

Actualización de una asignatura de Arquitectura de Ordenadores de primer curso de Ingeniería

(Trabajo en Progreso)

Martín Llamas-Nistal, Fernando A. Mikic-Fonte, Juan Manuel Santos-Gago y Luis M. Álvarez-Sabucedo
Departamento de Ingeniería Telemática
Universidad de Vigo
España
{martin, mikic, jsgago, lsabucedo}@gist.uvigo.es

Abstract—La mayoría de las asignaturas deberían someterse cada cierto tiempo a una evaluación donde se examine si siguen cumpliendo los objetivos que la titulación demanda teniendo en cuenta, entre otros, el estado actual de la materia y de la titulación. En este artículo se describen los pasos seguidos para actualizar y modernizar una asignatura de Arquitectura de Ordenadores de primer curso de la titulación de Grado en Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación en la Universidad de Vigo, España.

Keywords—Arquitectura de Ordenadores; Tecnologías de Telecomunicación; Simuladores de Ordenadores

I. INTRODUCCIÓN

Este trabajo se enmarca dentro de los estudios de Grado de Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación. Durante muchos años los contenidos de la asignatura Arquitectura de Ordenadores del primer curso han estado basados en contenidos de asignaturas similares de otros planes de estudios correspondientes fundamentalmente a la titulación de Ingeniero de Telecomunicación. A la hora de impartir esta asignatura no sólo se han de tener en cuenta los contenidos concretos, sino también los simuladores de ordenadores donde se van a realizar las prácticas y por lo tanto fijar los contenidos teóricos.

Con el transcurso del tiempo siempre en cualquier materia y máxime en Arquitectura de Ordenadores hay que plantearse si realmente estamos explicando lo que el estado actual de la tecnología demanda. Este artículo aborda el proceso de actualización de contenidos que estamos realizando en la Escola de Enxeñaría (EE) de Telecomunicación de la Universidad de Vigo en la asignatura de Arquitectura de Ordenadores del Grado de Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación.

El resto del presente artículo se organiza de la siguiente manera: en la sección II se describe la historia, situación actual de la asignatura y los objetivos de la misma. En la sección III la evolución tecnológica que ha ocurrido en los últimos años. En la sección IV, en trabajos relacionados, exponemos la visión de esta materia en las universidades más importantes en esta

Esta investigación está siendo financiada por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (ERDF) y el Gobierno Regional de Galicia a través de los proyectos CN2012/260 " Consolidation of Research Units: AtlantTIC" y GRC2013-006 (Consolidación de Grupos de Investigación), y por la Red 513RT0471 del CYTED, RIURE: Red Iberoamericana para la Usabilidad de Recursos Educativos (www.riure.net).

titulación. En la sección V presentamos nuestra propuesta, y en la sección VI finalizaremos con las conclusiones y el trabajo futuro a desarrollar.

II. HISTORIA Y SITUACIÓN ACTUAL DE LA ASIGNATURA

En este apartado se describe cuál ha sido la historia de los contenidos actuales de la asignatura de Arquitectura de Ordenadores en el anterior plan de estudios de Ingeniero de Telecomunicación y ahora en el actual de Grado de Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación, describiendo los objetivos de la asignatura correspondiente en este grado.

A. Historia de la Asignatura

En el Plan de estudios de 1994 de Ingeniería de Telecomunicación, la asignatura de Arquitectura de Ordenadores se encontraba en el segundo curso de un total de cinco, siendo una asignatura obligatoria. En la fig. 1 se puede ver la estructuración de las asignaturas más relacionadas con Arquitectura de Ordenadores. En el primer curso –primer cuatrimestre– en la asignatura de Fundamentos de Ordenadores I (FO-I) se trataba el nivel de máquina convencional (exceptuando la parte de entrada/salida): Modelo von Neumann, Modos de direccionamiento, Registros, Pilas y subprogramas, lenguajes máquina y ensambladores, y programación con estos lenguajes. En Fundamentos de Ordenadores II (FO-II), primer curso segundo cuatrimestre, se trataban los lenguajes de programación de alto nivel, tipos de datos y programación, en concreto PASCAL.

En segundo curso, primer cuatrimestre se encontraba Arquitectura de Ordenadores I (AO-I) donde se trataba la parte de entrada/salida que no se había tratado en FO-I (interrupciones, controlador de interrupciones, y ADM), rutas de datos y el nivel de micromáquina, introduciendo finalmente paralelismo y encadenamiento. En el segundo cuatrimestre se veía la parte práctica de AO-I en la asignatura de Laboratorio de Arquitectura de Ordenadores (LAO), centrándose en prácticas de microprogramación y entrada/salida (ADM e interrupciones). Simultáneamente en el mismo curso se estaban cursando también las asignaturas de Electrónica Digital (ED) en el primer cuatrimestre y Laboratorio de Electrónica Digital

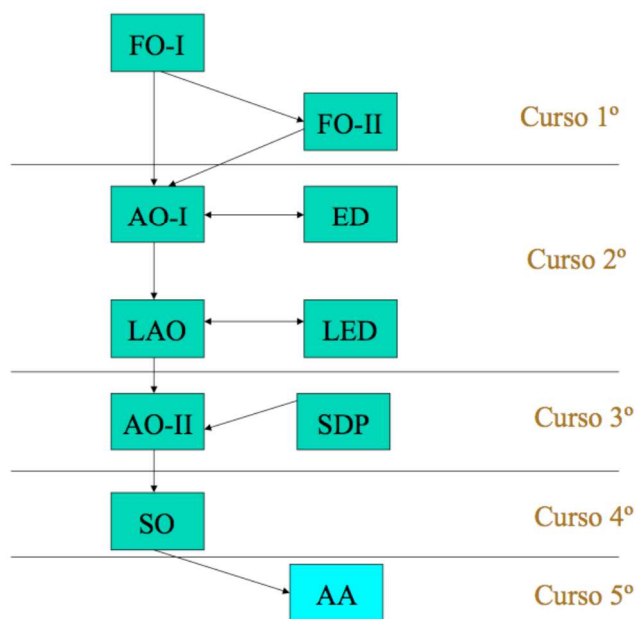


Fig. 1. Asignaturas relacionadas con Arquitectura de Ordenadores en la Ingeniería de Telecomunicación de la Universidad de Vigo (Plan 1994).

(LED) en el segundo cuatrimestre. En el siguiente curso (tercero) se veía en el primer cuatrimestre la típica asignatura de Sistemas Digitales Programables (SDP), lo cual ayudaba al alumno a ver parte de lo aprendido en FO-I y AO-I bajo un prisma más electrónico y hacer prácticas con algún micro real (en concreto mediante la placa de evaluación Altair 537 y el microcontrolador 80C537). En el segundo cuatrimestre se tenía Arquitectura de Ordenadores II (AO-II) donde se hacían prácticas en un micro real (en concreto el MC68000 mediante la placa SBC86K) y se concretaban muchos de los conceptos introducidos en asignaturas anteriores, fundamentalmente FO-I y AO-I. Esta asignatura permitía ver a los estudiantes que aquellos conceptos estudiados anteriormente en ordenadores pedagógicos se ponían en práctica en un sistema real. Seguidamente en el curso cuarto se ven Sistemas Operativos (SO), y Arquitecturas Avanzadas (AA) como una asignatura optativa en el quinto curso.

Las asignaturas FO-I, AO-I y LAO se basaban sobre la misma familia de ordenadores pedagógicos, cuyo máximo representante era Algóritmez [1], para el que se contaba con simuladores desarrollados en nuestra universidad [2][3]. Finalmente en AO-II se pasaba a una arquitectura real, la de la familia MC68000.

En el proceso de adaptación al Espacio Europeo de Educación Superior (EEES), los estudios de grado se han implantado en la EE de Telecomunicación de Vigo a partir del curso 2010-11 bajo la denominación de Grado en Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación. Dentro de estos estudios, la materia dedicada a temas relacionados con la arquitectura de ordenadores ha experimentado una notable disminución si hacemos una comparación con la antigua titulación.

Tal como hemos comentado anteriormente, las asignaturas relacionadas con la arquitectura de ordenadores (directa o

indirectamente) eran considerables, y marcaban una clara línea a lo largo de toda la carrera. Sin embargo, en los nuevos estudios de grado, esta línea no solo es que se haya visto difuminada, sino que ha desaparecido, convirtiéndose la asignatura Informática: Arquitectura de Ordenadores, en prácticamente la única asignatura en toda la carrera en la que se ofrecen contenidos relacionados con la arquitectura de ordenadores. Esto se puede apreciar fácilmente con tan solo revisar los contenidos de las asignaturas de la titulación, por ejemplo a través de las guías docentes de cada una de ellas [4].

Mediante la consulta de estas guías llegamos a la conclusión de que efectivamente las asignaturas relacionadas con el tema que nos ocupa han menguado considerablemente, ya que solamente podríamos considerar las siguientes (fig. 2):

- Informática: Arquitectura de Ordenadores (AO). En ella se concentran prácticamente los mismos contenidos (con pequeñas variaciones y añadidos de poca incidencia en el global de la asignatura) que se impartían en la antigua Arquitectura de Ordenadores I. En concreto: la representación de la información en los ordenadores, el modelo de Von Neumann y los modelos estructural, procesal y funcional; la representación y el procesamiento simbólico, junto con lenguaje ensamblador; y por último una introducción a los Sistemas Operativos y a las Bases de Datos.
- Circuitos electrónicos programables: Esta asignatura optativa de tercer curso podría ser considerada como aquella con mayor relación con el tema abordado. De todas formas, dicha relación se ve sesgada hacia una componente con una orientación claramente electrónica, y de programación de microcontroladores y FPGA específicos y de amplio uso comercial, en concreto Spartan 3 y 3E, la familia Virtex 2, y el microcontrolador Picoblaze de Xilinx
- Diseño de aplicaciones con microcontroladores: En esta asignatura optativa perteneciente al último curso de la carrera volvemos a encontrarnos en sus contenidos con temas relacionados con microcontroladores (en concreto del microcontrolador PIC18F45K20), a través de los cuales realizar una revisión de conceptos tales como Unidad Aritmética y Lógica, Unidad de control, Memoria de Programa y de datos, e Interrupciones y Periféricos, a través del diseño de aplicaciones.

Por último podemos nombrar Programación I y II (de primer y segundo curso respectivamente), dedicadas a la programación en un lenguaje de alto nivel mediante programación estructurada y programación orientada a objetos; Electrónica Digital (de segundo curso), centrada principalmente en el análisis y el diseño de los circuitos y sistemas electrónicos digitales; y Sistemas de Información y Sistemas Operativos (ambas de tercer curso), orientadas específicamente a tratar en profundidad las Bases de Datos y los Sistemas Operativos.

Como se puede ver, los contenidos que básicamente se dan en lo que actualmente es AO se impartían en las asignaturas de

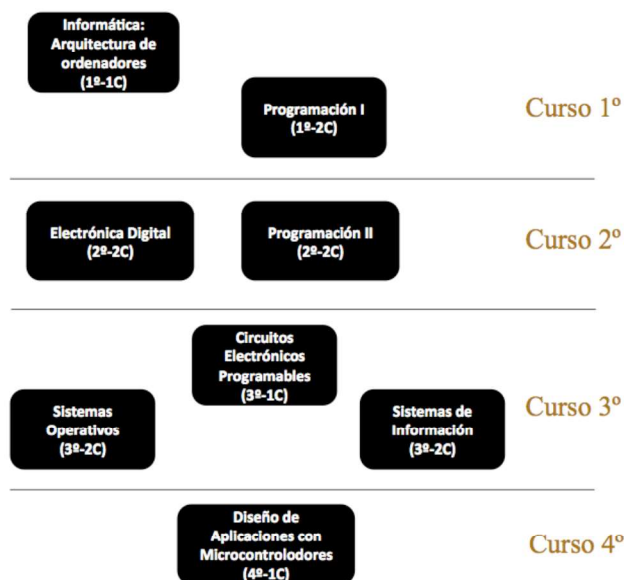


Fig. 2. Asignaturas relacionadas con la Arquitectura de Ordenadores en el grado de Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación de la Universidad de Vigo.

FO-I y parcialmente en AO-I. Pero lo que es más importante, se tenían 4 asignaturas (FO-I, AO-I, LAO y finalmente AO-II) donde se veían no sólo los contenidos actuales de AO sino también contenidos más extensos sobre la misma materia, teniendo continuidad en varias asignaturas.

Eso no ocurre en la actualidad, que como puede verse sólo existe una única asignatura donde sólo se imparte los conceptos relativos al nivel de máquina convencional más una pequeña parte de máquina operativa y máquina simbólica, empleándose 6 créditos ECTS.

Como se puede apreciar fácilmente se ha pasado de centrarse en una línea clara y definida a lo largo de la carrera centrada en el tema de la arquitectura de ordenadores, donde se trataban múltiples conceptos relacionados con este tema desde diferentes puntos de vista, a una situación en la que prácticamente la gran parte del peso de los contenidos se encuentran focalizados en una sola asignatura, la cual además se encuentra emplazada en el primer cuatrimestre del primer año, es decir, con los alumnos recién ingresados.

B. Objetivos

El Grado en Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación impartido en la EE de Telecomunicación de la Universidad de Vigo permite obtener las competencias de la profesión de Ingeniería Técnica de Telecomunicación. Tal como se ha comentado anteriormente, la asignatura que nos ocupa, AO, cuenta con 6 créditos ECTS (3 teóricos y 3 prácticos) y se imparte durante el primer cuatrimestre del primer año de carrera. Dicha asignatura, y tal como se ve reflejado en la guía docente de la misma, tiene un carácter de formación básica para el alumnado, lo cual significa que les llevará a:

- Comprender los fundamentos de las técnicas que tienen que utilizar, así como adquirir hábitos intelectuales de razonamiento científico y de aprendizaje.
- Adquirir un conocimiento profundo y fundamental de las tecnologías propias de la asignatura (esta formación debe ser básica y general)

Teniendo esto en cuenta, el objetivo principal planteado para esta asignatura será proporcionar los conocimientos necesarios para entender el funcionamiento del ordenador, centrándose en los niveles de abstracción más bajos pero sin llegar a la circuitería electrónica. Esta asignatura se centra pues en el nivel de máquina convencional, introduce el nivel de máquina operativa, y presenta un ejemplo de aplicación en el nivel de máquina simbólica.

Los resultados de aprendizaje de esta asignatura de acuerdo a su guía docente [4] son:

- Adquisición de conocimientos de los principales conceptos relacionados con la arquitectura de los ordenadores y capacidad para su manejo a través de modelos.
- Capacidad para el manejo de los sistemas de representación de la información utilizados en los ordenadores.
- Conocimientos de los tipos de instrucciones más representativas y variaciones más relevantes y capacidad para determinar las implicaciones de su uso por parte del programador de máquina convencional.
- Conocimientos de los principales modos de direccionamiento en lenguaje ensamblador y capacidad para el manejo eficiente de los mismos.
- Adquisición de habilidades sobre el diseño de algoritmos y la construcción de programas a nivel de máquina convencional.
- Conocimiento de los principios y componentes fundamentales de los sistemas operativos y las bases de datos.

III. EVOLUCIÓN TECNOLÓGICA

En los últimos años se ha venido experimentando una auténtica revolución en el uso de la tecnología en todos los ámbitos. Esta revolución ha venido marcada por supuesto por la adopción de Internet como parte fundamental de la vida cotidiana (tanto en el ámbito personal como profesional), pero sobre todo por la aparición y rápida adopción de smartphones y tablets. Los cuales se han convertido en compañeros inseparables en nuestras vidas, hasta el punto de no entenderse la misma comunicación (y adquisición de información) sin ellos.

Estos nuevos dispositivos, además de traer una nueva forma de vida y de entender la comunicación para la población en general, han traído consigo nuevos desafíos para los profesionales del sector tecnológico; que no solo podemos englobar dentro del ámbito de la utilización de los mismos,

sino de las tecnologías subyacentes que hacen posible su funcionamiento.

Es precisamente dentro de estas tecnologías donde los profesionales nos hemos encontrado con otra revolución, la cual tal vez no sea tan visible para el ciudadano de a pie, y es aquella que se refiere a las nuevas arquitecturas que han surgido de la mano de estos nuevos dispositivos.

Hasta hace bien pocos años, precisamente antes de la aparición de los dispositivos móviles, es decir, cuando la población accedía a la tecnología prácticamente sólo a través de sus ordenadores personales, nos encontrábamos en los mismos con unas arquitecturas (que podríamos llamar tradicionales) de las cuales su mayor exponente podrían ser las basadas en procesadores Intel, comúnmente conocidas como arquitecturas x86 [5].

La aparición de, sobre todo, smartphones y tablets, pero sin olvidarnos de los demás dispositivos que han ido proliferando a lo largo de los últimos años en forma de wearables (relojes, bandas, e incluso ropa), pequeños ordenadores (Raspberry Pi, Arduino, BeagleBone, Libelium Waspote, etc.), y todo tipo de nuevos dispositivos (drones, electrodomésticos inteligentes...), ha hecho que un nuevo tipo de arquitectura venga a acaparar los titulares tecnológicos. Dicha arquitectura no es otra que ARM [6].

La diferencia principal que podemos encontrarnos entre las arquitecturas x86 y ARM es en cuanto al conjunto de instrucciones que utilizan, CISC (Complex Instruction Set Computing) y RISC (Reduced Instruction Set Computing) respectivamente [7].

Todo ello, junto con el hecho de que ARM Holdings, empresa que desarrolló esta arquitectura, decidió hacerla accesible a los distintos fabricantes (Qualcomm, Apple, Samsung, etc...) por una pequeña tasa, ha conseguido que la arquitectura ARM se encuentre en multitud de dispositivos de multitud de compañías diferentes.

Dentro de los entornos académicos no podemos dejar de considerar a una de las arquitecturas más populares: MIPS (Microprocessor without Interlocked Pipeline Stages) [8]. Es una familia de arquitecturas ISA (Instruction Set Architecture) de procesadores de tipo RISC. Las arquitecturas MIPS32 y MIPS64, los representantes más recientes de esta familia, han sido utilizados en una gran variedad de aplicaciones, sobre todo en sistemas empotrados, incluyendo videoconsolas, equipos de ofimática y set-top boxes y todavía son muy utilizadas en equipamiento de redes e infraestructura de telecomunicaciones. Esta arquitectura ha sido utilizada con frecuencia en el entorno educativo como base para asignaturas de arquitectura de ordenadores y materias relacionadas.

Otra arquitectura muy popular es AVR [9], de tipo RISC, que sigue un modelo Harvard Modificado, concebido por dos estudiantes del Norwegian Institute of Technology y comercializado por Atmel. AVR presenta una arquitectura ISA muy simple que es implementada en varios microcontroladores fabricados por Atmel encontrados con frecuencia en sistemas empotrados que requieren de poca capacidad computacional. Estos microcontroladores, debido a su bajo coste, prestaciones relativamente elevadas y facilidad de uso, han sido empleados

muy a menudo por los aficionados a la electrónica. Últimamente, su popularidad ha crecido de forma exponencial a raíz de la gran acogida que ha tenido la plataforma de hardware libre Arduino.

IV. TRABAJO RELACIONADO

En este apartado presentamos cómo se enfoca la misma materia de Arquitectura de Ordenadores en la misma titulación. Como existen muchas escuelas de telecomunicación en España, hemos querido centrarnos en las más representativas. Decidir cuáles son siempre es una tarea difícil y a veces subjetiva, por lo que hemos tomado aquellas que marca el estudio de la Universidad de Granada [10] y que se muestran en la tabla I.

El actual modelo normativo definido por el llamado comúnmente “Plan Bolonia” define un marco altamente desregulado. El único elemento común a los diferentes planes de estudio posibles (y validados por la ANECA¹) son los descriptores establecidos por el Ministerio para cada titulación. Es facultad de cada plan de estudio la adscripción de estos últimos a la o las asignaturas que se considere más oportuno.

Consecuentemente, la existencia o no de una asignatura en general, y AO en particular, está sujeta al albedrío de cada Escuela en su plan de estudios. Se ha llevado a cabo un estudio de los planes de estudios impartidos en dichos centros para las titulaciones de Grado de Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación, que en algunas escuelas no existe como tal, y en tal caso hemos escogido el más cercano. Las conclusiones de este estudio nos permiten hablar de un panorama poco nítido en lo tocante a la organización docente de esta asignatura. Baste señalar como indicativo de ello que la asignatura objeto de este estudio no está presente en todos los planes de estudio. Se puede constatar que los contenidos de la asignatura, planteados éstos en los términos del presente trabajo, se pueden

TABLA I. RANKING DE UNIVERSIDADES EN LA DISCIPLINA DE TELECOMUNICACIONES^a

Ranking	Universidad
1	Politécnica de Catalunya
2	Carlos III
3	Politécnica de València
4	Rovira i Virgili
5	Politécnica de Madrid
6	Oviedo
7	Vigo
8	Politécnica de Cartagena
9	Málaga
10	Sevilla

^a Fuente: [10], Disciplina científica: Telecomunicaciones, Período 2009-2013

¹ La ANECA es la Agencia Nacional de Evaluación de la Calidad y Acreditación de España (www.aneca.es).

encontrar bajo otra denominación en algunos casos, por ejemplo, como Fundamentos de los computadores. Y, en varios casos, los contenidos *esperables* dentro de esta asignatura están organizados dentro del programa de otras asignaturas.

Haciendo un repaso pormenorizado de las instituciones objeto de estudio, según el orden indicado en la tabla I, debemos significar en primer lugar el caso de la Politècnica de Catalunya. En el Grado de Ingeniería Telemática por este centro, no hay una asignatura específica para estos contenidos y sólo podemos encontrar una parte de los mismos en Introducción a los Ordenadores.

En el Grado en Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación impartido por la Politècnica de València, se encuentra la asignatura Fundamentos de Ordenadores y Sistemas Operativos. En esa asignatura se reparten de un modo equitativo sus contenidos entre la parte hardware (conceptos y características de los procesadores) y la parte software (sistemas operativos y su gestión de recursos de un ordenador a nivel software)

En el grado impartido por la Universidad Carlos III, resulta más complejo identificar una asignatura concreta en la que se incluyan los contenidos propios de Arquitectura de los Ordenadores. Los descriptores asignados a esta asignatura se encuentran distribuidos en otras asignaturas de acuerdo a diferentes criterios organizativos.

En la Universidad Rovira i Virgili, en su grado de Ingeniería Telemática, incluye una asignatura titulada Fundamentos de computadores. Su enfoque es de bastante bajo nivel, al menos en comparación con otras guías docentes, al incidir de modo primordial en temas cercanos al diseño electrónico y lógico.

En la Politècnica de Madrid, en su semestre 4 de las titulaciones relacionadas con el grado de ingeniería de telecomunicación, incluye la asignatura Microprocesadores, que ofrece a los alumnos conocimientos para gestionar microprocesadores desde un nivel de software más alejado del nivel lógico y electrónico.

Por su parte, la Universidad de Oviedo, en su Grado en Ingeniería en Tecnologías y Servicios de Telecomunicación ofrece la asignatura Fundamentos de Informática. En dicha asignatura, amén de otros contenidos de más alto nivel, encontramos contenidos relacionados con arquitecturas de ordenadores a bajo nivel y programación a nivel lenguaje máquina.

En la Politècnica de Cartagena, en su grado de ingeniería telemática, resulta complicado identificar una asignatura concreta en la que se impartan los contenidos buscados en una asignatura como la planteada.

En el caso de la Universidad de Málaga, dentro del grado de ingeniería telemática, en la rama de materias comunes, nos encontramos con la asignatura de Microcontroladores. Esta asignatura tiene por objeto el estudio de los diferentes aspectos relevantes del uso de microcontroladores para aplicaciones de telecomunicación tales como lenguajes de programación, arquitecturas, etc.

En la Universidad de Sevilla, dentro del Grado de Ingeniería de las Tecnologías de la Comunicación, se establece dentro del plan de estudios la asignatura Fundamentos de los Computadores. En esta asignatura, en torno al 68000 de Motorola, se hace un estudio de los microprocesadores a nivel de programación, gestión de periféricos, etc.

Por lo tanto no existe ninguna asignatura semejante (al menos en las 10 primeras escuelas objeto de este estudio) que nos pueda servir de referente para la actualización de la nuestra. Este resultado era de esperar, debido a la libertad que el Proceso de Bolonia permite en el desarrollo de los planes de estudio.

V. NUESTRA PROPUESTA

En nuestra universidad, y a través de los distintos planes de estudio de Ingeniería de Telecomunicación, hemos enseñado los conceptos relacionados con la Arquitectura de Ordenadores a través de ordenadores pedagógicos, pero teniendo siempre una asignatura donde se podían ver esos conceptos en ordenadores reales. Con la implantación del grado, se han reducido las materias relacionadas con la arquitectura de los ordenadores, quedando sólo una única asignatura, y centrándose sólo en ordenadores pedagógicos, sin ningún ordenador real.

Ya en los anteriores planes de estudios, existía la discusión sobre la conveniencia de utilizar ordenadores pedagógicos o reales, tanto desde el punto de vista de los profesores como de los estudiantes. Sin embargo, esta discusión llegaba a un punto de compromiso-equilibrio al haber en una asignatura un ordenador real donde poder aplicar los conceptos aprendidos en ordenadores pedagógicos. Obviamente con el grado, este equilibrio se ha roto de facto, en beneficio de los ordenadores pedagógicos. Es por lo tanto que nos planteamos la conveniencia de utilizar ordenadores reales, demandada por una parte de nuestros estudiantes que ven cómo se les exige aprender un ordenador ficticio sin tener la oportunidad de ver un ordenador real. Esta cuestión también fue debatida entre los profesores.

El problema de usar un ordenador real (antes y ahora) es que es difícil encontrar uno que nos permita explicar los conceptos requeridos sin perderse en la complejidad de todos los detalles del mismo.

De acuerdo a la evolución tecnológica planteada en el anterior apartado, creemos que hoy en día la arquitectura más popular y más adecuada para tal fin es ARM. El artículo del profesor Clements [11] nos ayudó mucho en esta idea: "*ARM cubre los requisitos de los actuales currícula, es fácil de aprender, y tiene una arquitectura elegante y sofisticada. Más aún, se encuentra ampliamente en sistemas reales*".

Sin embargo no hay que perder de vista que la asignatura está situada en el primer cuatrimestre del primer curso, y por lo tanto es la primera asignatura que tienen los estudiantes sobre ordenadores en todo el grado. Los estudiantes no tienen en el mismo cuatrimestre ninguna otra sobre materia afín (programación, electrónica, circuitos). Por lo tanto explicar AO basado en ARM exige aproximaciones más sencillas de ARM. Eso nos exige (a los profesores) realizar alguna aproximación a

la arquitectura ARM a través de simplificaciones de la misma. El BRM (Basic RISC Machine) [12] del profesor Gregorio Fernández es una simplificación de ARM que puede servir a este fin. Aún así, actualmente estamos valorando la posibilidad de simplificar aún más para que el primer ordenador que vean los estudiantes sea lo más sencillo posible, para luego irle añadiendo complejidad.

Y todo ello sin perder de vista que debemos contar con el simulador adecuado para que nuestros estudiantes puedan realizar sus prácticas y fijar los conocimientos de AO. Una posibilidad es realizar un simulador específico para ARM, y especialmente sus simplificaciones. Nuestro grupo tiene experiencia en el desarrollo de simuladores, desarrollando simuladores para los ordenadores pedagógicos Simplez y Algorítmex, ESAL [3] sobre entorno MS-DOS y desarrollado mediante Turbo-Pascal, y [2] en el entorno Simulnet desarrollado en java, siendo además uno de los primeros en entornos de Internet [13]. Aunque el que llevamos empleando en clase desde hace más de 20 años es ESAL, por su sencillez de uso e instalación desde todo ese tiempo, lo que hizo que el simulador desarrollado en Java prácticamente no se usara en clase. Además en los últimos años trabajamos junto con el departamento de electrónica para su uso como núcleo software para implementaciones SoC (System on a Chip) [14].

En la figura 3 se puede ver la pantalla principal de ESAL a nivel de máquina convencional que incluye también la parte de entrada y salida a través del controlador de interrupciones y ADM (Acceso Directo a Memoria). El simulador a realizar para ARM debería tener una interfaz similar, ya que de acuerdo a nuestra experiencia facilita el aprendizaje de los estudiantes.

Otra opción es utilizar alguno de los existentes para ARM. El campo de los simuladores para aprendizaje de arquitectura de ordenadores es muy prolífico, y ya desde hace muchos años existen una gran variedad de simuladores. En [15] tenemos el

último estudio más completo hasta el momento sobre los simuladores para enseñanza de arquitectura de ordenadores. En este estudio se seleccionó un total de 28 simuladores dividiéndolos en dos grupos, distinguiendo entre los que permiten crear configuraciones específicas de sistemas o usar sólo las de un determinado grupo de sistemas previamente configurados. Desde nuestro punto de vista, esta distinción es irrelevante, puesto que buscamos simular arquitecturas ARM, y además que sean gratuitas al menos para fines académicos. De esos 28 sistemas, sólo hay 3 que cumplen estos requisitos: M5 [16] [17], que actualmente es gem5 [18] [19], compartiendo la misma página web [16][18]; simics [20][21]; y SimpleScalar [22].

Desde el año 2009 en que se hizo este estudio han surgido nuevos simuladores (entre ellos el mencionado gem 5, actualización de M5), entre los que cabe destacar ARMSim# [23][24], de la Universidad de Victoria (British Columbia, Canadá), y que es usado en BRM [12].

Finalmente hemos optado por usar un simulador ya existente (en concreto el anteriormente citado ARMSim#) en lugar de realizar uno ad hoc. Hay varias razones para ello, entre las que caben destacar su facilidad de uso y parecida funcionalidad a ESAL, y su disponibilidad inmediata. El desarrollo de un simulador para ARM requiere de un cierto tiempo y dedicación que harían retrasar la implantación de esta nueva arquitectura en la asignatura.

Por último, otra de las ventajas de usar ARM es que permite a los estudiantes poder practicar en pequeños ordenadores reales, como por ejemplo el Rapsberry Pi [25], que son muy asequibles económicamente. Para aumentar la posibilidad de uso de estos pequeños ordenadores, estamos estudiando la posibilidad de ofrecerlos mediante laboratorios remotos [26].



Fig. 3. Pantalla principal de ESAL a nivel máquina convencional.: 1- Menú Principal 2- Contenidos de la Memoria principal, 3- Registros del Controlador de ADM y del Controlador de Interrupciones, 4- Registros Locales

VI. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En el presente artículo hemos mostrado las motivaciones que nos han movido para la actualización de la asignatura de Arquitectura de Ordenadores del grado de Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación, en la Universidad de Vigo, partiendo de las materias similares impartidas en el anterior plan de estudios de Ingeniería de Telecomunicación.

En un estudio que hemos realizado sobre asignaturas equivalentes en las 10 principales escuelas de España (según [10]) no hemos encontrado ninguna realmente semejante que nos pudiese servir de ayuda en nuestro propósito.

El objetivo que seguimos es mostrar los conceptos de AO en unos ordenadores que estén lo más cercano posible a los reales, para que sirva de motivación a nuestros estudiantes que cada vez demandan más una aplicación directa de los ordenadores sobre los que estudian en AO. En ese sentido, hemos elegido ARM [6] y hemos argumentado nuestra decisión.

Aunque ya en una primera etapa están elegidos el ordenador y las herramientas de simulación y de pequeño ordenador real (Raspberry Pi), aún queda el trabajo de concretar las fases en las que se irá introduciendo esta arquitectura, aunque una de ellas será BRM [12]. En todo caso la estructuración que se haga de la arquitectura ARM para facilitar el aprendizaje al alumno ha de ser completamente compatible con la arquitectura real de ARM y con el simulador elegido [23].

Finalmente hay una serie de herramientas y materiales que usamos en la asignatura y a la que habrá que adaptar o crear nuevos materiales, tanto vídeos [27] como elementos de evaluación y autoevaluación [28].

AGRADECIMIENTOS

Gracias a nuestros compañeros en la docencia de las asignaturas relacionadas con AO, con quienes hemos compartido tantas reflexiones que han servido para mejorar la asignatura: Manuel J. Fernández Iglesias, Alberto Gil Solla, Luis E. Anido Rifón, Enrique Costa Montenegro. Especial recuerdo a Eduardo Cunha por su magnífica aportación a ESAL.

REFERENCIAS

- [1] G. Fernández. "Conceptos básicos de Arquitectura y Sistemas Operativos, Curso de Ordenadores" (Basics Concepts on Architectures and Operating Systems, Course of Computers). Sistemas y Servicios de Comunicación, S.L. ISBN 84-605-0522-7. (Available in Spanish).
- [2] M. Llamas, L. Anido, M. J. Fernández. "Simulators over the network" *IEEE Transactions on Education*, Vol. 44, No. 2, CD-ROM Directory 09, May 2001.
- [3] Eduardo Cunha-Rodríguez. "ESAL: entornos de simulación para los ordenadores pedagógicos Simplez, Simplez+i4 y Algorítmez." (ESAL: simulation environments for pedagogical computers Simplez, Simplez+i4 and Algorítmez). Proyecto Fin de Carrera (Master Thesis), Tutor: Martín Llamas Nistal. E.T.S.I. de Telecomunicación. Universidad de Vigo. 2001. (Available in Spanish).
- [4] EE de Telecomunicación. "Guía docente de Informática:Arquitectura de Ordenadores", Vigo (España), 2016 [Online] Available: <https://seix.uvigo.es/docnet->

nuevo/guia_docent/?centre=305&ensenyament=V05G300V01&assignatura=V05G300V01103&idioma=cast (Available in Spanish).

- [5] The X86 Microprocessors: Architecture And Programming (8086 To Pentium). Das Lyta B. Editor: Pearson Education India, 2010. ISBN: 8131732460, 9788131732465.
- [6] ARM Architecture Reference Manual. David Sea. Editor: Pearson Education, 2001 ISBN: 0201737191, 9780201737196.
- [7] Microprocessor Architectures and Systems: RISC, CISC and DSP. Steve Heath. Editor: Newnes, 2014. ISBN: 1483278247, 9781483278247
- [8] Heinrich, Joseph, and Gerry Kane. MIPS RISC Architecture. Prentice Hall, 1992
- [9] Mazidi, M. A., Naimi, S., & Naimi, S. (2010). AVR microcontroller and embedded systems: using assembly and C. Prentice Hall Press
- [10] 2014 de los Rankings I-UGR de Universidades Españolas según Campos y Disciplinas Científicas (5ª ed). Elaborado por los grupos de investigación EC3-EC3metrics spin-off y SCI2S, Universidad de Granada, 2014. [Online] Available: <http://www.rankinguniversidades.es> (Available in Spanish).
- [11] Clements, A., "ARMs for the poor: Selecting a processor for teaching computer architecture," in *Frontiers in Education Conference (FIE), 2010 IEEE*, vol., no., pp.T3E-1-T3E-6, 27-30 Oct. 2010 doi: 10.1109/FIE.2010.5673541
- [12] Fernández Fernández, Gregorio. "Elementos de sistemas operativos, de representación de la información y de procesadores hardware y software." Dpto. Ingeniería de Sistemas Telemáticos - UPM, Madrid. 2015. [Online] Available: <http://oa.upm.es/36552/> (Available in Spanish).
- [13] Luis Anido, Martín Llamas, and Manuel J Fernández. "Labware for the internet". *Computer Applications in Engineering Education*, 8(3-4):201-208, 2000.
- [14] J. M. Santos, M. Llamas, M. J. Moure and A. Lago, "Computer Architecture Lab: A bridge between electronics and computers," *Technologies Applied to Electronics Teaching (TAE), 2012*, Vigo, 2012, pp. 38-43. doi: 10.1109/TAE.2012.6235403.
- [15] Nikolic, B.; Radivojevic, Z.; Djordjevic, J.; Milutinovic, V., "A Survey and Evaluation of Simulators Suitable for Teaching Courses in Computer Architecture and Organization," in *Education, IEEE Transactions on*, vol.52, no.4, pp.449-458, Nov. 2009 doi: 10.1109/TE.2008.930097
- [16] N. L. Binkert, R. G. Dreslinski, L. R. Hsu, K. T. Lim, A. G. Saidi, and S. K. Reinhardt, Main Page -M5 2007 [Online]. Available: <http://www.m5sim.org>
- [17] N. L. Binkert, R. G. Dreslinski, L. R. Hsu, K. T. Lim, A. G. Saidi, and S. K. Reinhardt, "The M5 simulator: Modeling networked systems," *IEEE Micro*, vol. 26, no. 4, pp. 52-60, Jul./Aug. 2006.
- [18] Nathan Binkert, Bradford Beckmann, Gabriel Black, Steven K. Reinhardt, Ali Saidi, Arkaprava Basu, Joel Hestness, Derek R. Hower, Tushar Krishna, Somayeh Sardashti, Rathijit Sen, Korey Sewell, Muhammad Shoaib, Nilay Vaish, Mark D. Hill, and David A. Wood. 2015. Main Page - gem5. [Online]. Available: <http://www.gem5.org> and <http://www.m5sim.org>
- [19] Nathan Binkert, Bradford Beckmann, Gabriel Black, Steven K. Reinhardt, Ali Saidi, Arkaprava Basu, Joel Hestness, Derek R. Hower, Tushar Krishna, Somayeh Sardashti, Rathijit Sen, Korey Sewell, Muhammad Shoaib, Nilay Vaish, Mark D. Hill, and David A. Wood. 2011. The gem5 simulator. *SIGARCH Comput. Archit. News* 39, 2 (August 2011), 1-7. DOI=<http://dx.doi.org/10.1145/2024716.2024718>
- [20] Wind River Simics, 2016 [Online]. Available: <http://www.windriver.com/products/simics/>
- [21] P. S. Magnusson, M. Christensson, J. Eskilson, D. Forsgren, G. Hällberg, J. Högberg, F. Larsson, A. Moestedt, and B. Werner, "Simics: A full system simulation platform," *Computer*, vol. 35, pp. 50-58, Feb. 2002.
- [22] SimpleScalar LLC The SimpleScalar Toolset, 2011 [Online]. Available: <http://www.simplescalar.com>
- [23] University of Victoria, British Columbia. 2016 [Online] Available <http://armsim.cs.uvic.ca/>

- [24] Hamid R. Arabnia, Azita Bahrami and Victor A. Clincy. "ARMSim# - a Customizable Simulator for Exploring the ARM Architecture" FECS2009: 223-228.
- [25] Raspberry Pi Foundation, 2016. [Online] Available: <https://www.raspberrypi.org/>
- [26] García-Zubia, J.; Angulo, I.; Hernandez, U.; Castro, M.; Sancristobal, E.; Orduna, P.; Irurzun, J.; de Garibay, J.R., "Easily Integrable platform for the deployment of a Remote Laboratory for microcontrollers," in *Education Engineering (EDUCON), 2010 IEEE*, vol., no., pp.327-334, 14-16 April 2010
doi: 10.1109/EDUCON.2010.5492558
- [27] Llamas-Nistal, M.; Mikic-Fonte, F.A., "Generating OER by Recording Lectures: A Case Study," in *Education, IEEE Transactions on*, vol.57, no.4, pp.220-228, Nov. 2014
doi: 10.1109/TE.2014.2336630
- [28] Martín Llamas-Nistal, Manuel J. Fernández-Iglesias, Juan González-Tato, and Fernando A Mikic-Fonte. "Blended e-assessment: Migrating classical exams to the digital world". *Computers & Education*, 62:72–87, 2013.