



# Trabajo de Fin de Grado

---

## Simulador didáctico de arquitectura de computadores

*Didactic simulator for Computer Architecture .*

Adrián Abreu González

---

La Laguna, 11 de mayo de 2017

D. **Iván Castilla Rodríguez**, con N.I.F. 78.565.451-G profesor Titular de Universidad adscrito al Departamento de Nombre del Departamento de la Universidad de La Laguna, como tutor

## **C E R T I F I C A**

Que la presente memoria titulada:

*“Simulador didáctico de arquitectura de computadores.”*

ha sido realizada bajo su dirección por D. **Adrián Abreu González**, con N.I.F. 54.111.250-R.

Y para que así conste, en cumplimiento de la legislación vigente y a los efectos oportunos firman la presente en La Laguna a 11 de mayo de 2017

# Agradecimientos

XXX

XXX

XXX

XXX

# Licencia



© Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento 4.0 Internacional.

## Resumen

*El objetivo de este trabajo ha sido .... bla, bla, bla bla, bla, bla bla, bla, bla*

*La competencia [E6], que figura en la guía docente, indica que en la memoria del trabajo se ha de incluir: antecedentes, problemática o estado del arte, objetivos, fases y desarrollo del proyecto, conclusiones, y líneas futuras.*

*Se ha incluido el apartado de 'Licencia' con todas las posibles licencias abiertas (Creative Commons). En el caso en que se decida hacer público el contenido de la memoria, habrá que elegir una de ellas (y borrar las demás). La decisión de hacer pública o no la memoria se indica en el momento de subir la memoria a la Sede Electrónica de la ULL, paso necesario en el proceso de presentación del TFG.*

*El documento de memoria debe tener un máximo de 50 páginas.*

*No se deben dejar páginas en blanco al comenzar un capítulo, ya que el documento no está pensado para se impreso sino visionado con un lector de PDFs.*

*También es recomendable márgenes pequeños ya que, al firmar digitalmente por la Sede, se coloca un marco alrededor del texto original.*

*El tipo de letra base ha de ser de 14ptos.*

**Palabras clave:** Palabra reservada1, Palabra reservada2, ...

## Abstract

Here should be the abstract in a foreing language...

***Keywords:*** *Keyword1, Keyword2, Keyword3, ...*

# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Introducción . . . . .	1
1.2. Paralelismo a nivel de instrucción . . . . .	1
1.2.1. Superescalar . . . . .	1
1.2.2. VLIW . . . . .	1
1.3. Motivación para el trabajo . . . . .	1
<b>2. Antecedentes</b>	<b>3</b>
2.1. SIMD . . . . .	3
2.2. Otros simuladores . . . . .	3
<b>3. Tecnologías</b>	<b>4</b>
3.1. Lenguaje para la lógica de la aplicación . . . . .	4
3.1.1. Coffescript . . . . .	4
3.1.2. Dart . . . . .	4
3.1.3. Typescript . . . . .	4
3.2. Tecnología para la integración modelo vista . . . . .	5
3.2.1. Webcomponents . . . . .	5
3.2.2. Polymer . . . . .	6
3.2.3. React . . . . .	6
3.3. Tecnología para hacer la build . . . . .	6
3.3.1. Browserify . . . . .	6
3.3.2. Gulp/Grunt . . . . .	6
3.3.3. Webpack . . . . .	6
3.4. Tecnología para la documentación . . . . .	7
3.4.1. Generadores de contenido estático . . . . .	7
3.4.2. Hexo . . . . .	7
<b>4. Objetivos y fases</b>	<b>8</b>
4.1. Objetivos . . . . .	8
4.2. Fases . . . . .	8
<b>5. Desarrollo del proyecto</b>	<b>9</b>
5.1. Migración del núcleo de la aplicación . . . . .	9

5.1.1. Analizadores léxicos . . . . .	9
5.1.2. Lex . . . . .	9
5.2. Migración de la máquina superescalar . . . . .	9
5.3. Desarrollo de la interfaz . . . . .	10
5.3.1. Análisis de la interfaz original . . . . .	10
5.3.2. El problema de las zonas . . . . .	10
5.3.3. El nuevo diseño por componentes . . . . .	10
5.4. Integración interfaz - máquina superescalar . . . . .	10
5.4.1. Realización de los bindings . . . . .	10
5.5. Migración de la documentación . . . . .	10
<b>6. Ampliación de funcionalidades</b>	<b>12</b>
6.1. Parseador . . . . .	12
6.2. Modo de ejecución en lotes . . . . .	13
6.3. Histórico . . . . .	13
<b>7. Conclusiones y líneas futuras</b>	<b>15</b>
7.1. Conclusiones . . . . .	15
7.2. Líneas futuras . . . . .	15
<b>8. Summary and Conclusions</b>	<b>17</b>
8.1. Summary . . . . .	17
8.2. Future work lines . . . . .	17
<b>9. Presupuesto</b>	<b>18</b>
<b>A. Título del Apéndice 1</b>	<b>19</b>
A.1. Algoritmo XXX . . . . .	19
A.2. Algoritmo YYY . . . . .	19
<b>B. Título del Apéndice 2</b>	<b>20</b>
B.1. Otro apéndice: Sección 1 . . . . .	20
B.2. Otro apéndice: Sección 2 . . . . .	20
<b>Bibliografía</b>	<b>20</b>



# Índice de figuras

1.1. Ejemplo . . . . .	2
3.1. Ejemplo . . . . .	5
6.1. Notificacion de error original SIMDE . . . . .	12

# Índice de tablas

9.1. Presupuesto . . . . .	18
----------------------------	----

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Introducción

### 1.2. Paralelismo a nivel de instrucción

#### 1.2.1. Superescalar

Como alumno del itinerario de Ingeniería de Computadores he sido usuario del SIMD. Y es por ello que soy consciente de las mejoras

#### 1.2.2. VLIW

Lalalala

### 1.3. Motivación para el trabajo

La aplicación SIMDe como se ha mencionado previamente

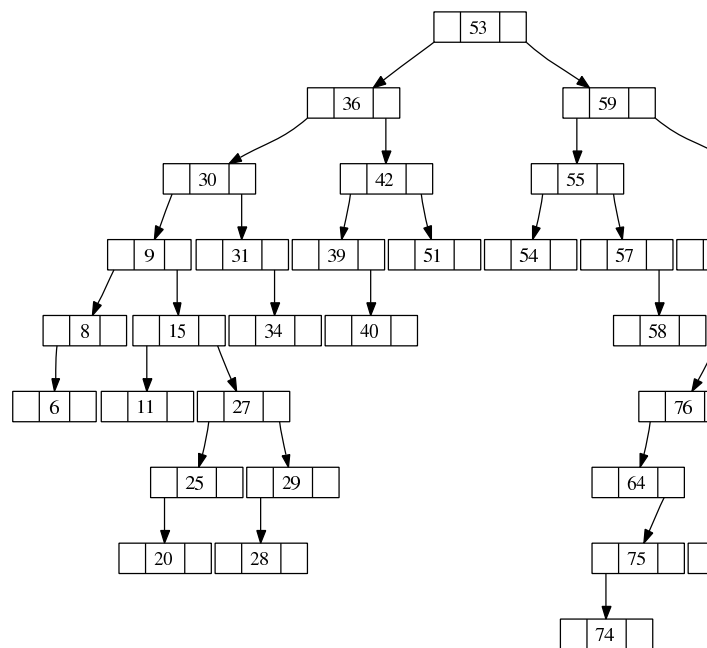


Figura 1.1: Ejemplo

# Capítulo 2

## Antecedentes

Los capítulos intermedios servían para cubrir los siguientes aspectos: antecedentes, problemática o estado del arte, objetivos, fases y desarrollo del proyecto.

En el capítulo anterior se ha introducido bla, bla, bla ....

### 2.1. SIMDE

En el año dos mil cuatro, el por aquel entonces estudiante de esta universidad, Iván Castilla Rodríguez - y ahora tutor de este trabajo de fin de grado-, desarrolló como proyecto final de carrera un Simulador Didáctico para la enseñanza de arquitectura de computadores, bautizado como Simde.

Este simulador permite al usuario representar de forma visual los dos grandes tipos de máquinas que implementan el paralelismo a nivel de instrucción (las máquinas Superescalares y las VLW). Y desde entonces se ha estado utilizando por los alumnos de las asignaturas relacionadas, tal como puede ser la asignatura de arquitectura de computadores, de la especialidad de Ingeniería de Computadores.

### 2.2. Otros simuladores

# Capítulo 3

## Tecnologías

### 3.1. Lenguaje para la lógica de la aplicación

Por normal general cuando se habla de programación web en el lado del cliente, se tiende a pensar de forma inmediata en Javascript, y en general, este razonamiento es totalmente válido. Pero dado que SIMD E es una aplicación fuertemente orientada a objetos y con una gran base de código, se han valorado múltiples opciones.

#### 3.1.1. Coffescript

#### 3.1.2. Dart

Dart es un lenguaje de código abierto desarrollado por Google que permite desarrollador aplicaciones web, móvil, de servidor y también se puede utilizar en el *Internet of Things*.

Se ha considerado en el desarrollo de esta aplicación porque es un lenguaje orientado a objetos que utiliza una sintaxis similar a C#. Además, aunque Google Chrome tiene una máquina virtual nativa para este lenguaje, es posible transpilar el código a Javascript para los navegadores que no tiene este soporte nativo.

Tras razonar detenidamente, Dart ha quedado descartado por diversas razones:

1. no va

#### 3.1.3. Typescript

Typescript es un lenguaje libre y de código abierto desarrollado por Microsoft que actúa como un superconjunto de Javascript, es decir incorpora los distintos estándares: ECMA5, ECMA6, ECMA7... Y además, como característica destacable, añade comprobación de tipos en tiempo de compilación.

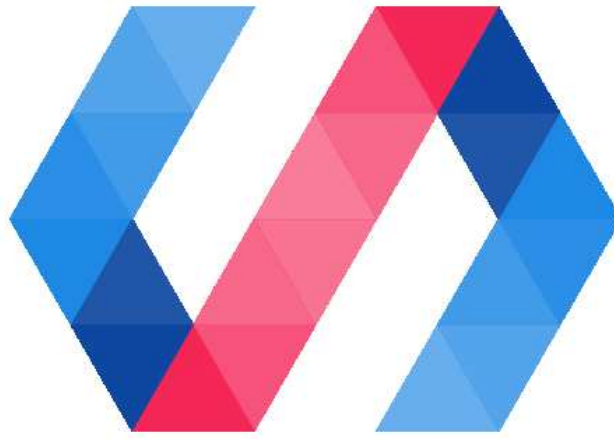


Figura 3.1: Ejemplo

Este tipado no se refleja en el código final, de hecho una interfaz, por ejemplo, añade 0 sobrecarga en el código final. Pero si que es interesante por las capacidades de autocompletar (a través de Microsoft Intellisense) que añade. Typescript se puede transpilar directamente a código javascript es5, el cuál es el estándar actual en todos los navegadores.

Si tuviéramos que barajar una posible alternativa, sin duda la más destacada sería Flow, un comprobador de tipos para javascript desarrollado por Facebook.

Pero existen múltiples razones para que haya escogido typescript sobre Flow:

1. Flow no está siendo parte de un proyecto de gran envergadura, se suponía que se introduciría en el desarrollo de react. Sin embargo no ha sido así.
2. Typescript es la opción de defacto para Angular 2, ha ido ganando mucho entusiasmo por parte de la comunidad y tiene un gran soporte.
3. Tengo cierta experiencia con Typescript.

## 3.2. Tecnología para la integración modelo vista

### 3.2.1. Webcomponents

Desde el inicio del proyecto, tenía claro que alguna librería se encargaría de realizar por mí el tedioso proceso de manipular el DOM. Actualmente existen múltiples librerías y frameworks que podían servirme en esta tarea, pero muchos de ellos (como por ejemplo Angular), no son lo suficientemente flexibles y acaban condicionando el desarrollo de la aplicación.

Lo que SIMDE necesitaba era un proyecto que hiciera uso de los Web components, una serie de apis que permiten crear etiquetas html personalizadas y

reutilizables. Los webs componentes consisten en 4 características principales que pueden usarse por separado o todos juntos:

1. Elementos personalizados
2. Shadow DOM
3. HTML Imports
4. HTML Templates

### 3.2.2. Polymer

Probablemente la librería basada en Web Componentes más conocida es Polymer, una librería desarrollada por Google y anunciada en 2013.

Pero a pesar de que las múltiples ventajas de Polymer existe una librería cuya comunidad es espléndida, y no es otra que React.

### 3.2.3. React

Existen una gran cantidad de motivos para escoger React sobre Polymer: Como por ejemplo, que ahora mismo se utiliza en decenas de aplicaciones importantes, como netflix, airbnb, Walmart... (TODO INCLUIR CITA)

Que la comunidad es impresionantemente activa y cuenta con una gran cantidad de usuarios dispuestos a ayudar, así como cuenta con muchísima documentación y muchísimas implementaciones de librerías de terceros.

React utiliza un híbrido entre html y javascript denominado jsx, como también tiene soporte para Typescript, en este caso utilizamos tsx, y se basa en un “unidirectional data-flow”.

Ademas React implementa operaciones sobre el DOM virtual de tal forma que las operaciones sobre el verdadero DOM sean eficientes.

## 3.3. Tecnología para hacer la build

### 3.3.1. Browserify

### 3.3.2. Gulp/Grunt

### 3.3.3. Webpack

Una de las grandes herramientas de 2016 que acabó por cambiar el flujo de muchos desarrolladores web y desbancó a tasks runners como Grunt y Gulp fue



webpack.

Para poder integrar todo este código y resolver el problema de los múltiples imports era necesario utilizar algún tipo de herramienta de gestión de paquetes, como por ejemplo commonjs, o requirejs. Sin embargo, webpack se encarga de resolver todas estas dependencias y crear statics assets para el navegador.

Uno de los mayores puntos a favor es que es altamente configurable, existen muchísimos plugins de webpack que permiten hacer preprocesamiento de css, tratamiento de imágenes, minimización código, etcétera..

Actualmente en la aplicación de SIMDE webpack se encarga de compilar el código de typescript, el código de react y de generar un bundle

## **3.4. Tecnología para la documentación**

Para integrar la documentación en la nueva aplicación web de SIMDE resultaba obvio que esta documentación estuviera también en formato web. Para esto existían muchas alternativas, desde un conjunto de ficheros html hasta un pequeño cms.

Dado que la documentación es bastante extensa pero que en realidad, no es mas que un documento que se redactará en una ocasión y se le irán realizando pequeñas ampliaciones y/o correcciones se optó por una solución diferente, los generadores de contenido estático.

### **3.4.1. Generadores de contenido estático**

Los gneeradores de contenido estático

### **3.4.2. Hexo**

# Capítulo 4

## Objetivos y fases

### 4.1. Objetivos

### 4.2. Fases

El desarrollo del trabajo se ha dividido en cuatro fases principales desde un primer momento.

1. **Migración del “núcleo de la aplicación”:** Es decir las estructuras básicas comunes a las máquinas y el punto de entrada para la generación de las estructuras correspondientes, es decir, el analizador léxico de MIPS.
2. **Migración de la máquina superescalar:** El proceso completo de reescribir todas las estructuras de la máquina y su correcto funcionamiento en javascript.
3. **Desarrollo de la interfaz:** El desarrollo tanto de un diseño remodelado con las tecnologías web, como de componentes que gestionen correctamente su propio estado.
4. **Integración interfaz-máquina:** Realizar las conexiones necesarias entre el código desarrollado y la interfaz que permitan permitir el uso del simulador por parte del usuario.

# Capítulo 5

## Desarrollo del proyecto

### 5.1. Migración del núcleo de la aplicación

#### 5.1.1. Analizadores léxicos

El núcleo de la aplicación se basa en el uso del generador de analizadores léxicos FLEX para parsear un conjunto de instrucciones similar al MIPS IV. Para realizar el proceso de migración he tenido que comprender primero el funcionamiento de los analizadores léxicos.

Aislando la implementación original y haciendo uso de una librería desarrollada para Javascript de Lex, se pudo conseguir en una escasa cantidad de tiempo tener en funcionamiento el código en Javascript.

#### 5.1.2. Lex

Además, era imprescindible migrar las estructuras básicas que se crean cuando se carga el código, es decir: Las unidades funcionales y los bloques básicos y sucesores.

En este punto ya se tomó una de las decisiones más importantes para el desarrollo.

### 5.2. Migración de la máquina superescalar

Una de las cosas que más puedo agradecer, es que el diseño del autor original de SIMD E era bastante bueno. Además, en la memoria del proyecto **CITAR MEMORIA** se incluían las decisiones de diseño tomadas para la realización del simulador. Dando sentido.

Aún así, en la migración de C++ a Typescript se echaron múltiples características del primer lenguaje, como por ejemplo la sobrecarga de operadores y el uso de iteradores sobre colecciones.

La mayor dificultad en esta parte del proceso era ser capaz de seguir el flujo de un volumen tan grande de código. Por suerte, la linterna de Typescript y el *intellisense* ayudaron mucho a reducir la cantidad de pifias.

Aún así encontré además, algunos problemas a la hora de migrar el código debido al uso de librerías que no estaban en el estándar.

**CITAR FAMOSO CASO BBAS.**

## **5.3. Desarrollo de la interfaz**

### **5.3.1. Análisis de la interfaz original**

### **5.3.2. El problema de las zonas**

### **5.3.3. El nuevo diseño por componentes**

## **5.4. Integración interfaz - máquina superescalar**

### **5.4.1. Realización de los bindings**

## **5.5. Migración de la documentación**

La primer ampliación ha sido la incorporación de documentación del programa. Aunque el término de ampliación no es del todo correcto, puesto que en el proyecto original el autor elaboró una extensa documentación, esta quedó inaccesible.

La documentación fue realizada en formato .HLP, un formato de ayuda de Windows que quedó en desuso en Windows Vista. Y esta documentación era realmente interesante, pues no sólo contenía datos sobre la palicación, sino que incluía consejos para el desarrollo de aplicaciones para las distintas máquinas y además explicaba el funcionamiento de las máquinas.

Para recuperar esta documentación se ha utilizado una herramientas de extracción denominada Help Decompiler. Esta herramienta de línea de comandos procesa los ficheros de ayuda de Windows .HLP y genera un fichero de texto enriquecido con la documentación y en una carpeta externa el contenido multimedia que incluye la misma.

Para poder llevar a cabo la tarea de la documentación de forma paralela se consideró que lo mejor era hacer un proyecto aparte. Resultaba evidente que la documentación de una aplicación web debía de estar en la web.

Tras barajar algunas opciones, se optó por mover la documentación a un formato mantenible como es markdown. Y partiendo de esto se utilizó un generador de contenido estático basado en NodeJS (Hexo) para convertir este markdown en web. Se desarrollo un tema simple y personalizado para la ayuda y se añadió la capacidad de cambiar entre inglés y español.

Este es el estado actual de la aplicación de la documentación.

IMAGEN DOCUMENTACIÓN

Se puede acceder a ella desde el menú *Ayuda ¿Documentación* en la nueva aplicación del SIMDE.

# Capítulo 6

## Ampliación de funcionalidades

En este proyecto de fin de grado se han realizado cuatro ampliaciones sobre las funcionalidades originales del simulador.

### 6.1. Parseador

Una de las características más deseadas por parte de los usuarios de SIMDE (entre los que yo mismo me puedo incluir), es un sistema de errores más descriptivo.

Por desgracia, en la versión original de SIMDE sólo se mostraba una notificación que indicaba que el código cargado contenía errores.



Figura 6.1: Notificación de error original SIMDE

Ahora, tras una serie de modificaciones en el parseado de código, se muestran los siguientes errores:

1. Operando erróneo
2. Opcode desconocido
3. Etiqueta repetida

Además, se muestra la línea del error. Esto resulta tremendamente importante, ya que una de las aplicaciones de SIMD requiere realizar mejoras en el rendimiento de código haciendo uso de técnicas como el desenrollado de bucles, dando lugar a códigos de considerable tamaño.

IMAGENES ERROR

## 6.2. Modo de ejecución en lotes

Otra característica que habría sido resultado muy deseable por mi parte y por parte de mis compañeros, es no tener el límite de velocidad que tiene la versión original.

En mi caso, la cantidad media de ciclos de los ejercicios que se me propusieron superaba los 500 ciclos, haciendo un tiempo medio de ejecución de 2 - 3 minutos, lo cual sumado a la media de pruebas, a la depuración de errores, y a las distintas optimizaciones, alargaba de forma innecesaria el desarrollo de los ejercicios.

Es por eso que ahora, cuando el campo de velocidad está en 0, se ejecuta la simulación a velocidad máxima, y solo se refresca la interfaz cuando termina la ejecución. Ahorrando así recursos.

## 6.3. Histórico

Otra característica que resultaba necesaria en el simulador y que se añoraba sobre todo en el primer contacto era la posibilidad de ir hacia atrás.

En un principio, se esperaba utilizar algún sistema gestor de estados y permitir el *time traveling*. Por desgracia debido al volumen de este trabajo de fin de grado decidió no utilizarse este tipo de soluciones.

Sin embargo, la idea del *time traveling* resultaba más que deseable, por lo que se implementó de una forma un tanto rústica. Para permitir emular este comportamiento y mantener la fidelidad de la ejecución (recordemos que existen una serie de operaciones que son sujetas a un porcentaje de fallos aleatorios), lo que se hizo fue acumular el estado visual de la máquina, el modelo en sí con el que se dibujaban los componentes.

De tal forma, cuando un usuario entraba en este modo *timetraveling* recorre un array de estados de la interfaz, imprimiendo la información almacenada, sin afectar al comportamiento de la máquina, pero emulando ese *time traveling* de cara al usuario.

Por tanto, se considera que un usuario que retroceda X pasos, deberá avanzar esos X pasos para continuar la ejecución (o en su defecto, pulsar el botón **Play**). Esto es así porque aunque como repito, se trata de una característica

enormemente deseada en la primera toma de contacto del simulador, no se trata de una característica de la que se espere que el usuario abuse.



# Capítulo 7

## Conclusiones y líneas futuras

### 7.1. Conclusiones

Con el desarrollo de este trabajo se ha conseguido disponer una nueva versión del simulador de paralelismo a nivel de instrucción SIMD.

Se ha visto además que las múltiples herramientas y tecnologías disponibles hoy día (los nuevos lenguajes transpilables a javascript, los web components, las herramientas para la distribución), permiten elaborar y diseñar con relativa facilidad aplicaciones que se salen de la norma.

Es necesario recordad, que como en todo proceso de software, el desarrollo de una aplicación esta vivo, sujeto a cambios y que dado el impresionante ritmo al que evoluciona el mundo de la web, quizás este trabajo sea un pequeño anexo al pie de página de lo que esta aplicación pueda representar.

### 7.2. Líneas futuras

Tras el desarrollo de este trabajo se abren varias líneas futuras:

- Implementación de la máquina VLIW: Esta línea no resulta sorprendente. Con el desarrollo de este trabajo de fin de grado también se han implementado las estructuras básicas que se comparte con la máquina VLIW. Esta línea de trabajo tiene la mayor prioridad, pues equipara la funcionalidad de la aplicación web de SIMD a la aplicación original.
- Realizar una mayor cantidad de test: En el mundo web no resulta sencillo realizar test para los distintos casos, sin embargo, la lógica que acompaña al simulador es un gran candidato a ser testado. Con las bases asentadas en los tests realizados para la estructura de la cola y del parseador del código, se podría extender este funcionamiento a pequeñas simulaciones.

- Realizar un tutorial de inicio: Ahora que SIMDE es una aplicación accesible para todo el mundo, sería deseable que no supusiera una barrera para cualquier usuario que sintiera la necesidad de probar
- Implementar un sistema de gestión de estados: En la aplicación actual se ha hecho un sistema de estados rudimentario debido al volumen de trabajo de sistemas como Redux y a las dificultades que entrañan los Observables que vienen en un sistema como Mobx. En líneas futuras este sistema rudimentario podría sustituirse por un sistema más robusto desarrollado por terceros.

# Capítulo 8

## Summary and Conclusions

### 8.1. Summary

### 8.2. Future work lines

Tras el desarrollo de este trabajo se abren varias líneas futuras:

- Implementación de la máquina VLIW: Esta línea no resulta sorprendente. Con el desarrollo de este trabajo de fin de grado también se han implementado las estructuras básicas que se comparte con la máquina VLIW. Esta línea de trabajo tiene la mayor prioridad, pues equipara la funcionalidad de la aplicación web de SIMDE a la aplicación original.
- Realizar una mayor cantidad de test: En el mundo web no resulta sencillo realizar test para los distintos casos, sin embargo, la lógica que acompaña al simulador es un gran candidato a ser testado. Con las bases asentadas en los tests realizados para la estructura de la cola y del parseador del código, se podría extender este funcionamiento a pequeñas simulaciones.
- Realizar un tutorial de inicio: Ahora que SIMDE es una aplicación accesible para todo el mundo, sería deseable que no supusiera una barrera para cualquier usuario que sintiera la necesidad de probar
- Implementar un sistema de gestión de estados: En la aplicación actual se ha hecho un sistema de estados rudimentario debido al volumen de trabajo de sistemas como Redux y a las dificultades que entrañan los Observables que vienen en un sistema como Mobx. En líneas futuras este sistema rudimentario podría sustituirse por un sistema más robusto desarrollado por terceros.

# Capítulo 9

## Presupuesto

Descripción	Coste
200 Horas de trabajo	8000 €
Ordenador para desarrollo	1300 €
Total	9300 €

Tabla 9.1: Presupuesto

# Apéndice A

## Título del Apéndice 1

### A.1. Algoritmo XXX

```
*****
*
* Fichero .h
*
*****
*
* AUTORES
*
*
* FECHA
*
*
* DESCRIPCION
*
*
*****/
```

### A.2. Algoritmo YYY

```
/*****
*
* Fichero .h
*
*****
*
* AUTORES
*
* FECHA
*
* DESCRIPCION
*
*
*****/
```

# Apéndice B

## Título del Apéndice 2

### B.1. Otro apéndice: Sección 1

Texto

### B.2. Otro apéndice: Sección 2

Texto

# Bibliografía

- [1] ACM LaTeX Style. [http://www.acm.org/publications/latex\\_style/](http://www.acm.org/publications/latex_style/).
- [2] FACOM OS IV SSL II USER'S GUIDE, 99SP0050E5. Technical report, 1990.
- [3] D. H. Bailey and P. Swarztrauber. The fractional Fourier transform and applications. *SIAM Rev.*, 33(3):389–404, 1991.
- [4] A. Bayliss, C. I. Goldstein, and E. Turkel. An iterative method for the Helmholtz equation. *J. Comp. Phys.*, 49:443–457, 1983.
- [5] C. Darwin. *The Origin Of Species*. November 1859.
- [6] C. Goldstein. Multigrid methods for elliptic problems in unbounded domains. *SIAM J. Numer. Anal.*, 30:159–183, 1993.
- [7] P. Swarztrauber. *Vectorizing the FFTs*. Academic Press, New York, 1982.
- [8] S. Taásan. *Multigrid Methods for Highly Oscillatory Problems*. PhD thesis, Weizmann Institute of Science, Rehovot, Israel, 1984.