



**DEPARTAMENTO  
DE COMPUTACION**

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales - UBA

# Trabajo Práctico Final

## Modelo Navier Stokes 2D

25 de febrero 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 mas 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 computación en paralelo, o de computación vectorial. En este trabajo nos centraremos en la tecnología de computación 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 y channel flow.

describirlos

Se realizó una solución iterativa de punto fijo, creo. Por que? No hay iteracion de punto fijo en el código.

## 2. DESARROLLO

**2.1. Discretización.** Comenzaremos con algunas definiciones. al modelar con diferencias finitas, se utilizan ciertos reemplazos de los operadores diferenciales conocidos como discretizaciones. Como su nombre indica, estos son versiones discretas de los operadores, y se los usa bajo el supuesto de que en el limite se comportan de forma similar. Pasaremos ahora a definir algunas discretizaciones que serán utilizadas en al hacer el pasaje.

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:

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

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

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

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 y 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 termino temporal, sin que hubiera en principio información sobre el tiempo en la ecuación de la presión. Este cambio se hace con el objetivo de terminar de acoplar la ecuación de la presión con las ecuaciones de velocidad. La derivación de esta solución 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 mas sencilla. 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 casi completamente en C++, excepto por la sección donde es critico 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  $U2$ ,  $U2$ ,  $V1$ ,  $V2$ ,  $P1$ ,  $P2$ , 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 descrita 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 segun lo estipulado por el metodo de discretización utilizado.
- La sección del programa que realiza el calculo consta de tres ciclos for 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.
- Mediante la utilización de las directivas de compilador, el codigo compilado constara de una implementación en C++ plano, una implementación SIMD, donde al llegar a un valor menor al ancho de los registros XMM dividido por el tamaño de el tipo de datos flotante de precision simple se cambia el procesamiento mediante SIMD por el de C++, y ademas mediante estas mismas directivas puede definirse o no la presencia de OpenMP, logrando asi la utilización de multiples nucleos.
- 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 funcion de calculo se calculan 4 elementos consecutivos en memoria.
- Ademas, 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

**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.

### 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. Entre ellos se encuentran los siguientes flags:

- fdce: Realiza eliminación de código muerto en RTL <sup>1</sup>. Disminuyendo así la presencia de código que no tiene efecto en el resultado.
- fdse: Realiza eliminación de guardado muerto en RTL, valores que son escritos a memoria, pero que no vuelven a leerse.
- 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.

Tenemos un extracto de código de la función CalcVelocities (donde se realiza el grueso de los cálculos) donde podemos ver el flag de eliminación de código muerto (fdce) en acción. Tenemos un primer pedazo de código donde obtenemos la ejecución de cpp sin optimización en versión assembler y más abajo lo mismo pero con optimización -O1. El formato es línea de código, instrucción en hexadecimal y descripción de la instrucción versión assembler.

#### Muestra de código de cpp

<\_simulatorCalcVelocities>:

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

---

<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

```

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

```

### Muestra de código de cpp con 01

```

<_simulatorCalcVelocities>:
12f0: 41 57          push    r15
12f2: 41 56          push    r14
12f4: 41 55          push    r13
12f6: 41 54          push    r12
12f8: 55            push    rbp
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
1890: 5d               pop     rbp
1891: 41 5c             pop     r12
1893: 41 5d             pop     r13
1895: 41 5e             pop     r14
1897: 41 5f             pop     r15
1899: c3               ret

```

Lo que notamos de los dos extractos de código anterior, la diferencia, es el uso de la instrucción `not`. Aparentemente no tiene ningún tipo de efecto, con lo cual, en el código optimizado se hace eliminación de este.

En la posición `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, se arregla con el flag `fdse`. (accesos al pedo de `O0`)

Además notamos que, con el uso del parámetro `-O1`, se hace uso de los registros para el manejo de las variables locales en vez de la pila como sucedía usando el parámetro `-O0` (está por defecto).

En el código de `c++` con flag `O1`, el manejo de memoria no tiene el comportamiento tonto de volver a cargar algo desde memoria que ya tenía. Sin embargo repite movimientos de datos innecesarios entre registros.

También notamos que no utiliza al máximo los registros, ya que guarda ciertos datos a memoria.

Además aquí se puede notar el uso de la pila para las variables en vez de usar registros en la versión no optimizada (referencia a experimento anterior). A diferencia de esto, una vez que activamos la optimización `o1` podemos ver que los valores de los registros son guardados dentro de la función para permitir operaciones más rápidas por el resto del llamado.

El siguiente extracto, muestra el nivel de mejora en cuanto a manejo de datos de memoria de `O1`. No así las cagadas, pero está bueno ponerlo.

```

000000000000018e <_ZN4mat23setEiif>:
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           cdq     rax
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
00000000000000d4 <_ZN4mat23setEiif>:
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

```

Compilamos el código de C++ con el flag de optimización -O1 y se obtuvieron los siguientes resultados en medición de tiempo de ejecución respecto al código sin flags de optimización:

Tiempo ejecución		
Tamaño	Sin optimización	Con optimización (O1)
6 x 6	8.328s	3.260s
8 x 8	14.640s	5.776s
10 x 10	22.872s	8.980s
12 x 12	32.916s	12.888s

Los tiempos de ejecución se reducen utilizando el flag de optimización.

**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 performace del código generado.

Algunos de los flags que O2 activa:

■

-fthread-jumps -falign-functions -falign-jumps -falign-loops -falign-labels -fcaller-saves -fcrossjumping -fcse-follow-jumps -fcse-skip-blocks -fdelete-null-pointer-checks -fdevirtualize -fdevirtualize-speculatively -fexpensive-optimizations -fgcse -fgcse-lm -fhoist-adjacent-loads -finline-small-functions -findirect-inlining -fipa-cp -fipa-bit-cp -fipa-vrp -fipa-sra -fipa-icf -fisolate-erroneous-paths-dereference -flra-remat -foptimize-sibling-calls -foptimize-strlen -fpartial-inlining -fpeephole2 -freorder-blocks-algorithm=stc -freorder-blocks-and-partition -freorder-functions -frerun-cse-after-loop -fsched-interblock -fsched-spec -fschedule-insns -fschedule-insns2 -fstore-merging -fstrict-aliasing -ftree-builtin-call-dce -ftree-switch-conversion -ftree-tail-merge -fcode-hoisting -ftree-pre -ftree-vrp -fipa-ra Please note the warning under -fgcse about invoking -O2 on programs that use computed gotos.

%01

000000000000106c <\_ZN9simulatorl9setCavityFlowSpeedsEv>:

```

106c: 83 7f 24 00      cmp     DWORD PTR [rdi+0x24],0x0
1070: 7e 7d           jle     10ef <_ZN9simulatorl9setCavityFlowS
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]          # 1
10a4: 00
10a5: 89 de          mov     esi,ebx
10a7: 4c 89 f7        mov     rdi,r14
10aa: e8 00 00 00 00   call    10af <_ZN9simulatorl9setCavityFlowS
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]          # 1
10bc: 00
10bd: 89 de          mov     esi,ebx
10bf: 4c 89 ef        mov     rdi,r13
10c2: e8 00 00 00 00   call    10c7 <_ZN9simulatorl9setCavityFlowS
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]          # 1
10d4: 00
10d5: 89 de          mov     esi,ebx
10d7: 4c 89 e7        mov     rdi,r12
10da: e8 00 00 00 00   call    10df <_ZN9simulatorl9setCavityFlowS
10df: 83 c3 01        add     ebx,0x1
10e2: 39 5d 24        cmp     DWORD PTR [rbp+0x24],ebx
10e5: 7f b0          jg      1097 <_ZN9simulatorl9setCavityFlowS
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

```

%O2

0000000000001880 <\_ZN9simulator19setCavityFlowSpeedsEv>:

```

1880:  44 8b 5f 24          mov     r11d,DWORD PTR [rdi+0x24]
1884:  45 85 db             test    r11d,r11d
1887:  7e 72                jle     18fb <_ZN9simulator19setCavityFlowSpeedsEv>
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                cdq     qeax
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,rsi
18bb:  48 89 c1             mov     rcx,rcx
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 <_ZN9simulator19setCavityFlowSpeedsEv>
18fb:  f3 c3               repz   ret
18fd:  90                  nop
18fe:  66 90                xchg    ax,ax

```

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.

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

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 multiples 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
```

0000000000001aa0 <\_ZN9simulatorl4calcVelocitiesEii>:

```
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
```

0000000000001900 <\_ZN9simulatorl1setPBordersEv>:

```
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 definido 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.

### 3.3. Tiempos de compilación y tamaño de código generado.

Tiempo compilación	
Sin optimización	Con optimización (O1)
0.652s	1.044s

Utilizamos nuevamente la herramienta objdump. El código en assembler obtenido mediante la herramienta era reducido en cuanto a cantidad de líneas (por ejemplo, la función calcVelocities tenia 558 líneas en assembler sin flags de optimización y luego con el flag 341 líneas).

**3.4. Comparación entre secuencial, vectorial y multicore.** Ya analizado el tipo de mejoras que son implementadas por G++ al utilizar -O1, se comparan mediciones de tiempo de los distintos flags presentes en el compilador, con otras formas de mejorar el rendimiento. En particular se estudia vectorización mediante SIMD y multicore mediante OpenMP.

Para cada mejora se experimentó con distintos tamaños del sistema simulado, yendo desde  $1 \times 1 m^2$  hasta  $20 \times 20 m^2$ . Además, para cada tamaño, se realizaron 100 repeticiones, y se tomo la media y varianza 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.

**3.5. CPU vs. memoria.**

#### 4. CONCLUSIÓN