resultado, abstrayendo así el mecanismo de indexado en un arreglo plano.

Función *setCavityFlowSpeeds* con optimización -O1

106c:	83 7f 24 00	<b>cmp</b>	<b>DWORD PTR</b> [rdi+0x24],0x0
1070:	7e 7d	<b>jle</b>	10ef
1072:	41 56	<b>push</b>	r14
1074:	41 55	<b>push</b>	r13
1076:	41 54	<b>push</b>	r12
1078:	55	<b>push</b>	rbp
1079:	53	<b>push</b>	rbx
107a:	48 89 fd	<b>mov</b>	rbp,rdi
107d:	bb 00 00 00 00	<b>mov</b>	ebx,0x0
1082:	4c 8d b7 b0 00 00 00	<b>lea</b>	r14,[rdi+0xb0]
1089:	4c 8d af e0 00 00 00	<b>lea</b>	r13,[rdi+0xe0]
1090:	4c 8d a7 10 01 00 00	<b>lea</b>	r12,[rdi+0x110]
1097:	8b 45 28	<b>mov</b>	eax,DWORD PTR [rbp+0x28]
109a:	8d 50 ff	<b>lea</b>	edx,[rax-0x1]
109d:	f3 0f 10 05 00 00 00	<b>movss</b>	xmm0,DWORD PTR [rip+0x0]
10a4:	00		

<sup>2</sup>Common Subexpression Elimination (CSE).

<sup>3</sup>Constant folding: Evaluar expresiones constantes en tiempo de compilación.

<sup>4</sup>Constant propagation: Sustitución de variables por sus valores constantes en expresiones en tiempo de compilación.

10a5:	89 de	<b>mov</b>	<b>esi,ebx</b>
10a7:	4c 89 f7	<b>mov</b>	<b>rdi,r14</b>
10aa:	e8 00 00 00 00	<b>call</b>	<b>10af</b>
10af:	8b 45 28	<b>mov</b>	<b>eax,DWORD PTR [rbp+0x28]</b>
10b2:	8d 50 ff	<b>lea</b>	<b>edx,[rax-0x1]</b>
10b5:	f3 0f 10 05 00 00 00	<b>movss</b>	<b>xmm0,DWORD PTR [rip+0x0]</b>
10bc:	00		
10bd:	89 de	<b>mov</b>	<b>esi,ebx</b>
10bf:	4c 89 ef	<b>mov</b>	<b>rdi,r13</b>
10c2:	e8 00 00 00 00	<b>call</b>	<b>10c7</b>
10c7:	8b 45 28	<b>mov</b>	<b>eax,DWORD PTR [rbp+0x28]</b>
10ca:	8d 50 ff	<b>lea</b>	<b>edx,[rax-0x1]</b>
10cd:	f3 0f 10 05 00 00 00	<b>movss</b>	<b>xmm0,DWORD PTR [rip+0x0]</b>
10d4:	00		
10d5:	89 de	<b>mov</b>	<b>esi,ebx</b>
10d7:	4c 89 e7	<b>mov</b>	<b>rdi,r12</b>
10da:	e8 00 00 00 00	<b>call</b>	<b>10df</b>
10df:	83 c3 01	<b>add</b>	<b>ebx,0x1</b>
10e2:	39 5d 24	<b>cmp</b>	<b>DWORD PTR [rbp+0x24],ebx</b>
10e5:	7f b0	<b>jg</b>	<b>1097</b>
10e7:	5b	<b>pop</b>	<b>rbx</b>
10e8:	5d	<b>pop</b>	<b>rbp</b>
10e9:	41 5c	<b>pop</b>	<b>r12</b>
10eb:	41 5d	<b>pop</b>	<b>r13</b>
10ed:	41 5e	<b>pop</b>	<b>r14</b>
10ef:	f3 c3	<b>repz ret</b>	
10f1:	90	<b>nop</b>	

#### Función setCavityFlowSpeeds con optimización -O2

1880:	44 8b 5f 24	<b>mov</b>	<b>r11d,DWORD PTR [rdi+0x24]</b>
1884:	45 85 db	<b>test</b>	<b>r11d,r11d</b>
1887:	7e 72	<b>jle</b>	<b>18fb</b>
1889:	8b 47 28	<b>mov</b>	<b>eax,DWORD PTR [rdi+0x28]</b>
188c:	4c 63 97 bc 00 00 00	<b>movsxd</b>	<b>r10,DWORD PTR [rdi+0xbc]</b>
1893:	31 d2	<b>xor</b>	<b>edx,edx</b>
1895:	4c 63 8f ec 00 00 00	<b>movsxd</b>	<b>r9,DWORD PTR [rdi+0xec]</b>
189c:	4c 63 87 1c 01 00 00	<b>movsxd</b>	<b>r8,DWORD PTR [rdi+0x11c]</b>
18a3:	83 e8 01	<b>sub</b>	<b>eax,0x1</b>
18a6:	48 98	<b>cdqe</b>	
18a8:	49 c1 e2 02	<b>shl</b>	<b>r10,0x2</b>
18ac:	48 c1 e0 02	<b>shl</b>	<b>rax,0x2</b>
18b0:	49 c1 e1 02	<b>shl</b>	<b>r9,0x2</b>
18b4:	49 c1 e0 02	<b>shl</b>	<b>r8,0x2</b>
18b8:	48 89 c6	<b>mov</b>	<b>rsi,rax</b>
18bb:	48 89 c1	<b>mov</b>	<b>rcx,rax</b>
18be:	48 03 b7 b0 00 00 00	<b>add</b>	<b>rsi,QWORD PTR [rdi+0xb0]</b>
18c5:	48 03 8f e0 00 00 00	<b>add</b>	<b>rcx,QWORD PTR [rdi+0xe0]</b>
18cc:	48 03 87 10 01 00 00	<b>add</b>	<b>rax,QWORD PTR [rdi+0x110]</b>
18d3:	0f 1f 44 00 00	<b>nop</b>	<b>DWORD PTR [rax+rax*1+0x0]</b>
18d8:	83 c2 01	<b>add</b>	<b>edx,0x1</b>
18db:	c7 06 0a d7 23 3c	<b>mov</b>	<b>DWORD PTR [rsi],0x3c23d70a</b>
18e1:	c7 01 0a d7 23 3c	<b>mov</b>	<b>DWORD PTR [rcx],0x3c23d70a</b>
18e7:	4c 01 d6	<b>add</b>	<b>rsi,r10</b>
18ea:	c7 00 0a d7 23 3c	<b>mov</b>	<b>DWORD PTR [rax],0x3c23d70a</b>
18f0:	4c 01 c9	<b>add</b>	<b>rcx,r9</b>
18f3:	4c 01 c0	<b>add</b>	<b>rax,r8</b>
18f6:	44 39 da	<b>cmp</b>	<b>edx,r11d</b>

18f9:	75 dd	jne	18d8
18fb:	f3 c3	repz ret	
18fd:	90	nop	
18fe:	66 90	xchg	ax, ax

A grandes rasgos la optimización más notoria se constituye por un cálculo previo al ciclado, de los distintos valores numéricos necesarios para luego acceder a las posiciones de memoria necesarias. Este cálculo previo no se da en la versión -O1, sino que estos cálculos son realizados dentro del ciclo. Esto es claro ya que si observamos el ciclo que se constituye entre las líneas 1097 y 10e5 (24 instrucciones) de la versión -O1, este consta de una mayor cantidad de líneas que el de la versión -O2, 18d8, 18f9 (9 instrucciones). Por el contrario, el código entre el inicio de la función y el del ciclo, es más largo en la versión -O2.

En el código mejorado con -O2 se reemplaza el uso de registros que deben ser resguardados, por registros de uso libre que no habían sido usados previamente. Esto disminuye el uso de la pila y el tiempo de accesos a memoria.

Los tres calls en la versión con mejora de -O1 (que por conocer la implementación de C++), corresponden al llamado de la función set para tres matrices. En la versión mejorada de -O2 se las reemplaza por el código de la función, dado que la cantidad de líneas no se vió aumentada (*inline-small-functions*), de hecho disminuyó.

Además se puede notar la activación de los flags de alineamiento. Por ejemplo, se nota claramente la presencia de *align-functions*, que fuerza el comienzo de las funciones en posiciones de memoria que sean múltiplos de potencias de dos. Esto se logra insertando instrucciones sin efectos. Una forma de hacer esto es insertar líneas luego de un ret, que nunca se llegan a ejecutar.

Si analizamos las direcciones de memoria donde se encuentran definidas las funciones, su último dígito siempre es cero. A continuación se muestran algunos ejemplos donde se ve el final de una función, con sus respectivas instrucciones extra y el comienzo de la nueva función alineada.

#### calcVelocities

1a99:	41 5d	pop	r13
1a9b:	41 5e	pop	r14
1a9d:	c3	ret	
1a9e:	66 90	xchg	ax, ax

1aa0 <\_ZN9simulator14calcVelocitiesEii>:

1aa0:	8b 8f ec 00 00 00	mov	ecx, DWORD PTR [rdi+0xec]
1aa6:	41 57	push	r15
1aa8:	41 56	push	r14

#### setPBorders

18fb:	f3 c3	repz ret	
18fd:	90	nop	
18fe:	66 90	xchg	ax, ax

1900 <\_ZN9simulator11setPBordersEv>:

1900:	41 56	push	r14
1902:	41 55	push	r13

Se aclara que, la potencia de dos utilizada, es algo que se especifica en el flag cuando es utilizado por el usuario, y que no queda definida cuando este flag es agregado mediante el uso de -O2. Aún así el hecho de que el último dígito de todas las funciones sea cero, es un fuerte indicador de la presencia del efecto de esta

optimización.

3.2.3. *Optimizaciones O3.* La optimización O3 mejora aún más los resultados, activa todas las optimizaciones de -O2 además de los siguientes flags:

- *finline-functions*
- *funswitch-loops*
- *fpredictive-commoning*
- *fgcse-after-reload*
- *ftree-loop-vectorize*
- *ftree-loop-distribute-patterns*
- *ftree-slp-vectorize*
- *fovect-cost-model*
- *ftree-partial-pre*
- *fipa-cp-clone options*

La utilización del flag -O3 aumenta aún más la cantidad de mejoras en búsqueda del aumento de la velocidad. La primera de ellas, *finline-functions*, es similar a su correspondiente flag en -O2, *finline-small-functions*, con la diferencia de que hace efecto sobre mayor cantidad de funciones, no limitándose solo a las funciones más pequeñas en cuanto a cantidad de código de cara a mantener baja la cantidad de líneas totales.

En cuanto a *funswitch-loops*, no hay en el programa condiciones en ciclos que sean independientes de ellos ya que todos son función de las variables sobre las que se itera. La única instancia de esto que podría darse es en la condición que decide si utilizar Assembler o C++ plano pero esta no está escrita en el lenguaje, sino que es una directiva del compilador.

Tampoco se encuentran efectos de aplicar el flag *fpredictive-commoning*. De aplicar, el mismo ahorraría accesos a memoria guardando datos de una iteración de un ciclo para la siguiente. No se ven ahorros de accesos a memoria ni cambios en la forma en que se accede. Tampoco se ve ningún cambio en el código al incluir el flag en una compilación realizada con -O2 y realizar una diferencia entre este y el resultado de -O2 normal.

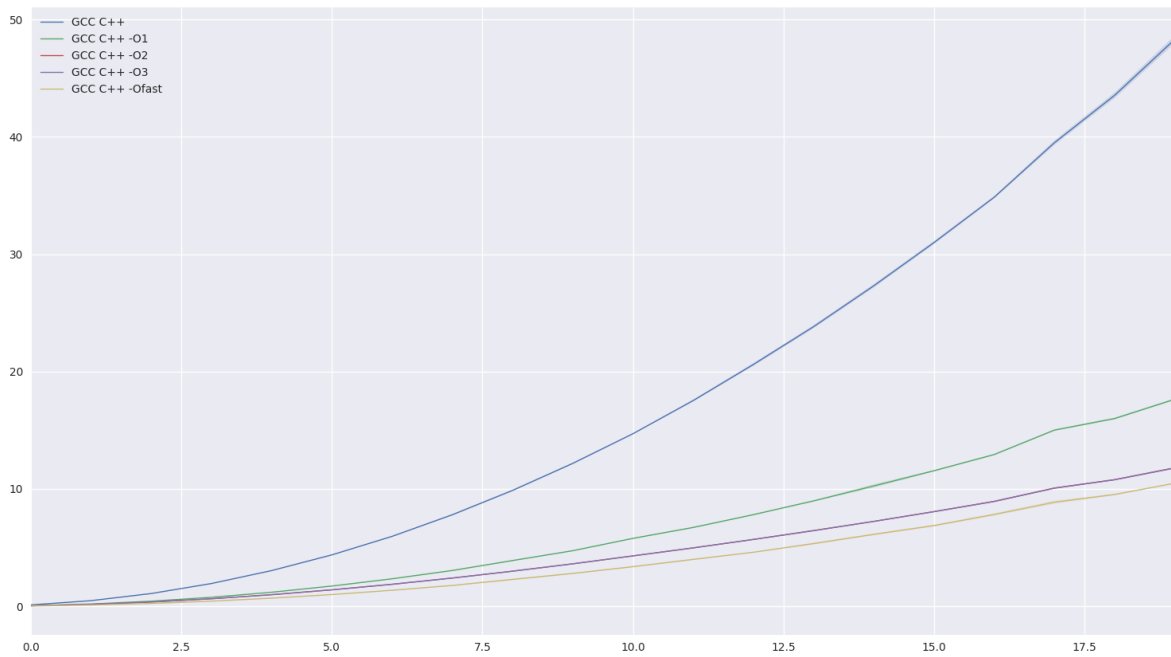
**3.3. Comparación entre secuencial, vectorial y multicore.** Ya analizado el tipo de mejoras que son implementadas por G++ al utilizar -O1, -O2 y -O3, se presentan en esta sección los resultados de los experimentos realizados. Se comparan mediciones de tiempo de los distintos flags presentes en el compilador, con otras técnicas.

En particular se estudian los flags -O0, -O1, -O2, -O3 y -Ofast del compilador GCC (GNU Compiler Collection), -O0, -O1, -O2, -O3 y -Ofast para ICC (Intel C++ Compiler), -O0, -O1, -O2, -O3 y -Ofast para GCC, peor utilizando OpenMP, y por último -O0, -O3 y -Ofast para la versión vectorizada desarrollada en este trabajo, la cual consta de una parte en C++ en común con la versión no vectorial, que fue compilada con GCC, y una función implementada en Assembler y compilada mediante NASM (Netwide Assembler x86), específicamente desarrollada para aprovechar la tecnología SIMD, y seleccionada por ser la sección más crítica en términos de rendimiento, del programa original.

Para cada técnica se experimentó con distintos tamaños del sistema simulado, comenzando desde simulaciones de sistemas pequeños de  $1 \times 1 \text{m}^2$  y aumentando de a un metro el lado del sistema, hasta llegar a  $20 \times 20 \text{m}^2$ , el tamaño de lado es además la medida correspondiente al eje horizontal, mientras que el tiempo medido en segundos, es el correspondiente al eje vertical. Además, para cada punto, se realizaron 100 repeticiones, y se tomó la media y desvío estándar de las mismas, con el objetivo de eliminar el error de medición introducido por la falta de control del tiempo otorgado a las distintas tareas del sistema operativo por parte del scheduler.

Los tiempos fueron medidos mediante la utilización de la herramienta *time* de Linux, bajo la distribución Ubuntu 16.04 LTS, en una máquina i7-920 2.67GHz, 18GB ram, 1TB HDD 7200rpm. Además no se utilizó la máquina durante la experimentación, para no introducir ruido en las mediciones. En total se realizaron cerca de 40.000 simulaciones. A continuación se muestran los resultados de las mismas.

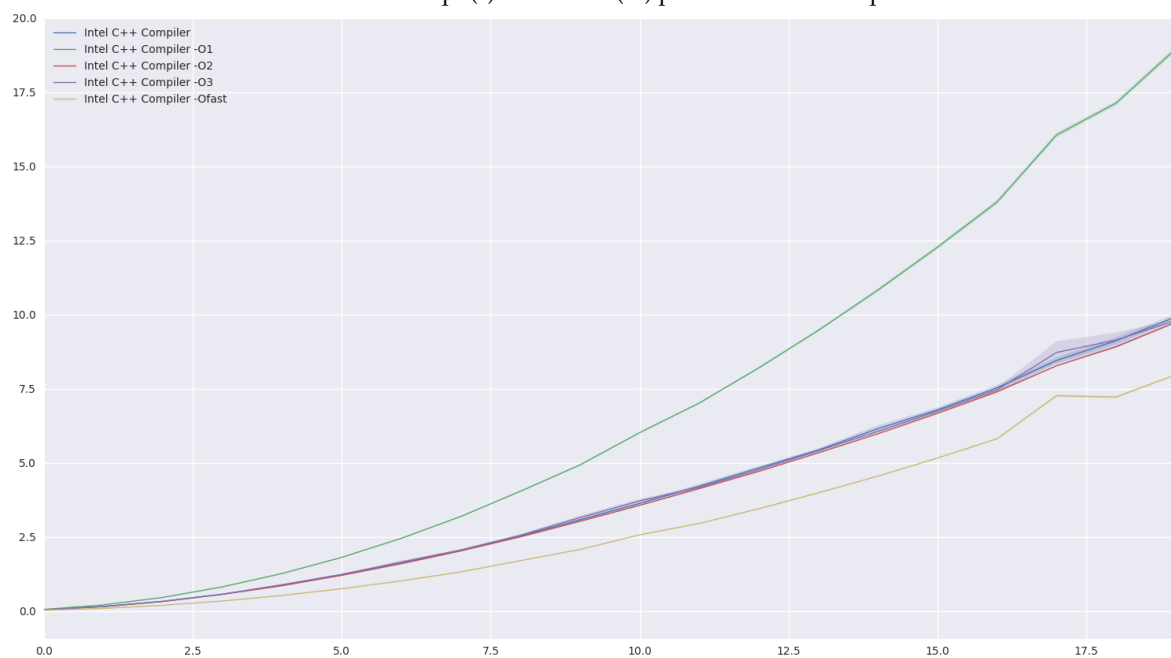
FIGURA 1. Tiempo(s) vs Tamaño(m) para GCC



La primera experimentación consiste en el análisis de GCC, en particular su compilador C++, para distintos niveles de optimización. Esta se corresponde con la **Figura 1**.

Como es de esperar, el programa responde bien a las mejoras, con la mayor diferencia dándose entre -O0 y -O1, y la menor entre -O3 y -Ofast. Para el caso de mayor tamaño, el programa, distando de tardar casi 50s como en -O0, da un resultado menor a 20s, un tiempo menor a la mitad.

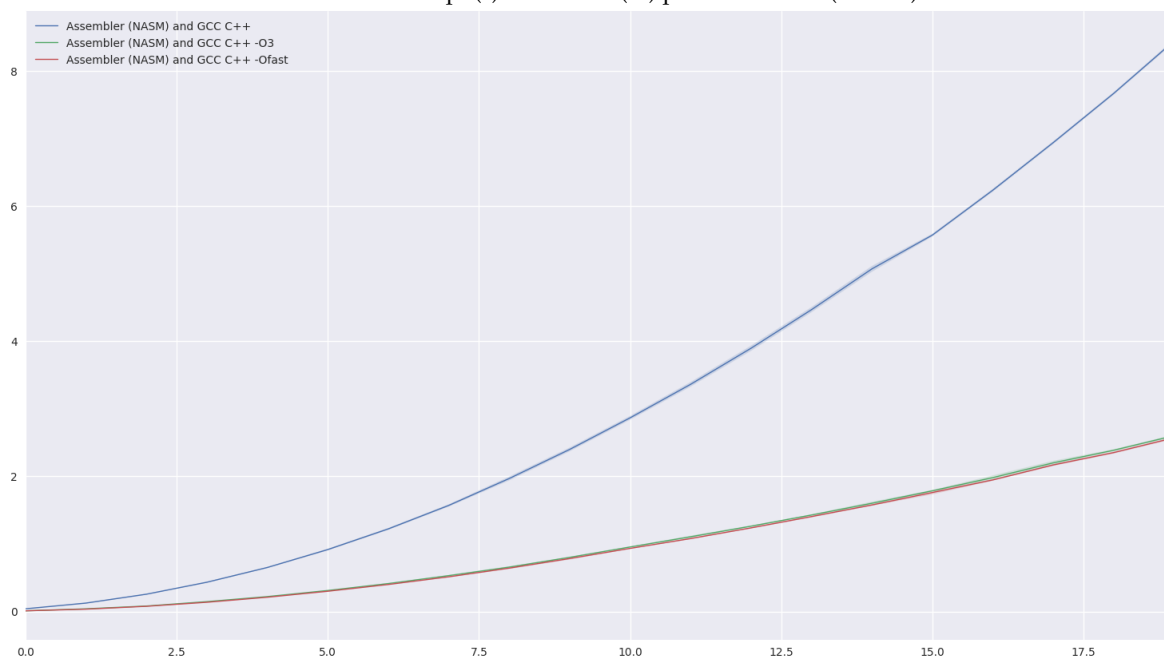
FIGURA 2. Tiempo(s) vs Tamaño(m) para Intel C++ Compiler



Donde la versión mas optimizada de GCC daba un resultado para el tamaño de 20x20m, algo menor a 20s, el compilador ICC (Intel C++ compiler), muestra en la **Figura 2** un tiempo de 10s, notablemente mas rápido que GCC -Ofast, sin utilizar optimizaciones. Esto se debe a que este compilador, como su nombre lo indica, fue diseñado para compilar para procesadores Intel, aprovechando las características específicas de los mismos.

Se nota aquí otra diferencia, mientras que los flags llamados -Ox en GCC implementan siempre mejoras de velocidad de ejecución, el flag -O1, en ICC, busca mejorar el tamaño del ejecutable, dando así un tiempo de ejecución mayor que al no utilizar optimizaciones. Notar que aún así, este es mas rapido que GCC -Ofast. Finalmente, la mejor medida para ICC esta alrededor de los 8s.

FIGURA 3. Tiempo(s) vs Tamaño(m) para Assembler(NASM)



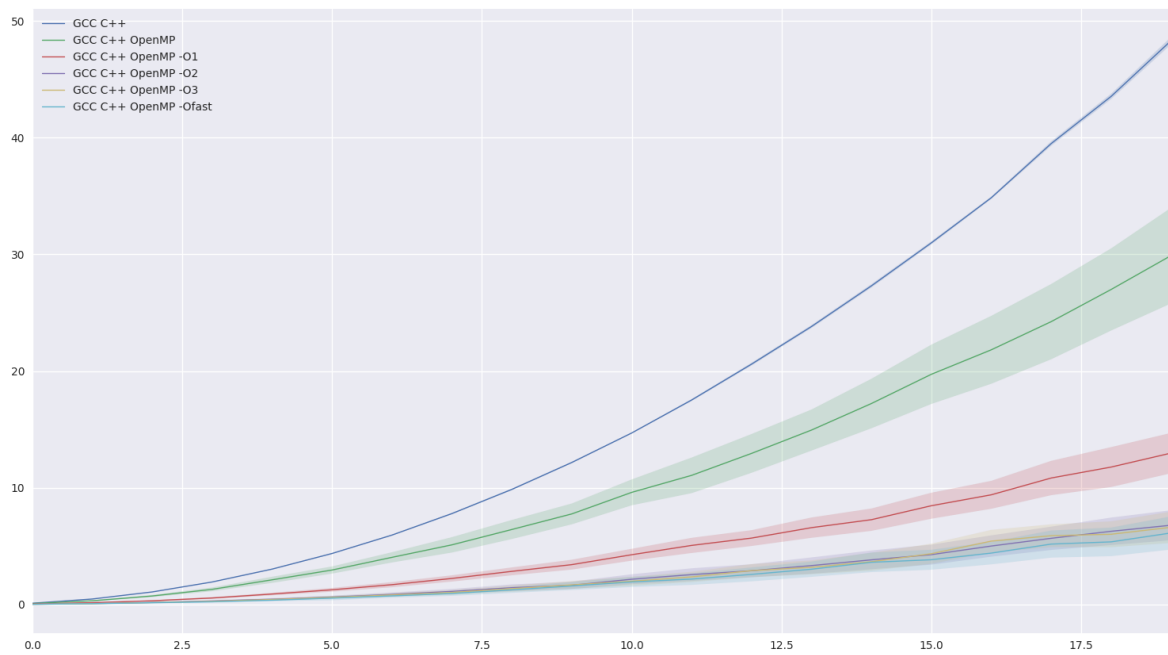
De la misma forma en que GCC -Ofast tenia un rendimiento similar a ICC sin optimizaciones, la versión producida en este trabajo, aprovechando la tecnología SIMD, tiene, sin optimizaciones, un rendimiento similar a ICC -Ofast. Esto puede verse en la **Figura 3**. También muestra una mejora al utilizar flags, en particular llega a un tiempo de ejecución poco mayor a 2s, al utilizar -O3 u -Ofast, optimizaciones cuyas curvas son casi idénticas.

Otra experimentación surge de una estrategia distinta, en lugar de intentar mejorar el rendimiento mediante la optimización de código por sí sola, se intentara hacer lo mismo mediante la asignación de mayor cantidad de recursos computacionales. OpenMP es una tecnología que logra hacer esto de forma automática. Se dispone, mediante el mismo, de directivas que al actuar sobre un ciclo que depende de una variable, ejecuta distintas instancias del cuerpo del mismo en distintos núcleos del procesador, logrando paralelización a nivel CPU, reduciendo los tiempos de ejecución.

Los resultados correspondientes a esta experimentación, pueden verse en la **Figura 4**. Una particularidad de esta gráfica, es que muestra intervalos de desviación estándar mayores que las otras. Dado que estamos agregando recursos computacionales, el uso de CPU aumenta, dejando pocos recursos para atender al resto de las tareas del sistema operativo. Se sospecha que este es el principal motivo, para el aumento drástico de la varianza de las mediciones respecto de los otros experimentos.

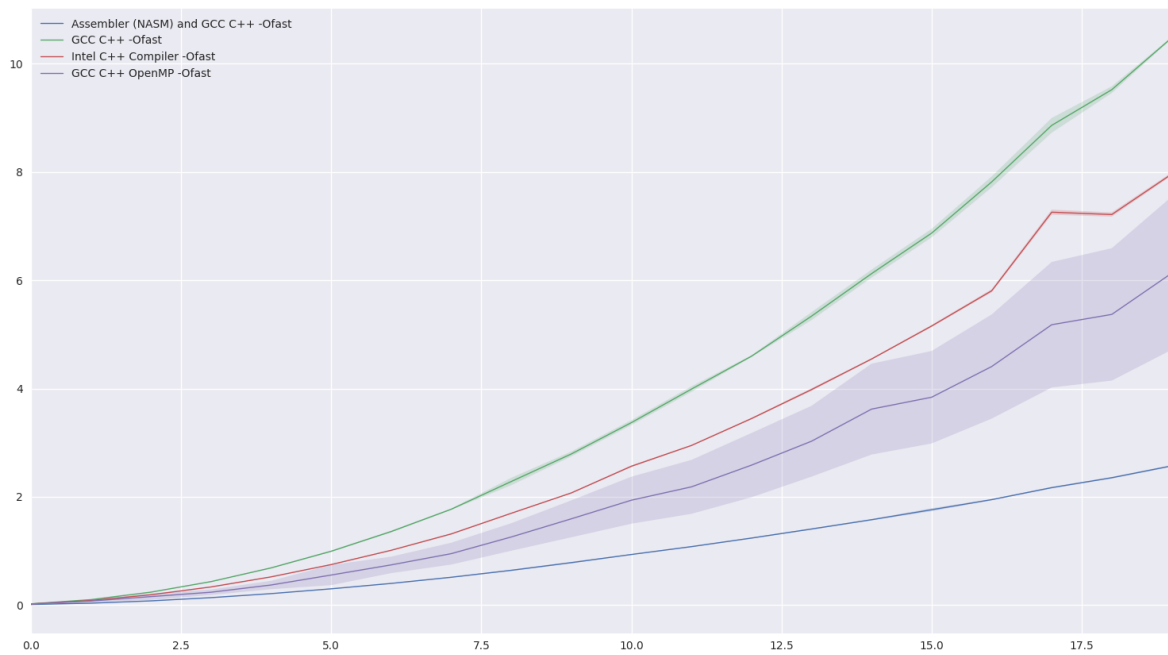
Notamos que aunque la asignación de mayor cantidad de recursos aumenta significativamente el rendimiento, este no supera a la versión SIMD. Hay una explicación razonable para este fenómeno, la máquina donde se realizó la experimentación, como se comentó anteriormente, utiliza un i7-920 2.67GHz. Este modelo de procesador dispone de 4 núcleos físicos, con lo cual OpenMP puede gracias a esto, dividir la tarea en 4 partes. La versión

FIGURA 4. Tiempo(s) vs Tamaño(m) para GCC + OpenMP



SIMD del programa, utiliza registros XMM, y valores flotantes de 32 bits de longitud, con lo cual logra, mediante vectorización, procesar 4 puntos de la malla al mismo tiempo. Siendo que ambas técnicas procesan un máximo teórico de 4 puntos de malla por cada ejecución del cuerpo del ciclo, y que SIMD no requiere comunicación entre distintos núcleos, este resulta en mejores prestaciones.

FIGURA 5. Tiempo(s) vs Tamaño(m) utilizando el flag -Ofast



Por ultimo, y a modo ilustrativo, presentamos en la **Figura 5** una gráfica de las optimizaciones que dieron mejor resultado para cada técnica o compilador utilizado. En todos los casos el mejor rendimiento se obtuvo mediante la utilización del flag -Ofast. Queda claro mediante esta figura, que las mejores prestaciones se dan al utilizar SIMD, seguido por OpenMP, ICC, y finalmente GCC. El patron queda claro, mientras mas recursos se utilizen, y mas especifico sea el codigo de acuerdo a la plataforma subyacente, mejor rendimiento se obtiene.

### 3.4. CPU vs. memoria.



#### 4. CONCLUSIÓN