

Universidad Carlos III de Madrid
Escuela Politécnica Superior
Grado en Ingeniería Informática

uc3m

Universidad
Carlos III
de Madrid

Trabajo Fin de Grado

WepSIM: Simulador de un procesador elemental con unidad de control microprogramada

Autor: Javier Prieto Cepeda
Tutor: Félix García Carballeira

Leganés, Madrid, España
Junio 2017

*If you would not be forgotten
As soon as you are dead and rotten,
Either write things worth reading,
Or do things worth the writing.*

Benjamin Franklin

Agradecimientos

Es muy difícil incluir en tan pocas palabras a todas aquellas personas que han puesto su granito de arena a lo largo de estos años para que a día de hoy, haya logrado llegar hasta aquí. Es por ello que si me dejo a alguien sin incluir, me disculpe y no dude en sentirse parte de estas palabras.

En primer lugar, quiero agradecer de corazón a mis padres, Tomás y Raquel, el haberme educado y enseñado a elegir aquel camino que me hiciera feliz de verdad, dándome la oportunidad de estudiar con su esfuerzo y sacrificio. Aquí también estás tú, David. Pese a llegar unos años después de mí, no paras de enseñarme día a día nuevas lecciones. De los pequeños también se aprende. Gracias.

También debo de dar las gracias a la persona que ha tenido que aguantar estos cinco años las consecuencias de estudiar esta carrera. Míriam, gracias por tu paciencia, tus consejos y tus ánimos.

Mis abuelos también han sido parte de esas personas que han sumado su granito de arena enseñándome y aconsejándome en todo momento, ejerciendo de guías. Sé que vosotros habéis sufrido también mucho en estos años, pero aquí está el premio.

Por otro lado, debo de agradecer a dos personas el darme la oportunidad de realizar este proyecto. Félix y Álex, gracias por este tiempo en el que tanto he podido aprender y en el que tanto me habéis ayudado.

También son parte de este proyecto los grandes amigos que he hecho en la travesía por el grupo de investigación ARCOS. Uno de ellos además, después de compartir asiento en clase. Saúl, gracias por tu ayuda y por los buenísimos momentos que hemos compartido. Carlos, nos quedan más carreras por hacer juntos. Fran, Estefanía, Silvina, Alberto, Jesús Cristina, Garci, Pablo, David, Rafa y Alfredo, gracias por acogerme tan bien en el laboratorio y por ayudarme en todo momento.

Agradecer también a Jesús, Javi Blas y al resto de personas de componen el grupo de investigación ARCOS la ayuda prestada durante este tiempo.

Por otro lado, también quiero destacar a aquellos compañeros de prácticas y amigos que he hecho a lo largo de estos años en la carrera, y que siempre recordaré: Sergio, Planet, Rubén, Álvaro, Álex, Guille, Juanlu, Sandra y Marin.

WepSIM: Simulador de un procesador elemental con unidad de control microprogramada

by

Javier Prieto Cepeda

Abstract

WepSIM es un simulador de un procesador elemental con unidad de control microprogramada basado en el procesador diseñado por el personal del grupo de investigación ARCOS de la Universidad Carlos III de Madrid para la docencia en la asignatura Estructura de Computadores. Con este simulador se pretende ofrecer una visión integrada de la microprogramación de un computador y la programación en lenguaje ensamblador, dando la posibilidad de trabajar con distintos juegos de instrucciones. Gracias al diseño modular propuesto en el cual está basado este simulador, es posible añadir, modificar o quitar elementos existentes al modelo hardware diseñado. Todas estas características, hacen de WepSIM el primer simulador que unifica la microprogramación y la programación en lenguaje ensamblador permitiendo una fácil personalización del modelo hardware a simular y la especificación de diferentes juegos de instrucciones. Mediante este simulador se busca facilitar la enseñanza y aprendizaje en el área docente de Estructura y Arquitectura de Computadores.

Keywords: MIPS · Simulación · Ensamblador · Microprogramación

Supervisor: Félix García Carballeira

Title: Full Professor

Índice general

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Introducción | 1 |
| 1.1 | Motivación | 1 |
| 1.2 | Objetivos | 2 |
| 1.3 | Estructura del documento | 3 |
| 2 | Estado del arte | 5 |
| 2.1 | Simuladores para la enseñanza de la Estructura y Arquitectura de Computadores | 5 |
| 2.1.1 | Simuladores para microprogramación | 6 |
| 2.1.2 | Simuladores para programación en ensamblador | 7 |
| 2.1.3 | Propuesta de simulación unificada | 12 |
| 2.2 | Tecnologías web | 13 |
| 2.2.1 | HTML5 | 13 |
| 2.2.2 | Frameworks | 15 |
| 2.3 | Procesador elemental WepSIM | 16 |
| 3 | Análisis | 19 |
| 3.1 | Descripción del proyecto | 19 |
| 3.2 | Requisitos | 20 |
| 3.2.1 | Requisitos de usuario | 23 |
| 3.2.2 | Modelo de casos de uso | 29 |
| 3.2.3 | Requisitos funcionales | 38 |
| 3.2.4 | Requisitos no-funcionales | 47 |
| 3.3 | Marco regulador | 50 |
| 3.3.1 | Aspectos legales | 50 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 4 | Diseño | 53 |
| 4.1 | Estudio de la solución final | 53 |
| 4.1.1 | Solución elegida | 55 |
| 4.2 | Arquitectura de WepSIM | 55 |
| 4.2.1 | Modelo hardware | 57 |
| 4.2.2 | Modelo software | 59 |
| 4.2.3 | Kernel del simulador | 62 |
| 5 | Implementación y despliegue | 63 |
| 5.1 | Implementación | 63 |
| 5.2 | Despliegue | 73 |
| 6 | Verificación, validación y evaluación | 75 |
| 6.1 | Verificación y validación | 75 |
| 6.1.1 | Pruebas de verificación | 76 |
| 6.1.2 | Pruebas de validación | 87 |
| 7 | Planificación y presupuesto | 99 |
| 7.1 | Planificación | 99 |
| 7.1.1 | Justificación de la Metodología | 99 |
| 7.1.2 | Ciclo de Vida | 100 |
| 7.1.3 | Tiempo Estimado | 101 |
| 7.2 | Presupuesto | 102 |
| 7.2.1 | Coste del Proyecto | 102 |
| 7.2.2 | Oferta de Proyecto Propuesta | 105 |
| 7.3 | Entorno Socio-Económico | 106 |
| 8 | Conclusiones y trabajos futuros | 109 |
| 8.1 | Conclusiones | 109 |
| 8.1.1 | Contribuciones | 110 |
| 8.1.2 | Publicaciones | 111 |
| 8.2 | Trabajos Futuros | 111 |
| | Glosario | 113 |

| | |
|---------------------|------------|
| Acrónimos | 113 |
| Bibliografía | 115 |

Índice de figuras

| | | |
|-----|--|----|
| 2-1 | Ejemplo de definición de microcódigo en simulador Tanenbaum. | 6 |
| 2-2 | Interfaz SPIM. | 7 |
| 2-3 | Interfaz QtSPIM. | 8 |
| 2-4 | Interfaz MARS. | 9 |
| 2-5 | Interfaz em88110. | 10 |
| 2-6 | Interfaz WebMIPS. | 11 |
| 2-7 | Arquitectura CPU WepSIM | 16 |
| 2-8 | Arquitectura unidad de control WepSIM. | 17 |
| 3-1 | Diagrama modelo casos de uso 1. | 29 |
| 3-2 | Diagrama modelo casos de uso 2. | 30 |
| 4-1 | Arquitectura de WepSIM. | 56 |
| 4-2 | Modelado del hardware. | 57 |
| 4-3 | Ejemplo de modelado de una puerta triestado. | 58 |
| 4-4 | Ejemplo de modelado de un registro. | 59 |
| 4-5 | Ejemplo de formato de instrucción. | 60 |
| 4-6 | Ejemplo de código fuente en ensamblador. | 60 |
| 4-7 | Formato de instrucción descrito en el microcódigo y ejemplo de su traducción en binario. | 61 |
| 4-8 | Arquitectura del kernel del simulador. | 62 |
| 5-1 | Estructura de ficheros. | 64 |
| 5-2 | Dependencias entre ficheros. | 65 |
| 6-1 | Verificación y validación software. | 76 |

7-1 Modelo en Espiral (Boehm, 2000). 101

7-2 Diagrama Gantt. 102

Índice de tablas

| | | |
|------|--|----|
| 2.1 | Comparación de simuladores de ensamblador y microcódigo. | 12 |
| 3.1 | Plantilla para la especificación de requisitos. | 22 |
| 3.2 | Requisito de usuario UR-C01. | 23 |
| 3.3 | Requisito de usuario UR-C02. | 23 |
| 3.4 | Requisito de usuario UR-C03. | 24 |
| 3.5 | Requisito de usuario UR-C04. | 24 |
| 3.6 | Requisito de usuario UR-C05. | 24 |
| 3.7 | Requisito de usuario UR-C06. | 25 |
| 3.8 | Requisito de usuario UR-C07. | 25 |
| 3.9 | Requisito de usuario UR-C08. | 25 |
| 3.10 | Requisito de usuario UR-C09. | 26 |
| 3.11 | Requisito de usuario UR-R01. | 26 |
| 3.12 | Requisito de usuario UR-R02. | 27 |
| 3.13 | Requisito de usuario UR-R03. | 27 |
| 3.14 | Requisito de usuario UR-R04. | 27 |
| 3.15 | Requisito de usuario UR-R05. | 28 |
| 3.16 | Requisito de usuario UR-R06. | 28 |
| 3.17 | Requisito de usuario UR-R07. | 28 |
| 3.18 | Plantilla de caso de uso. | 31 |
| 3.19 | Caso de uso UC-01. | 31 |
| 3.20 | Caso de uso UC-02 | 32 |
| 3.21 | Caso de uso UC-03. | 32 |
| 3.22 | Caso de uso UC-04. | 33 |

| | | |
|------|--|----|
| 3.23 | Caso de uso UC-05. | 33 |
| 3.24 | Caso de uso UC-06. | 34 |
| 3.25 | Caso de uso UC-07. | 34 |
| 3.26 | Caso de uso UC-08. | 35 |
| 3.27 | Caso de uso UC-09. | 35 |
| 3.28 | Caso de uso UC-10. | 36 |
| 3.29 | Caso de uso UC-11. | 36 |
| 3.30 | Caso de uso UC-12. | 37 |
| 3.31 | Caso de uso UC-13. | 37 |
| 3.32 | Requisito funcional SR-F-F01. | 38 |
| 3.33 | Requisito funcional SR-F-F02. | 38 |
| 3.34 | Requisito funcional SR-F-F03. | 39 |
| 3.35 | Requisito funcional SR-F-F04. | 39 |
| 3.36 | Requisito funcional SR-F-F05. | 39 |
| 3.37 | Requisito funcional SR-F-F06. | 40 |
| 3.38 | Requisito funcional SR-F-F07. | 40 |
| 3.39 | Requisito funcional SR-F-F08. | 41 |
| 3.40 | Requisito funcional SR-F-F09. | 41 |
| 3.41 | Requisito funcional SR-F-F10. | 42 |
| 3.42 | Requisito funcional SR-F-F11. | 42 |
| 3.43 | Requisito funcional SR-F-F12. | 42 |
| 3.44 | Requisito funcional SR-F-F13. | 43 |
| 3.45 | Requisito funcional SR-F-F14. | 43 |
| 3.46 | Requisito funcional SR-F-F15. | 43 |
| 3.47 | Requisito funcional SR-F-F16. | 44 |
| 3.48 | Requisito funcional SR-F-F17. | 44 |
| 3.49 | Requisito funcional SR-F-F18. | 45 |
| 3.50 | Requisito funcional SR-F-F19. | 45 |
| 3.51 | Requisito funcional SR-F-F20. | 45 |
| 3.52 | Requisito funcional SR-F-F21. | 46 |
| 3.53 | Requisito funcional SR-F-F22. | 46 |
| 3.54 | Requisito no-funcional SR-NF-PL01. | 47 |

| | |
|---|----|
| 3.55 Requisito no-funcional SR-NF-PL02. | 47 |
| 3.56 Requisito no-funcional SR-NF-PL03. | 48 |
| 3.57 Requisito no-funcional SR-NF-PL04. | 48 |
| 3.58 Requisito no-funcional SR-NF-PL05. | 48 |
| 3.59 Requisito no-funcional SR-NF-UI01. | 49 |
| 3.60 Requisito no-funcional SR-NF-P01. | 49 |
| 3.61 Matriz de trazabilidad de requisitos. | 51 |
| 4.1 Comparación de frameworks y bibliotecas. | 54 |
| 6.1 Plantilla de pruebas de verificación. | 77 |
| 6.2 Test de verificación VET-01. | 78 |
| 6.3 Test de verificación VET-02. | 78 |
| 6.4 Test de verificación VET-03. | 79 |
| 6.5 Test de verificación VET-04. | 79 |
| 6.6 Test de verificación VET-05. | 80 |
| 6.7 Test de verificación VET-06. | 80 |
| 6.8 Test de verificación VET-07. | 81 |
| 6.9 Test de verificación VET-08. | 82 |
| 6.10 Test de verificación VET-09. | 82 |
| 6.11 Test de verificación VET-10. | 83 |
| 6.12 Test de verificación VET-11. | 83 |
| 6.13 Test de verificación VET-12. | 84 |
| 6.14 Matriz de trazabilidad de pruebas de verificación. | 86 |
| 6.15 Plantilla para test de validación. | 87 |
| 6.16 Test de validación VAT-01. | 88 |
| 6.17 Test de validación VAT-02. | 89 |
| 6.18 Test de validación VAT-03. | 90 |
| 6.19 Test de validación VAT-04. | 91 |
| 6.20 Test de validación VAT-05. | 92 |
| 6.21 Test de validación VAT-06. | 93 |
| 6.22 Test de validación VAT-07. | 94 |
| 6.23 Test de validación VAT-08. | 94 |

| | | |
|------|--|-----|
| 6.24 | Test de validación VAT-09. | 95 |
| 6.25 | Test de validación VAT-10. | 95 |
| 6.26 | Test de validación VAT-11. | 96 |
| 6.27 | Matriz de trazabilidad de pruebas de validación. | 97 |
| | | |
| 7.1 | Información del Proyecto. | 103 |
| 7.2 | Costes de recursos humanos. | 103 |
| 7.3 | Costes de equipamiento. | 104 |
| 7.4 | Otros costes directos. | 105 |
| 7.5 | Resumen de costes. | 105 |
| 7.6 | Oferta propuesta. | 106 |

Capítulo 1

Introducción

El primer capítulo introduce brevemente el objetivo del proyecto, incluyendo las características clave del proyecto y su motivación (Sección 1.1, *Motivación*), los objetivos del proyecto (Sección 1.2, *Objetivos*), y toda la estructura del documento (Sección 1.3, *Estructura del documento*).

1.1 Motivación

La enseñanza de la arquitectura de un computador es una parte básica y fundamental en la formación de los estudiantes de Ingeniería Informática, mediante la cual los estudiantes logran obtener una visión y comprensión del comportamiento a bajo nivel de un computador. Para lograr que los estudiantes comprendan y asienten correctamente los fundamentos teóricos, es necesario el uso de clases prácticas, en donde el estudiante pueda ser capaz de interactuar con un computador de arquitectura igual o similar a la explicada en teoría y además logre extrapolar los fundamentos teóricos al comportamiento real.

Uno de los principales problemas a la hora de diseñar estas clases prácticas es lograr obtener los medios necesarios para que los estudiantes puedan hacer uso de un computador similar al visto en las clases teóricas. Actualmente, existen diferentes simuladores y emuladores que simulan diferentes componentes de un computador, pero no existe una herramienta que unifique la simulación de estos componentes, siendo un problema a la hora de obtener una visión global del funcionamiento de un computador.

Un emulador es un software que se encarga de imitar el comportamiento de una computadora de forma que programas pensados para una arquitectura concreta, puedan ser ejecu-

tados en otra diferente. Por otro lado, un simulador es un software que trata reproducir el comportamiento de un computador, pero con un menor nivel de realismo, puesto que el emulador se encarga de modelar de forma precisa el dispositivo de manera que los programas ejecutados sobre él funcionen como si estuvieran siendo ejecutados en el dispositivo original.

Hay distintos simuladores que se pueden utilizar para trabajar con los principales aspectos que se tratan en las asignaturas de Estructura y Arquitectura de Computadores: ensamblador, caché, etc. La mayoría de estos simuladores se centran en un tipo de simulación concreto, lo que implica una pérdida de la visión del conjunto al necesitar el uso de diferentes simuladores. Por lo tanto, es mucho mejor tener siempre una visión centralizada de cualquier servicio, siendo más favorable el uso de una herramienta que reúna las máximas funcionalidades posibles.

Hay otro problema no menos importante: la mayoría de los simuladores están pensados para PC. Uno de los objetivos que nos planteamos con WepSIM es que pudiera ser utilizado en dispositivos móviles (*smartphones* o *tablets*), para ofrecer al estudiante una mayor flexibilidad en su uso.

Además de tener un simulador portable a distintas plataformas, el simulador ha de ser lo más autocontenido posible, de manera que integre la ayuda principal para su uso (no como un documento separado que sirva de manual de uso para ser impreso) permitiendo al usuario hacer un uso completo de la aplicación sin la necesidad de salir de ella.

Por todo ello, proponemos ofrecer un simulador que sea simple y modular, y que permita integrar la enseñanza de la microprogramación con la programación en ensamblador. En concreto, puede utilizarse para microprogramar un juego de instrucciones y ver el funcionamiento básico de un procesador, y para crear programas en ensamblador basados en el ensamblador definido por el anterior microcódigo. Este planteamiento permite una mejor comprensión de la programación de sistemas dado que es posible ver cómo interactúa el software en ensamblador con el hardware en el tratamiento de interrupciones. Finalmente, desde el punto de vista de la docencia, nuestro simulador ofrece una visión global de lo que pasa en hardware y software, evitando además el tiempo extra que supone el aprendizaje de distintas herramientas.

1.2 Objetivos

El objetivo principal de este proyecto, es desarrollar un simulador, que a diferencia de los existentes, pueda simular de forma completa el comportamiento de un procesador elemental

permitiendo comprobar el estado de los componentes en cada ciclo de reloj, de manera que ayude a los estudiantes a comprender y asimilar de forma sencilla y visual el funcionamiento de un procesador. Los objetivos secundarios, derivados del objetivo principal, son:

- **O1:** Simular la ejecución de el juego de instrucciones especificado en un computador denominado WepSIM desde el punto de vista de la microprogramación y la programación en ensamblador.
- **O2:** Permitir la especificación de diferentes juegos de instrucciones.
- **O3:** Permitir unificar la microprogramación en un computador y la programación en lenguaje ensamblador.
- **O4:** Permitir al usuario la visualización en cada ciclo de reloj del estado y comportamiento del computador simulado.

1.3 Estructura del documento

El documento contiene los siguientes capítulos:

- Capítulo 1, *Introducción*, presenta una breve descripción del contenido del documento. También incluye la motivación y los objetivos del proyecto.
- Capítulo 2, *Estado del arte*, incluye una descripción de los diferentes tipos de simuladores (de lenguaje ensamblador y de microcódigo), presentando el trabajo relacionado y una descripción de las tecnologías web actuales.
- Capítulo 3, *Análisis*, describe brevemente el proyecto, establece los requisitos y presenta el marco regulador del proyecto.
- Capítulo 4, *Diseño*, explica la solución elegida y detalla el diseño del sistema, incluyendo todos sus componentes.
- Capítulo 5, *Implementación y despliegue*, incluye los detalles de implementación de las partes principales del software desarrollado y las características necesarias para la implementación de la aplicación.

- Capítulo 6, *Verificación, validación y evaluación*, detalla una verificación y validación completa del proyecto.
- Capítulo 7, *Planificación y presupuesto*, presenta los conceptos relacionados con la planificación seguida, descompone todos los costes del proyecto y describe el entorno socio-económico.
- Capítulo 8, *Conclusiones y trabajos futuros*, incluye las contribuciones del proyecto, explica las principales conclusiones del proyecto y presenta los trabajos futuros.

Capítulo 2

Estado del arte

Este capítulo presenta el estado del arte, la última y más avanzada etapa de las tecnologías relacionadas con nuestra aplicación. En primer lugar, se presentan los diferentes simuladores existentes en el ámbito docente tanto para microprogramación (Sección 2.1.1) como para la programación en código ensamblador (Sección 2.1.2), realizando una comparación de nuestro trabajo con el contexto actual de los distintos simuladores expuestos previamente (Sección 2.1.3). Después, se presentan las diferentes tecnologías web más utilizadas en la actualidad (Sección 2.2). Por último se describe el procesador en el cual se basa WepSIM (Sección 2.3).

2.1 Simuladores para la enseñanza de la Estructura y Arquitectura de Computadores

Son muchos los tipos de simuladores existentes en el ámbito docente para la explicación de las distintas partes que componen un computador. Estos simuladores, pueden ser de diferentes ámbitos como, por ejemplo, cachés, pipeline, circuitos integrados, microprogramación, programación en ensamblador, etc.

En esta sección, nos centramos en los tipos de simuladores que tienen relación directa con la propuesta realizada, como lo son los simuladores para la microprogramación y los simuladores para la programación en ensamblador.

2.1.1 Simuladores para microprogramación

En esta sección, se explican los diferentes simuladores existentes para la microprogramación. Cabe destacar que, actualmente, existen pocos simuladores que nos proporcionen esta funcionalidad, principalmente debido a que una gran parte de ellos son utilizados de forma interna por las empresas para verificar el correcto funcionamiento de sus unidades en la fase de diseño y desarrollo.

P8080E [1] es un simulador desarrollado por el grupo de investigación DATSI en la Facultad de Informática de la Universidad Politécnica de Madrid. Este simulador, no consta de una interfaz gráfica portable e interactiva que se ajuste a las tecnologías actuales. Para poder realizar el desarrollo del microcódigo, el simulador requiere el binario completo de cada ciclo, de forma que resulta un tanto complejo su uso. Pese a ser un simulador bastante completo, no está orientado para la enseñanza de ensamblador y microprogramación con la misma herramienta, puesto que no permite la definición del juego de instrucciones con un formato diferente al definido por defecto.

```

SOURCE LINE
0: mar := pc; rd;
1: pc  := pc + 1; rd;
2: ir   := mbr;
3: tir  := lshift(ir + ir);
4: tir  := lshift(ir);
5: alu  := tir; if n then goto 9;

6: mar := ir ; rd;
7: rd;
8: ac   := mbr; goto 0;

9: mar := ir ; mbr := ac; wr;
10: wr; goto 0;

```

Figura 2-1: *Ejemplo de definición de microcódigo en simulador Tanenbaum.*

En [2], se describe el desarrollo y la implementación de un simulador para una arquitectura de microprogramación específica (Figura 2-1). Fue publicado en el año 1986 y está basado en la arquitectura definida en el entonces popular libro de ingeniería de computadores de *Tanenbaum*, el autor [3]. El simulador, requería de la definición de cada uno de los ciclos de ejecución de las instrucciones para la posterior generación de la memoria de control. Esta definición, se realizaba mediante la sintaxis definida en el libro, lo que hacía de este simulador una herramienta bastante completa para aprender junto con el libro.

- Activación del uso de pseudoinstrucciones,
- Simulación de predicción de saltos y accesos a memoria, con la latencia correspondiente,
- Activación del uso del manejador de la señal trap y la carga del manejador personalizado,
- Activación de la visualización de los mensajes en caso de ocurrir excepciones,
- Activación del uso de “memory-mapped IO”.

SPIM, además cuenta con una versión más actualizada del simulador, que posee una interfaz gráfica más potente (Figura 2-3). Este simulador se llama QtSPIM [5], y cuenta con todas las características anteriormente mencionadas de SPIM.

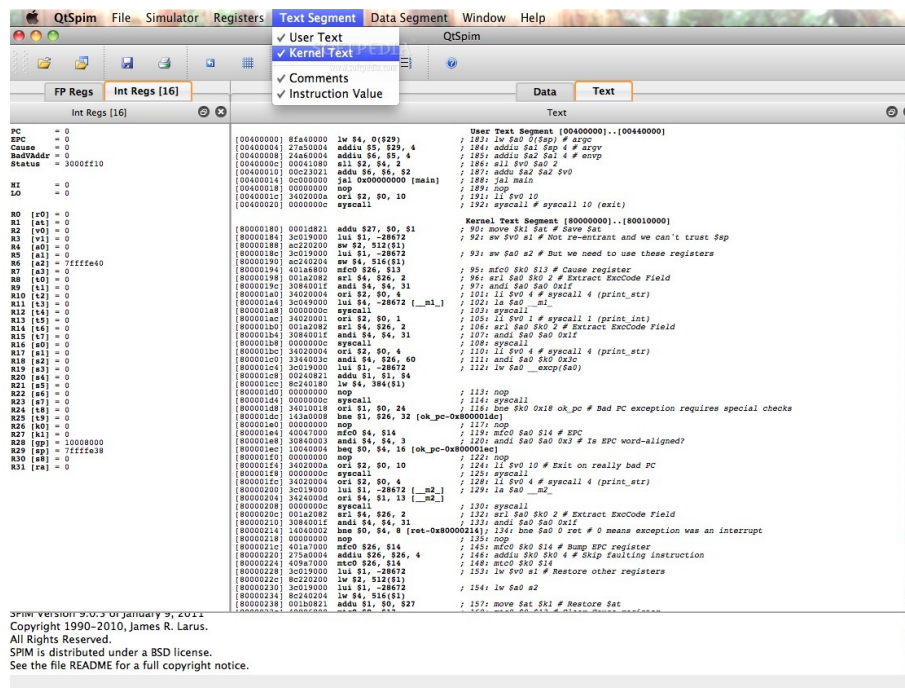


Figura 2-3: Interfaz QtSPIM.

MARS [6] es un simulador con interfaz gráfica desarrollado en JAVA para el lenguaje ensamblador MIPS (Figura 2-4). Fue creado en el año 2005 como una alternativa del simulador SPIM y diseñado específicamente para las necesidades limitadas de grado. Está basado en la arquitectura MIPS RISC, que tiene un número pequeño de elementos del lenguaje e instrucciones. Consta de operaciones de entrada/salida, saltos, condiciones y operaciones aritmético-lógicas tanto enteras como en coma flotante. Alguna de las mejoras que incorpora MARS con respecto a SPIM son [7]:

- Depuración más sencilla y cómoda, debido constar de una interfaz gráfica de usuario (GUI). Esto se debe, a que para añadir un punto de ruptura, únicamente hay que pulsar sobre el elemento que tiene la instrucción.
- Los programas pueden ejecutarse de forma inversa, lo que permite volver a un estado anterior del computador en la ejecución de un programa.
- La velocidad de ejecución puede modificarse de forma que, si se ralentiza, el usuario puede observar cómo cada instrucción se resalta cuando está siendo ejecutada y ver los cambios que se producen en los valores del banco de registros y de las ubicaciones de memoria.
- La memoria y los registros se pueden modificar de una manera “What You See Is What You Get” (WYSIWYG).
- Incorpora un editor de texto, eliminando dependencias externas para el uso del simulador.
- Permite que los desarrolladores puedan suministrar nuevos complementos que, por ejemplo, sirvan para extender la arquitectura o mostrar los datos de forma intuitiva.

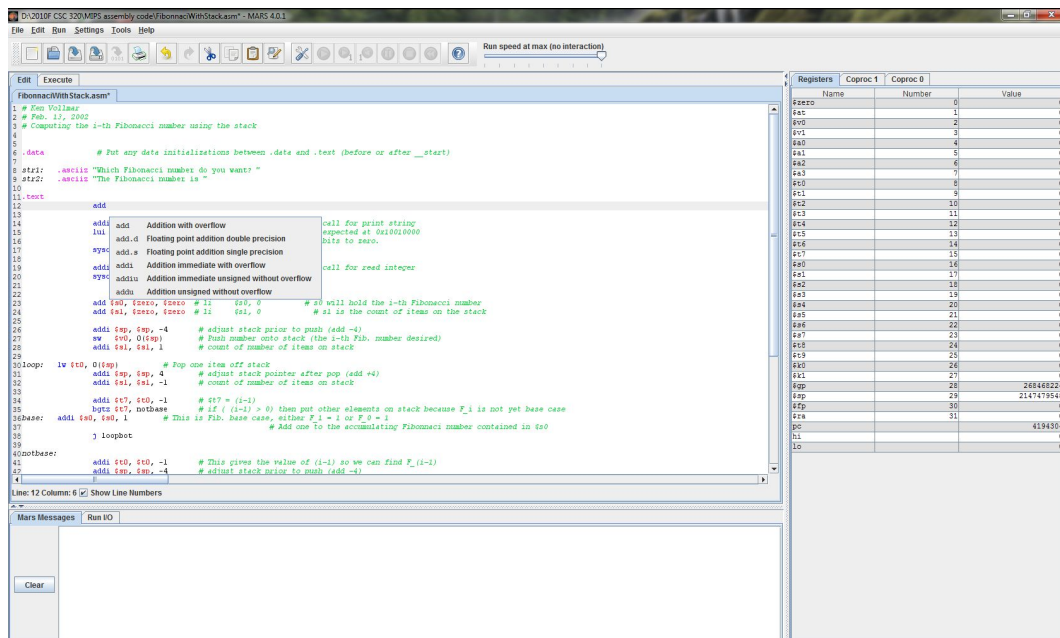


Figura 2-4: Interfaz MARS.

P88110 es emulador descrito en [8] que se basa en la emulación de un procesador superescalar (Figura 2-5). El propósito fundamental de este emulador, es mostrar el funcionamiento de

este tipo de procesadores, haciendo visible el funcionamiento del *pipeline* y las dependencias existentes. Está basado en una arquitectura específica (MC88110) y pese a integrar el efecto de un procesador superescalar no integra la microprogramación, que haría de él un emulador completo.

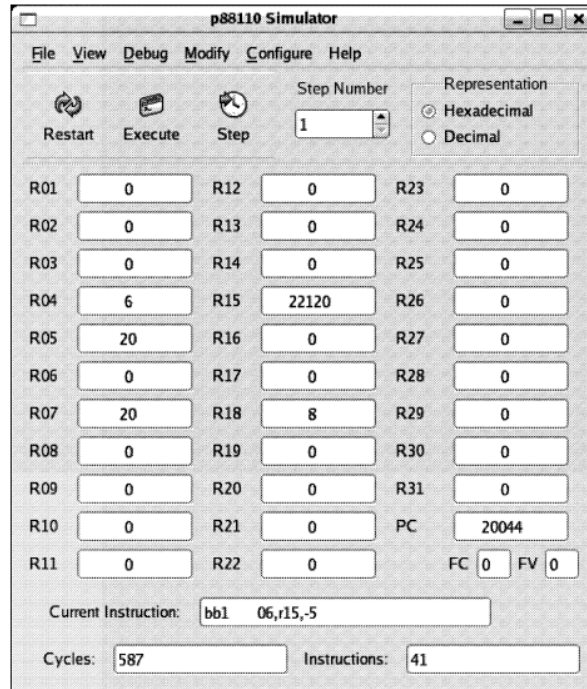


Figura 2-5: Interfaz em88110.

WebMIPS [9], es un simulador desarrollado en la Facultad de Ingeniería de la Información de Sienna, Italia (Figura 2-6). Está escrito en el lenguaje de programación ASP.NET y se utiliza mediante una página web, de forma que no requiere de su instalación en computador local. No soporta el juego completo de instrucciones de MIPS, sino que consta de un juego reducido de instrucciones que sirve de introducción al estudio de la arquitectura del computador. Con respecto a los anteriores simuladores mencionados, difiere al mostrar el esquema arquitectónico, indicando las cinco etapas de *pipeline* de las que consta el computador que simula. Otra característica, es la indicación del número de ciclos de reloj que consume la ejecución del programa. Tiene como objetivo principal la demostración de la ejecución del juego de instrucciones básico explicado durante la asignatura “Arquitectura de Computadores” impartida por los creadores del simulador.

Entre las diferentes características a destacar de este simulador, se encuentran:

- Verificación del código ensamblador, comprobando que no existen errores en la definición del código.
- Dispone de códigos simples de ejemplo ("*load-and-play*") que facilitan la comprensión del funcionamiento del procesador.
- Permite diferentes visualizaciones del estado de la memoria y los registros del procesador.
- Consta de dos modos de ejecución: paso a paso y ejecución completa del programa.

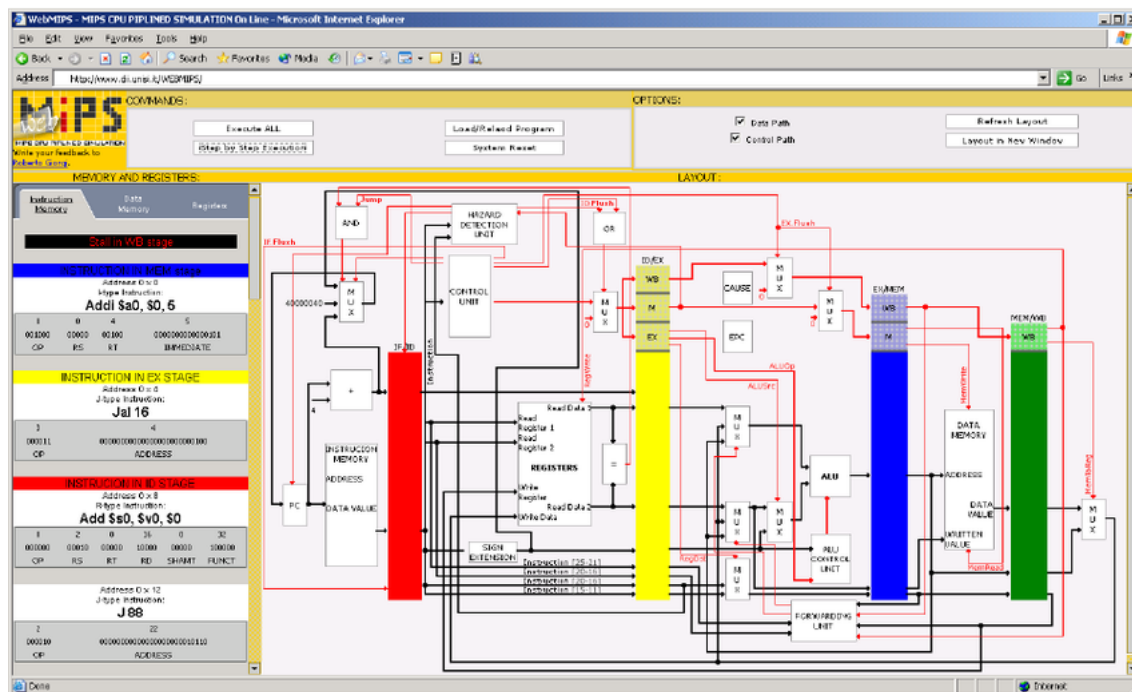


Figura 2-6: Interfaz WebMIPS.

2.1.3 Propuesta de simulación unificada

Hay distintas herramientas muy útiles para labores docentes relacionadas con la asignatura “Estructura de Computadores”, aunque como se comentó previamente, no existe una herramienta que nos proporcione el desarrollo y simulación tanto a nivel de microcódigo como a nivel de ensamblador (Figura 2.1). WepSIM, une ambos aspectos ofreciendo:

- Visión interrelacionada de la microprogramación y la programación en ensamblador.
- Flexibilidad en la plataforma usada, pensando en dispositivos móviles.
- Herramienta autocontenida, de forma que incorpora en sí misma tanto la ayuda como distintos ejemplos que favorecen la comprensión del simulador.
- Consta de un modelo hardware que puede ser modificado o ampliado en caso de ser necesario.
- Permite definir un amplio conjunto de instrucciones máquina.
- Puede ser usado como herramienta de microprogramación o de programación en ensamblador.

Tabla 2.1: Comparación de simuladores de ensamblador y microcódigo.

| Simulador | SPIM | QtSPIM | MARS | PC88110 | WebMIPS | WepSIM | P8080E | MicMac |
|---------------------------------------|------|--------|------|---------|---------|--------|--------|--------|
| Ensamblador | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | |
| Microprogramación | | | | | | ✓ | ✓ | ✓ |
| Multiplataforma | ✓ | ✓ | | | ✓ | ✓ | | |
| Interactivo | | | | | | ✓ | | |
| Juego de instrucciones personalizable | | | | | | ✓ | | |

De este modo, con WepSIM se pretende crear un simulador unificado, abarcando los aspectos más relevantes de la asignatura “Estructura de Computadores” y permitiendo que todas las prácticas de la asignatura puedan realizarse en la misma plataforma, evitando la pérdida de tiempo y dificultad que supone para el estudiante el habituarse a diferentes entornos para cada una de las prácticas.

WepSIM se puede definir por tanto como un simulador de programación en ensamblador y microprogramación, flexible puesto que permite la personalización del juego de instrucciones

del computador, multiplataforma puesto que permite su uso desde diferentes tipos de dispositivos, e interactivo al poder modificar la configuración del computador en tiempo de ejecución.

2.2 Tecnologías web

Actualmente, gran parte de los recursos disponibles son ofrecidos a través de Internet y su distribución es posible gracias a las tecnologías web. Estas tecnologías permiten la construcción de las páginas web haciendo uso de las tecnologías para el desarrollo de páginas web y las tecnologías de interconexión de computadores permitiendo a los usuarios el intercambio en formato de hipertexto de todo tipo de datos y de aplicaciones software.

2.2.1 HTML5

Cuando se realiza el desarrollo de una página web, son tres las tecnologías que se emplean con mayor frecuencia: HTML, CSS y JavaScript. Todas estas tecnologías vienen definidas y estandarizadas por el organismo internacional W3C, y conforman el lenguaje de marcado HTML5. Cada una de ellas tiene una función concreta en el funcionamiento de la página web:

- **HTML:** Es un lenguaje de marcas con el que se realiza la estructuración de la página web. Es un estándar que sirve de referencia para el software que conecta con la elaboración de páginas web en sus diferentes versiones, define una estructura básica y un código (denominado código HTML) para la definición de contenido de una página web, como texto, imágenes, vídeos, juegos, entre otros.

El lenguaje HTML basa su filosofía de desarrollo en la diferenciación. Para añadir un elemento externo a la página (imagen, vídeo, script, entre otros.), este no se incrusta directamente en el código de la página, sino que se hace una referencia a la ubicación de dicho elemento mediante texto. De este modo, la página web contiene solamente texto mientras que recae en el navegador web (interpretador del código) la tarea de unir todos los elementos y visualizar la página final. Al ser un estándar, HTML busca ser un lenguaje que permita que cualquier página web escrita en una determinada versión, pueda ser interpretada de la misma forma (estándar) por cualquier navegador web actualizado.

En cambio, a lo largo de las diferentes versiones, se han añadido y eliminado diferentes características con la finalidad de hacer el lenguaje más eficiente y facilitar el desarrollo de

páginas web con diferentes plataformas y navegadores. Un navegador web desactualizado no será capaz de interpretar correctamente una página web escrita en una versión superior de HTML a la que pueda interpretar.

- **CSS:** Es un lenguaje de diseño gráfico utilizado para definir y crear la presentación de un documento estructurado escrito en un lenguaje de marcado, como puede ser HTML. Su principal finalidad es establecer el diseño visual de las páginas web e interfaces de usuario escritas en los lenguajes HTML o XHTML. Este lenguaje, además, permite aplicar estilos no visuales como pueden ser las hojas de estilo audibles.

Esta tecnología web es usada por la mayoría de sitios web para crear páginas visualmente atractivas, interfaces de usuario para aplicaciones web, y GUIs para muchas de las aplicaciones móviles existentes en el mercado. Con ella se pretende separar el contenido de la página web de la presentación, buscando mejorar la accesibilidad del documento y dando una mayor flexibilidad y control en la especificación de las características de la presentación, permitiendo que varios documentos HTML compartan un mismo estilo, usando una única hoja de estilos reduciendo la complejidad y la repetición de código en la estructura del documento.

- **JavaScript:** Es un lenguaje de programación interpretado orientado a las páginas web, que surgió de la necesidad de ampliar las posibilidades del HTML. Su principal función en las páginas web es realizar tareas y operaciones en el marco de la aplicación cliente como la mejora de la interfaz de usuario y la generación de páginas web dinámicas, aunque también es utilizado en el lado del servidor .

Este lenguaje fue diseñado con una sintaxis similar a la del lenguaje de programación C, aunque adopta nombres y convenciones del lenguaje de programación Java. En cambio, Java y Javascript tienen propósitos y semánticas distintos.

En la actualidad, todos los navegadores realizan la interpretación del código JavaScript integrado en las páginas web. Para poder interactuar con una página web, el lenguaje está provisto de una implementación del DOM que facilita el control y manejo de las interacciones del usuario.

2.2.2 Frameworks

Como se indica en [10] las aplicaciones web se han convertido en los últimos años en complejos sistemas software con interfaces de usuario cada vez más parecidas a las aplicaciones de escritorio, dando servicio a procesos de negocio de considerable envergadura y estableciéndose sobre ellas requisitos estrictos de accesibilidad y respuesta. Para ayudar al desarrollo de estas aplicaciones web, se hace uso de diferentes *frameworks* y bibliotecas que añaden funcionalidad al entorno de trabajo. Los *frameworks* son una estructura conceptual para el desarrollo e implementación de aplicaciones web, teniendo como objetivos principales la aceleración del proceso de desarrollo, reutilización de código ya existente y promover buenas prácticas de desarrollo, como el uso de patrones. Entre los *frameworks* más utilizados en la actualidad, se encuentran:

- **Angular.js:** Es un *framework* MVC (Modelo-Vista-Controlador) de JavaScript de código abierto mantenido por Google para el desarrollo Web Front End, que permite crear aplicaciones *Single-Page*. Este *framework* ha supuesto un avance puesto que al implementar el patrón MVC ayuda al desarrollador a separar conceptos. De este modo, adapta y amplía el HTML tradicional para servir mejor contenido dinámico a través de un *data binding* bidireccional que permite la sincronización automática de modelos y vistas. Además facilita la creación de test unitarios, lo cual resulta de gran ayuda para los desarrolladores.
- **jQuery.js:** Es una biblioteca de JavaScript rápida, pequeña y característica. Ofrece una infraestructura que proporciona una mayor facilidad para la creación de aplicaciones complejas del lado del cliente. De esta forma, al utilizar esta biblioteca, el desarrollador se asegura que funcionará correctamente en los navegadores de los usuarios.
- **BootStrap:** Es un *framework* de código abierto para el diseño de aplicaciones web, en el cual se incluyen diferentes plantillas de diseño con tipografía, formularios, botones, menús de navegación y otros elementos de diseño basados en HTML y CSS que proporcionan el desarrollador ayuda a la hora de implementar la interfaz de usuario de su aplicación. Además, es compatible con la mayoría de los navegadores web.
- **Dojo:** Es un *framework* que contiene APIs que facilitan el desarrollo de aplicaciones web que utilizan la tecnología AJAX, conteniendo un sistema de empaquetado inteligente, efecto de interfaz de usuario, abstracción de eventos, almacenamiento de APIs en el cliente e interacción de APIs con AJAX.

2.3 Procesador elemental WepSIM

WepSIM es un procesador elemental con unidad de control microprogramada diseñado por el personal del grupo de investigación ARCOS de la Universidad Carlos III de Madrid para la docencia en la asignatura “Estructura de Computadores”.

En la Figura 2-7 se muestra la estructura del Procesador Elemental WepSIM. WepSIM, consta de un módulo de memoria, un dispositivo teclado, un dispositivo pantalla y un dispositivo de E/S genérico que se puede utilizar para trabajar con interrupciones.

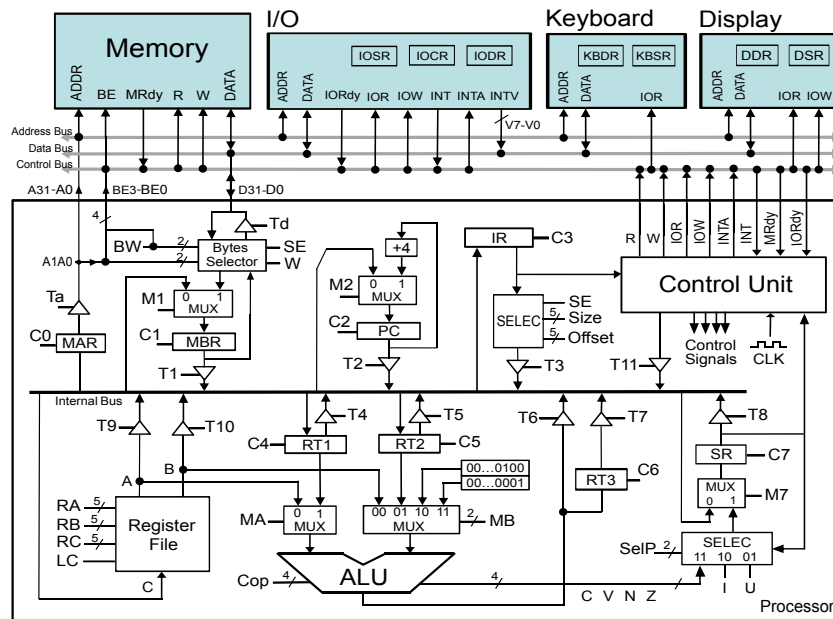


Figura 2-7: Arquitectura CPU WepSIM .

WepSIM es un procesador de 32 bits que direcciona la memoria por bytes, que cuenta con un banco de 32 registros y dos registros adicionales (RT1 y RT2) que no son visibles para el programador de ensamblador, pero que permiten el almacenamiento temporal de datos para la realización de operaciones intermedias. Desde los registros, es posible enviar los valores para operar en una ALU que dispone de las 15 operaciones aritmético-lógicas más comunes. El registro PC tiene su propio operador de sumar cuatro, de forma que no es necesario hacer uso de la ALU para esta operación. El resultado de las operaciones realizadas en la ALU puede ser almacenado en un registro temporal (RT3) que también es invisible para el programador de ensamblador, o ser enviado directamente al bus interno a través del correspondiente triestado.

El registro de estado (SR) puede ser actualizado con los *flags* resultantes de la última operación de la alu (O, N y Z). Para ello, SELEC/SelP representa un bloque de circuitos que permite

Finalmente, la Unidad de Control genera las señales de control para cada ciclo de reloj. La Figura 2-8 muestra la Unidad de Control con mayor detalle. Se trata de una unidad de control microprogramada con secuenciamiento implícito. Las señales de control para el ciclo de reloj actual se almacenan en el registro de micro-instrucción (aquel con los campos A0, B, C, SelA, etc.). El contenido de este registro proviene de la memoria de control, concretamente del contenido en la posición a la que apunta el registro de micro-dirección. La micro-dirección almacenada en este registro puede modificarse usando el multiplexor “MUX ”. Hay cuatro opciones: la microdirección actual más uno, una micro-dirección indicada en la propia micro-instrucción (que se solapa con SelA, SelB y parcialmente con SelE), la primera micro-dirección asociada al campo de código de operación de la instrucción del registro IR, y finalmente el valor cero, que es la dirección de la memoria de control donde se almacena la microrrutina correspondiente al fetch. La microdirección se puede seleccionar de forma condicional, para ello se usa el multiplexor “MUX C” que permite seleccionar los bits del registro de estado (SR) o valores de las señales de control de E/S.

Para generar los valores correspondientes a las señales selectoras del banco de registros RA, RB y RE se usan los circuitos selectores SelRA, SelRB y SelRE. Estos selectores toman como entrada los 32 bits del registro de instrucción (IR) por un lado y el campo SelA, SelB y SelE por otro, de forma que toman SelX como el desplazamiento dentro del registro de instrucción (de 0 a 32) desde donde tomar los siguientes 5 bits correspondientes a las señales RA, RB o RE. Permiten por tanto seleccionar 5 bits consecutivos de los 32 bits del registro de instrucción.

El multiplexor MR permite indicar si las señales RA, RB y RE serán literalmente los valores almacenados en SelA, SelB y SelE (MR=1) o bien si SelA, SelB y SelE indican el desplazamiento dentro de la instrucción donde están los valores a utilizar para RA, RB y RE. Esto último permite que en la instrucción se pueda indicar los registros a usar como operandos en el banco de registros, en lugar de indicarlos desde la micro-instrucción.

Para la señal Cop (código de operación en la ALU) la señal MC permite tomar el valor SelCop de la micro-instrucción (MC=1) o bien los 4 bits menos significativos del registro de instrucción (MC=0), es decir IR3-IR0.

En [11] se puede encontrar una descripción más detallada del procesador descrito anteriormente.

Capítulo 3

Análisis

El objetivo principal de este capítulo, es describir el proyecto mediante la obtención y especificación de los requisitos del simulador, que puede proporcionar información suficiente para un análisis detallado que, por lo tanto, puede servir para continuar diseñando e implementando (Capítulos 4, *Diseño*; y 5, *Implementación y despliegue*) un software que cumpla con esos requisitos.

Con el fin de obtener los requisitos del sistema, el tutor ha desempeñado el papel del cliente en diferentes reuniones, mientras que el estudiante ha desempeñado los roles de analista, diseñador, programador y *tester*.

La Sección 3.1 resume brevemente la descripción del proyecto. La Sección 3.2 especifica los requisitos del sistema, empezando con los requisitos de usuario y finalizando con los requisitos funcionales y no-funcionales. La Sección 3.2.2 especifica los caso de uso del sistema. Finalmente, la Sección 3.3 indica el conjunto de leyes y regulaciones para la gestión del software.

3.1 Descripción del proyecto

El objetivo de este proyecto es construir una herramienta que permita simular con realismo el comportamiento de un procesador basado en la arquitectura indicada por el el tutor del proyecto, de forma que sirva como única herramienta para los estudiantes a lo largo de la asignatura Estructura de Computadores.

Los simuladores actuales para la enseñanza de Estructura de Computadores, están focalizados a una función concreta, como puede ser la simulación de cachés, la simulación de código ensamblador o la simulación de microcódigo entre otros, pero a la hora de unificar todas estas

funcionalidades en una única herramienta, existe un vacío que genera una pérdida de tiempo en el aprendizaje de cada herramienta y la no posibilidad de ver una simulación completa.

El reto al que se enfrente cualquier simulador educativo es el de ser capaz de simular fielmente el funcionamiento de un dispositivo, permitiendo al estudiante poder observar con el mayor detalle posible el comportamiento éste.

El sistema que se propone debe ser capaz de simular con realismo el comportamiento del procesador, permitiendo la definición del juego de instrucciones a utilizar para el posterior desarrollo de código ensamblador y su ejecución en el simulador con un alto nivel de detalle en cada uno de los ciclos de ejecución. De esta forma, los estudiantes podrán comprender fácilmente los contenidos teóricos expuestos en la asignatura y serán capaces de realizar todas las prácticas en una misma herramienta, pudiendo ver de forma incremental el desarrollo de software de bajo nivel sobre un procesador elemental.

3.2 Requisitos

Esta sección proporciona una descripción detallada de los requisitos de la aplicación. Para la tarea de la especificación de requisitos, se han seguido las prácticas recomendadas por IEEE [12]. De acuerdo con estas prácticas, una buena especificación debe abordar la funcionalidad del software, los problemas de rendimiento, las interfaces externas, otras características no funcionales y las limitaciones de diseño o implementación. Además, la especificación de los requisitos debe ser:

- **Completa:** el documento refleja todos los requisitos de software importantes.
- **Consistente:** los requisitos no deben generar conflictos entre sí.
- **Correcta:** cada requisito debe ser cumplido por el software según las necesidades del usuario.
- **Modificable:** la estructura de la especificación permite cambios en los requisitos de una manera simple, completa y consistente.
- **Clasificación basada en la importancia y la estabilidad:** cada requisito debe indicar su importancia y su estabilidad.

- **Trazable:** el origen de cada requisito es claro y se puede hacer referencia fácilmente en otras etapas.
- **Inequívoco:** cada requisito tiene una sola interpretación.
- **Verificable:** Cada requisito debe ser verificable, es decir, existe algún proceso para verificar que el software cumple con cada requisito.

A partir de los requisitos de los usuarios, que constituyen una referencia informal al comportamiento del producto que el cliente espera, derivamos los requisitos de software (en este caso, requisitos funcionales y no funcionales) que guiaron el proceso de diseño con información específica sobre la funcionalidad del sistema y otras características. Los requisitos recuperados se estructuraron de acuerdo con el siguiente esquema:

1. Requisitos de usuario

- (a) **Capacidad:** el requisito describe la funcionalidad esperada del sistema como en casos de uso.
- (b) **Restricción:** el requisito especifica las restricciones o condiciones que el sistema debe cumplir.

2. Requisitos de software

(a) Funcionales

- i. **Funcional:** el requisito describe la funcionalidad básica y el propósito del sistema mientras se minimiza la ambigüedad.
- ii. **Inverso:** el requisito limita la funcionalidad de la aplicación para aclarar su alcance.

(b) No-Funcionales

- i. **Rendimiento:** el requisito se relaciona con el rendimiento mínimo requerido del sistema resultante.
- ii. **Interfaz:** el requisito está relacionado con la interfaz de usuario de la aplicación.
- iii. **Escalabilidad:** el requisito está relacionado con la capacidad del sistema para adaptarse a cargas de trabajo cada vez mayores.

- iv. **Plataforma:** el requisito especifica las plataformas subyacentes de software y hardware en las que funcionará el sistema.

La Tabla 3.1 proporciona la plantilla utilizada para la especificación de requisitos. Es necesario tener en cuenta que para los requisitos del usuario, el formato de identificación será UR-XY, donde X indica el subtipo de requisito: requisitos de capacidad (C) o restricciones (R). YY corresponde al número de requisito en su subcategoría. Para los requisitos de software, se utilizará el formato de identificación SR-X-YYY, donde X indica si es un requisito funcional (F) o no funcional (NF), e Y representa su subcategoría: funcional (F), inversa (I), Rendimiento (P), interfaz (UI), escalabilidad (S) o plataforma (PL). ZZ corresponde al número de requisito en su subcategoría.

Tabla 3.1: *Plantilla para la especificación de requisitos.*

| | |
|--------------------|--|
| ID | Requisito ID. |
| Nombre | Nombre del requisito. |
| Tipo | Indica la categoría en la que se colocaría el requisito de acuerdo con el esquema descrito anteriormente. |
| Origen | Constituye la fuente del requisito. Puede ser el usuario, otro requisito u otros actores involucrados en el proyecto. |
| Prioridad | Indica la prioridad del requisito según su importancia. Un requisito puede ser identificado como <i>esencial</i> , <i>condicional</i> or <i>opcional</i> . |
| Estabilidad | Indica la variabilidad del requisito a través del proceso de desarrollo, definido como <i>estable</i> or <i>inestable</i> . |
| Descripción | Explicación detallada del requisito. |

3.2.1 Requisitos de usuario

Esta subsección especifica los requisitos de usuario.

Tabla 3.2: *Requisito de usuario UR-C01.*

| | |
|--------------------|--|
| ID | UR-C01 |
| Nombre | Simulación del modelo hardware propuesto |
| Tipo | Capacidad |
| Origen | Usuario |
| Prioridad | Esencial |
| Estabilidad | Estable |
| Descripción | La herramienta simulará el comportamiento de la arquitectura definida para la asignatura Estructura de Computadores. |

Tabla 3.3: *Requisito de usuario UR-C02.*

| | |
|--------------------|---|
| ID | UR-C02 |
| Nombre | Definición de juego de instrucciones del simulador |
| Tipo | Capacidad |
| Origen | Usuario |
| Prioridad | Esencial |
| Estabilidad | Estable |
| Descripción | La herramienta debe permitir la definición del juego de instrucciones a utilizar por el usuario siguiendo el formato especificado por el tutor. |

Tabla 3.4: *Requisito de usuario UR-C03.*

| | |
|--------------------|--|
| ID | UR-C03 |
| Nombre | Operaciones con el juego de instrucciones |
| Tipo | Capacidad |
| Origen | Usuario |
| Prioridad | Esencial |
| Estabilidad | Estable |
| Descripción | La herramienta debe permitir al usuario las siguientes operaciones con el juego de instrucciones: cargar desde fichero, exportar a un fichero y generar el firmware. |

Tabla 3.5: *Requisito de usuario UR-C04.*

| | |
|--------------------|---|
| ID | UR-C04 |
| Nombre | Definición de juego del código ensamblador |
| Tipo | Capacidad |
| Origen | Usuario |
| Prioridad | Esencial |
| Estabilidad | Estable |
| Descripción | La herramienta debe permitir la definición del código ensamblador a simular siguiendo el formato utilizado en la asignatura Estructura de Computadores y el juego de instrucciones cargado previamente. |

Tabla 3.6: *Requisito de usuario UR-C05.*

| | |
|--------------------|--|
| ID | UR-C05 |
| Nombre | Operaciones con el código ensamblador |
| Tipo | Capacidad |
| Origen | Usuario |
| Prioridad | Esencial |
| Estabilidad | Estable |
| Descripción | La herramienta debe permitir al usuario las siguientes operaciones con el código ensamblador: cargar desde fichero, exportar a un fichero y generar el binario asociado. |

Tabla 3.7: *Requisito de usuario UR-C06.*

| | |
|--------------------|---|
| ID | UR-C06 |
| Nombre | Tipos de simulación |
| Tipo | Capacidad |
| Origen | Usuario |
| Prioridad | Esencial |
| Estabilidad | Estable |
| Descripción | La herramienta debe permitir tres tipos diferentes de simulación: simulación ciclo a ciclo de reloj, simulación instrucción a instrucción y simulación completa del código. |

Tabla 3.8: *Requisito de usuario UR-C07.*

| | |
|--------------------|--|
| ID | UR-C07 |
| Nombre | Configuración de la velocidad de las simulaciones |
| Tipo | Capacidad |
| Origen | Usuario |
| Prioridad | Esencial |
| Estabilidad | Estable |
| Descripción | La herramienta debe permitir al usuario seleccionar la velocidad de la simulación. |

Tabla 3.9: *Requisito de usuario UR-C08.*

| | |
|--------------------|---|
| ID | UR-C08 |
| Nombre | Esquemas de la arquitectura |
| Tipo | Capacidad |
| Origen | Usuario |
| Prioridad | Esencial |
| Estabilidad | Estable |
| Descripción | La herramienta debe mostrar la arquitectura de la CPU y la Unidad de Control que forman el simulador. |

Tabla 3.10: *Requisito de usuario UR-C09.*

| | |
|--------------------|---|
| ID | UR-C09 |
| Nombre | Información a mostrar |
| Tipo | Capacidad |
| Origen | Usuario |
| Prioridad | Esencial |
| Estabilidad | Estable |
| Descripción | La herramienta debe mostrar al usuario la información del estado del simulador en cada paso de la simulación. |

Tabla 3.11: *Requisito de usuario UR-R01.*

| | |
|--------------------|---|
| ID | UR-R01 |
| Nombre | Multiplataforma |
| Tipo | Restricción |
| Origen | Usuario |
| Prioridad | Esencial |
| Estabilidad | Estable |
| Descripción | El simulador no debe ser instalado en el dispositivo del usuario. |

Tabla 3.12: *Requisito de usuario UR-R02.*

| | |
|--------------------|---|
| ID | UR-R02 |
| Nombre | Navegadores web |
| Tipo | Restricción |
| Origen | Usuario |
| Prioridad | Esencial |
| Estabilidad | Estable |
| Descripción | El simulador debe de funcionar en los siguiente navegadores web: Microsoft Edge 30+, Mozilla Firefox 45+, Google Chrome 50+ y Safari 10+. |

Tabla 3.13: *Requisito de usuario UR-R03.*

| | |
|--------------------|--|
| ID | UR-R03 |
| Nombre | Interfaz de usuario |
| Tipo | Restricción |
| Origen | Usuario |
| Prioridad | Esencial |
| Estabilidad | Estable |
| Descripción | La interfaz de usuario debe de ser compatible para uso en PCs y smartphones. |

Tabla 3.14: *Requisito de usuario UR-R04.*

| | |
|--------------------|--|
| ID | UR-R04 |
| Nombre | Tiempo por ciclo de reloj |
| Tipo | Restricción |
| Origen | Usuario |
| Prioridad | Esencial |
| Estabilidad | Estable |
| Descripción | El tiempo de ejecución en media de un ciclo de reloj del simulador no debe de sobrepasar 0,1 segundos. |

Tabla 3.15: *Requisito de usuario UR-R05.*

| | |
|--------------------|---|
| ID | UR-R05 |
| Nombre | Ejecución en local |
| Tipo | Restricción |
| Origen | Usuario |
| Prioridad | Esencial |
| Estabilidad | Estable |
| Descripción | Las simulaciones serán realizadas en el dispositivo del usuario, siendo únicamente necesario el servidor para el acceso a la herramienta. |

Tabla 3.16: *Requisito de usuario UR-R06.*

| | |
|--------------------|---|
| ID | UR-R06 |
| Nombre | Conexión a internet |
| Tipo | Restricción |
| Origen | Usuario |
| Prioridad | Esencial |
| Estabilidad | Estable |
| Descripción | La herramienta podrá ser ejecutada sin conexión a internet. |

Tabla 3.17: *Requisito de usuario UR-R07.*

| | |
|--------------------|---|
| ID | UR-R07 |
| Nombre | Tecnologías de desarrollo |
| Tipo | Restricción |
| Origen | Usuario |
| Prioridad | Esencial |
| Estabilidad | Estable |
| Descripción | El simulador debe de ser desarrollado mediante el lenguaje de programación HTML5. |

3.2.2 Modelo de casos de uso

Un caso de uso representa un uso típico que realizará alguno de los futuros usuarios del sistema desarrollado. El diagrama que se muestra a continuación representa los casos de uso de un usuario que utilice esta herramienta desarrollada. Se ha partido el diagrama en dos para hacerlo mucho más legible. A continuación, se muestra la primera parte del diagrama (Figura 3-1). En la página siguiente se muestra la segunda parte (Figura 3-2).

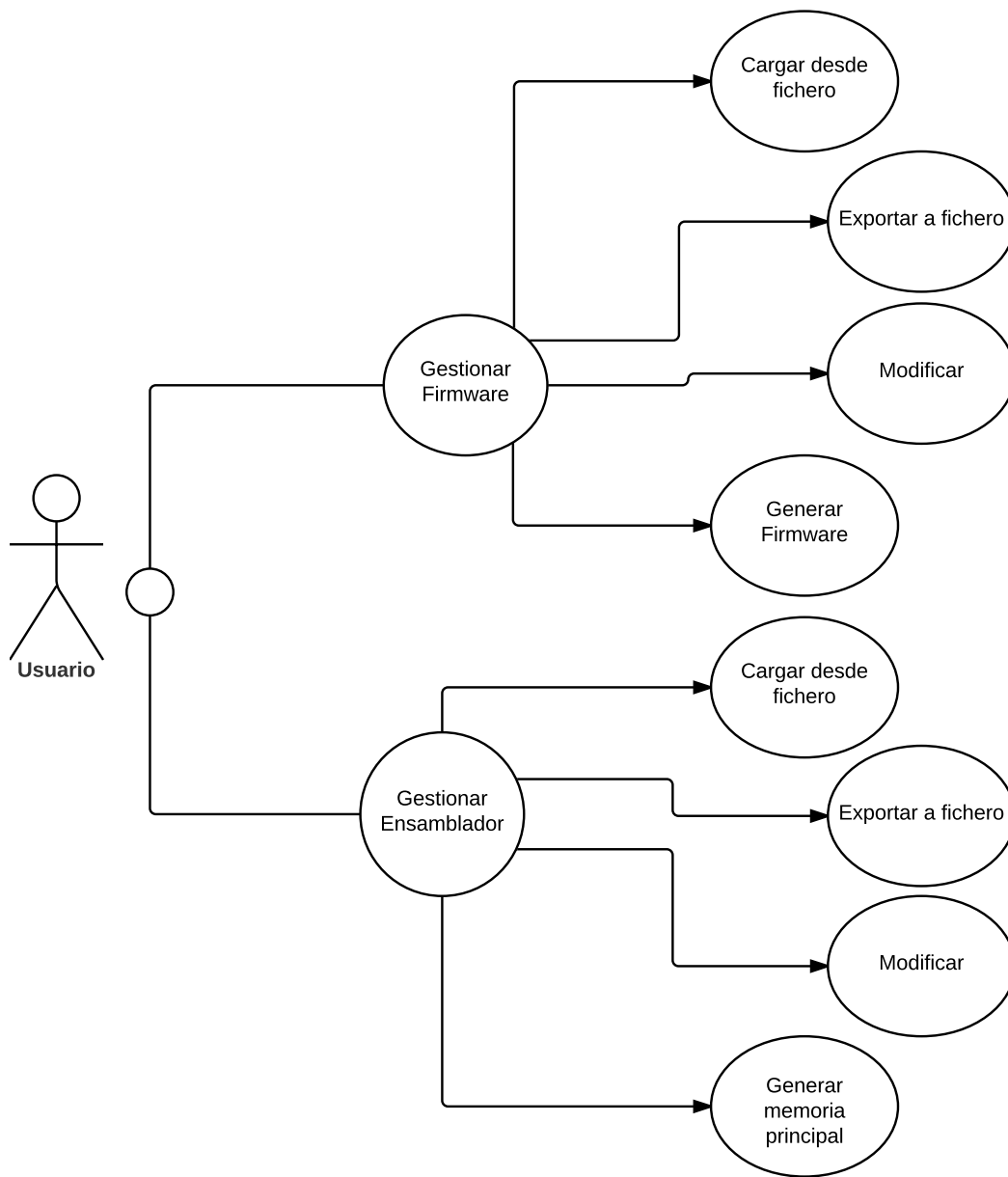


Figura 3-1: Diagrama modelo casos de uso 1.

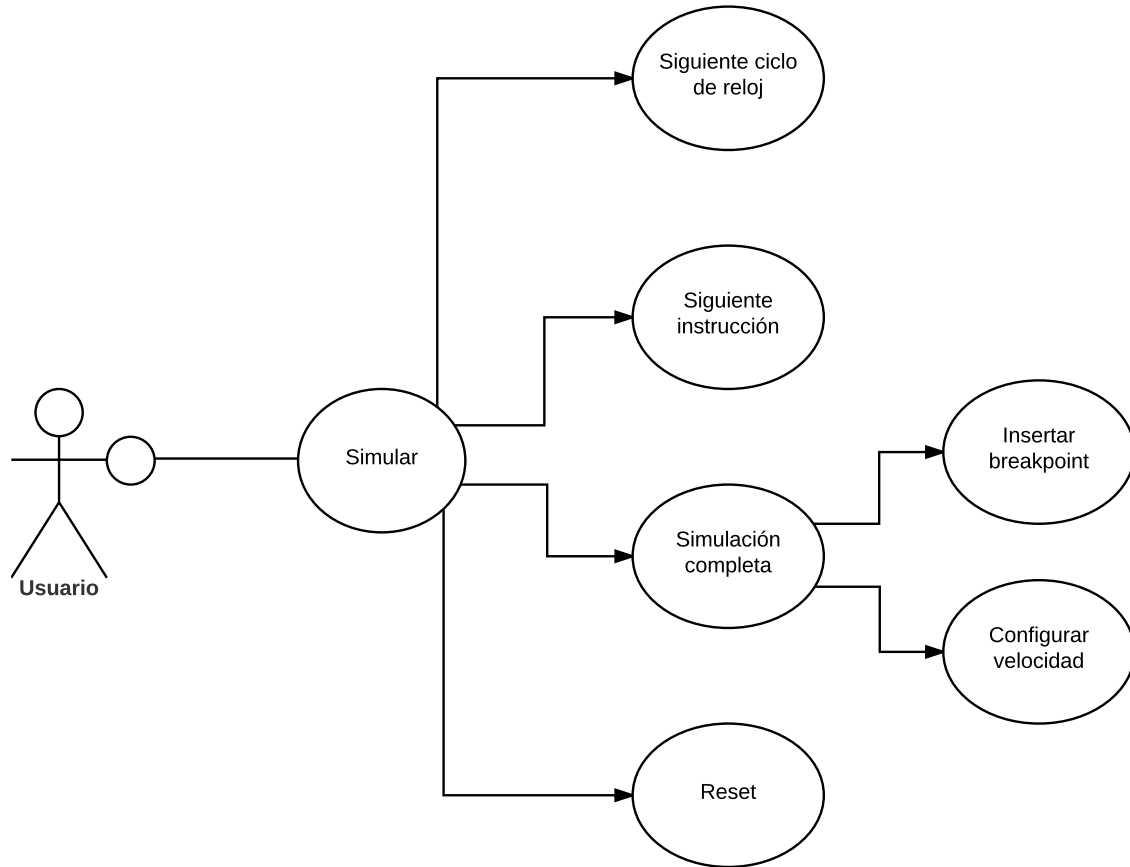


Figura 3-2: Diagrama modelo casos de uso 2.

Para realizar la especificación clara, completa y detallada de cada uno de los casos de uso recogidos en el diagrama anterior se utilizará una tabla donde se recogerán los siguientes campos de información.

La Tabla 3.18 proporciona la plantilla utilizada para la especificación de casos de uso. Es necesario tener en cuenta que el formato de identificación será UC-XX, donde XX corresponde al número del caso de uso.

A continuación, se exponen los casos de uso.

Tabla 3.18: *Plantilla de caso de uso.*

| | |
|-------------------------|--|
| ID | Caso de uso ID. |
| Nombre | Nombre del caso de uso. |
| Actores | Describe el actor o los actores que intervienen en la realización del caso de uso. |
| Objetivo | Describe textualmente el cometido concreto del caso de uso. |
| Precondiciones | Muestra el estado del sistema que debe darse para que se pueda realizar el caso de uso. |
| Postcondiciones | Presenta el estado del sistema tras la realización del caso de uso. |
| Escenario Básico | Especifica la secuencia de pasos principales que se efectúan para realizar el caso de uso. |

Tabla 3.19: *Caso de uso UC-01.*

| | |
|-------------------------|--|
| ID | UC-01 |
| Nombre | Cargar juego de instrucciones |
| Actores | Usuario |
| Objetivo | Cargar en la herramienta un nuevo juego de instrucciones desde un fichero que indica el usuario. |
| Precondiciones | Ninguna. |
| Postcondiciones | El juego de instrucciones se carga en la herramienta, mostrándose en el editor de texto correspondiente al firmware. |
| Escenario Básico | <ul style="list-style-type: none"> ■ El usuario selecciona la pestaña firmware. ■ Pulsa el botón cargar firmware. ■ Selecciona el fichero deseado y acepta. |

Tabla 3.20: *Caso de uso UC-02*

| | |
|-------------------------|---|
| ID | UC-02 |
| Nombre | Exportar juego de instrucciones |
| Actores | Usuario |
| Objetivo | Exportar a un fichero el juego de instrucciones cargado en la memoria de control. |
| Precondiciones | La memoria de control ha sido generada. |
| Postcondiciones | Se genera un fichero en el dispositivo del usuario con el juego de instrucciones cargado previamente en la memoria de control. |
| Escenario Básico | <ul style="list-style-type: none"> ■ El usuario selecciona la pestaña firmware. ■ Pulsa el botón guardar firmware. ■ Selecciona el nombre de fichero deseado y acepta. |

Tabla 3.21: *Caso de uso UC-03.*

| | |
|-------------------------|--|
| ID | UC-03 |
| Nombre | Modificar juego de instrucciones |
| Actores | Usuario |
| Objetivo | Editar el juego de instrucciones desde la herramienta. |
| Precondiciones | Ninguna. |
| Postcondiciones | Las modificaciones realizadas por el usuario en el juego de instrucciones son mostradas en el editor de texto correspondiente al firmware. |
| Escenario Básico | <ul style="list-style-type: none"> ■ El usuario selecciona la pestaña firmware. ■ Realiza las modificaciones deseadas en el editor de texto. |

Tabla 3.22: Caso de uso UC-04.

| | |
|-------------------------|---|
| ID | UC-04 |
| Nombre | Generar firmware |
| Actores | Usuario |
| Objetivo | Generar la memoria de control a partir del juego de instrucciones definido en la herramienta. |
| Precondiciones | El juego de instrucciones debe estar definido en la herramienta. |
| Postcondiciones | Se genera la memoria de control asociada al juego de instrucciones definido por el usuario. |
| Escenario Básico | <ul style="list-style-type: none"> ■ El usuario selecciona la pestaña firmware. ■ Define el juego de instrucciones deseado en la herramienta. ■ Pulsa el botón generar firmware. |

Tabla 3.23: Caso de uso UC-05.

| | |
|-------------------------|--|
| ID | UC-05 |
| Nombre | Cargar ensamblador |
| Actores | Usuario |
| Objetivo | Cargar en la herramienta un nuevo código ensamblador desde un fichero que indica el usuario. |
| Precondiciones | Ninguna. |
| Postcondiciones | El código ensamblador se carga en la herramienta, mostrándose en el editor de texto correspondiente al ensamblador. |
| Escenario Básico | <ul style="list-style-type: none"> ■ El usuario selecciona la pestaña ensamblador. ■ Pulsa el botón cargar ensamblador. ■ Selecciona el fichero deseado y acepta. |

Tabla 3.24: Caso de uso UC-06.

| | |
|-------------------------|---|
| ID | UC-06 |
| Nombre | Exportar ensamblador |
| Actores | Usuario |
| Objetivo | Exportar a un fichero el código ensamblador cargado para la simulación. |
| Precondiciones | El código ensamblador ha sido cargado en el simulador. |
| Postcondiciones | Se genera un fichero en el dispositivo del usuario con el código ensamblador cargado previamente en el simulador. |
| Escenario Básico | <ul style="list-style-type: none"> ■ El usuario selecciona la pestaña ensamblador. ■ Pulsa el botón guardar ensamblador. ■ Selecciona el nombre de fichero deseado y acepta. |

Tabla 3.25: Caso de uso UC-07.

| | |
|-------------------------|---|
| ID | UC-07 |
| Nombre | Modificar ensamblador |
| Actores | Usuario |
| Objetivo | Editar el código ensamblador desde la herramienta. |
| Precondiciones | Ninguna. |
| Postcondiciones | Las modificaciones realizadas por el usuario en el juego de instrucciones son mostradas en el editor de texto correspondiente al firmware. |
| Escenario Básico | <ul style="list-style-type: none"> ■ El usuario selecciona la pestaña ensamblador. ■ Realiza las modificaciones deseadas en el editor de texto. |

Tabla 3.26: Caso de uso UC-08.

| | |
|-------------------------|--|
| ID | UC-08 |
| Nombre | Generar memoria principal |
| Actores | Usuario |
| Objetivo | Cargar el código ensamblador definido por el usuario en el simulador, generando el contenido de la memoria principal correspondiente al ensamblador. |
| Precondiciones | El código ensamblador debe estar definido en la herramienta. |
| Postcondiciones | Se genera la memoria principal asociada al código ensamblador definido por el usuario. |
| Escenario Básico | <ul style="list-style-type: none"> ■ El usuario selecciona la pestaña ensamblador. ■ Define el código ensamblador deseado en la herramienta. ■ Pulsa el botón compilar. |

Tabla 3.27: Caso de uso UC-09.

| | |
|-------------------------|--|
| ID | UC-09 |
| Nombre | Siguiente ciclo de reloj |
| Actores | Usuario |
| Objetivo | Avanzar un ciclo de reloj en la simulación. |
| Precondiciones | La memoria de control y la memoria principal deben de estar generadas. |
| Postcondiciones | La ejecución de la simulación avanza un ciclo de reloj, siendo modificado el estado del simulador. |
| Escenario Básico | <ul style="list-style-type: none"> ■ El usuario selecciona la pestaña simulador. ■ Pulsa el botón siguiente micro-instrucción. |

Tabla 3.28: Caso de uso UC-10.

| | |
|-------------------------|--|
| ID | UC-10 |
| Nombre | Siguiente instrucción |
| Actores | Usuario |
| Objetivo | Avanzar una instrucción en la simulación. |
| Precondiciones | La memoria de control y la memoria principal deben de estar generadas. |
| Postcondiciones | La ejecución de la simulación avanza una instrucción, siendo modificado el estado del simulador. |
| Escenario Básico | <ul style="list-style-type: none"> ■ El usuario selecciona la pestaña simulador. ■ Pulsa el botón siguiente instrucción. |

Tabla 3.29: Caso de uso UC-11.

| | |
|-------------------------|---|
| ID | UC-11 |
| Nombre | Insertar breakpoint |
| Actores | Usuario |
| Objetivo | Insertar un punto de detención en una instrucción del código ensamblador a simular. |
| Precondiciones | La memoria de control y la memoria principal deben de estar generadas. |
| Postcondiciones | Se añade un breakpoint en la simulación. |
| Escenario Básico | <ul style="list-style-type: none"> ■ El usuario selecciona la pestaña simulador. ■ Selecciona la pestaña Assembly Debugger. ■ Pulsa sobre la instrucción en la que añadir el breakpoint. |

Tabla 3.30: Caso de uso UC-12.

| | |
|-------------------------|---|
| ID | UC-12 |
| Nombre | Configurar velocidad |
| Actores | Usuario |
| Objetivo | Configurar la velocidad de la simulación. |
| Precondiciones | La memoria de control y la memoria principal deben de estar generadas. |
| Postcondiciones | Se modifica la velocidad de la simulación. |
| Escenario Básico | <ul style="list-style-type: none"> ■ El usuario selecciona la pestaña simulador. ■ Modifica la velocidad mediante la barra deslizable de velocidad. |

Tabla 3.31: Caso de uso UC-13.

| | |
|-------------------------|--|
| ID | UC-13 |
| Nombre | Reinicio del simulador |
| Actores | Usuario |
| Objetivo | Reiniciar la simulación. |
| Precondiciones | La memoria de control y la memoria principal deben de estar generadas. |
| Postcondiciones | El simulador queda reiniciado y preparado para el comienzo de la simulación. |
| Escenario Básico | <ul style="list-style-type: none"> ■ El usuario selecciona la pestaña simulador. ■ Pulsa sobre el botón reset. |

3.2.3 Requisitos funcionales

Esta subsección especifica los requisitos funcionales.

Tabla 3.32: *Requisito funcional SR-F-F01.*

| | |
|--------------------|---|
| ID | SR-F-F01 |
| Nombre | Arquitectura de 32 bits |
| Tipo | Funcional |
| Origen | UR-C01 |
| Prioridad | Esencial |
| Estabilidad | Estable |
| Descripción | La herramienta debe simular una arquitectura de 32 bits, implicando un banco de 32 registros, memoria principal con tamaño de 2^{32} bits y registros y buses de 32 bits. |

Tabla 3.33: *Requisito funcional SR-F-F02.*

| | |
|--------------------|---|
| ID | SR-F-F02 |
| Nombre | Unidad de control microprogramable |
| Tipo | Funcional |
| Origen | UR-C01 |
| Prioridad | Esencial |
| Estabilidad | Estable |
| Descripción | La unidad de control debe de ser microprogramable, con secuenciamiento implícito, saltos a nivel de microdirección y microsaltos condicionales. |

Tabla 3.34: *Requisito funcional SR-F-F03.*

| | |
|--------------------|---|
| ID | SR-F-F03 |
| Nombre | Datos en complemento a dos (Ca2) |
| Tipo | Funcional |
| Origen | UR-C01 |
| Prioridad | Esencial |
| Estabilidad | Estable |
| Descripción | La herramienta operará con una ALU de números enteros en complemento a dos. |

Tabla 3.35: *Requisito funcional SR-F-F04.*

| | |
|--------------------|--|
| ID | SR-F-F04 |
| Nombre | Definición de juego de instrucciones |
| Tipo | Funcional |
| Origen | UR-C02 |
| Prioridad | Esencial |
| Estabilidad | Estable |
| Descripción | La herramienta debe permitir al usuario la definición del juego de instrucciones a utilizar. |

Tabla 3.36: *Requisito funcional SR-F-F05.*

| | |
|--------------------|--|
| ID | SR-F-F05 |
| Nombre | Formato del juego de instrucciones |
| Tipo | Funcional |
| Origen | UR-C02 |
| Prioridad | Esencial |
| Estabilidad | Estable |
| Descripción | El juego de instrucciones debe seguir el formato utilizado en la asignatura Estructura de Computadores, definiendo instrucciones del lenguaje ensamblador, su microcódigo asociado, nombrado de los registros y pseudoinstrucciones. |

Tabla 3.37: *Requisito funcional SR-F-F06.*

| | |
|--------------------|---|
| ID | SR-F-F06 |
| Nombre | Modificación del juego de instrucciones |
| Tipo | Funcional |
| Origen | UR-C03 |
| Prioridad | Esencial |
| Estabilidad | Estable |
| Descripción | La herramienta debe de permitir la modificación del juego de instrucciones a utilizar por el usuario. |

Tabla 3.38: *Requisito funcional SR-F-F07.*

| | |
|--------------------|---|
| ID | SR-F-F07 |
| Nombre | Carga de juego de instrucciones |
| Tipo | Funcional |
| Origen | UR-C03 |
| Prioridad | Esencial |
| Estabilidad | Estable |
| Descripción | La herramienta debe permitir la carga de un fichero que contenga el juego de instrucciones. |

Tabla 3.39: *Requisito funcional SR-F-F08.*

| | |
|--------------------|--|
| ID | SR-F-F08 |
| Nombre | Exportar juego de instrucciones |
| Tipo | Funcional |
| Origen | UR-C03 |
| Prioridad | Esencial |
| Estabilidad | Estable |
| Descripción | La herramienta debe permitir exportar el juego de instrucciones en un fichero. |

Tabla 3.40: *Requisito funcional SR-F-F09.*

| | |
|--------------------|---|
| ID | SR-F-F09 |
| Nombre | Generación firmware del simulador |
| Tipo | Funcional |
| Origen | UR-C03 |
| Prioridad | Esencial |
| Estabilidad | Estable |
| Descripción | La herramienta debe de generar el firmware simulador a partir del juego de instrucciones definido y cargado por el usuario. |

Tabla 3.41: *Requisito funcional SR-F-F10.*

| | |
|--------------------|---|
| ID | SR-F-F10 |
| Nombre | Definición del código ensamblador |
| Tipo | Funcional |
| Origen | UR-C04 |
| Prioridad | Esencial |
| Estabilidad | Estable |
| Descripción | La herramienta debe permitir al usuario la definición del código ensamblador a utilizar en la simulación. |

Tabla 3.42: *Requisito funcional SR-F-F11.*

| | |
|--------------------|--|
| ID | SR-F-F11 |
| Nombre | Formato del código ensamblador |
| Tipo | Funcional |
| Origen | UR-C04 |
| Prioridad | Esencial |
| Estabilidad | Estable |
| Descripción | El código ensamblador a simular debe de seguir el formato utilizado en la asignatura Estructura de Computadores, utilizando el lenguaje definido en el juego de instrucciones. |

Tabla 3.43: *Requisito funcional SR-F-F12.*

| | |
|--------------------|---|
| ID | SR-F-F12 |
| Nombre | Edición del código ensamblador |
| Tipo | Funcional |
| Origen | UR-C05 |
| Prioridad | Esencial |
| Estabilidad | Estable |
| Descripción | La herramienta debe permitir modificar el código ensamblador. |

Tabla 3.44: *Requisito funcional SR-F-F13.*

| | |
|--------------------|---|
| ID | SR-F-F13 |
| Nombre | Carga del código ensamblador |
| Tipo | Funcional |
| Origen | UR-C05 |
| Prioridad | Esencial |
| Estabilidad | Estable |
| Descripción | La herramienta debe permitir la carga de un fichero que contenga el código ensamblador. |

Tabla 3.45: *Requisito funcional SR-F-F14.*

| | |
|--------------------|---|
| ID | SR-F-F14 |
| Nombre | Exportar código ensamblador |
| Tipo | Funcional |
| Origen | UR-C05 |
| Prioridad | Esencial |
| Estabilidad | Estable |
| Descripción | La herramienta debe permitir exportar a un fichero el código ensamblador cargado en la herramienta. |

Tabla 3.46: *Requisito funcional SR-F-F15.*

| | |
|--------------------|--|
| ID | SR-F-F15 |
| Nombre | Generación ejecutable del código ensamblador |
| Tipo | Funcional |
| Origen | UR-C05 |
| Prioridad | Esencial |
| Estabilidad | Estable |
| Descripción | La herramienta debe de generar el binario ejecutable asociado al código ensamblador definido para la simulación. |

Tabla 3.47: *Requisito funcional SR-F-F16.*

| | |
|--------------------|---|
| ID | SR-F-F16 |
| Nombre | Simulación ciclo a ciclo de reloj |
| Tipo | Funcional |
| Origen | UR-C06 |
| Prioridad | Esencial |
| Estabilidad | Estable |
| Descripción | La herramienta debe de permitir la simulación ciclo a ciclo de reloj del código ensamblador cargado por el usuario. |

Tabla 3.48: *Requisito funcional SR-F-F17.*

| | |
|--------------------|--|
| ID | SR-F-F17 |
| Nombre | Simulación instrucción a instrucción |
| Tipo | Funcional |
| Origen | UR-C06 |
| Prioridad | Esencial |
| Estabilidad | Estable |
| Descripción | La herramienta debe de permitir la simulación instrucción a instrucción del código ensamblador cargado por el usuario. |

Tabla 3.49: *Requisito funcional SR-F-F18.*

| | |
|--------------------|---|
| ID | SR-F-F18 |
| Nombre | Simulación completa |
| Tipo | Funcional |
| Origen | UR-C06 |
| Prioridad | Esencial |
| Estabilidad | Estable |
| Descripción | La herramienta debe de permitir la simulación completa del código ensamblador cargado por el usuario. |

Tabla 3.50: *Requisito funcional SR-F-F19.*

| | |
|--------------------|--|
| ID | SR-F-F19 |
| Nombre | Velocidad de simulación |
| Tipo | Funcional |
| Origen | UR-C07 |
| Prioridad | Esencial |
| Estabilidad | Estable |
| Descripción | La herramienta debe de permitir al usuario elegir la velocidad de simulación del código ensamblador cargado. |

Tabla 3.51: *Requisito funcional SR-F-F20.*

| | |
|--------------------|--|
| ID | SR-F-F20 |
| Nombre | Esquema CPU |
| Tipo | Funcional |
| Origen | UR-C08 |
| Prioridad | Esencial |
| Estabilidad | Estable |
| Descripción | La herramienta debe de mostrar el esquema de la CPU del simulador, modificando el color de las señales activas y buses de datos actualizados en cada ciclo de reloj. |

Tabla 3.52: *Requisito funcional SR-F-F21.*

| | |
|--------------------|--|
| ID | SR-F-F21 |
| Nombre | Esquema unidad de control |
| Tipo | Funcional |
| Origen | UR-C08 |
| Prioridad | Esencial |
| Estabilidad | Estable |
| Descripción | La herramienta debe de mostrar el esquema de la unidad de control del simulador, modificando el color de las señales activas y buses de datos actualizados en cada ciclo de reloj. |

Tabla 3.53: *Requisito funcional SR-F-F22.*

| | |
|--------------------|---|
| ID | SR-F-F22 |
| Nombre | Información de la simulación |
| Tipo | Funcional |
| Origen | UR-C09 |
| Prioridad | Esencial |
| Estabilidad | Estable |
| Descripción | La herramienta debe de mostrar durante la ejecución el estado de los registros del simulador. |

3.2.4 Requisitos no-funcionales

Esta subsección especifica los requisitos no-funcionales.

Tabla 3.54: *Requisito no-funcional SR-NF-PL01.*

| | |
|--------------------|--|
| ID | SR-NF-PL01 |
| Nombre | Multiplataforma |
| Tipo | Plataforma |
| Origen | UR-R01 |
| Prioridad | Esencial |
| Estabilidad | Estable |
| Descripción | El simulador debe de ser diseñado como una aplicación web. |

Tabla 3.55: *Requisito no-funcional SR-NF-PL02.*

| | |
|--------------------|--|
| ID | SR-NF-PL02 |
| Nombre | Navegadores web |
| Tipo | Plataforma |
| Origen | UR-R02 |
| Prioridad | Esencial |
| Estabilidad | Estable |
| Descripción | El simulador debe poder ser ejecutado en los navegadores: Microsoft Edge 30+, Mozilla Firefox 45+, Google Chrome 50+ y Safari 10+. |

Tabla 3.56: *Requisito no-funcional SR-NF-PL03.*

| | |
|--------------------|---|
| ID | SR-NF-PL03 |
| Nombre | Plataforma de ejecución |
| Tipo | Plataforma |
| Origen | UR-R05 |
| Prioridad | Esencial |
| Estabilidad | Estable |
| Descripción | Las ejecuciones de la herramienta deben ser realizadas en el dispositivo del usuario. |

Tabla 3.57: *Requisito no-funcional SR-NF-PL04.*

| | |
|--------------------|---|
| ID | SR-NF-PL04 |
| Nombre | Internet |
| Tipo | Plataforma |
| Origen | UR-R06 |
| Prioridad | Esencial |
| Estabilidad | Estable |
| Descripción | La herramienta podrá ser ejecutada sin conexión a internet. |

Tabla 3.58: *Requisito no-funcional SR-NF-PL05.*

| | |
|--------------------|--|
| ID | SR-NF-PL05 |
| Nombre | Lenguaje de programación HTML5 |
| Tipo | Plataforma |
| Origen | UR-R07 |
| Prioridad | Esencial |
| Estabilidad | Estable |
| Descripción | La herramienta debe ser desarrollada en el lenguaje de programación HTML5 (HTML + CSS + JavaScript). |

Tabla 3.59: *Requisito no-funcional SR-NF-UI01.*

| | |
|--------------------|---|
| ID | SR-NF-UI01 |
| Nombre | Interfaz de usuario |
| Tipo | Interfaz |
| Origen | UR-R03 |
| Prioridad | Esencial |
| Estabilidad | Estable |
| Descripción | La interfaz de usuario del simulador debe de ser compatible tanto con PCs como con plataformas móviles (tablets, smartphones, etc). |

Tabla 3.60: *Requisito no-funcional SR-NF-P01.*

| | |
|--------------------|---|
| ID | SR-NF-P01 |
| Nombre | Tiempo medio por ciclo de reloj |
| Tipo | Rendimiento |
| Origen | UR-R04 |
| Prioridad | Esencial |
| Estabilidad | Estable |
| Descripción | El tiempo medio de ejecución de un ciclo de reloj no debe exceder 0,1 segundos. |

La matriz de trazabilidad de entre requisitos de usuario y requisitos de software (Tabla 3.61) determina que todos los requisitos de usuario quedan reflejados en los requisitos de software.

3.3 Marco regulador

Esta sección discute las restricciones necesarias teniendo en cuenta el marco regulador. En concreto, se especifican las restricciones legales aplicables al simulador.

3.3.1 Aspectos legales

Para el uso de la mayoría de aplicaciones web, los usuarios deben de registrarse, y las bases de datos de las mismas manejan información confidencial de los usuarios, por lo que es necesario garantizar que terceros no puedan acceder a esa información. Una solución es cifrar la información transmitida mediante algún protocolo criptográfico. En España, este requisito es especificado en el artículo 104 del RD 1720/2007 [13], que se ocupa de la Ley Española de Protección de Datos.

A diferencia de lo anteriormente citado, la aplicación desarrollada no utiliza datos privados de los usuarios y tampoco transmite información confidencial a terceros, ya que es un simulador que únicamente utiliza los códigos generados por el usuario para ejecutarlos de forma local en el dispositivo del usuario.

Por otro lado, es crucial que el simulador esté disponible como software de código abierto. Queremos que cualquiera pueda redistribuir el código o modificarlo por los términos de la Licencia Pública General Menor de GNU (LGPL) [14]. Para ello, nuestro simulador está disponible en los siguientes sitios web:

<https://www.arcos.inf.uc3m.es/wepsim/>.

<https://github.com/wepsim/wepsim>.

Tabla 3.61: Matriz de trazabilidad de requisitos.

| Requisitos | UR-C01 | UR-C02 | UR-C03 | UR-C04 | UR-C05 | UR-C06 | UR-C07 | UR-C08 | UR-C09 | UR-R01 | UR-R02 | UR-R03 | UR-R04 | UR-R05 | UR-R06 | UR-R07 |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| SR-F-F01 | ✓ | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| SR-F-F02 | ✓ | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| SR-F-F03 | ✓ | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| SR-F-F04 | - | ✓ | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| SR-F-F05 | - | ✓ | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| SR-F-F06 | - | - | ✓ | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| SR-F-F07 | - | - | ✓ | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| SR-F-F08 | - | - | ✓ | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| SR-F-F09 | - | - | ✓ | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| SR-F-F10 | - | - | - | ✓ | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| SR-F-F11 | - | - | - | ✓ | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| SR-F-F12 | - | - | - | - | ✓ | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| SR-F-F13 | - | - | - | - | ✓ | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| SR-F-F14 | - | - | - | - | ✓ | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| SR-F-F15 | - | - | - | - | ✓ | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| SR-F-F16 | - | - | - | - | - | ✓ | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| SR-F-F17 | - | - | - | - | - | ✓ | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| SR-F-F18 | - | - | - | - | - | ✓ | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| SR-F-F19 | - | - | - | - | - | - | ✓ | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| SR-F-F20 | - | - | - | - | - | - | - | ✓ | - | - | - | - | - | - | - | - |
| SR-F-F21 | - | - | - | - | - | - | - | - | ✓ | - | - | - | - | - | - | - |
| SR-F-F22 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | ✓ | - | - | - | - | - | - |
| SR-NF-PL01 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | ✓ | - | - | - | - | - | - |
| SR-NF-PL02 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | ✓ | - | - | - | - | - |
| SR-NF-PL03 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | ✓ | - | - |
| SR-NF-PL04 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | ✓ | - |
| SR-NF-PL05 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | ✓ |
| SR-NF-UI01 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | ✓ | - | - | - | - |
| SR-NF-P01 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | ✓ | - | - | - |

Capítulo 4

Diseño

En este capítulo se realiza una descripción completa del simulador desarrollado, incluyendo la arquitectura interna y los diferentes componentes software, que componen la herramienta descritos con anterioridad en [15].

La Sección 4.1 discute el estudio de la solución final, considerando las diferentes alternativas existentes para el diseño y desarrollo del simulador. En la Sección 4.1.1 se indica la solución elegida y la compara con las alternativas consideradas. La Sección 4.2 describe cada uno de los componentes que componen el simulador.

4.1 Estudio de la solución final

Debido a los requisitos de usuario establecidos en este proyecto (Sección 3.2.1), en donde se especificaba que el software no debía de ser instalado en el dispositivo del usuario, y debía de poder ser ejecutado en los navegadores web indicados, se ha decidido que el diseño del simulador esté enfocado como una aplicación web.

Existen diferentes modelos arquitectónicos a la hora de realizar el diseño de una aplicación web. La primera opción, es el modelo cliente-servidor en el cual las tareas se reparten entre dos roles: un proveedor que proporciona recursos o servicios que es llamado servidor, y un consumidor que contacta con el servidor con el objetivo de hacer uso de los recursos que este provee. Es un modelo distribuido en el que la lógica de negocio y el cómputo recae en el servidor, y el cliente provee la interfaz de usuario, realizando validaciones y procesos menores de la lógica de negocio. La segunda opción, es un modelo en el que toda la aplicación es ejecutada en el cliente, siendo únicamente necesario el servidor para el acceso al código de

la aplicación. Este modelo, posibilita incluso que el servidor no sea necesario en el caso de existir el código de la aplicación web en el cliente, pudiendo ser ejecutada sin la necesidad de internet. Ambos modelos, poseen una alta compatibilidad al hacer que las aplicaciones no sean dependientes del sistema operativo del usuario, sino del navegador web que este utiliza.

Debido a los requisitos de usuario establecidos en este proyecto (Sección 3.2.1), la segunda opción es la que cumple con la necesidad de no necesitar acceso a internet, de forma que la funcionalidad total del simulador quede en el dispositivo del usuario.

Una vez decidido el modelo de diseño, es necesario tener en cuenta las diferentes tecnologías a utilizar. Como se indicó en (Sección 3.2.1), es necesario que la aplicación sea diseñada siguiendo el lenguaje de marcado HTML5, que está formado por HTML, CSS y JavaScript. De este modo, es necesario contemplar los diferentes frameworks y bibliotecas existentes que ayudan a la hora de realizar el diseño de la aplicación, posibilitando el funcionamiento de esta tanto en ordenadores como en dispositivos móviles. Estas tecnologías descritas anteriormente en el Apartado 2.2, proporcionan distintas funcionalidades y enfoques a la hora de diseñar la aplicación, permitiendo la compatibilidad de la aplicación con la amplia mayoría de los navegadores web. En la Tabla 4.1, se analizan las funcionalidades y compatibilidades que proporcionan estas tecnologías, valorando si cumplen con los requisitos establecidos en este proyecto.

| Framework | Angular.js | jQuery.js | BootStrap | Dojo |
|---------------------------------------|------------|-----------|-----------|------|
| Funcionalidad requerida | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Ejecución en cliente | ✓ | ✓ | ✓ | |
| Compatibilidad navegadores requeridos | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Soporte plataformas móviles | ✓ | ✓ | ✓ | |

Tabla 4.1: Comparación de frameworks y bibliotecas.

De este modo, se puede observar como pese a que *Angular.js* nos proporciona la mayoría de funcionalidades requeridas, tiene una curva de aprendizaje bastante mayor que *jQuery*, lo cual hace que *jQuery* se imponga a la hora de su elección debido a que la ganancia de uso que proporcionaría *Angular.js* es inferior a este inconveniente. Por otro lado, sería interesante el uso de *Dojo* a la hora de utilizar una tecnología que nos proporcione funcionalidad y efectos en la interfaz de usuario y nos ayude a la captación de eventos, pero queda descartado al estar enfocado a aplicaciones que utilizan AJAX. De esta forma, *BootStrap* será la tecnología

elegida para dotar a la aplicación de la funcionalidad requerida a nivel de interfaz de usuario y complementando tanto a JavaScript como a jQuery.

4.1.1 Solución elegida

Para que los profesores de la asignatura Estructura de Computadores puedan hacer uso de una herramienta que sirva de ayuda para la explicación de los conceptos teóricos de la asignatura, y los estudiantes puedan utilizarla para comprender estos conceptos y realizar posteriormente las prácticas de la asignatura, se propone el diseño e implementación de una herramienta web que simule con realismo en funcionamiento de un procesador elemental con unidad de control microprogramable.

Este simulador, será desarrollado como una herramienta web debido a la portabilidad que proporciona, ya que podrá ser ejecutado sobre un gran número de diferentes dispositivos independientemente del sistema operativo que utilice, puesto que únicamente necesita un navegador web para su correcto funcionamiento. De esta forma, los profesores y estudiantes podrán hacer uso de la herramienta sin depender de su instalación en el dispositivo a utilizar, incluso pudiendo los estudiantes realizar las prácticas sobre dispositivos móviles.

Para lograr dicha portabilidad, el simulador ha sido desarrollado en HTML5 (HTML + JavaScript + CSS) haciendo posible su ejecución en cualquier plataforma (smartphones, tablet, PC, etc.) que pueden ejecutar Microsoft Edge, Mozilla Firefox, Google Chrome o Safari. Además, la herramienta depende de los siguientes frameworks/bibliotecas: JQuery, JQueryUI, JQuery Mobile, Knockout y BootStrap.

Por tanto, la solución elegida es capaz de unificar en una misma herramienta todas las funcionalidades requeridas para la enseñanza de Estructura de computadores con un alto nivel de detalle, con alta disponibilidad al facilitarse su como una herramienta web, y con una gran portabilidad puesto que podrá ser ejecutada sobre un gran número de diversos dispositivos, buscando en todo momento una solución sin la necesidad de servidor.

4.2 Arquitectura de WepSIM

La arquitectura de la solución presentada en este trabajo consta de tres elementos principales:

- Modelo hardware: permite definir el hardware a usar.

- Modelo software: permite definir el juego de instrucciones a utilizar.
- Kernel de simulación: simula el funcionamiento del hardware ejecutando el microcódigo/lenguaje máquina definido con anterioridad.

El modelo hardware permite definir los distintos elementos típicos de un computador (memoria principal, procesador, etc.) de una forma modular. La forma de definir estos elementos equilibra dos objetivos contrapuestos: es suficientemente completa como para imitar los principales aspectos de la realidad, pero es lo suficientemente mínima para facilitar su uso. Ante todo se persigue que sea una herramienta didáctica.

El modelo software permite definir el microcódigo y el ensamblador basado en este microcódigo de la forma tan intuitiva posible. El ensamblador a usar viene dado por un conjunto de instrucciones que puede ser definido por el usuario e intenta ser lo suficientemente flexible como para poder definir diferentes tipos y juegos de instrucciones, como por ejemplo MIPS o ARM.

El tercer elemento de la arquitectura propuesta es un kernel que toma como entrada el modelo hardware descrito y el modelo software de trabajo, y se encarga de mostrar el funcionamiento del hardware con el software dado.

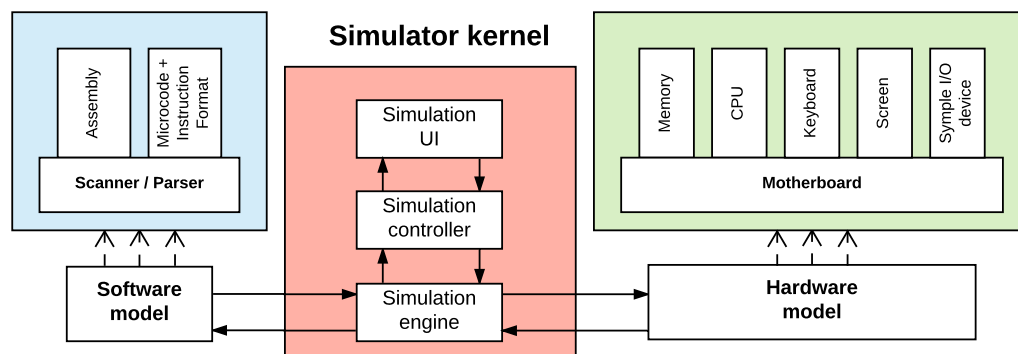


Figura 4-1: Arquitectura de WepSIM.

La Figura 4-1 resume la arquitectura de WepSIM. El punto de inicio es el modelo hardware que describe el procesador a ser simulado. Ello incluye el procesador, la memoria y algunos dispositivos de E/S: teclado, pantalla y un dispositivo de E/S simple que genera interrupciones. El modelo hardware describe el estado global del procesador. A partir del estado global del procesador, el kernel de simulación actualiza el estado en cada ciclo de reloj.

La unidad de control simulada almacena las señales de control de cada ciclo en una memoria

de control. La memoria de control tiene todos los microprogramas para las instrucciones con las que trabaja el procesador, y el fetch para leer la instrucción de memoria y decodificarla.

El microcódigo (el contenido de la memoria de control) junto con el formato de cada instrucción (campos de la instrucción y su longitud) se describe en un fichero de texto. El modelo software lee este fichero, lo traduce a binario y lo carga en el procesador. La definición del lenguaje ensamblador a utilizar se describe junto con el microcódigo, y el modelo software permite traducir a binario programas escritos en dicho ensamblador.

El kernel de simulación pregunta al subsistema del modelo software por el microcódigo definido, la descripción del formato de instrucción y el contenido de la memoria principal. Los binarios se cargan en los elementos del modelo hardware, y a continuación el kernel de simulación actualiza el estado global en cada ciclo de reloj.

WepSIM dispone de un controlador de simulación que se encarga de actualizar el ciclo de reloj y mostrar el estado global. El subsistema de interfaz de simulación actualiza la interfaz de usuario. Cuando el usuario usa la interfaz de usuario para solicitar una operación, el subsistema de interfaz de simulación traslada la petición al controlador de simulación. Como se puede ver, se usa un Modelo- Vista-Controlador (MVC) básico para la arquitectura de WepSIM.

4.2.1 Modelo hardware

El modelo hardware que usa WepSIM permite definir los distintos elementos típicos de un computador (memoria principal, procesador, etc.) de una forma modular y de manera que sea posible añadir, quitar o modificar estos elementos.

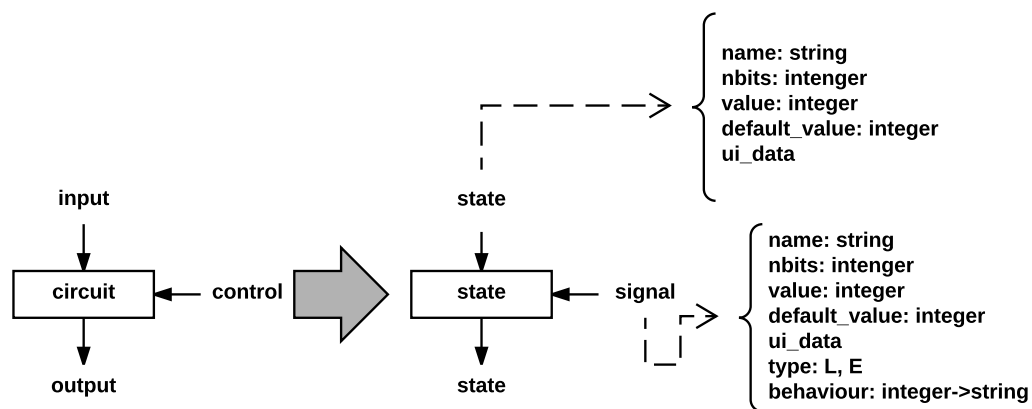


Figura 4-2: Modelado del hardware.

La figura 4-2 introduce el modelo propuesto. Cada elemento del circuito se describe como

una caja negra con posibles entradas, posibles salidas y señales de control (que controlan las posibles transformaciones de las entradas a las salidas). El subsistema del modelo hardware transforma esta caja negra en dos conjuntos de objetos: estados y señales. Un estado tiene un identificador (el nombre), el valor (un valor entero) y un valor inicial (el valor por defecto). Los valores que puede tomar son valores naturales dentro de un rango, dado por el número de bits con los que se representa el estado. Una señal es un estado especial que controla el valor de otros estados o señales. Hay dos atributos asociados a las señales (y no a los estados): el tipo de señal (por nivel o por flanco) y su comportamiento. Para cada valor de señal una cadena de caracteres describe en un Lenguaje Simple lo que la señal mueve o transforma. Este Lenguaje Simple se compone principalmente de instrucciones que representan las operaciones elementales.

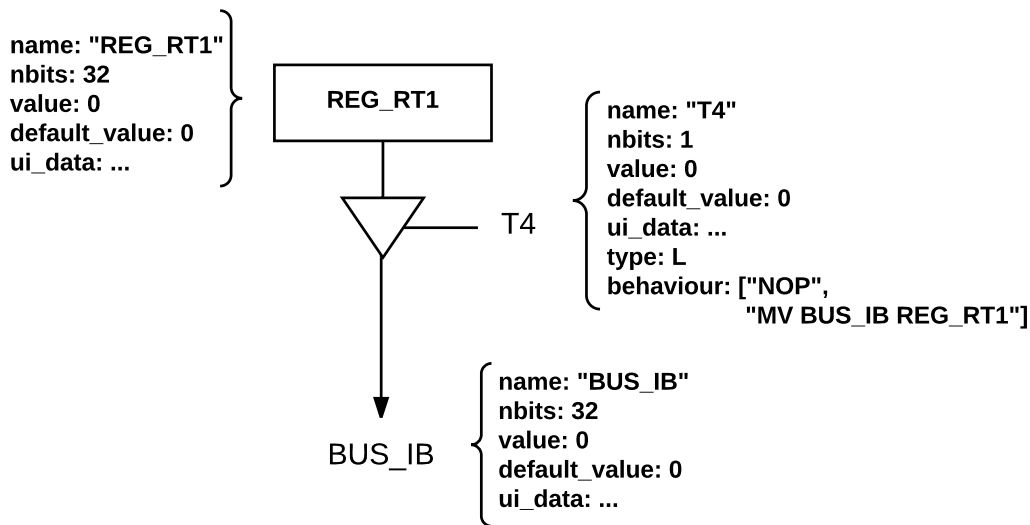


Figura 4-3: Ejemplo de modelado de una puerta triestado.

Las figuras 4-3 y 4-4 muestran dos ejemplos: un triestado y un registro. El triestado controla dos estados: el estado del bus al que se conecta BUS IB y el estado del registro de entrada, REG RT1 en este caso. Ambos representan el valor a la salida de la puerta (BUS IB) y el valor del registro RT1 (REG RT1). La señal T4 se encarga de indicar cuándo el valor del registro RT1 se envía a la salida. Esta señal T4 es una señal por nivel (tipo: L), con valor cero no tiene efecto (comportamiento "NOP"). Cuando el valor de la señal es uno entonces el comportamiento es el de copiar el valor del registro RT1 a la salida (comportamiento "MV BUS IB REG RT1").

El ejemplo con el registro (figura 4-4) es similar. En este caso trabaja con dos estados: el

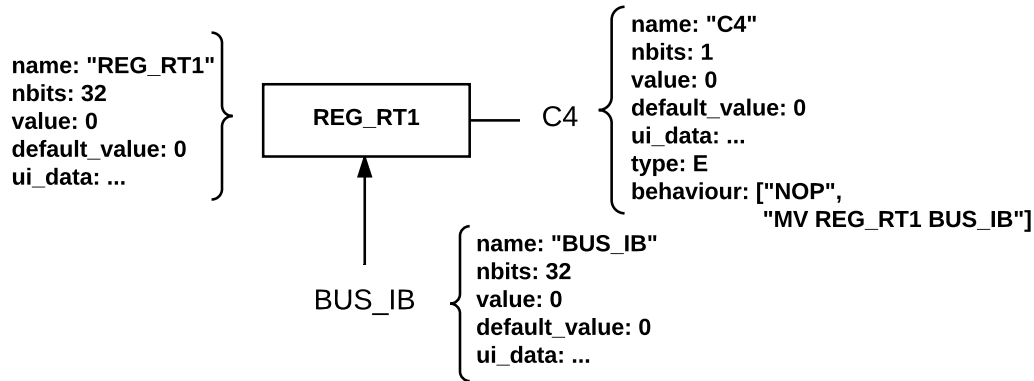


Figura 4-4: Ejemplo de modelado de un registro.

contenido del registro RT1 y el contenido situado a la entrada (BUS IB). La señal C4 controla cuándo se almacena en el registro RT1 el valor que hay en la entrada. La diferencia está en el tipo de señal: C4 es una señal por flanco de bajada (tipo: E), por lo que al final del ciclo de reloj (pasa de uno a cero) si la señal vale uno entonces el comportamiento es el de copiar el valor situado a la entrada al registro (comportamiento "MV REG RT1 BUS IB").

El Lenguaje Simple usado para definir los comportamientos añade a las operaciones elementales otras operaciones necesarias. Por ejemplo disparar una señal ("FIRE C4") que ayuda a propagar el efecto de una señal al re-evaluar la señal inmediata que podría verse afectada. Otro ejemplo lo encontramos en dos operaciones que pueden ser muy útiles a la hora de depurar: imprimir el valor de un estado ("PRINT E BUS IB") e imprimir el valor de una señal ("PRINT S C4").

4.2.2 Modelo software

Una vez definido el procesador elemental usando el modelo hardware propuesto, toca describir el conjunto de instrucciones que es capaz de ejecutar así como el microcódigo que lo orquesta. En un fichero de texto se define el formato de las instrucciones máquina junto con el cronograma asociado a la ejecución de cada una de las instrucciones máquina. La Figura 4-5 muestra un ejemplo de definición para la instrucción li (load immediate), que almacena un valor inmediato en un registro.

El fichero con el cronograma de fetch y todos los cronogramas de las instrucciones define el microcódigo para la plataforma WepSIM. El simulador permite la definición de diferentes

```

li reg val
{
    co=000010,
    nwords=1,
    reg=reg(25,21),
    val=inm(15,0),
    {
        (SE=0, OFFSET=0, SIZE=10000, SE=1, T3=1,
        LE=1, MR=0, SELE=10101, A0=1, B=1, C=0)
    }
}

```

Figura 4-5: *Ejemplo de formato de instrucción.*

juegos y formatos de instrucciones. Inicialmente se ha implementado un subconjunto de las instrucciones del MIPS, pero es posible definir instrucciones de otros conjuntos de forma similar. En este fichero se pueden asignar códigos simbólicos a los registros del banco de registros, lo que permite que en los programas escritos en ensamblador se puedan usar dichos símbolos (por ejemplo, registro \$t3 en la figura 4-6).

```

.text
main:  li    $t3 8
        li    $t5 10
        add   $t6 $t3 $t5

```

Figura 4-6: *Ejemplo de código fuente en ensamblador.*

El campo “co” identifica el código de instrucción máquina, que es un número binario de 6 bits. Esto permite definir hasta 64 instrucciones distintas. Dado que los últimos 4 bits de la instrucción pueden usarse para seleccionar la operación en la ALU, es posible seleccionar hasta 16 operaciones aritmético-lógicas con un mismo código de instrucción, por lo que se podrían tener 79 (63+16) instrucciones en total.

Cuando WepSIM carga el microcódigo, cada código de instrucción tiene asociado una dirección de comienzo en la memoria de control donde se almacena el cronograma asociado. Esta tabla con dos columnas (el código de instrucción y su dirección de comienzo asociada en la memoria de control) se carga en la ROM co2microAddr mostrada en la figura 2-8.

El campo “nwords” define cuantas palabras precisa la instrucción para su definición y carga en memoria. Una palabra en WepSIM son 4 bytes.

Para cada campo de la instrucción se define el bit inicial, el bit final (ambos incluidos) y el

tipo de campo (registro, valor inmediato, dirección absoluta y dirección relativa a PC). Una vez definido el formato, se definen todas las microinstrucciones que necesita la instrucción máquina definida para su ejecución. Todas las microinstrucciones se encuentran encerradas entre llaves y cada microinstrucción está formada por una lista de tuplas (señal, valor) encerradas entre paréntesis. Para la instrucción definida en la figura 4-5 se precisa de una sola microinstrucción, en la que se indican qué señales se activan durante un ciclo de reloj. Para las señales no indicadas se asume que su valor es 0 durante el ciclo de reloj correspondiente.

Una vez cargado el microcódigo en WepSIM, es posible cargar cualquier fichero ensamblador que haya sido codificado usando las instrucciones máquina definidas anteriormente en el microcódigo.

En la figura 4-6 se muestra un ejemplo de código fuente en ensamblador que se puede usar en WepSIM. Este ejemplo en particular muestra un código estilo MIPS. Para que un programa en ensamblador pueda utilizar la instrucción de carga inmediata *li* (load immediate) y de suma *add* (addition), deben haber sido definidas previamente en el microcódigo. WepSIM puede comprobar los errores de sintaxis y construir el binario mediante el rellenado de los campos descritos en la definición del microcódigo correspondiente a la instrucción. La Figura 4-7 muestra un ejemplo de traducción a binario para la instrucción *li \$2 5* en función del formato definido en la figura 4-5. También se debe haber definido en el fichero de microcódigo el valor del registro asociado a la etiqueta *\$2* (00100 en este caso).

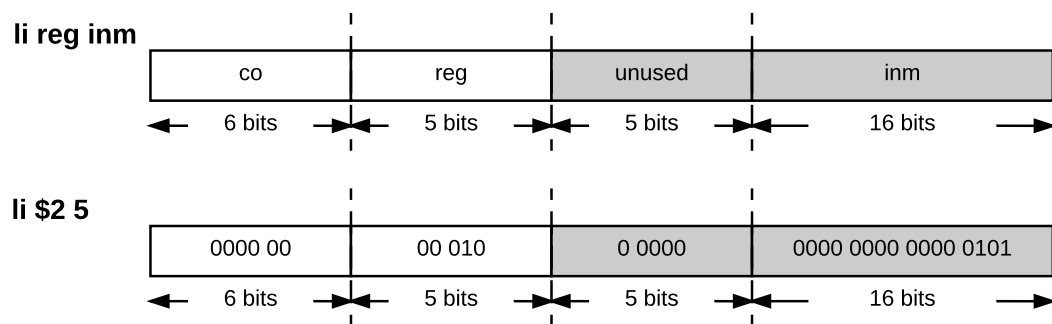


Figura 4-7: Formato de instrucción descrito en el microcódigo y ejemplo de su traducción en binario.

Una de las grandes ventajas del simulador WepSIM es que no está limitado a un conjunto de instrucciones concreto. Se puede definir un amplio conjunto de instrucciones de procesadores reales o inventados. Se puede usar para añadir por ejemplo, a un conjunto de instrucciones MIPS, otras instrucciones diferentes no incluidas en dicho conjunto de instrucciones.

4.2.3 Kernel del simulador

El kernel del simulador, es el componente que integra la interfaz de usuario del simulador, el controlador del simulador, y el motor de simulación, siendo el encargado de hacer las funciones de controlador de la herramienta gestionando las comunicaciones de la interfaz de usuario con los modelos hardware y software.

De esta forma cuando el usuario interacciona con la interfaz gráfica, el módulo encargado de la interfaz genera eventos que identifican las acciones que el usuario realiza. Estos eventos son generados a modo de peticiones al controlador de la simulación, que se encarga de identificar el evento generado, comprobar el contexto en el cual se encuentra, y enviar la acción correspondiente a realizar al motor del simulador. El motor del simulador, se encarga de comunicarse con los modelos hardware y software, de forma que estos puedan ejecutar correctamente la acción solicitada (Figura 4-8).

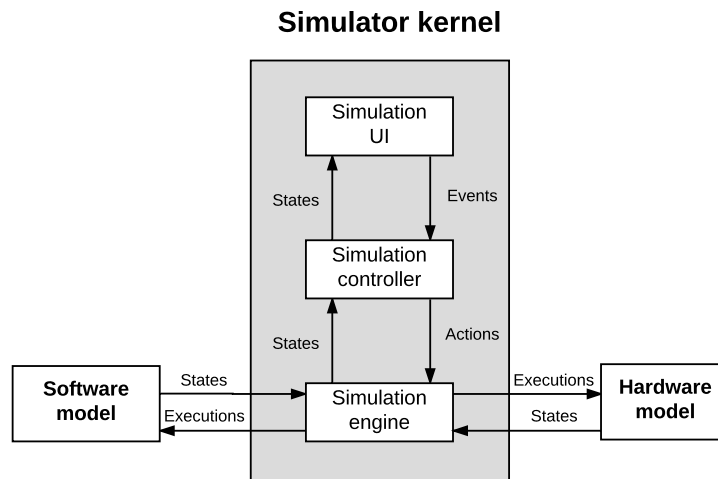


Figura 4-8: *Arquitectura del kernel del simulador.*

Por ejemplo, si el usuario selecciona la ejecución de un ciclo de reloj, la interfaz de usuario genera el evento correspondiente. El controlador del simulador, se encarga de identificar el evento, verificar que se cumplen todas las condiciones para poder ejecutarse un ciclo de reloj comprobando diferentes valores del estado del simulador. En caso de poder ser realizada la ejecución del ciclo de reloj, envía la orden al motor del simulador que se encarga de comunicarse con el modelo hardware, realizando la ejecución de un ciclo de reloj actualizando los componentes del modelo hardware. Por último, la interfaz de usuario consulta el estado del modelo hardware actualizando la información necesaria para ser mostrada al usuario.

Capítulo 5

Implementación y despliegue

Este capítulo trata la implementación y despliegue del software. En cuanto a la implementación del sistema, se explican las partes más complicadas del código en (Sección 5.1, *Implementación*). Por otro lado, explicamos los pasos necesarios para desplegar el sistema final (Sección 5.2, *Despliegue*)

5.1 Implementación

Como hemos explicado en el Capítulo 3, *Análisis*, hemos implementado el simulador utilizando el lenguaje de programación JavaScript junto con HTML5, CSS y las bibliotecas/frameworks JQuery, JQueryUI, JQuery Mobile, Knockout y BootStrap. El motor de simulación es el encargado de ejecutar cada uno de los ciclos de reloj del simulador, tomando como entradas tanto el modelo hardware como el modelo software, pero el desarrollador ha debido de diseñar e implementar el algoritmo que posibilita esta ejecución.

Además, hemos trabajado en conseguir una herramienta que sea capaz de generar la memoria de control mediante la definición del juego de instrucciones por parte del usuario, y de generar el código binario asociado al código ensamblador definido por el usuario; el cual depende del juego de instrucciones definido previamente. Para ello, se han diseñado e implementado dos compiladores diferentes, capaces de generar los binarios correspondientes además de las estructuras de datos necesarias para ayudar al motor de simulación a lo largo de la ejecución.

Como resultado de este diseño e implementación, el código fuente de la herramienta está compuesto por una serie de ficheros que definen las funcionalidades y componentes anteriormente citados. Por ello, es necesario explicar la estructura de ficheros que componen el simula-

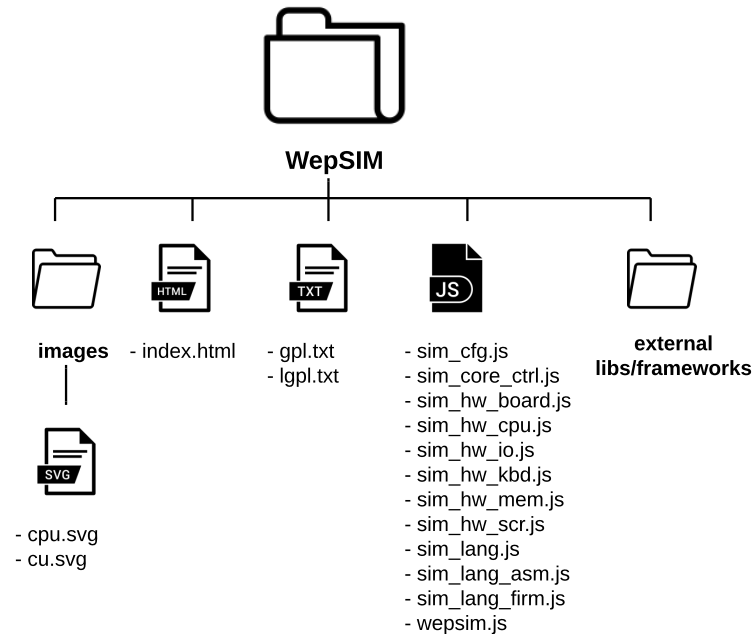


Figura 5-1: Estructura de ficheros.

dor y las dependencias que existen entre sí. De esta forma, en 5-1 podemos ver los ficheros que componen la herramienta web, los cuales tienen una serie de dependencias indicadas en 5-2.

Los ficheros que componen WepSIM son detallados a continuación:

- **index.html:** este fichero se encarga de la vista de la herramienta, generando la interfaz de usuario de la herramienta.
- **gpl.txt y lgpl.txt:** estos ficheros contienen la especificación de las licencias del software.
- **sim_cfg.js** este fichero contiene las estructuras de datos de la configuración de la herramienta.
- **sim_core_ctrl.js:** este fichero contiene la implementación del motor de simulación de la herramienta.
- **sim_core_ui.js:** este fichero contiene la implementación del motor de la interfaz de usuario de la herramienta.
- **sim_hw_cpu.js:** este fichero contiene la definición del modelo hardware de la cpu del simulador.

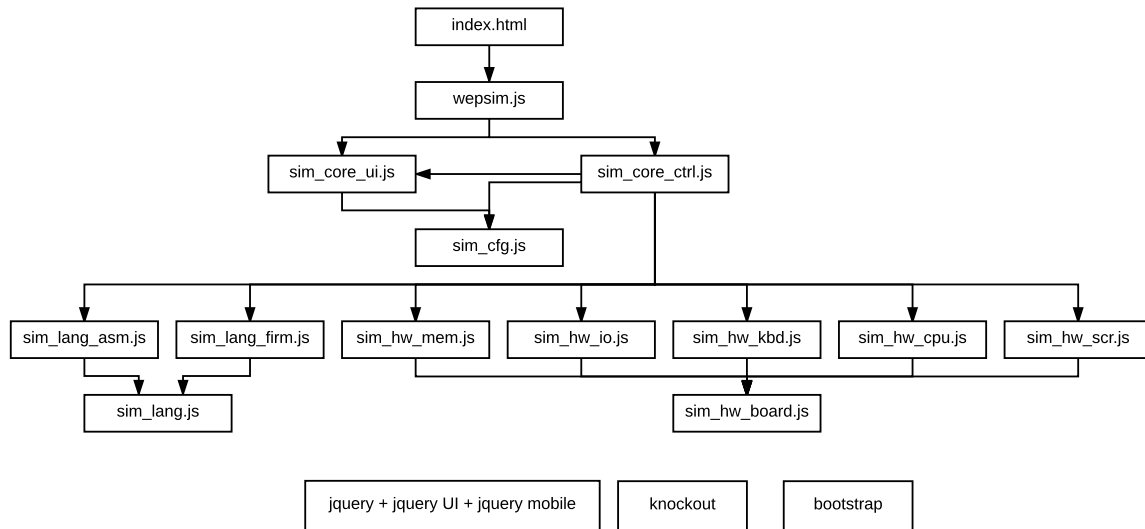


Figura 5-2: Dependencias entre ficheros.

- **sim_hw_io.js:** este fichero contiene la definición del modelo hardware del módulo de generación de interrupciones del simulador.
- **sim_hw_kbd.js:** este fichero contiene la definición del modelo hardware del módulo del teclado del simulador.
- **sim_hw_scr.js:** este fichero contiene la definición del modelo hardware de la memoria principal del simulador.
- **sim_hw_mem.js:** este fichero contiene la definición del modelo hardware de la pantalla del simulador.
- **sim_lang.js:** este fichero contiene la implementación de las funciones principales del parser de ficheros de la herramienta.
- **sim_lang_asm.js:** este fichero contiene la implementación del compilador de código ensamblador de la herramienta.
- **sim_lang_firm.js:** este fichero contiene la implementación del compilador de firmware de la herramienta.
- **images/cpu.svg:** este fichero contiene la definición de la imagen vectorial de la cpu de la herramienta.

- **images/cpu.svg:** este fichero contiene la definición de la imagen vectorial de la unidad de control de la herramienta.
- **external folder:** este directorio contiene las bibliotecas y frameworks que necesita el simulador para su correcto funcionamiento, como son JQuery, JQueryUI, JQuery Mobile, Knockout y BootStrap.

Para comprender funcionamiento tanto de los dos compiladores utilizados (compilador de firmware y compilador de ensamblador) como del kernel del simulador, se puede observar en 5.1, mientras que en 5.2 podemos ver el proceso de compilación del código ensamblador definido por el usuario en función de la memoria de control previamente generada, detallando el proceso de compilación del segmento de datos en 5.3 y el proceso de compilación del segmento de texto en 5.4. En 5.5 podemos ver el pseudocódigo de como se realiza una simulación, realizando la comprobación de segmentos de memoria, tipo de simulación, y ejecución del ciclo o instrucción correspondiente.

El proceso de compilación del juego de instrucciones (Figura 5.1) se realiza mediante un análisis sintáctico basado en la técnica *LEX and YACC*, que queda perfectamente descrita en [16]. De este modo, el proceso de compilación queda dividido en tres bloques importantes: instrucciones, nombrado de registros y pseudoinstrucciones. En primer lugar, se realiza la lectura del bloque de instrucciones, en donde se comprueba cada uno de los campos y parámetros que la conforman para posteriormente generar el binario asociado a cada ciclo de reloj. Después, se realiza la lectura del banco de registros, donde se forma el par *id,nombre*, pudiendo realizar el nombrado deseado de los distintos registros que lo componen. Por último, se realiza la lectura de pseudoinstrucciones. Estas instrucciones no pertenecen al lenguaje, sino que están compuestas por instrucciones del lenguaje, pudiendo el usuario utilizar técnicas de alto nivel en donde con una única línea de código, genere más de una instrucción.

Pseudocódigo 5.1 Proceso de compilación del juego de instrucciones.

```

1: function COMPILE_FIRMWARE(context )
2:   token = getToken();
3:   firmware = null;
4:   instructions = null;
5:   registers = null;
6:   pseudoinstructions = null;
7:   while (!is_registers(token) and token != null) do
8:     instruction = null;
9:     instructions[signature]=readSignature(getNextToken());
10:    instructions[co]=readCo(getNextToken());
11:    if (getNextToken() == COP) then
12:      instruction[cop]=readCop(getNextToken());
13:    end if
14:    while (is_Field(getNextToken())) do
15:      instructions[field].add=readField(getToken());
16:    end while
17:    while (is_microcode(getNextToken())) do
18:      instructions[microcode].add=readCycle(getToken());
19:    end while
20:    firmware.add(instructions);
21:  end while
22:  if (is_registers(getToken())) then
23:    registers = readRegisters(getToken());
24:  end if
25:  if (is_pseudoInstructions(getToken())) then
26:    pseudoinstructions = readPseudoinstructions(getToken());
27:  end if
28:  firmware.add(instructions);
29:  firmware.add(registers);
30:  firmware.add(pseudoinstructions);
31:  Return firmware;
32: end function

```

El proceso de compilación del código ensamblador (Figura 5.1) está basado, al igual que el compilador del juego de instrucciones, en la técnica de compilación *LEX and YACC*. Este proceso, está dividido en dos etapas: segmentos de datos y segmento de texto.

En la etapa de compilación del segmento de datos, se realiza el proceso de lectura y compilación de las diferentes directivas definidas por el usuario. En primer lugar, se realiza la identificación de las diferentes etiquetas que identifican a las directivas y que serán utilizadas posteriormente en el segmento de texto. Una vez identificadas estas etiquetas, se procede a la generación del binario asociado a este segmento, el cual depende directamente del tipo de directiva utilizado y del tamaño de la directiva.

Pseudocódigo 5.2 Proceso de compilación de código ensamblador.

```

1: function COMPILE_ASSEMBLY( context,datosCU)
2:   dataSegment = null;
3:   textSegment = null;
4:   mainMemory = null;
5:   if (!is_data_segment(getToken())) then
6:     Return;
7:   end if
8:   dataSegment = read_data_segment(context[dSegment]);
9:   if (!is_text_segment(getToken())) then
10:    Return;
11:  end if
12:  textSegment = read_text_segment(context[tSegment]);
13:  mainMemory.add(dataSegment);
14:  mainMemory.add(textSegment,dataSegment.labels);
15:  Return mainMemory;
16: end function

```

En la etapa de compilación del segmento de texto, se realiza el proceso de compilación de las diferentes instrucciones ensamblador definidas por el usuario. Por ello, es necesario el uso del juego de instrucciones definido previamente, ya que la generación del binario de la instrucción depende de la definición previa. En primer lugar, se realiza la búsqueda de las diferentes etiquetas empleadas en este segmento, identificando las nuevas etiquetas definidas a las anteriores definidas en el segmento de datos, para la cambiar la etiqueta por el valor de la dirección de memoria asociada a la etiqueta. Una vez realizado este proceso, se procede a la

compilación de cada una de las instrucciones, buscando para cada instrucción del segmento de texto una instrucción definida en el juego de instrucciones que cumple con la sintaxis. En caso de existir la instrucción, se procede a la generación del binario asociado, comprobando el valor de cada uno de los campos. Este proceso se realiza para cada una de las operaciones definidas en este segmento. Una vez traducidas todas las instrucciones, se genera la memoria principal asociada al código definido.

Por último, se indica el proceso de simulación de la herramienta. Este proceso es realizado en el kernel del simulador como ha sido explicado anteriormente (Sección 4.2.3). Como podemos observar en el pseudocódigo 5.5, en primer lugar se realiza la petición de ejecución. El controlador del simulador, comprobaría el contexto (*breakpoints*, final de segmento, etc.) verificando si la ejecución es posible. En caso de ser posible, identificaría el tipo de simulación solicitada, llamando a la función correspondiente. Si la ejecución solicitada es de una microinstrucción, el motor de simulación únicamente generaría un ciclo de reloj, enviándolo al modelo hardware para su ejecución y actualizando posteriormente los valores mostrados en la interfaz de usuario. La ejecución de una instrucción completa se realiza ejecutando en bucle la secuencia de microinstrucciones correspondientes hasta que el registro de microdirección apunta a la dirección de comienzo del ciclo *FETCH*, que indicaría el comienzo de la próxima instrucción, o apunta a una dirección de memoria fuera del rango del segmento de texto, lo cual indica que la simulación del código ensamblador ha finalizado.

En [17] se presenta el manual completo de usuario de la herramienta, que incluye la especificación del modelo hardware implementado y la explicación de uso del simulador, indicando algunos ejemplos docentes para aprender el uso de esta herramienta y poder comprender mejor el funcionamiento de los distintos componentes que la forman.

Pseudocódigo 5.3 Proceso de compilación de código ensamblador: segmento de datos.

```
1: function READ_DATA_SEGMENT(context)
2:   labels = null;
3:   token = getToken();
4:   while (!is_End(getNextToken())) do                                ▷ Check Labels
5:     if (isLabel(getToken())) then
6:       labels.add(getLabel(getToken()));
7:     end if
8:   end while
9:   dataSegment[labels].add(labels);
10:  token = getFirstToken();
11:  for (i in context[directives]) do                                ▷ Read Directives
12:    possible_datatype = i;
13:    if (possible_datatype == ".byte") then dataSegment[directives].add(readByte(i));
14:    end if
15:    if (possible_datatype == ".half") then dataSegment[directives].add(readHalf(i));
16:    end if
17:    if (possible_datatype == ".word") then dataSegment[directives].add(readWord(i));
18:    end if
19:    if (possible_datatype == ".space") then dataSegment[directives].add(readSpace(i));
20:    end if
21:    if (possible_datatype == ".ascii") then dataSegment[directives].add(readAscii(i));
22:    end if
23:    if (possible_datatype == ".asciiz") then dataSegment[directives].add(i);
24:    end if
25:    if (possible_datatype == ".align") then dataSegment[directives].add(readAlign(i));
26:    end if
27:  end for
28:  Return dataSegment
29: end function
```

Pseudocódigo 5.4 Proceso de compilación de código ensamblador: segmento de texto.

```
1: function READ_TEXT_SEGMENT(context,labels)
2:   for (i in labels do                                     ▷ Read Labels
3:     replaceLabel(context, i);                             ▷ Replace Label in Text Segment
4:   end for
5:   for (i in context[instructions]) do                     ▷ Read Instructions
6:     auxInstruction = fillFields(i);
7:     auxBinary = null;
8:     if (!isInstruction(auxInstruction[0])) then             ▷ Check if instruction exist
9:       Return;
10:    end if auxBinary = generateBinary(auxInstruction);
11:    if (auxBinary == null) then
12:      Return;
13:    end if textSegment.add(auxBinary);
14:  end for
15:  Return textSegment
16: end function
```

Pseudocódigo 5.5 Proceso de simulación.

```
1: function RUN_SIMULATION( )
2:   if (!possible_execute()) then
3:     Return;
4:   end if
5:   change_play_button();
6:   execute_simulation_inchain();
7: end function
8: function EXECUTE_SIMULATION_INCHAIN( )
9:   if (end_code()) then
10:    Return;
11:   end if
12:   if (is_breakpoint()) then
13:    Return;
14:   end if
15:   if (execute_mode == microInstruction) then
16:     execute_microInstruction();
17:   end if
18:   if (execute_mode == instruction) then
19:     execute_instruction();
20:   end if
21: end function
22: function EXECUTE_MICROINSTRUCTION( )
23:   if (!possible_execute()) then
24:     Return;
25:   end if
26:   compute_general_behaviour(CLOCK);                                ▷ Execute Cycle
27:   update_UI();
28: end function
29: function EXECUTE_INSTRUCTION( )
30:   if (!possible_execute()) then
31:     Return;
32:   end if
33:   do
34:     compute_general_behaviour(CLOCK);                                ▷ Execute Cycle
35:   while (reg_microaddr!=0 and mem_control[microAddr]!=undefined)    ▷ Check Next Cycle
36:     update_UI();                                                    ▷ Update User Interface
37: end function
```

5.2 Despliegue

En esta sección se presenta el despliegue de la herramienta, el cual queda dividido en tres partes: especificaciones técnicas recomendadas, el proceso de despliegue del software para que sea accesible, y por último el proceso de ejecución de la herramienta.

Las especificaciones técnicas recomendadas para que el usuario final obtenga la mejor experiencia posible con la herramienta:

- **Sistema Operativo:** Ubuntu 16.04.2 LTS (Linux distribution) / Windows 10 / MacOS 10.12.5.
- **Procesador:** Intel(R) Core(TM) i3 CPU 6300 @3.8GHz o superior.
- **Random-Access Memory (RAM):** 4 GB o superior.
- **Almacenamiento:** 1 GB de espacio libre en el disco duro (recomendado para el navegador web).
- **Red:** La conexión a internet no es necesaria para la ejecución de la herramienta, únicamente para el acceso a ella.
- **Software:** Los siguientes navegadores web son los recomendados para el uso de la herramienta:
 1. Mozilla Firefox 45+.
 2. Google Chrome 50+.
 3. Microsoft Edge 30+.
 4. Safari 10+.

Para el proceso de despliegue de la herramienta, se requiere que el usuario disponga de un servidor web *Apache* o *Nginx* instalado en su computador para que el software sea accesible. Una vez instalado el servidor web, se deben de seguir los siguientes pasos:

1. Acceder al directorio establecido en el servidor web para alojar el simulador.
2. Clonar el repositorio del simulador para obtener el código fuente del simulador:

git clone https://github.com/wepsim/wepsim.git

3. Reiniciar el servicio del servidor web para que realice los cambios pertinentes.

Por último, el usuario podrá acceder a la herramienta mediante un navegador web de los citados anteriormente. Para ello, el usuario deberá de indicar en el navegador la dirección en la cual ha sido publicada la herramienta, no siendo necesaria la conexión a internet en caso de estar publicada en el mismo computador (*localhost*).

En caso de no desear el usuario realizar este proceso, puede acceder a la herramienta de forma inmediata accediendo a la dirección:

`https://wepsim.github.io/wepsim/`.

Capítulo 6

Verificación, validación y evaluación

Este capítulo detalla la verificación, validación y evaluación del proyecto. En primer lugar, presentamos la verificación y validación del simulador (Sección 6.1, *Verificación y validación*), y detallamos una serie de pruebas que nos permitieron verificar que habíamos cumplido todos los requisitos establecidos en el Capítulo 3 (*Análisis*). Después de esto, mostramos la validación de los resultados de las simulaciones, demostrando que el simulador realiza simulaciones precisas y realistas.

Para la realización de las simulaciones, hemos tomado la definición de un juego de instrucciones base proporcionado por el coordinador de la asignatura Estructura de Computadores, pudiendo así validar que el funcionamiento del simulador es correcto al obtener los resultados esperados en cada una de las instrucciones y códigos simulados en la herramienta.

6.1 Verificación y validación

El principal objetivo de esta sección es verificar que todos los requisitos detallados en el Capítulo 3 (*Análisis*) han sido cumplidos. Además, validamos los resultados obtenidos con WepSIM, comparándolos con los resultados teóricos esperados de la definición del juego de instrucciones de la asignatura Estructura de Computadores y los ejercicios especificados en el libro [11].

En la ingeniería de software, la verificación y validación son los procesos de comprobar que un sistema de software cumple con las especificaciones y que cumple con su propósito. Como se explica en el Capítulo 3 (*Análisis*), el cliente fija inicialmente los requisitos deseados para el producto final (requisitos del usuario). A partir de ahí, los analistas especifican los requisitos de

software (requisitos funcionales y no funcionales). Para verificar que se cumplen los requisitos del proyecto, se necesitan procesos de verificación y validación (ver Figura 6-1).

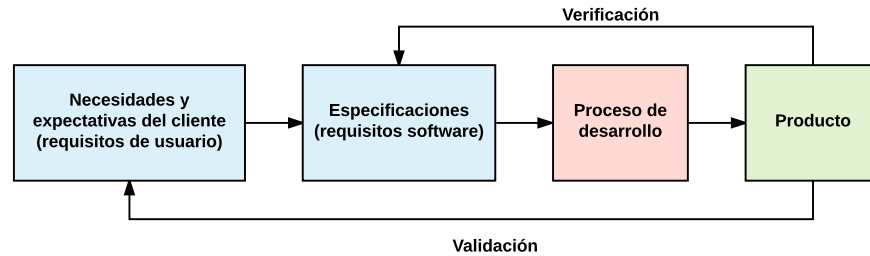


Figura 6-1: *Verificación y validación software.*

Verificación Software Es el proceso de evaluación de los productos de trabajo (no el producto final real) de una fase de desarrollo para determinar si cumplen con los requisitos especificados para esa fase (los requisitos de software). *Validación software* es el proceso de evaluación del producto final al final del proceso de desarrollo para determinar si satisface los requisitos especificados por el usuario al inicio del proyecto [18].

6.1.1 Pruebas de verificación

Con el fin de realizar las pruebas de verificación, hemos seguido un proceso dinámico durante la fase de desarrollo del software. Con estas pruebas queríamos responder a la pregunta: “¿Estamos construyendo el producto correctamente?”. La tabla 6.1 proporciona la plantilla utilizada para los test de verificación. Tenga en cuenta que el formato del atributo ID es VET-XX, donde XX indica el número de test de verificación.

| | |
|------------------------|---|
| ID | Test ID. |
| Nombre | Nombre del test. |
| Requisitos | Requisitos de software cumplidos con este test. |
| Descripción | Descripción del test. |
| Precondiciones | Las condiciones que siempre deben ser verdad antes de realizar el test. |
| Procedimiento | Una secuencia fija, paso a paso, de las actividades realizadas por el test. |
| Postcondiciones | Las condiciones que siempre deben ser verdaderas justo después de realizar el test. |
| Evaluación | <i>OK</i> or <i>Error</i> . |

Tabla 6.1: *Plantilla de pruebas de verificación.*

A continuación, especificamos las pruebas de verificación.

| | |
|------------------------|--|
| ID | VET-01. |
| Nombre | Plataforma. |
| Requisitos | SR-NF-PL01, SR-NF-PL02 |
| Descripción | Verificar que el software puede ser utilizado en los navegadores especificados en los requisitos. |
| Precondiciones | <ol style="list-style-type: none"> 1. Utilizar un computador con sistema operativo Ubuntu 16.04 / Windows 10 / MacOS 10.2.5 . 2. Tener instalados los navegadores Microsoft Edge 30+, Mozilla Firefox 45+, Google Chrome 50+ o Safari 10+. |
| Procedimiento | <ol style="list-style-type: none"> 1. Abrir el software en cualquiera de los navegadores web especificados. 2. Generar firmware. 3. Generar memoria principal. 4. Ejecutar simulación. |
| Postcondiciones | La simulación ha sido completada satisfactoriamente sin ningún error de ejecución debido a la plataforma . |
| Evaluación | OK |

Tabla 6.2: Test de verificación VET-01.

| | |
|------------------------|--|
| ID | VET-02. |
| Nombre | Ejecución local. |
| Requisitos | SR-NF-PL03, SR-NF-PL04 |
| Descripción | Verificar que el software es ejecutado en local sin la necesidad de conexión a internet. |
| Precondiciones | <ol style="list-style-type: none"> 1. No tener acceso a Internet. 2. Tener el código fuente de la herramienta descargado en local. |
| Procedimiento | <ol style="list-style-type: none"> 1. Abrir el software en cualquiera de los navegadores web especificados. 2. Generar firmware. 3. Generar memoria principal. 4. Ejecutar simulación. |
| Postcondiciones | La simulación ha sido completada satisfactoriamente sin ningún error de ejecución debido a la conexión de red. |
| Evaluación | OK |

Tabla 6.3: Test de verificación VET-02.

| | |
|------------------------|---|
| ID | VET-03. |
| Nombre | Lenguaje de programación HTML5. |
| Requisitos | SR-NF-PL05 |
| Descripción | Verificar que el software ha sido desarrollando utilizando HTML5. |
| Precondiciones | 1. Tener el código fuente de la herramienta descargado en local. |
| Procedimiento | 1. Comprobar el código de los archivos fuente del simulador. |
| Postcondiciones | El simulador ha sido desarrollado mediante el lenguaje de programación HTML5. |
| Evaluación | OK |

Tabla 6.4: *Test de verificación VET-03.*

| | |
|------------------------|--|
| ID | VET-04. |
| Nombre | Interfaz de usuario. |
| Requisitos | SR-NF-UI01 |
| Descripción | Verificar que la interfaz del simulador es compatible tanto con pc como con plataformas móviles. |
| Precondiciones | 1. Disponer de un pc y de un dispositivo móvil. 2. Los dispositivos deben tener instalados los navegadores web especificados previamente. |
| Procedimiento | 1. Abrir el software en cualquiera de los navegadores web especificados. 2. Generar firmware. 3. Generar memoria principal. 4. Ejecutar simulación. |
| Postcondiciones | La interfaz del simulador es compatible tanto como PC como con dispositivos móviles, visualizándose correctamente en cualquier pantalla de la herramienta. |
| Evaluación | OK |

Tabla 6.5: *Test de verificación VET-04.*

| | |
|------------------------|---|
| ID | VET-05. |
| Nombre | Tiempo medio por ciclo de reloj. |
| Requisitos | SR-NF-P01 |
| Descripción | Verificar que el tiempo medio por ciclo de reloj del simulador no supera 0,1 segundos. |
| Precondiciones | 1. Disponer de un dispositivo con una versión de navegador web igual o superior a los indicados anteriormente. |
| Procedimiento | 1. Abrir el software en cualquiera de los navegadores web especificados. 2. Generar firmware. 3. Generar memoria principal utilizando un código ensamblador que utiliza cada una de las partes de la arquitectura del simulador. 4. Ejecutar simulación midiendo el tiempo de ejecución. |
| Postcondiciones | El tiempo de ejecución medio por ciclo de reloj excede 0,1 segundos. |
| Evaluación | OK |

Tabla 6.6: *Test de verificación VET-05.*

| | |
|------------------------|--|
| ID | VET-06. |
| Nombre | Arquitectura del simulador. |
| Requisitos | SR-F-F01, SR-F-02, SR-F-03 |
| Descripción | Verificar que el software simula una arquitectura de 32 bits con unidad de control microprogramable (con secuenciamiento implícito, saltos a nivel de microdirección y micros saltos condicionales). |
| Precondiciones | 1. Tener el código fuente de la herramienta descargado en local. 2. Disponer de un dispositivo con una versión de navegador web igual o superior a los indicados anteriormente. |
| Procedimiento | 1. Comprobar el código de los archivos fuente del simulador que contienen el modelo hardware a simular (sim_hw_*.js). 2. Generar firmware que define instrucciones de acceso a memoria, operaciones con el banco de registros, uso de los buses de la arquitectura del simulador, saltos a nivel de microdirección y micros saltos condicionales. 3. Generar memoria principal utilizando un código ensamblador que utiliza cada una de las partes de la arquitectura del simulador y las instrucciones de prueba definidas. 4. Verificar que los resultados obtenidos de la ejecución son los resultados teóricos esperados. |
| Postcondiciones | El modelo hardware ha sido definido correctamente, obteniendo los resultados esperados tras la simulación. |
| Evaluación | OK |

Tabla 6.7: *Test de verificación VET-06.*

| | |
|------------------------|---|
| ID | VET-07. |
| Nombre | Definición de juego de instrucciones. |
| Requisitos | SR-F-F04, SR-F-F05, SR-F-F09, SR-F-F10, SR-F-F11, SR-F-F15 |
| Descripción | Verificar que el software permite la definición del juego de instrucciones en el formato utilizado en la asignatura Estructura de Computadores. |
| Precondiciones | <ol style="list-style-type: none"> 1. Disponer de un dispositivo con una versión de navegador web igual o superior a los indicados anteriormente. 2. Disponer de un juego de instrucciones base en el formato utilizado en la asignatura Estructura de Computadores. 3. Disponer de un código ensamblador que utiliza el juego de instrucciones utilizado en la asignatura Estructura de Computadores. |
| Procedimiento | <ol style="list-style-type: none"> 1. Generar firmware mediante el juego de instrucciones proporcionado. 2. Generar memoria principal utilizando el código ensamblador proporcionado. 3. Ejecutar simulación. 4. Verificar que los resultados obtenidos de la ejecución son los resultados teóricos esperados. |
| Postcondiciones | La memoria de control y la memoria principal han sido generadas correctamente, realizándose la simulación de forma satisfactoria. |
| Evaluación | OK |

Tabla 6.8: *Test de verificación VET-07.*

| | |
|------------------------|--|
| ID | VET-08. |
| Nombre | Importación y exportación. |
| Requisitos | SR-F-F07, SR-F-F08, SR-F-F13, SR-F-F14 |
| Descripción | Verificar que el software permite tanto la importación como la exportación de/a fichero del juego de instrucciones y del código ensamblador. |
| Precondiciones | <ol style="list-style-type: none"> 1. Disponer de un dispositivo con una versión de navegador web igual o superior a los indicados anteriormente. 2. Disponer de un juego de instrucciones base en el formato utilizado en la asignatura Estructura de Computadores en un fichero. 3. Disponer de un código ensamblador que utiliza el juego de instrucciones utilizado en la asignatura Estructura de Computadores en un fichero. |
| Procedimiento | <ol style="list-style-type: none"> 1. Importar juego de instrucciones mediante el fichero proporcionado. 2. Generar firmware. 3. Exportar juego de instrucciones. 4. Importar código ensamblador mediante el fichero proporcionado. 5. Generar memoria principal. 6. Exportar código ensamblador. 7. Verificar que la memoria de control y la memoria principal han sido generadas correctamente. 8. Verificar que los ficheros exportados han sido generados correctamente. |
| Postcondiciones | La memoria de control, la memoria principal y los dos ficheros exportados han sido generados correctamente. |
| Evaluación | OK |

Tabla 6.9: *Test de verificación VET-08.*

| | |
|------------------------|--|
| ID | VET-09. |
| Nombre | Edición de texto. |
| Requisitos | SR-F-F06, SR-F-F12 |
| Descripción | Verificar que el software permite la edición del juego de instrucciones y del código ensamblador. |
| Precondiciones | 1. Disponer de un dispositivo con una versión de navegador web igual o superior a los indicados anteriormente. |
| Procedimiento | <ol style="list-style-type: none"> 1. Definir un juego de instrucciones mediante la herramienta. 2. Generar firmware. 3. Definir código ensamblador mediante la herramienta. 4. Generar memoria principal. |
| Postcondiciones | La memoria de control, la memoria principal han sido generadas correctamente, pudiéndose editar desde la herramienta. |
| Evaluación | OK |

Tabla 6.10: *Test de verificación VET-09.*

| | |
|------------------------|--|
| ID | VET-10. |
| Nombre | Tipos de simulaciones. |
| Requisitos | SR-F-F16, SR-F-F17, SR-F-F18, SR-F-F22 |
| Descripción | Verificar que el software permite los tres tipos de simulación: ciclo a ciclo de reloj, instrucción a instrucción y simulación completa. |
| Precondiciones | 1. Disponer de un dispositivo con una versión de navegador web igual o superior a los indicados anteriormente. 2. Tener la memoria de control y la memoria principal de la herramienta generadas. |
| Procedimiento | 1. Realizar la simulación del código cargado microinstrucción a microinstrucción. 2. Reiniciar la simulación. 3. Realizar la simulación del código cargado instrucción a instrucción. 4. Reiniciar la simulación. 5. Realizar la simulación completa del código cargado. |
| Postcondiciones | Las simulaciones han sido realizadas correctamente, obteniéndose los resultados teóricos esperados en ellas. |
| Evaluación | OK |

Tabla 6.11: *Test de verificación VET-10.*

| | |
|------------------------|--|
| ID | VET-11. |
| Nombre | Velocidad de simulación. |
| Requisitos | SR-F-F19 |
| Descripción | Verificar que el software permite la configuración de la velocidad de simulación. |
| Precondiciones | 1. Disponer de un dispositivo con una versión de navegador web igual o superior a los indicados anteriormente. 2. Tener la memoria de control y la memoria principal de la herramienta generadas. |
| Procedimiento | 1. Realizar la simulación completa del código cargado. 2. Reiniciar la simulación. 3. Modificar velocidad de simulación. 4. Realizar la simulación completa del código cargado. |
| Postcondiciones | Las simulaciones han sido realizadas correctamente, obteniéndose diferentes tiempos en función de la velocidad de simulación establecida. |
| Evaluación | OK |

Tabla 6.12: *Test de verificación VET-11.*

| | |
|------------------------|--|
| ID | VET-12. |
| Nombre | Información de las simulaciones. |
| Requisitos | SR-F-F20, SR-F-21, SR-F-22 |
| Descripción | Verificar que el software muestra los esquemas de la CPU y la Unidad de control, modificando el color de las señales activas y buses actualizados y muestra la información del estado de los registros. |
| Precondiciones | <ol style="list-style-type: none"> 1. Disponer de un dispositivo con una versión de navegador web igual o superior a los indicados anteriormente. 2. Tener la memoria de control y la memoria principal de la herramienta generadas. |
| Procedimiento | 1. Realizar la simulación del código cargado ciclo a ciclo de reloj. |
| Postcondiciones | Las simulaciones han sido realizadas correctamente, cambiándose el color de las señales activas y buses de datos actualizados en cada ciclo de reloj y mostrándose la información de los registros. |
| Evaluación | OK |

Tabla 6.13: *Test de verificación VET-12.*

La matriz de trazabilidad de las pruebas de verificación (Tabla 6.14) Determina que todos los requisitos de software se han verificado durante la fase de desarrollo del proyecto.

| Requisitos | VET-01 | VET-02 | VET-03 | VET-04 | VET-05 | VET-06 | VET-07 | VET-08 | VET-09 | VET-10 | VET-11 | VET-12 |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| SR-F-F01 | - | - | - | - | - | ✓ | - | - | - | - | - | - |
| SR-F-F02 | - | - | - | - | - | ✓ | - | - | - | - | - | - |
| SR-F-F03 | - | - | - | - | - | ✓ | - | - | - | - | - | - |
| SR-F-F04 | - | - | - | - | - | - | ✓ | - | - | - | - | - |
| SR-F-F05 | - | - | - | - | - | - | ✓ | - | - | - | - | - |
| SR-F-F06 | - | - | - | - | - | - | - | - | ✓ | - | - | - |
| SR-F-F07 | - | - | - | - | - | - | - | ✓ | - | - | - | - |
| SR-F-F08 | - | - | - | - | - | - | - | ✓ | - | - | - | - |
| SR-F-F09 | - | - | - | - | - | - | ✓ | - | - | - | - | - |
| SR-F-F10 | - | - | - | - | - | - | ✓ | - | - | - | - | - |
| SR-F-F11 | - | - | - | - | - | - | ✓ | - | - | - | - | - |
| SR-F-F12 | - | - | - | - | - | - | - | - | ✓ | - | - | - |
| SR-F-F13 | - | - | - | - | - | - | - | ✓ | - | - | - | - |
| SR-F-F14 | - | - | - | - | - | - | - | ✓ | - | - | - | - |
| SR-F-F15 | - | - | - | - | - | - | ✓ | - | - | - | - | - |
| SR-F-F16 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | ✓ | - | - |
| SR-F-F17 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | ✓ | - | - |
| SR-F-F18 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | ✓ | - | - |
| SR-F-F19 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | ✓ | - |
| SR-F-F20 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | ✓ |
| SR-F-F21 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | ✓ |
| SR-F-F22 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | ✓ | - | ✓ |
| SR-NF-PL01 | ✓ | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| SR-NF-PL02 | ✓ | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| SR-NF-PL03 | - | ✓ | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| SR-NF-PL04 | - | ✓ | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| SR-NF-PL05 | - | - | ✓ | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| SR-NF-UI01 | - | - | - | ✓ | - | - | - | - | - | - | - | - |
| SR-NF-P01 | - | - | - | - | ✓ | - | - | - | - | - | - | - |

Tabla 6.14: Matriz de trazabilidad de pruebas de verificación.

6.1.2 Pruebas de validación

Para realizar las pruebas de validación, hemos comprobado el software final, comparándolo con las necesidades del usuario especificadas en el Capítulo 3 *Análisis*). Con estas pruebas queremos responder a la pregunta: “¿Hemos construido el producto adecuado?”. La tabla 6.15 proporciona la plantilla utilizada para los test de validación. Tenga en cuenta que el formato del atributo ID es VAT-XX, donde XX indica el número de test de validación.

| | |
|-----------------------------|---|
| ID | Test ID. |
| Nombre | Nombre del test. |
| Requisitos | Requisitos del usuario cumplidos con esta prueba. |
| Test de verificación | Pruebas de verificación que nos ayudan a validar esta prueba. |
| Descripción | Descripción de la prueba. |
| Precondiciones | Las condiciones que siempre deben ser verdad antes de realizar la prueba. |
| Procedimiento | Una secuencia fija, paso a paso, de las actividades realizadas por la prueba. |
| Postcondiciones | Las condiciones que siempre deben ser verdaderas justo después de realizar la prueba. |
| Evaluación | OK or Error. |

Tabla 6.15: *Plantilla para test de validación.*

A continuación, especificamos las pruebas de validación.

| | |
|------------------------|--|
| ID | VAT-01. |
| Nombre | Juego de instrucciones. |
| Requisitos | UR-C02, UR-C03 |
| Descripción | Validar que el software permite la definición del juego de instrucciones en el formato utilizado en la asignatura Estructura de Computadores mediante la carga de un fichero y la edición desde la herramienta, generando la memoria de control asociada y permitiendo la exportación del juego de instrucciones a un fichero. |
| Precondiciones | <ol style="list-style-type: none"> 1. Disponer de un dispositivo con una versión de navegador web igual o superior a los indicados anteriormente. 2. Disponer de un juego de instrucciones base en el formato utilizado en la asignatura Estructura de Computadores. |
| Procedimiento | <ol style="list-style-type: none"> 1. Importar juego de instrucciones desde fichero. 2. Editar el juego de instrucciones desde la herramienta. 3. Generar memoria de control utilizando el juego de instrucciones cargado. 4. Exportar el juego de instrucciones cargado a fichero. |
| Postcondiciones | La memoria de control ha sido generada correctamente, permitiéndose la carga desde fichero, la edición desde la herramienta y la exportación del juego de instrucciones a fichero. |
| Evaluación | OK |

Tabla 6.16: *Test de validación VAT-01.*

| | |
|------------------------|--|
| ID | VAT-02. |
| Nombre | Juego de instrucciones. |
| Requisitos | UR-C04, UR-C05 |
| Descripción | Validar que el software permite la definición del código ensamblador en el formato utilizado en la asignatura Estructura de Computadores mediante la carga de un fichero y la edición desde la herramienta, generando la memoria principal asociada y permitiendo la exportación del código ensamblador a un fichero. |
| Precondiciones | <ol style="list-style-type: none"> 1. Disponer de un dispositivo con una versión de navegador web igual o superior a los indicados anteriormente. 2. Disponer de un juego de instrucciones base en el formato utilizado en la asignatura Estructura de Computadores cargado en el simulador. 3. Disponer de un código ensamblador base en el formato utilizado en la asignatura Estructura de Computadores. |
| Procedimiento | <ol style="list-style-type: none"> 1. Importar código ensamblador desde fichero. 2. Editar el código ensamblador desde la herramienta. 3. Generar memoria principal utilizando el código ensamblador cargado. 4. Exportar el código ensamblador cargado a fichero. |
| Postcondiciones | La memoria principal ha sido generada correctamente, permitiéndose la carga desde fichero, la edición desde la herramienta y la exportación del código ensamblador a fichero. |
| Evaluación | OK |

Tabla 6.17: *Test de validación VAT-02.*

| | |
|------------------------|--|
| ID | VAT-03. |
| Nombre | Simulación del modelo hardware propuesto. |
| Requisitos | UR-C01 |
| Descripción | Validar que el software permite la simulación del modelo hardware propuesto. |
| Precondiciones | <ol style="list-style-type: none"> 1. Disponer de un dispositivo con una versión de navegador web igual o superior a los indicados anteriormente. 2. Disponer de un juego de instrucciones base en el formato utilizado en la asignatura Estructura de Computadores cargado en el simulador. 3. Disponer de un código ensamblador base en el formato utilizado en la asignatura Estructura de Computadores cargado en el simulador. |
| Procedimiento | <ol style="list-style-type: none"> 1. Comprobar el código de los archivos fuente del simulador que contienen el modelo hardware a simular (sim_hw_*.js). 2. Ejecutar la simulación del código ensamblador. |
| Postcondiciones | El modelo hardware definido se corresponde con el modelo propuesto, siendo el resultado de la simulación el resultado teórico esperado. |
| Evaluación | OK |

Tabla 6.18: *Test de validación VAT-03.*

| | |
|------------------------|--|
| ID | VAT-04. |
| Nombre | Tipos de simulaciones. |
| Requisitos | UR-C06 |
| Descripción | Verificar que el software permite los tres tipos de simulación: ciclo a ciclo de reloj, instrucción a instrucción y simulación completa. |
| Precondiciones | <ol style="list-style-type: none"> 1. Disponer de un dispositivo con una versión de navegador web igual o superior a los indicados anteriormente. 2. Tener la memoria de control y la memoria principal de la herramienta generadas. |
| Procedimiento | <ol style="list-style-type: none"> 1. Realizar la simulación del código cargado microinstrucción a microinstrucción. 2. Reiniciar la simulación. 3. Realizar la simulación del código cargado instrucción a instrucción. 4. Reiniciar la simulación. 5. Realizar la simulación completa del código cargado. |
| Postcondiciones | Las simulaciones han sido realizadas correctamente, obteniéndose los resultados teóricos esperados en ellas. |
| Evaluación | OK |

Tabla 6.19: *Test de validación VAT-04.*

| | |
|------------------------|--|
| ID | VAT-05. |
| Nombre | Velocidad de simulación. |
| Requisitos | UR-C07 |
| Descripción | Verificar que el software permite la configuración de la velocidad de simulación. |
| Precondiciones | <ol style="list-style-type: none"> 1. Disponer de un dispositivo con una versión de navegador web igual o superior a los indicados anteriormente. 2. Tener la memoria de control y la memoria principal de la herramienta generadas. |
| Procedimiento | <ol style="list-style-type: none"> 1. Realizar la simulación completa del código cargado. 2. Reiniciar la simulación. 3. Modificar velocidad de simulación. 4. Realizar la simulación completa del código cargado. |
| Postcondiciones | Las simulaciones han sido realizadas correctamente, obteniéndose diferentes tiempos en función de la velocidad de simulación establecida. |
| Evaluación | OK |

Tabla 6.20: *Test de validación VAT-05.*

| | |
|------------------------|--|
| ID | VAT-06. |
| Nombre | Información de las simulaciones. |
| Requisitos | UR-C08, UR-C09 |
| Descripción | Verificar que el software muestra los esquemas de la CPU y la Unidad de control, modificando el color de las señales activas y buses actualizados y muestra la información del estado de los registros. |
| Precondiciones | <ol style="list-style-type: none"> 1. Disponer de un dispositivo con una versión de navegador web igual o superior a los indicados anteriormente. 2. Tener la memoria de control y la memoria principal de la herramienta generadas. |
| Procedimiento | 1. Realizar la simulación del código cargado ciclo a ciclo de reloj. |
| Postcondiciones | Las simulaciones han sido realizadas correctamente, cambiándose el color de las señales activas y buses de datos actualizados en cada ciclo de reloj y mostrándose la información de los registros. |
| Evaluación | OK |

Tabla 6.21: *Test de validación VAT-06.*

| | |
|------------------------|--|
| ID | VAT-07. |
| Nombre | Plataforma. |
| Requisitos | UR-R01, UR-R02 |
| Descripción | Verificar que el software puede ser utilizado en los navegadores especificados en los requisitos. |
| Precondiciones | 1. Utilizar un computador con sistema operativo Ubuntu 16.04 / Windows 10 / MacOS 10.2.5 . 2. Tener instalados los navegadores Microsoft Edge 30+, Mozilla Firefox 45+, Google Chrome 50+ o Safari 10+. |
| Procedimiento | 1. Abrir el software en cualquiera de los navegadores web especificados. 2. Generar firmware. 3. Generar memoria principal. 4. Ejecutar simulación. |
| Postcondiciones | La simulación ha sido completada satisfactoriamente sin ningún error de ejecución debido a la plataforma . |
| Evaluación | OK |

Tabla 6.22: *Test de validación VAT-07.*

| | |
|------------------------|--|
| ID | VAT-08. |
| Nombre | Interfaz de usuario. |
| Requisitos | UR-R03 |
| Descripción | Verificar que la interfaz del simulador es compatible tanto con pc como con plataformas móviles. |
| Precondiciones | 1. Disponer de un pc y de un dispositivo móvil. 2. Los dispositivos deben tener instalados los navegadores web especificados previamente. |
| Procedimiento | 1. Abrir el software en cualquiera de los navegadores web especificados. 2. Generar firmware. 3. Generar memoria principal. 4. Ejecutar simulación. |
| Postcondiciones | La interfaz del simulador es compatible tanto como pc como con dispositivos móviles, visualizándose correctamente en cualquier pantalla de la herramienta. |
| Evaluación | OK |

Tabla 6.23: *Test de validación VAT-08.*

| | |
|------------------------|---|
| ID | VAT-09. |
| Nombre | Tiempo medio por ciclo de reloj. |
| Requisitos | UR-R04 |
| Descripción | Verificar que el tiempo medio por ciclo de reloj del simulador no supera 0,1 segundos. |
| Precondiciones | 1. Disponer de un dispositivo con una versión de navegador web igual o superior a los indicados anteriormente. |
| Procedimiento | 1. Abrir el software en cualquiera de los navegadores web especificados. 2. Generar firmware. 3. Generar memoria principal utilizando un código ensamblador que utiliza cada una de las partes de la arquitectura del simulador. 4. Ejecutar simulación midiendo el tiempo de ejecución. |
| Postcondiciones | El tiempo de ejecución medio por ciclo de reloj excede 0,1 segundos. |
| Evaluación | OK |

Tabla 6.24: *Test de validación VAT-09.*

| | |
|------------------------|--|
| ID | VAT-10. |
| Nombre | Ejecución local. |
| Requisitos | UR-R05, UR-R06 |
| Descripción | Verificar que el software es ejecutado en local sin la necesidad de conexión a internet. |
| Precondiciones | 1. No tener acceso a Internet. 2. Tener el código fuente de la herramienta descargado en local. |
| Procedimiento | 1. Abrir el software en cualquiera de los navegadores web especificados. 2. Generar firmware. 3. Generar memoria principal. 4. Ejecutar simulación. |
| Postcondiciones | La simulación ha sido completada satisfactoriamente sin ningún error de ejecución debido a la conexión de red. |
| Evaluación | OK |

Tabla 6.25: *Test de validación VAT-10.*

| | |
|------------------------|---|
| ID | VAT-11. |
| Nombre | Tecnologías de desarrollo. |
| Requisitos | UR-R07 |
| Descripción | Verificar que el software ha sido desarrollando utilizando HTML5. |
| Precondiciones | 1. Tener el código fuente de la herramienta descargado en local. |
| Procedimiento | 1. Comprobar el código de los archivos fuente del simulador. |
| Postcondiciones | El simulador ha sido desarrollado mediante el lenguaje de programación HTML5. |
| Evaluación | OK |

Tabla 6.26: *Test de validación VAT-11.*

La matriz de trazabilidad de las pruebas de validación (Tabla 6.27) Determina que todos los requisitos de usuario han sido validados con el producto final.

| Requisitos | VAT-01 | VAT-02 | VAT-03 | VAT-04 | VAT-05 | VAT-06 | VAT-07 | VAT-08 | VAT-09 | VAT-10 | VAT-11 |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| UR-C01 | - | - | ✓ | - | - | - | - | - | - | - | - |
| UR-C02 | ✓ | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| UR-C03 | ✓ | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| UR-C04 | - | ✓ | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| UR-C05 | - | ✓ | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| UR-C06 | - | - | - | ✓ | - | - | - | - | - | - | - |
| UR-C07 | - | - | - | - | ✓ | - | - | - | - | - | - |
| UR-C08 | - | - | - | - | - | ✓ | - | - | - | - | - |
| UR-C09 | - | - | - | - | - | ✓ | - | - | - | - | - |
| UR-R01 | - | - | - | - | - | - | ✓ | - | - | - | - |
| UR-R02 | - | - | - | - | - | - | ✓ | - | - | - | - |
| UR-R03 | - | - | - | - | - | - | - | ✓ | - | - | - |
| UR-R04 | - | - | - | - | - | - | - | - | ✓ | - | - |
| UR-R05 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | ✓ | - |
| UR-R06 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | ✓ | - |
| UR-R07 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | ✓ |

Tabla 6.27: Matriz de trazabilidad de pruebas de validación.

Capítulo 7

Planificación y presupuesto

Este capítulo presenta una planificación detallada del proyecto (Sección 7.1, *Planificación*). Luego, explicamos los costes del proyecto (Sección 7.2, *Presupuesto*). Al final del capítulo, explicamos el entorno socio-económico del proyecto (Section 7.3, *Entorno Socio-Económico*).

7.1 Planificación

Esta sección incluye la planificación completa del proyecto. En primer lugar, describimos la metodología de desarrollo de software utilizada. Después, detallamos la duración de cada fase del proyecto, indicando todos los tiempos en un diagrama Gantt.

7.1.1 Justificación de la Metodología

Debido a sus características, hemos dividido nuestro proyecto en tres iteraciones:

- **Modelo hardware:** la primera iteración ha consistido en lograr el modelado del hardware que compone el procesador WepSIM. El objetivo de esta fase, ha sido lograr el modelado y funcionamiento básico de cada componente hardware por separado.
- **Modelo software:** esta fase ha consistido en lograr el modelo software utilizado en la asignatura Estructura de computadores para la definición del juego de instrucciones y el lenguaje ensamblador. El objetivo de esta fase, ha sido lograr interpretar el juego de instrucciones definido y código ensamblador definidos por el usuario, generando la memoria de control y memoria principal en el orden correspondiente.

- **Kernel del simulador:** esta fase ha consistido en lograr unir el modelo hardware y modelo software, realizando el kernel del simulador. El objetivo de esta fase, ha sido diseñar e implementar el kernel de simulador encargado de unir el modelo hardware y el modelo software, generando la simulación y la vista del simulador.

Era necesario contar con una metodología iterativa para desarrollar cada una de las fases de manera independiente para unir las todas en la última etapa y obtener el producto final. Para ello, hemos analizado tres metodologías de desarrollo de software diferentes: Prototipado de software [19], el Modelo en Cascada [20] y el Modelo en Espiral [21]. El Prototipado de Software no encaja muy bien en nuestro proyecto, puesto que requiere la construcción de un prototipo de software en poco tiempo. El Modelo en Cascada es un proceso de diseño secuencial, utilizado en procesos de desarrollo de software en el cual el progreso es visto como un flujo constante hacia abajo (como una cascada) a través de diferentes fases. El problema con esta metodología es que no permite iteraciones dentro del desarrollo del software. Finalmente, el Modelo en Espiral permitió dividir el proyecto en diferentes iteraciones. Este modelo, combina las fortalezas de los otros dos modelos (simplicidad y flexibilidad), utilizando además un proceso iterativo. Aunque este modelo es más lento que los dos anteriores, nos permitió aplicar diferentes iteraciones por lo que decidimos aplicarlo a todo el proceso.

7.1.2 Ciclo de Vida

El proceso de desarrollo del ciclo de vida del proyecto ha seguido el Modelo de ciclo de vida en Espiral [21]. La Figura 7-1 muestra el Modelo en Espiral usando un esquema.

El modelo en Espiral tiene cuatro fases, que se repiten durante las diferentes iteraciones del modelo. Estas fases son:

- **Planificación** ('Determine objectives' en Figura 7-1): Se reúnen los requisitos de los usuarios, se realiza un estudio de factibilidad del sistema y se determinan los objetivos de iteración.
- **Análisis** ('Identify and resolve risks' en Figura 7-1): Se realiza un análisis completo de los requisitos y se identifican los posibles riesgos. Esta fase termina con un diseño básico.
- **Desarrollo y Pruebas:** Se lleva a cabo la implementación del código. Se realizan los casos de prueba y los resultados de la prueba.

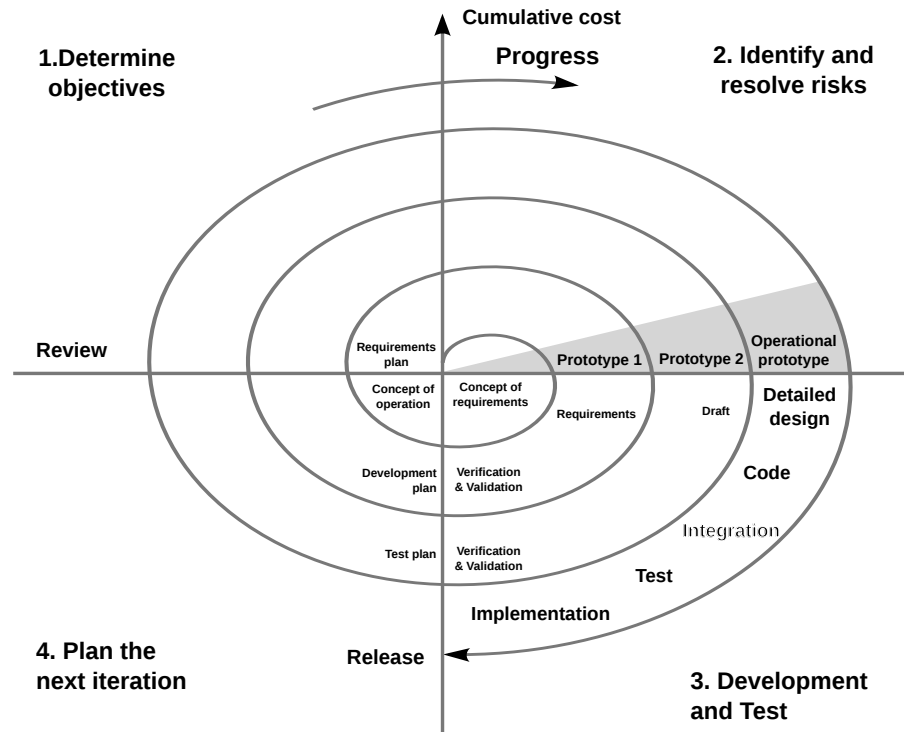


Figura 7-1: *Modelo en Espiral* (Boehm, 2000).

- **Evaluación** ('Plan the next iteration' en Figura 7-1): Los clientes evalúan el software y proporcionan sus comentarios. En este caso, el estudiante intenta obtener la aprobación del supervisor. Esta es la *tarea crítica* del ciclo de vida, ya que solo podemos pasar a la siguiente iteración del Modelo de ciclo de vida Espiral si esta tarea es aprobada.

Cada fase comienza con un objetivo de diseño y termina con el cliente (el supervisor) revisando el progreso hasta ahora. Como se explicó anteriormente, hemos dividido el desarrollo de software en tres iteraciones: modelo hardware, modelo software, y kernel del simulador. En la última iteración, el software completo debe someterse a pruebas exhaustivas para validar el simulador.

7.1.3 Tiempo Estimado

El diagrama de Gantt (Figura 7-2) muestra todas las tareas realizadas durante el desarrollo del proyecto. El proyecto comenzó el 2 de noviembre de 2015 y finalizó el 30 de diciembre de 2016, lo que supone un total de casi 13 meses de trabajo (305 días laborables). Durante este tiempo, he trabajado de lunes a viernes, durante cuatro horas al día.

El diagrama de Gantt muestra todas las tareas realizadas en cada iteración del modelo de ciclo de vida espiral. Recuerde que las tres iteraciones fueron: Modelo hardware, Modelo software y kernel del simulador. Además de las tareas (fases) mencionadas anteriormente (Planificación, Análisis, Desarrollo y Pruebas, y Evaluación), hemos incluido la tarea de Documentación al final de cada iteración. La tarea de documentación ha consistido principalmente en la redacción de este trabajo fin de grado.

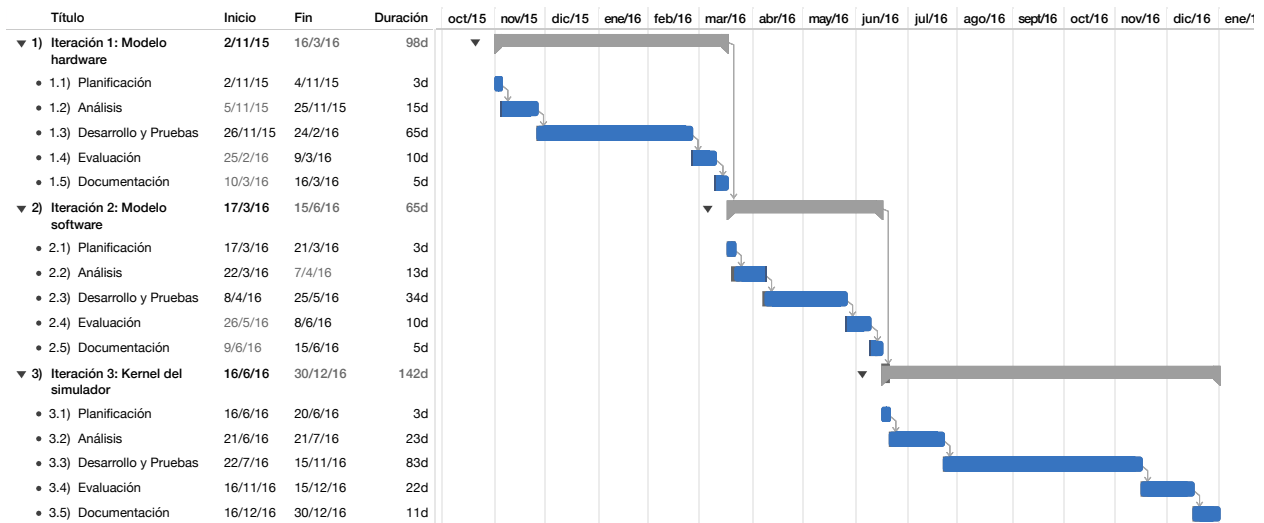


Figura 7-2: Diagrama Gantt.

7.2 Presupuesto

Esta sección detalla el presupuesto general del proyecto. Por un lado, presentamos los costes del proyecto y, por otro lado, damos a conocer la oferta presentada al cliente.

7.2.1 Coste del Proyecto

La tabla 7.1 resume las principales características del proyecto, incluido el presupuesto total.

| <i>Información del Proyecto</i> | |
|-----------------------------------|---|
| Título | WepSIM: Simulador de procesador elemental con unidad de control microprogramada |
| Autor | Javier Prieto Cepeda |
| Departamento | Departamento de Informática |
| Fecha de inicio | 2 de noviembre de 2015 |
| Fecha de finalización | 30 de diciembre de 2016 |
| Duración | 13 meses |
| Ratio de costes indirectos | 20 % |
| Presupuesto total | 51.860,96 |

Tabla 7.1: *Información del Proyecto.*

A continuación se desglosa el presupuesto total del proyecto.

Costes Directos

En esta parte se presentan los costes directos del proyecto. La Tabla 7.2 muestra los costes directos causados por los costes de personal, sobre la base de la planificación presentada en la sección anterior. El tutor y el estudiante han desempeñado los siguientes roles:

- **Tutor:** Jefe de Proyecto.
- **Estudiante:** Analista, Desarrollador, Tester.

| Categoría | Coste por hora (€) | Horas | Total (€) |
|------------------|---------------------------|--------------|------------------|
| Jefe de Proyecto | 60 | 65 | 3.900 |
| Analista | 35 | 269 | 9.415 |
| Desarrollador | 35 | 523 | 18.305 |
| Tester | 25 | 428 | 10.700 |
| Total | | | 42.320,00 |

Tabla 7.2: *Costes de recursos humanos.*

La Tabla 7.3 muestra los costes directos causados por la adquisición y uso del equipo. El coste amortizado, C , es calculado utilizando la siguiente formula:

$$C = \frac{d \cdot c \cdot u}{D} \quad (7.1)$$

Donde:

- **C:** Coste amortizado. Es equivalente al valor amortizado.
- **d:** Tiempo que el equipamiento ha sido utilizado.
- **c:** Coste del equipamiento.
- **u:** Dedicación al proyecto. Porcentaje del tiempo que el equipamiento ha sido utilizado.
- **D:** Periodo de amortización del equipamiento.

| Concepto | Coste, c (€) | Dedicación, u (%) | Dedicación, d (meses) | Amortización, D (meses) | Coste amortizado, C (€) |
|--------------|-----------------|----------------------|--------------------------|----------------------------|-------------------------------|
| Desktop PC | 799,99 | 100 | 13 | 36 | 288,89 |
| Laptop | 529,99 | 25 | 13 | 36 | 47,85 |
| ARCOS Mirlo | 1.979,99 | 50 | 7 | 60 | 115,50 |
| Impresora | 79,99 | 5 | 4 | 60 | 0,27 |
| Total | | | | | 452,50 |

Tabla 7.3: Costes de equipamiento.

Además, el equipo presentado en la Tabla 7.3 es detallado a continuación:

- **Desktop PC:** All in One - Asus Z220ICUK, 21.5", i5-6400T, 8GB, 1TB)
- **Laptop:** Toshiba L50D-C-19D, A10-8700P, 8GB RAM and 1TB.
- **ARCOS Mirlo:** Servidor utilizado por el grupo de investigación ARCOS. 32GB RAM y 8 procesadores i7 a 2.67GHz cada uno.
- **Impresora:** Brother DCP-1510.

Otros costes directos se muestran en la Tabla 7.4. Estos costes consisten en material de oficina, un tóner para la impresora y el abono transporte mensual. El material de oficina incluye: lápices, bolígrafos, cuadernos, papel y marcadores.

| Concepto | Coste (€) |
|------------------------|---------------|
| Material de oficina | 112,98 |
| Toner (x1) | 71,99 |
| Abono transporte (x13) | 260 |
| Total | 444,97 |

Tabla 7.4: *Otros costes directos.*

Resumen de Costes

La Tabla 7.5 muestra el resumen completo de los costes del proyecto. Los costes indirectos (20 % de los costes directos) consisten en las facturas de electricidad y agua, teléfono, acceso a internet, etc.

| <i>Resumen de costes</i> | |
|--------------------------|------------------|
| Recursos humanos | 42.320,00 |
| Equipamiento | 452,50 |
| Otros costes directos | 444,97 |
| Costes indirectos | 8.643,49 |
| Presupuesto total | 51.860,96 |

Tabla 7.5: *Resumen de costes.*

El presupuesto total de este proyecto asciende a **51.860,96 € (cincuenta y uno mil ochocientos sesenta euros y noventa y seis céntimos)**.

7.2.2 Oferta de Proyecto Propuesta

La Tabla 7.6 muestra la propuesta de oferta detallada. Esta oferta incluye los riesgos estimados (20 %), los beneficios esperados (15 %), y el Impuesto de Valor Agregado (Impuesto Sobre el

Valor Añadido (IVA)), que corresponde al 21 % [22]. Después de aplicar todos estos conceptos, la cantidad final para este proyecto en caso de venta a un cliente de terceros es **86.597,43 € (Ochenta y seis mil quinientos noventa y siete euros y cuarenta y tres céntimos)**.

| <i>Oferta propuesta</i> | | | |
|-------------------------|----------------|-------------------|--------------------|
| Concepto | Incremento (%) | Valor Parcial (€) | Coste agregado (€) |
| Costes del proyecto | - | 51.860,96 | 51.860,96 |
| Riesgos | 20 | 10.372,19 | 62.233,15 |
| Beneficios | 15 | 9.334,97 | 71.568,13 |
| IVA | 21 | 15.029,31 | 86.597,43 |
| Total | | | 86.597,43 |

Tabla 7.6: *Oferta propuesta.*

7.3 Entorno Socio-Económico

Como se ha comentado en capítulos anteriores, WepSIM puede apoyar la enseñanza en Estructura y Arquitectura de Computadores. Esto significa que los profesores de estas asignaturas pueden utilizar esta herramienta como refuerzo en las explicaciones del temario para mostrar de forma visual y práctica a los estudiantes el comportamiento de un procesador elemental. Además, sirve para que los estudiantes puedan desarrollar las prácticas de estas asignaturas sin la necesidad de utilizar diferentes herramientas, evitando la pérdida de tiempo que esto supone y permitiendo a los estudiantes dedicar el mayor tiempo posible a la realización de los ejercicios. Este ahorro de tiempo, tiene un impacto en los estudiantes a la hora de minimizar el tiempo invertido en la realización de prácticas, de forma que la mayor parte del tiempo dedicado a la asignatura sea útil y sirva para comprender mejor el funcionamiento de un computador, sirviendo de base en el resto de la trayectoria académica de los estudiantes y mejorando su rendimiento.

Debido al diseño modular realizado de este simulador, WepSIM permite la especificación tanto de diferentes juegos de instrucciones como de diferentes modelos hardware. Esto supone un gran avance en el área docente, puesto que permite el uso de una misma herramienta para

la enseñanza y simulación de diferentes dispositivos. Anteriormente se invertía mucho dinero para que los estudiantes pudieran realizar prácticas con diferentes tipos de procesadores, ya que se debían de adquirir los diferentes componentes hardware necesarios para la realización de las prácticas. Con WepSIM este concepto cambia, puesto que modelando el comportamiento del computador deseado, puede ser utilizado para diferentes tipos de prácticas, evitando costes de adquisición y mantenimiento y permitiendo una mayor variedad de opciones a la hora de diseñar las prácticas.

Gracias al uso de este simulador en el ámbito docente, se puede mostrar el impacto energético que supone una programación eficiente. Esto es debido a que WepSIM es un simulador de microprogramación y programación en ensamblador, pudiendo hacer visible el coste a bajo nivel de unas malas prácticas de programación. El objetivo, es concienciar a los estudiantes de la importancia que tiene la optimización y eficiencia en el uso de los recursos de un computador, puesto que uno de los retos de la comunidad científica es diseñar sistemas cada vez más eficientes energéticamente, de forma que en un futuro estas técnicas sean llevadas a cabo realizando sistemas más eficientes.

Por último, es necesario destacar el impacto que supone que WepSIM tenga licencia de código abierto. Esto supone que las universidades y centros docentes que quieran utilizar la herramienta, puedan hacerlo sin ningún tipo de coste, con el ahorro económico que supone la utilización de una herramienta de estas características. Además, gracias a este tipo de licencia, se favorece un entorno de colaboración entre diferentes universidades, de forma que se puedan añadir nuevos módulos a la herramienta sin coste económico para la comunidad docente.

Capítulo 8

Conclusiones y trabajos futuros

En este Capítulo presentamos las conclusiones del trabajo, revisamos los objetivos establecidos al principio de este documento, e incluimos algunas conclusiones personales. Además, discutiremos las principales contribuciones de nuestro trabajo, indicando también las publicaciones resultantes de este trabajo. Finalmente, discutimos el trabajo futuro.

8.1 Conclusiones

En este trabajo se ha descrito el diseño de WepSIM, un simulador de un procesador elemental con unidad de control microprogramada. Este trabajo presenta un nuevo simulador que resulta intuitivo, portable y extensible, sirviendo como complemento docente para la docencia en Estructura de Computadores. Este simulador, permite definir diferentes juegos de instrucciones y ejecutar y depurar código fuente que use el conjunto de instrucciones definido. También permite definir el comportamiento del procesador mediante microprogramación.

WepSIM, permite a los estudiante entender el funcionamiento de un procesador elemental de una forma sencilla, pudiendo ser usado desde un dispositivo móvil o un ordenador con un navegador Web moderno, sin la necesidad de ser instalado. De esta forma, los estudiantes pueden interactuar con el simulador aprendiendo y comprendiendo el funcionamiento del procesador elemental WepSIM, incluyendo los mecanismos de interacción con el software de sistema e integrando en una misma herramienta tanto la microprogramación como la programación en ensamblador.

El objetivo principal de este proyecto era desarrollar un simulador, que a diferencia de los existentes, pudiera simular de forma completa el comportamiento de un procesador elemental

permitiendo comprobar el estado de los componentes en cada ciclo de reloj, de manera que ayudáse a los estudiantes a comprender y asimilar de forma sencilla y visual el funcionamiento de un procesador. También hemos cumplido con todos los demás objetivos presentados en la introducción del documento:

- Simular la ejecución de el juego de instrucciones especificado en un computador denominado WepSIM desde el punto de vista de la micropogramación y la programación en ensamblador.
- Permitir la especificación de diferentes juegos de instrucciones.
- Permitir unificar la microprogramación y la programación en ensamblador.
- Permitir al usuario la visualización en cada ciclo de reloj del estado y comportamiento del computador simulado.

A nivel personal, este trabajo me ha ayudado a empezar en el mundo de la investigación científica. He logrado aplicar una gran cantidad de los conocimientos adquiridos a lo largo del grado. Además, he aprendido importantes técnicas de modelado de hardware, compilación y simulación, las cuáles tienen una gran utilidad y complejidad y me han servido para profundizar aún más en los conocimientos adquiridos en el grado. Por todo ello, es muy satisfactorio ver el resultado final obtenido, puesto que he logrado superar todos los problemas que han surgido a lo largo del proyecto.

8.1.1 Contribuciones

El proyecto llevado a cabo durante este Trabajo Fin de Grado encaja con muchas de las asignaturas estudiadas en el Grado en Ingeniería Informática de la Universidad Carlos III de Madrid, destacando los siguientes temas en particular:

- **Tecnología de Computadores** (asignatura obligatoria, Primer curso) en donde se introducen los componentes hardware y la lógica binaria.
- **Estructura de Computadores** (asignatura obligatoria, Segundo curso) en donde se introducen las bases de la estructura y funcionamiento de un computador.
- **Teoría de Autómatas y Lenguajes Formales** (asignatura obligatoria, Segundo curso) en donde se introducen las bases acerca de los lenguajes y gramáticas formales.

- **Sistemas Operativos** (asignatura obligatoria, Segundo curso) en donde se introducen las bases del funcionamiento del sistema operativo.
- **Arquitectura de Computadores** (asignatura obligatoria, Tercer curso) en donde se introducen las bases de la arquitectura de un computador.
- **Diseño de Sistemas Operativos** (asignatura obligatoria, Tercer curso) en donde se introducen las bases del diseño de los distintos módulos de un sistema operativo.
- **Dirección de proyectos de desarrollo de software** (asignatura obligatoria, Tercer curso) en donde se introducen las bases para la dirección y gestión de un proyecto de desarrollo de software.

8.1.2 Publicaciones

Este Trabajo Fin de Grado ha hecho una importante contribución al campo de la docencia en Estructura y Arquitectura de Computadores. Las principales contribuciones de este trabajo se han publicado en dos artículos:

- **A. Calderón, F. García-Carballeira, and J. Prieto**, “WepSIM: Simulador modular e interactivo de un procesador elemental para facilitar una visión integrada de la microprogramación y la programación en ensamblador”, *Enseñanza y aprendizaje de ingeniería de computadores*, vol. 6, 35-53, 2016. [15]
- **J. Prieto, A. Calderón, F. García-Carballeira, and S. Alonso-Monsalve**, “WepSIM: simulador integrado de microprogramación y programación en ensamblador”, *Jornadas sarteco 2016*. [23]

Además, en el momento de la entrega de este documento también otro artículo enviado a la espera de su aceptación.

8.2 Trabajos Futuros

Actualmente, hay varias líneas de trabajos futuros en las cuáles estamos trabajando.

- En cuanto a mejoras en el modelo hardware:

- Introducir más elementos hardware, como por ejemplo una caché, de forma que se amplíen los contenidos de la asignatura incluídos en la herramienta.
 - Introducir un modelo hardware basado en *pipeline*, permitiendo el uso de la herramienta en aquellas asignaturas que utilizan este modelo de arquitectura.
- En cuanto a mejoras en el modelo software:
- Añadir revisión semántica del código, permitiendo identificar y notificar los errores de programación al usuario.
 - Añadir nuevos juegos de instrucciones a la herramienta como por ejemplo el ensamblador ARM, permitiendo la utilización de diferentes lenguajes en la herramienta.
 - Estudiar el ensamblador de MIPS/ARM generado con GCC/Clang de forma que pueda ser usado directamente en WepSIM.
- En cuanto a mejoras en la herramienta:
- Añadir un módulo de corrección automática de prácticas a la herramienta, de forma que los estudiantes puedan practicar con ella y comprobar la validez de sus ejercicios.
 - Migrar la herramienta como aplicación móvil mediante el *plugin* Apache Cordova, de forma que la herramienta no quede ligada al uso mediante navegador web.

Bibliografía

- [1] "P8080e simulator." https://www.datsi.fi.upm.es/docencia/Estructura/U_Control/#HERRAMIENTAS. Accessed: 2017-04-26.
- [2] R.-F. Yen and Y. Kim, "Development and implementation of an educational simulator software package for a specific microprogramming architecture," *IEEE Transactions on Education*, no. 1, pp. 1–11, 1986.
- [3] A. S. Tanenbaum, *Structured Computer Organization 2nd*. ACM, 1984.
- [4] J. R. Larus, *Spim s20: A mips r2000 simulator*. Center for Parallel Optimization, Computer Sciences Department, University of Wisconsin, 1990.
- [5] I. Aguilar Juárez and J. R. Heredia Alonso, "Simuladores y laboratorios virtuales para ingeniería en computación," 2013.
- [6] K. Vollmar and P. Sanderson, "Mars: an education-oriented mips assembly language simulator," in *ACM SIGCSE Bulletin*, vol. 38, pp. 239–243, ACM, 2006.
- [7] S. R. Vegdahl, "Mipsilot: A compiler-oriented mips simulator," *Journal of Computing Sciences in Colleges*, vol. 24, no. 2, pp. 32–39, 2008.
- [8] M. I. Garcia, S. Rodríguez, A. Pérez, and A. García, "p88110: A graphical simulator for computer architecture and organization courses," *IEEE Transactions on Education*, vol. 52, no. 2, pp. 248–256, 2009.
- [9] I. Branovic, R. Giorgi, and E. Martinelli, "Webmips: a new web-based mips simulation environment for computer architecture education," in *Proceedings of the 2004 workshop on Computer architecture education: held in conjunction with the 31st International Symposium on Computer Architecture*, p. 19, ACM, 2004.
- [10] J. C. Garrido, "Arquitectura y diseño de sistemas web modernos," *InforMAS, Revista de Ingeniería Informática del CIIRM*, no. 1, 2004.
- [11] J. C. PEREZ, F. G. CARBALLEIRA, J. D. G. Sánchez, and D. E. Singh, *Problemas resueltos de estructura de computadores*. Ediciones Paraninfo, SA, 2015.
- [12] Institute for Electrical and Electronics Engineers, "IEEE Recommended Practice for Software Requirements Specifications," *IEEE*, pp. 830–1998, 1998.
- [13] BOE, 19 de enero de 2008, "Real Decreto 1720/2007, de 21 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento de desarrollo de la Ley Orgánica 15/1999, de 12 de diciembre, de protección de datos de carácter personal," *Boletín Oficial del Estado*, 17:4103-4136.

- [14] "The GNU Lesser General Public License." <http://www.gnu.org/licenses/licenses.html>, Last visited, June 2016.
- [15] A. C. Mateos, F. G. Carballeira, and J. P. Cepeda, "Wepsim: Simulador modular e interactivo de un procesador elemental para facilitar una visión integrada de la microprogramación y la programación en ensamblador," *Enseñanza y aprendizaje de ingeniería de computadores: Revista de Experiencias Docentes en Ingeniería de Computadores*, no. 6, pp. 35–53, 2016.
- [16] J. P. Bennett, *Introduction to compiling techniques: a first course using ANSI C, LEX and YACC*. McGraw-Hill, Inc., 1996.
- [17] ARCOS Research Group , "WepSIM user manual." <https://wepsim.github.io/wepsim-manual.pdf>, Last visited, June 2017.
- [18] Software Testing Fundamentals, "Verification vs Validation." <http://softwaretestingfundamentals.com/verification-vs-validation/>, Last visited, Mar. 2016.
- [19] Accelerated Technologies, Inc, "The Human Condition: A Justification for Rapid Prototyping," *Time Compression Technologies*, vol. 3 no. 3, p. 1, May 1998.
- [20] Benington, Herbert D., "Production of Large Computer Programs," *IEEE Annals of the History of Computing (IEEE Educational Activities Department)*, p. 350–361, Oct. 1983.
- [21] B. Boehm, "A Spiral Model of Software Development and Enhancement," *IEEE Computer* 21, 5, pp. 61–72, 1988.
- [22] BOE, 6 de agosto de 2012, "Resolución de 2 de agosto de 2012, de la Dirección General de Tributos, sobre el tipo impositivo aplicable a determinadas entregas de bienes y prestaciones de servicios en el Impuesto sobre el Valor Añadido," *Boletín Oficial del Estado*, 187:56055-56060.
- [23] J. Prieto-Cepeda, F. Garcia-Carballeira, A. Calderon, and S. Alonso-Monsalve, "WepSIM: simulador integrado de microprogramación y programación en ensamblador," *XXVII Jornadas de Paralelismo (JP2016)*, September 2016.