DEPARTAMENTO
DE COMPUTACION

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales - UBA

Trabajo Práctico Final

Modelo Navier Stokes 2D

2 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 GCC (GNU Compiler Collection), 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.

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 estándar 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. Desarrolo

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

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

Los operadores presentes en la primera ecuación presentada, al ser usados en su forma bidimencional, 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:

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

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

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

Centradas de segundo orden:

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

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

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

Adelantadas de primer orden:

$$\frac{dU}{dx} = \frac{U^n_{i+1,j} - U^n_{i,j}}{dx}$$

$$\frac{dU}{dy} = \frac{U^n_{i,j+1} - U^n_{i,j}}{dy}$$

$$\frac{dU}{dt} = \frac{U^{n+1}_{i,j} - U^n_{i,j}}{dx}$$

Atrasadas de primer orden:

$$\frac{dU}{dx} = \frac{U^n_{i,j} - U^n_{i-1,j}}{dx}$$

$$\frac{dU}{dy} = \frac{U^n_{i,j} - U^n_{i,j-1}}{dy}$$

$$\frac{dU}{dt} = \frac{U^n_{i,j} - U^{n-1}_{i,j}}{dx}$$

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

$$\frac{u^{n+1}_{i,j} - u^n_{i,j}}{\Delta t} + u^n_{i,j}\frac{u^n_{i,j} - u^n_{i-1,j}}{\Delta x} + v^n_{i,j}\frac{u^n_{i,j} - u^n_{i,j-1}}{\Delta y} = -\frac{1}{\rho}\frac{p^n_{i+1,j} - p^n_{i-1,j}}{2\Delta x} + \nu\left(\frac{u^n_{i+1,j} - 2u^n_{i,j} + u^n_{i-1,j}}{\Delta x^2} + \frac{u^n_{i,j+1} - 2u^n_{i,j} + u^n_{i,j-1}}{\Delta y^2}\right) + Fu$$

$$\frac{v^{n+1}_{i,j} - v^n_{i,j}}{\Delta t} + u^n_{i,j}\frac{v^n_{i,j} - v^n_{i-1,j}}{\Delta x} + v^n_{i,j}\frac{v^n_{i,j} - v^n_{i,j-1}}{\Delta y} = -\frac{1}{\rho}\frac{p^n_{i,j+1} - p^n_{i,j-1}}{2\Delta y} + \nu\left(\frac{v^n_{i+1,j} - 2v^n_{i,j} + v^n_{i-1,j}}{\Delta x^2} + \frac{v^n_{i,j+1} - 2v^n_{i,j} + v^n_{i,j-1}}{\Delta y^2}\right) + Fv$$

$$\frac{p^n_{i+1,j} - 2p^n_{i,j} + p^n_{i-1,j}}{\Delta x^2} + \frac{p^n_{i,j+1} - 2*p^n_{i,j} + p^n_{i,j-1}}{\Delta y^2} = \rho\left[\frac{1}{\Delta t}\left(\frac{u_{i+1,j} - u_{i-1,j}}{2\Delta x} + \frac{v_{i,j+1} - v_{i,j-1}}{2\Delta y}\right)\right.$$

Aquí en la última 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.

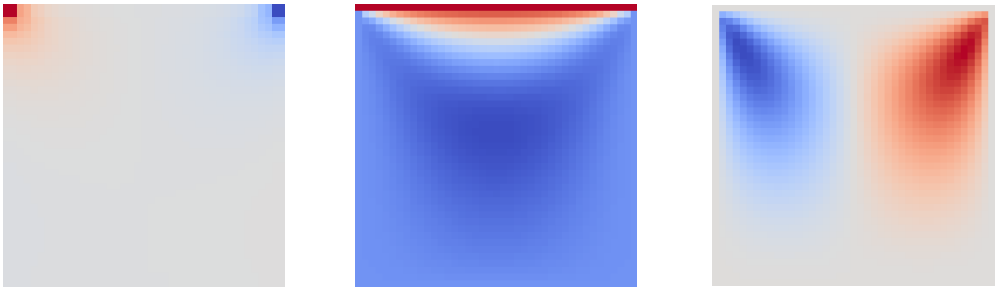
Se definen las condiciones iniciales del problema, y luego se utiliza un método explícito para calcular los nuevos valores del sistema. Estos son guardados en U2, V2, y P2. Seguido de esto, el programa reemplaza los valores de U1, V1, y P1, por aquellos de U2, V2 y P2, quedado así preparado para la siguiente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

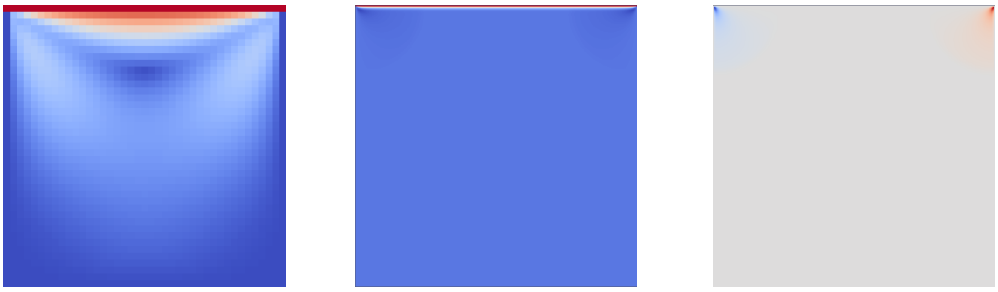
- Mediante una directiva DEFINE presente en el Makefile, se elije si se desea compilar con soporte para SIMD, soporte para OpenMP, ambos, o ninguno.
- El programa define las matrices necesarias con los valores iniciales según lo estipulado por el método de discretización utilizado.
- La sección del programa 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 presición 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.

Los resultados de la simulación pueden apreciarse en las **Figuras 1** y la **Figuras 2**



(A) Presion (B) Velocidad en x (C) Velocidad en y

FIGURA 1. Velocidad y presión



(A) Norma de la velocidad (B) Velocidad en x (C) Velocidad en y

FIGURA 2. Norma y velocidades con mayor resolución

3. EXPERIMENTACION

3.1. Herramientas de des-ensamblado. 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.

3.2. 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 caracterísicas del código generado que dan lugar a mejoras en el rendimiento:

- Dentro de la función *calcVelocities*, la función donde se ralizan 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 almacenándolas 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.

3.3. Optimizaciones del compilador.

3.3.1. 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 [1], 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.
- *fmerge-constants*: Intenta unir constantes identicas (cadenas o flotantes) a través de unidades de compilación. Esta opción es la por defecto para la compilacion 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 GCC 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.

[1] 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

Función set de mat2

```
18e: 55                    push   rbp
18f: 48 89 e5              mov    rbp,rsp
192: 48 89 7d f8           mov    QWORD PTR [rbp-0x8],rdi
196: 89 75 f4              mov    DWORD PTR [rbp-0xc],esi
199: 89 55 f0              mov    DWORD PTR [rbp-0x10],edx
19c: f3 0f 11 45 ec        movss  DWORD PTR [rbp-0x14],xmm0
1a1: 48 8b 45 f8           mov    rax,QWORD PTR [rbp-0x8]
1a5: 48 8b 10              mov    rdx,QWORD PTR [rax]
1a8: 48 8b 45 f8           mov    rax,QWORD PTR [rbp-0x8]
1ac: 8b 40 0c              mov    eax,DWORD PTR [rax+0xc]
1af: 0f af 45 f4           imul   eax,DWORD PTR [rbp-0xc]
1b3: 89 c1                 mov    ecx,eax
1b5: 8b 45 f0              mov    eax,DWORD PTR [rbp-0x10]
1b8: 01 c8                 add    eax,ecx
1ba: 48 98                 cdqe
1bc: 48 c1 e0 02           shl    rax,0x2
1c0: 48 01 d0              add    rax,rdx
1c3: f3 0f 10 45 ec        movss  xmm0,DWORD PTR [rbp-0x14]
1c8: f3 0f 11 00           movss  DWORD PTR [rax],xmm0
1cc: 90                    nop
1cd: 5d                    pop    rbp
1ce: c3                    ret
1cf: 90                    nop
```

La versión sin opitmizar, 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            imul   esi,DWORD PTR [rdi+0xc]
d8: 01 f2                  add    edx,esi
da: 48 63 d2               movsxd rdx,edx
dd: 48 8b 07               mov    rax,QWORD PTR [rdi]
e0: f3 0f 11 04 90         movss  DWORD PTR [rax+rdx*4],xmm0
e5: c3                     ret
```

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.

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 ningun 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 laf0. 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 apesar 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

```
1abe: 55                        push   rbp
1abf: 48 89 e5                  mov    rbp,rsp
1ac2: 48 83 ec 38               sub    rsp,0x38
1ac6: 48 89 7d e8               mov    QWORD PTR [rbp-0x18],rdi
1aca: 89 75 e4                  mov    DWORD PTR [rbp-0x1c],esi
1acd: 89 55 e0                  mov    DWORD PTR [rbp-0x20],edx
1ad0: 48 8b 45 e8               mov    rax,QWORD PTR [rbp-0x18]
1ad4: 48 8d 88 e0 00 00 00      lea    rcx,[rax+0xe0]
1adb: 8b 55 e0                  mov    edx,DWORD PTR [rbp-0x20]
1ade: 8b 45 e4                  mov    eax,DWORD PTR [rbp-0x1c]
1ae1: 89 c6                     mov    esi,eax
1ae3: 48 89 cf                  mov    rdi,rcx
1ae6: e8 00 00 00 00            call   1aeb
1aeb: f3 0f 11 45 d8            movss  DWORD PTR [rbp-0x28],xmm0
1af0: 48 8b 45 e8               mov    rax,QWORD PTR [rbp-0x18]
1af4: 48 8d 88 e0 00 00 00      lea    rcx,[rax+0xe0]
1afb: 8b 55 e0                  mov    edx,DWORD PTR [rbp-0x20]
1afe: 8b 45 e4                  mov    eax,DWORD PTR [rbp-0x1c]
1b01: 89 c6                     mov    esi,eax
1b03: 48 89 cf                  mov    rdi,rcx
1b06: e8 00 00 00 00            call   1b0b
...     ...       ...           ...    ...
2400: f3 0f 10 45 d8            movss  xmm0,DWORD PTR [rbp-0x28]
2405: 89 c6                     mov    esi,eax
2407: e8 00 00 00 00            call   240c
240c: 90                        nop
240d: c9                        leave
240e: c3                        ret
240f: 90                        nop
```

3.3.2. 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 performace 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 evaluan al mismo valor) y analiza si vale la pena reemplazarlas por una única variable reteniendo el valor computado[2] de manera global. También realiza constant folding[3] y constant propagation [4].
- *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.
- *finline-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 esten bien pegaditos, ocupando menos que el tmaño de una palabraPerform 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.

Función calcVelocities con optimización -O1

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

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 estan todavia disponibles.

Analizaremos ahora las diferencias entre el código resultado de compilar con optimizaciones -O1 y el que es generado por la compilación mediante optimizaciónes -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.

A grandes rasgos la optimización más notoria se constituye por un calculo previo al ciclado, de los distintos valores numéricos necesarios para luego acceder a las posiciónes 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

Función setCavityFlowSpeeds con optimización -O1

```
106c:   83 7f 24 00             cmp    DWORD PTR [rdi+0x24],0x0
1070:   7e 7d                   jle    10ef
1072:   41 56                   push   r14
1074:   41 55                   push   r13
1076:   41 54                   push   r12
1078:   55                      push   rbp
1079:   53                      push   rbx
107a:   48 89 fd                mov    rbp,rdi
107d:   bb 00 00 00 00          mov    ebx,0x0
1082:   4c 8d b7 b0 00 00 00    lea    r14,[rdi+0xb0]
1089:   4c 8d af e0 00 00 00    lea    r13,[rdi+0xe0]
1090:   4c 8d a7 10 01 00 00    lea    r12,[rdi+0x110]
1097:   8b 45 28                mov    eax,DWORD PTR [rbp+0x28]
109a:   8d 50 ff                lea    edx,[rax-0x1]
109d:   f3 0f 10 05 00 00 00    movss  xmm0,DWORD PTR [rip+0x0]
10a4:   00
10a5:   89 de                   mov    esi,ebx
10a7:   4c 89 f7                mov    rdi,r14
10aa:   e8 00 00 00 00          call   10af
10af:   8b 45 28                mov    eax,DWORD PTR [rbp+0x28]
10b2:   8d 50 ff                lea    edx,[rax-0x1]
10b5:   f3 0f 10 05 00 00 00    movss  xmm0,DWORD PTR [rip+0x0]
10bc:   00
10bd:   89 de                   mov    esi,ebx
10bf:   4c 89 ef                mov    rdi,r13
10c2:   e8 00 00 00 00          call   10c7
10c7:   8b 45 28                mov    eax,DWORD PTR [rbp+0x28]
10ca:   8d 50 ff                lea    edx,[rax-0x1]
10cd:   f3 0f 10 05 00 00 00    movss  xmm0,DWORD PTR [rip+0x0]
10d4:   00
10d5:   89 de                   mov    esi,ebx
10d7:   4c 89 e7                mov    rdi,r12
10da:   e8 00 00 00 00          call   10df
10df:   83 c3 01                add    ebx,0x1
10e2:   39 5d 24                cmp    DWORD PTR [rbp+0x24],ebx
10e5:   7f b0                   jg     1097
10e7:   5b                      pop    rbx
10e8:   5d                      pop    rbp
10e9:   41 5c                   pop    r12
10eb:   41 5d                   pop    r13
10ed:   41 5e                   pop    r14
10ef:   f3 c3                   repz ret
10f1:   90                      nop
```

el ciclo que se constituye entre las lineas 1097 y 10e5 (24 instrucciónes) de la versión -O1, este consta de una mayor cantidad de líneas que el de la versión -O2, 18d8, 18f9 (9 instrucciónes). 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 lineas no se vió aumentada (*finline-small-functions*), de hecho disminuyó.

Además se puede notar la activación de los flags de alineamiento. Por ejemplo, se nota claramente la presencia de *falign-functions*, que fuerza el comienzo de las funciones en posiciones de memoria que sean múltiplos de

Función setCavityFlowSpeeds con optimización -O2

```
1880:   44 8b 5f 24             mov    r11d,DWORD PTR [rdi+0x24]
1884:   45 85 db                test   r11d,r11d
1887:   7e 72                   jle    18fb
1889:   8b 47 28                mov    eax,DWORD PTR [rdi+0x28]
188c:   4c 63 97 bc 00 00 00    movsxd r10,DWORD PTR [rdi+0xbc]
1893:   31 d2                   xor    edx,edx
1895:   4c 63 8f ec 00 00 00    movsxd r9,DWORD PTR [rdi+0xec]
189c:   4c 63 87 1c 01 00 00    movsxd r8,DWORD PTR [rdi+0x11c]
18a3:   83 e8 01                sub    eax,0x1
18a6:   48 98                   cdqe
18a8:   49 c1 e2 02             shl    r10,0x2
18ac:   48 c1 e0 02             shl    rax,0x2
18b0:   49 c1 e1 02             shl    r9,0x2
18b4:   49 c1 e0 02             shl    r8,0x2
18b8:   48 89 c6                mov    rsi,rax
18bb:   48 89 c1                mov    rcx,rax
18be:   48 03 b7 b0 00 00 00    add    rsi,QWORD PTR [rdi+0xb0]
18c5:   48 03 8f e0 00 00 00    add    rcx,QWORD PTR [rdi+0xe0]
18cc:   48 03 87 10 01 00 00    add    rax,QWORD PTR [rdi+0x110]
18d3:   0f 1f 44 00 00          nop    DWORD PTR [rax+rax*1+0x0]
18d8:   83 c2 01                add    edx,0x1
18db:   c7 06 0a d7 23 3c       mov    DWORD PTR [rsi],0x3c23d70a
18e1:   c7 01 0a d7 23 3c       mov    DWORD PTR [rcx],0x3c23d70a
18e7:   4c 01 d6                add    rsi,r10
18ea:   c7 00 0a d7 23 3c       mov    DWORD PTR [rax],0x3c23d70a
18f0:   4c 01 c9                add    rcx,r9
18f3:   4c 01 c0                add    rax,r8
18f6:   44 39 da                cmp    edx,r11d
18f9:   75 dd                   jne    18d8
18fb:   f3 c3                   repz ret
18fd:   90                      nop
18fe:   66 90                   xchg   ax,ax
```

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 instrucciónes 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
```

Se aclara que, la potencia de dos utilizada, es algo que se especifíca 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

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
```

que el último dígito de todas las funciones sea cero, es un fuerte indicador de la presencia del efecto de esta optimización.

3.3.3. Optimizaciones O3. La utilización del flag -O3 aumenta aun más la cantidad de mejoras en búsqueda del aumento de la velocidad. A continuación analizamos algunos de los flags que activa.

El flag *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 se restringe solo a las funciones más pequeñas en cuanto a cantidad de código para mantener baja la cantidad de lineas 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 podria darse es en la condición que decide si utilizar Assembler o C++ plano pero esta no esta 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 ahorarría 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 ningun 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.

ftree-partial-pre Por último, el flag *fipa-cp-clone options* clona las funciones para realizar una sustitución de variables por sus valores constantes(i.e. *constant propagation*) de forma interprocedural a un nivel aun mayor. Es altamente probable que se obtengan multiples copias de funciones, con lo cual puede incrementar el tamaño del código de manera significativa.

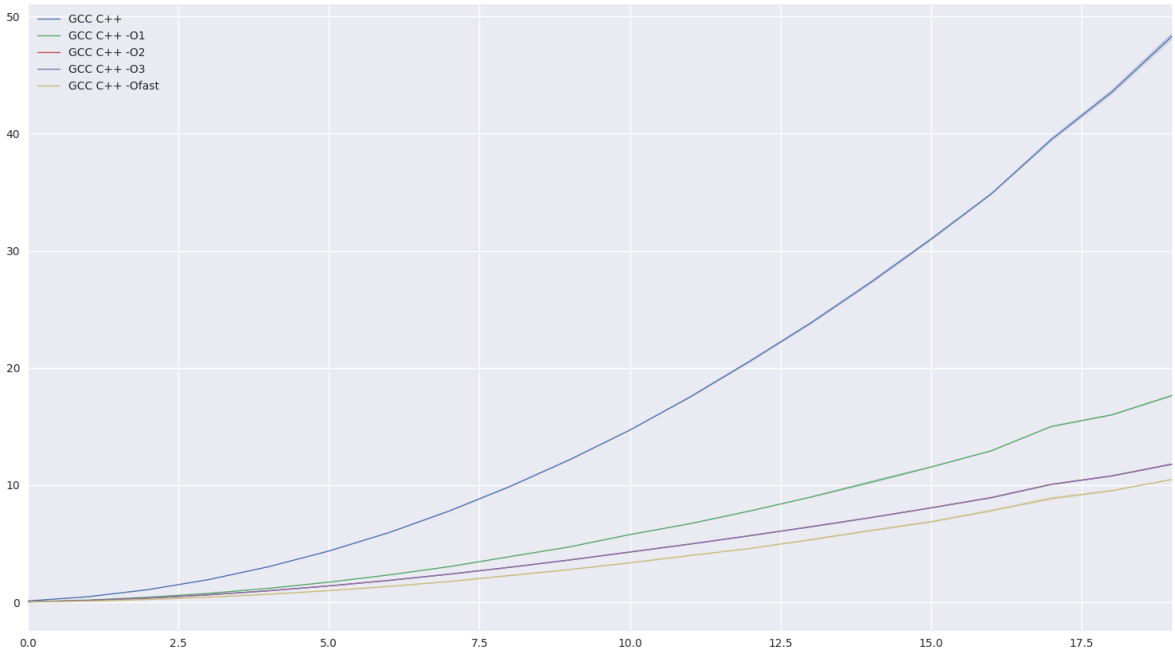
3.4. Comparación entre secuencial, vectorial y multicore. Ya analizado el tipo de mejoras que son implementadas por GCC al utilizar -O1, -O2 y -O3, se presentan en esta sección los resultados de los experimentos realizados. Se comparan mediciones de tiempo de los distintos flags presentes en el compilador,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

En particular se estudian los flags -O0, -O1, -O2, -O3 y -Ofast para el compilador **GCC (GNU Compiler Collection)**, el compilador **ICC (Intel C++ Compiler)**, para **GCC+OpenMP (Open Multi-Processing)**, 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 $1x1m^2$ y aumentando de a un metro el lado del sistema, hasta llegar a $20x20m^2$, 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. En el caso en que se mide el efecto del tiempo del sistema simulado, se comienza con una duración de 1s y se llega aumentando de a 1s hasta 30s de sistema simulado. Además, para cada punto, se realizaron 100 repeticiones, y se tomó la medida 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.

Todas las mediciones fueron realizadas 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 alrededor de **60.000 simulaciones**. A continuación se muestran los resultados de las mismas.

FIGURA 3. 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 3**.

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.

Donde la versión más 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 4** un tiempo de 10s, notablemente más 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 aun así, este es más rápido que GCC -Ofast. Finalmente, la mejor medida para ICC esta alrededor de los 8s.

De la misma forma en que GCC -Ofast tenía 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 5**. 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 si sola, se intentara hacer lo mismo mediante la asignación de mayor cantidad

FIGURA 4. Tiempo(s) vs Tamaño(m) para Intel C++ Compiler

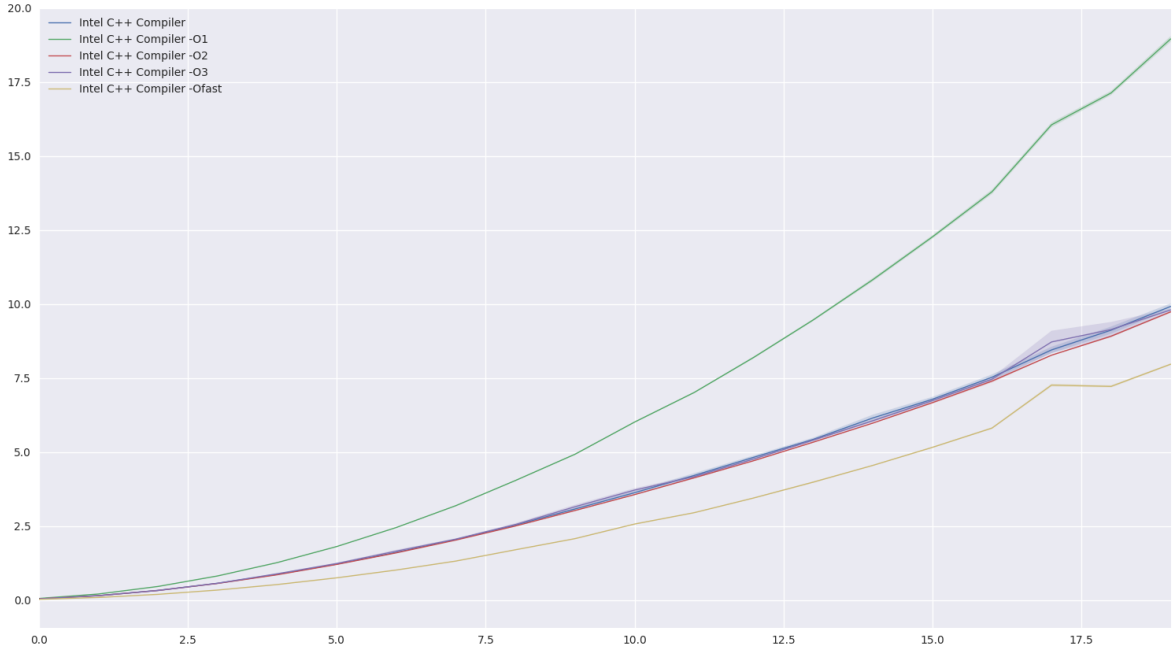
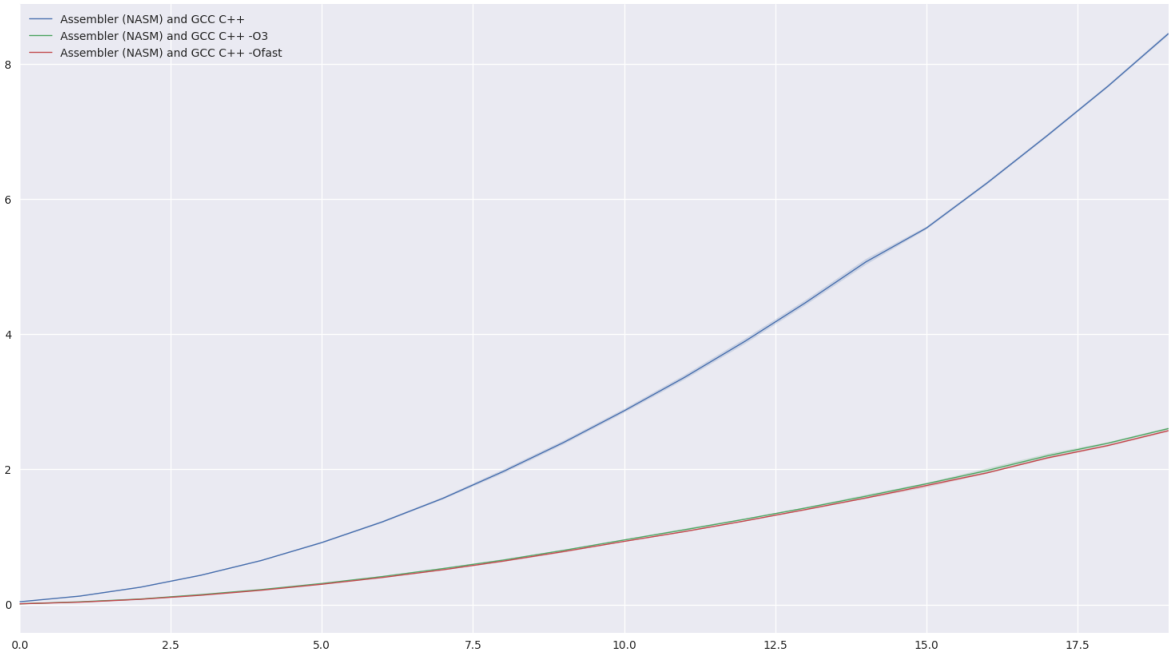


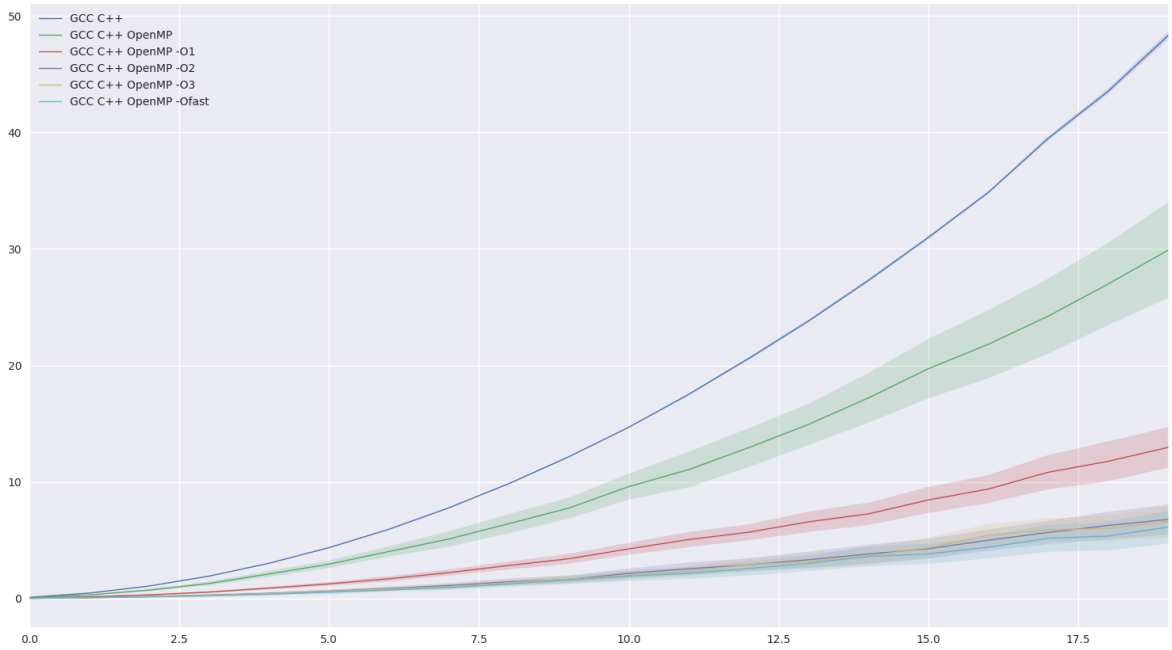
FIGURA 5. Tiempo(s) vs Tamaño(m) para Assembler(NASM)



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 6**. 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

FIGURA 6. Tiempo(s) vs Tamaño(m) para GCC + OpenMP



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 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 coordinación entre distintos núcleos, este resulta en mejores prestaciones.

A modo ilustrativo, presentamos en la **Figura 7** 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 patrón queda claro, mientras más recursos se utilicen, y más específico sea el código de acuerdo a la plataforma subyacente, mejor rendimiento se obtiene.

Finalmente se realiza un análisis de la única otra variable que afecta el rendimiento que es la magnitud de la cantidad de iteraciones temporales realizadas en cada simulación. En la **Figura 8** puede verse una comparación de los distintos casos analizados anteriormente, pero esta vez no aumenta el tamaño, aumenta el tiempo del sistema dinámico simulado. Cada punto de la gráfica indica un aumento del tiempo de un segundo más de simulación.

3.5. Análisis de performance bajo carga. Por último se analiza el efecto del uso de CPU en otras tareas. Esto consta de ejecutar repetidamente simulaciones idénticas para los distintos casos que se analizan en este trabajo, medir el tiempo que tardan en terminar. Además a lo largo del experimento se lanzan dos tareas. La primera es una tarea que hace uso intensivo de accesos a memoria, y la segunda de operaciones de cálculo flotante, utilizando para esto la ALU (Arithmetic Logic Unit). La ejecución de estas tareas genera dos picos en las mediciones de las simulaciones de fluidos. Los resultados pueden apreciarse en la **Figura 9**.

Podemos confirmar que la versión que utiliza OpenMP es la única que se ve afectada significativamente por la presencia de otras tareas, y también que no hay diferencias significativas entre tareas que usen memoria o tareas que realicen operaciones de punto flotante.

FIGURA 7. Tiempo(s) vs Tamaño(m) utilizando el flag -Ofast

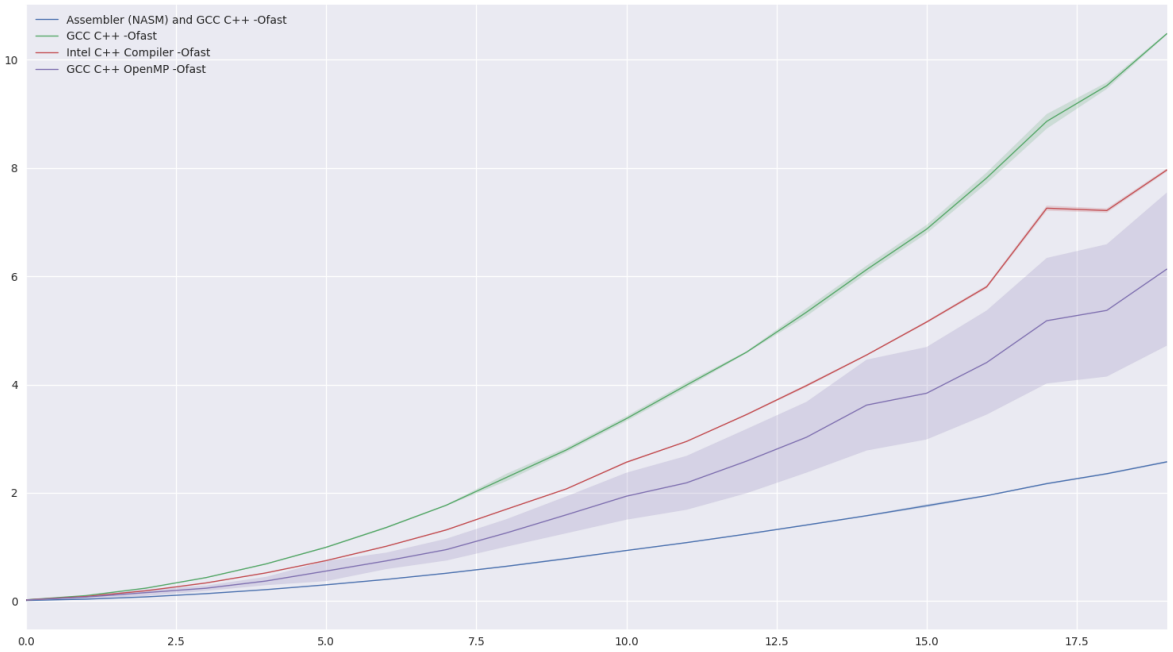


FIGURA 8. Tiempo real(s) vs Tiempo simulado(m) utilizando el flag -Ofast

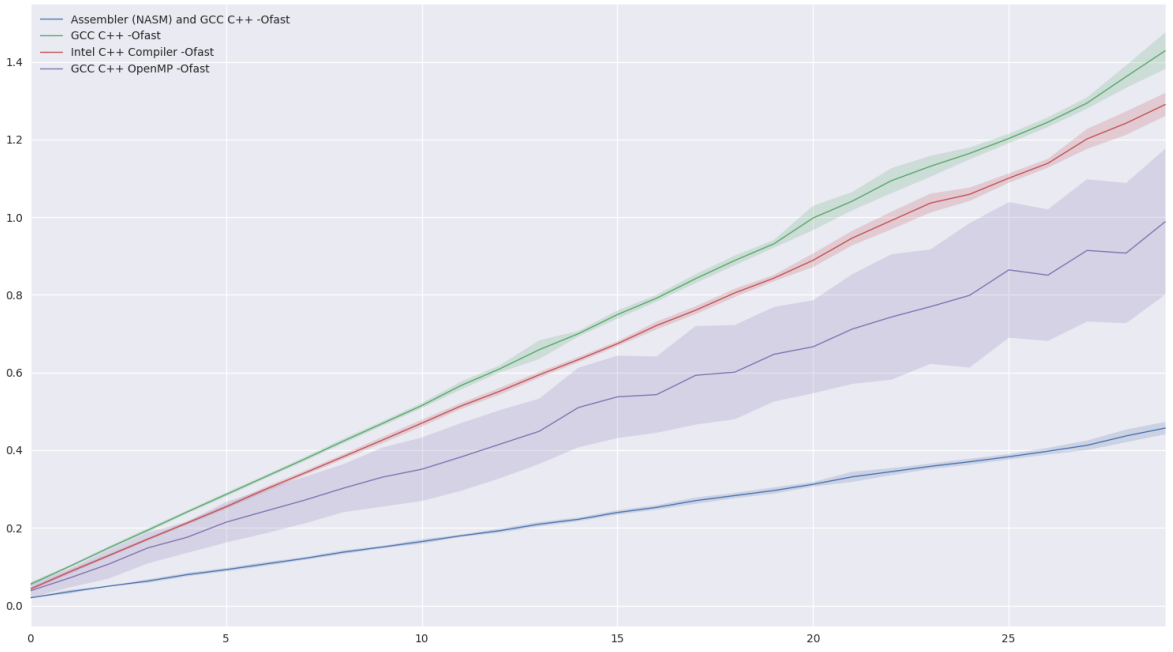
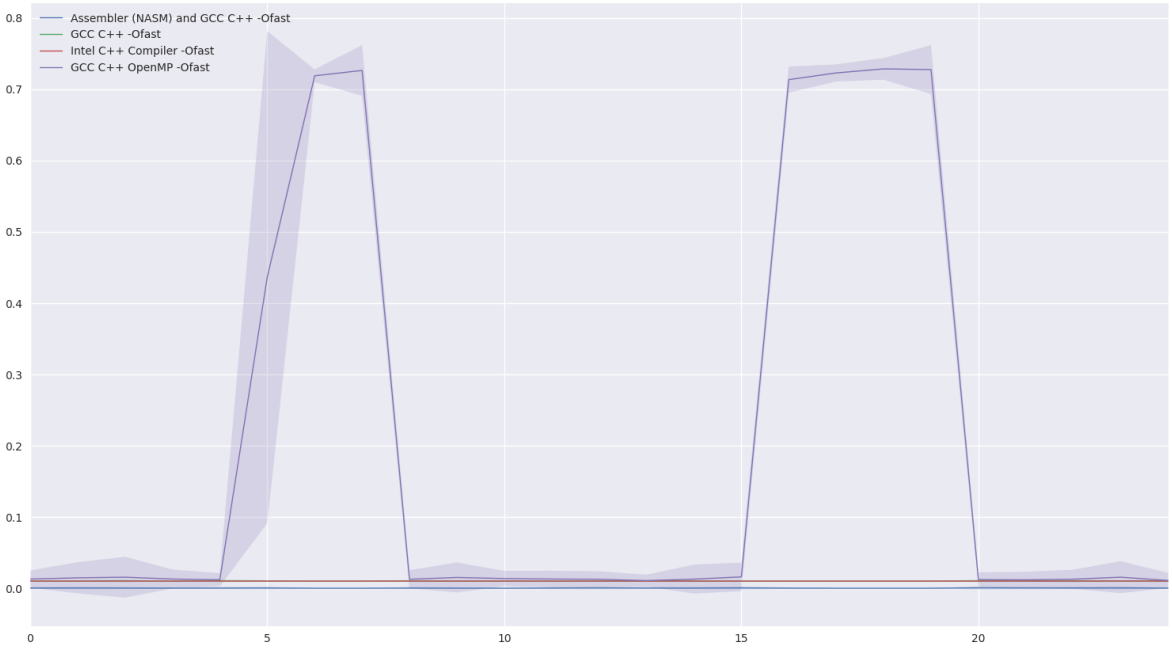


FIGURA 9. Tiempo(s) con carga de Memoria y luego CPU



4. Conclusión

Los resultados obtenidos sugieren que bien utilizado, mientras más específico es el método, mejor resultado produce, como puede verse en el aumento de rendimiento al pasar de GCC a ICC, y luego nuevamente de ICC a una versión escrita teniendo en cuenta la plataforma específica. Además se encontró evidencia que comprueba el poder de optimización de las distintas mejoras implementadas por los compiladores GCC e ICC, dando lugar a velocidades mucho mayores que las versiones originales.

Se estudió también el procesamiento multi-núcleo, y se encontró que mejora el rendimiento por sobre lo que es posible mejorarlo utilizando optimizaciones de compilador. Sin embargo, al no disponer de muchas unidades de procesamiento, la vectorización fue una herramienta más satisfactoria a la hora de disminuir el tiempo de ejecución. Esto se debió mayormente a que en el caso de este estudio, y por el equipo utilizado para realizar la experimentación, ambos SIMD y OpenMP, eran capaces de computar 4 elementos en simultáneo, con la salvedad de que el mecanismo mediante el cual lo hace SIMD es más sencillo.

Otra cosa que se pudo apreciar, es la alta varianza en los tiempos de ejecución de OpenMP. Creemos que esto se debe a que si bien no se utilizaron los equipos durante la experimentación, el scheduler debe atender todas las tareas, y al tener los 4 núcleos saturados, la versión de OpenMP es especialmente vulnerable a los efectos del sistema operativo.

Como trabajo a futuro se plantea por un lado combinar SIMD con OpenMP, o alguna otra tecnología que permita paralelización, como MPI (Message Passing Interface). Esperamos que esto de aumentos mucho mayores de rendimiento, y en particular en el caso de MPI, permita la construcción de una versión escalable. Por otro lado, seria interesante realizar el mismo estudio a otro tipo de problemas, con le objetivo de analizar en un rango más grande de aplicaciones el efecto de estas técnicas.