



Teaching "on-Board Data Management" Concepts
in the "Physics and Space Instrumentation"
Degree. an Example of a Common Use Case and
Vertical Coordination Among Subjects

Antonio Da Silva, Óscar Rodríguez, Pablo Parra,
Agustín Martínez, Juan Ignacio García, Manuel Prieto and
Sebastián Sánchez

EasyChair preprints are intended for rapid
dissemination of research results and are
integrated with the rest of EasyChair.

January 14, 2025

Enseñanza de la materia “Gestión de datos a bordo” en el grado de “Física e Instrumentación Espacial”. Un ejemplo de caso de uso y coordinación vertical entre asignaturas

Antonio da Silva

Departamento de Automática
Universidad de Alcalá
Alcalá de Henares, Spain
antonio.dasilva@uah.es

Óscar R. Polo

Departamento de Automática
Universidad de Alcalá
Alcalá de Henares, Spain
o.rodriguez@uah.es

Pablo Parra

Departamento de Automática
Universidad de Alcalá
Alcalá de Henares, Spain
pablo.parra@uah.es

Agustín Martínez

Departamento de Automática
Universidad de Alcalá
Alcalá de Henares, Spain
agustin.martinez@uah.es

Ignacio García

Departamento de Automática
Universidad de Alcalá
Alcalá de Henares, Spain
ignacio.garcia@uah.es

Manuel Prieto

Departamento de Automática
Universidad de Alcalá
Alcalá de Henares, Spain
manuel.prieto@uah.es

Sebastián Sánchez

Departamento de Automática
Universidad de Alcalá
Alcalá de Henares, Spain
sebastian.sanchez@uah.es

Abstract—La investigación y la docencia son los dos pilares sobre los que se asienta la Universidad. Por ello, los grupos de investigación deben participar activamente en la transmisión de este conocimiento a la sociedad. En este trabajo se presenta el grado de “Física e Instrumentación Espacial” de la Universidad de Alcalá (UAH), que ha sido promovido por el Grupo de Investigación Espacial (SRG-UAH) de la misma institución. Este nuevo grado, único en el espacio educativo español, pretende formar a una nueva generación de futuros científicos y tecnólogos en el campo de la exploración espacial. Además, combina los elementos de Ciencia, Tecnología, Electrónica y Matemáticas (STEM) de una forma que no estaba contemplada en las titulaciones clásicas de ciencia y tecnología. En este trabajo se presenta el caso de uso común usado en las diferentes asignaturas que componen la materia “Gestión de datos a bordo”, la coordinación vertical de los contenidos entre las mismas y los entornos de laboratorio usados.

Index Terms—Sistemas espaciales, Software empotrado, Tolerancia a fallos, Coordinación vertical

I. INTRODUCCIÓN

El 27/06/2022 se publicó en el BOE el real decreto por el cual el Ejército del Aire pasó a denominarse Ejército del Aire y del Espacio. Es solo una muestra más de cómo la tecnología aeroespacial y las infraestructuras relacionadas son una realidad que debe ser abordada por las instituciones educativas.

Este campo requiere nuevos profesionales que hayan recibido una formación completa en ciencia y tecnología aplicadas al sector espacial. Así pues, las instituciones de educación superior que ofrecen cursos relacionados con el sector aeroespacial deberían explorar nuevas áreas de transferencia

de conocimientos para conectar la educación aeroespacial y la práctica profesional [1].

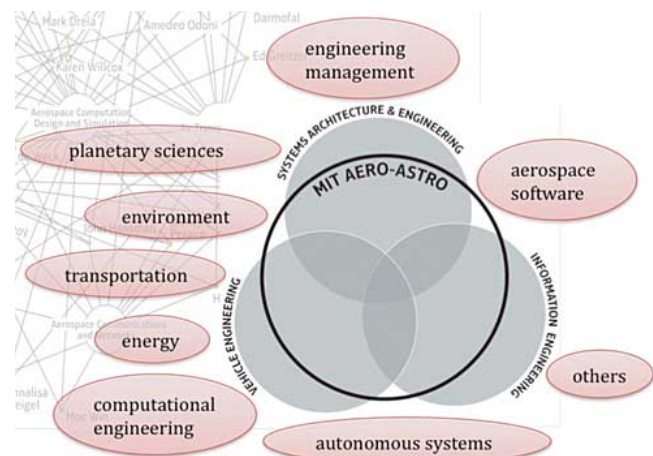


Fig. 1. Cambios en los títulos del área Aeroespacial, Figura tomada de [2]

Existen iniciativas para adaptar los programas de las ingenierías aeroespaciales clásicas [2], [3] que no pueden dar respuesta a los nuevos requisitos demandados actualmente por la industria aeronáutica. De hecho, en la actualidad esta industria demanda personal formado en desarrollo hardware con FPGAs, software empotrado, ingeniería de sistemas y expertos en tecnologías de la información como se muestra en la figura 1.

A. Estructura del artículo

El artículo se estructura en cuatro secciones. La primera sirve de introducción y plantea la necesidad de actualizar, en lo relativo al diseño de sistemas electrónicos, las actuales titulaciones de técnica aeroespacial. La segunda sección presenta el nuevo grado en “Física e Instrumentación Espacial” y se hace énfasis en la materia “Gestión de datos a bordo” en la que se enmarcan las principales competencias relacionados con el desarrollo de sistemas electrónicos embarcados. La tercera describe los métodos y materiales usados para lograr una correcta coordinación vertical en la impartición de dicha materia. Finalmente la cuarta sección presenta las conclusiones del trabajo.

II. DESCRIPCIÓN DEL GRADO EN “FÍSICA E INSTRUMENTACIÓN ESPACIAL”

El grado de “Física e Instrumentación Espacial” [4] es el primero de estas características que se propone en el ámbito universitario español y tiene una alta componente interdisciplinar que integra en un título modos de trabajo y conocimientos propios de la Física y la Tecnología, tal y como sucede hoy en día en los proyectos dirigidos a la investigación y exploración espacial, y a su desarrollo tecnológico asociado. Para ello combina los elementos de Ciencia, Tecnología, Electrónica y Matemáticas (STEM) de una forma que hasta ahora no estaba contemplada en las titulaciones clásicas de ciencia y tecnología. Esto lo hace fundamentalmente distinto tanto de los grados de Física al uso como de las Ingenierías Aeroespaciales que se imparten en el sistema universitario español.

TABLA I
MATERIAS BÁSICAS

Asignatura	Materia	Créditos
Álgebra Lineal	Matemáticas	6
Cálculo I		6
Cálculo II		6
Estadística		6
Mecánica	Física básica	6
Campos y ondas		6
Termodinámica		6
Electromagnetismo		6
Introducción a la física cuántica		6
Óptica y técnicas de observación		6
Fundamentos de computadores		Tecnología de computadores a bordo
Fundamentos de la programación	Gestión de datos a bordo	6

Este nuevo grado no cubre competencias que tengan relación alguna con la capacidad de vuelo, sustentación, aerodinámica, o propulsión de vehículos para su navegación a través del espacio, sino que capacita para comprender,

integrar y validar plataformas, cargas útiles científicas e instrumentación de medida embarcables en satélite, integrando los conocimientos de la física que se puede desarrollar en y desde el espacio, y los relativos al desarrollo de sistemas embarcados, sobre los que se aplican los estándares de desarrollo propios del sector espacial [5].

El Grado en “Física e Instrumentación Espacial” de la Universidad de Alcalá, comenzó a impartirse en el curso 2021/2022 y actualmente se encuentra en su tercer curso. Se trata de un título presencial de 240 créditos ECTS, que fue acreditado inicialmente el 18 de mayo de 2020 por la Comisión Española de Verificación y Acreditación de Planes de Estudio. Este grado se estructura en cuatro cursos académicos, con dos semestres de 30 créditos ECTS cada uno. El grado se estructura en una parte común, que deben cursar todos los estudiantes y a la que se asignan 204 ECTS. Las tablas I y II muestran las asignaturas básicas y obligatorias del grado, así como las materias a las que pertenece cada asignatura.

TABLA II
MATERIAS OBLIGATORIAS

Asignatura	Materia	Créditos
Cálculo numérico	Matemáticas	6
Métodos matemáticos de la física		6
Fundamentos de electrónica	Tecnología de computadores a bordo	6
Estructura de computadores a bordo		6
Programación de dispositivos e interfaces	Gestión de datos a bordo	6
Sistemas operativos		6
Arquitecturas tolerantes a fallo		6
Sistemas de gestión de datos a bordo		6
Física cuántica	Física de la materia y del espacio	6
Mecánica estadística		6
Ciencia de los materiales		6
Astrofísica		6
Fluidos en ambientes planetarios y espaciales		6
Análisis de circuitos	Señales, sistemas y comunicaciones	6
Señales y sistemas		6
Comunicaciones con el segmento de tierra		6
Dinámica espacial	Dinámica y control de satélites	6
Sistemas de control de actitud y orbitas		6
Sistemas espaciales	Sistemas espaciales	6
Estructura y sistema térmico de un satélite		6
Sistemas de potencia en el espacio		6
Gestión de proyectos espaciales		6

Además, los alumnos deben cursar una serie de créditos optativos, en los que pueden, si lo desean, realizar prácticas en empresas y centros de investigación. La estructura también incluye un proyecto final de carrera de 12 créditos.

A. Materia “Gestión de datos a bordo”

La materia “Gestión de datos a bordo” está formada por un conjunto de asignaturas que permiten a los estudiantes adquirir los conocimientos técnicos necesarios para la especificación, diseño y validación de los componentes hardware/software del sistema de gestión de datos a bordo de un satélite. De esta forma los estudiantes adquieren, entre otras, la siguiente competencia específica:

- Demostración de conocimiento del proceso de especificación, diseño y validación del sistema de gestión de datos a bordo de un satélite.

Esta competencia se adquiere al superar las siguientes asignaturas del plan de Estudios del grado de “Física e Instrumentación Espacial”:

- Fundamentos de la programación
- Programación de dispositivos e interfaces
- Sistemas operativos
- Arquitecturas tolerantes a fallo
- Sistemas de gestión de datos a bordo

En dichas asignaturas son necesarios entornos hardware/software de los que, en general, el alumno no puede disponer fuera de la universidad, debido a su especificidad y alto coste. Para fomentar el trabajo autónomo del alumno fuera del aula se propone el uso simuladores de los diferentes entornos que permitan al alumno, sino realizar el trabajo completo, si poder avanzar en el mismo fuera del aula. De esta forma los desarrollos podrán ser después cargados, ejecutados y depurados en el entorno real sin tener que realizar modificaciones en los proyectos. Esto hace que el proceso de aprendizaje sea más efectivo.

Se propone como segundo objetivo dotar al alumno de un entornos de aprendizaje integrados en forma de máquina virtual con una distribución de Ubuntu, que incluyan las herramientas esenciales de cada entorno de laboratorio y que permita el trabajo autónomo del alumno fuera del aula y que puede ser reutilizada por las diferentes asignaturas en diferentes cuatrimestres.

Además se propone la definición de un caso práctico único, desde sus aspectos más básicos a los más avanzados, que permita una correcta coordinación vertical entre las diferentes asignaturas que forman la materia “Gestión de datos a bordo” [6].

III. COORDINACIÓN VERTICAL DE LA MATERIA “GESTIÓN DE DATOS A BORDO”

De forma general, los esfuerzos de coordinación se realizan en el marco de todos los cursos de un semestre, pero pocas veces en el marco de toda la titulación. Los primeros han sido principalmente trabajos de coordinación horizontal, que son realizados por comisiones diferentes (una por semestre), con el

objetivo principal de coordinar temporalmente las actividades docentes, visitas, los exámenes y las entregas de trabajos prácticos. Sin embargo, se han realizado pocos esfuerzos en sentido temático o vertical [7] [8].

La coordinación vertical, por el contrario, se encarga fundamentalmente de asegurar la correcta distribución y consecución de las competencias específicas y transversales del título, así como de planificar de forma adecuada la utilización de los recursos demandados de forma horizontal por los diferentes equipos docentes. De forma complementaria existe otra forma de coordinación vertical y es aquella relacionada con las asignaturas que forman parte de una misma materia. Generalmente una materia se descompone en varias asignaturas que no tienen por qué pertenecer a un mismo semestre y/o curso académico. La memoria de grado asigna a cada materia las competencias específicas y transversales que deben adquirirse y resulta muy útil una coordinación entre los profesores que imparten asignaturas de una misma materia que permita delimitar claramente qué competencias aborda cada una de ellas y con qué profundidad. En el caso de asignaturas del mismo curso, no sería necesario establecer mecanismos de coordinación horizontal específicos ya que de forma implícita se incluyen en la coordinación horizontal general antes comentada [9].

A. Descripción del caso de uso práctico

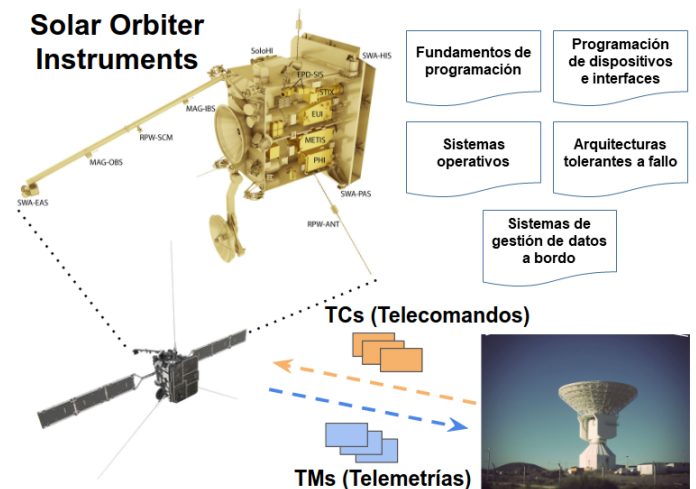


Fig. 2. Caso de uso práctico y asignaturas relacionadas

El contenido específico de la transferencia de conocimientos de investigación que se describe en este trabajo está relacionado con las actividades internacionales más relevantes del grupo de investigación SRG en los últimos años. Principalmente el desarrollo del instrumento Energetic Particle Detector (EPD) de la misión Solar Orbiter, que es una colaboración entre la Agencia Espacial Europea (ESA) y la National Aeronautics and Space Administration (NASA). La sonda Solar Orbiter fue lanzada el 10 de febrero de 2020 y ahora se encuentra en la fase científica, en la que está enviando valiosos datos para la comprensión de la física solar [10].

La figura 2 muestra de forma global el caso de uso planteado. En ella la nave Solar Orbiter se comunica con el segmento de tierra mediante el intercambio de paquetes de datos de acuerdo al estándar ECSS-E-ST-70-41C (PUS: Packet Utilization Standard) [11]. En las diferentes asignaturas de la materia “Gestión de datos a bordo” se aborda el procesamiento de estos paquetes de datos desde diferentes puntos de vista. Desde el desarrollo de software empotrado hasta los aspectos de tolerancia a fallos implicados en el desarrollo del sistema en su conjunto.

El grupo de profesores que imparte la materia está formado por siete personas, seis profesores titulares y un catedrático. Todos ellos pertenecientes al grupo de investigación SRG y adscritos al Departamento de Automática de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Alcalá.

B. Contenidos de cada asignatura

1) *Fundamentos de la programación (2 cuatrimestre)*: Esta asignatura aborda los fundamentos de la programación en lenguaje C con una fuerte orientación al uso de operadores binarios y los problemas de “endianess” relativos al orden en el que se almacenan y procesan los datos de tamaño superior a un octeto. Como ejemplos de estructuras de datos se manejarán las definidas en el estándar PUS y la entrada/salida de dichos paquetes se realiza sobre ficheros. Todo el código desarrollado en las prácticas es independiente de la plataforma por lo que puede usarse cualquier entorno de edición/compilación C. Los contenidos prácticos fundamentales serían:

- Estructura de datos PUS
- Operadores a nivel de bit
- Serialización, deserialización de datos (Endianess)

2) *Programación de dispositivos e interfaces (3 cuatrimestre)*: Esta asignatura introduce al estudiante en el desarrollo de software empotrado sobre una máquina desnuda. El código desarrollado ya es dependiente de la plataforma y se aborda el estudio y programación de la periferia básica y de comunicaciones presente en los sistemas empotrados para aplicaciones espaciales. También se abordan los diferentes esquemas de gestión de la entrada/salida, el concepto de manejador de dispositivo y los patrones básicos de codificación de manejadores de interrupción. En este ámbito se simula la recepción de telecomandos y la respuesta con telemetrías mediante líneas de comunicación serie.

- Programación de la máquina desnuda, interfaz de registros y drivers de dispositivo
- Uso de entornos de simulación para el desarrollo de software empotrado
- Interfaces serie UART, transmisión/recepción de TM/TC mediante monitores de línea serie
- Gestión del tiempo, temporizadores

3) *Sistemas operativos (4 cuatrimestre)*: En esta asignatura se introduce al estudiante en la necesidad de utilizar sistemas de software que ayuden a proporcionar niveles de abstracción lo suficientemente altos como para acometer el desarrollo de sistemas aún más complejos. En general, los sistemas

operativos se encargan de poner a disposición de los usuarios los recursos hardware de la plataforma de forma sencilla y segura. Además, facilitan el desarrollo y permiten la ejecución concurrente de programas o tareas que implementan diferentes funcionalidades del sistema.

- Sistemas operativos de tiempo real
- Programación multitarea, gestión de la concurrencia
- Transmisión/recepción de TM/TC mediante herramientas específicas de GSE (Ground Support Equipment)

4) *Arquitecturas tolerantes a fallo (5 cuatrimestre)*: Esta asignatura tiene como objetivo proporcionar los conocimientos sobre los métodos y las técnicas de diseño más empleadas en sistemas procesadores para la detección y tolerancia a fallos, con el objetivo final de que el sistema siga operativo aún en presencia de fallos. Los contenidos de la asignatura abarcan el hardware y el software de las arquitecturas de sistemas procesadores empleadas en instrumentación espacial.

- Aspectos de fiabilidad relacionado el diseño de sistemas espaciales
- Técnicas de tolerancia de fallos y recuperación
- Concepto de redundancia. Técnicas de redundancia hardware/software
- Técnicas de redundancia de la información.

5) *Sistema de gestión de datos a bordo (6 cuatrimestre)*: En esta asignatura se describen los principios de la gestión de datos a bordo de un sistema satélite. Para ello se centra principalmente, en el papel del software ODBH (On Board Data Handling), detallando los servicios estándar que debe implementar, detallando los elementos de la arquitectura software que intervienen, y de forma específica, los que habilitan la detección, aislamiento y recuperación de fallos.

- Servicios TM/TC Standard de la gestión de datos a bordo.
- Extensión de TM/TC específicos para una misión
- Patrones de procesamiento TM/TC
- Modelado de sistemas y generación de código para OBDH (On Board Data Handling)

C. Entornos de laboratorio

Además de que los contenidos prácticos giren alrededor de un caso común usado en los diferentes escenarios prácticos de laboratorio, el uso de entornos de laboratorio basados en una máquina virtual común que incluya todas las herramientas necesarias para el desarrollo de las prácticas en las diferentes asignaturas, facilita en gran medida la curva de aprendizaje de los estudiantes.

Por otro lado, para la distribución de la información, ejercicios, ejemplos de clase y enunciados de prácticas se ha optado por documentos online formateados con Markdown [12]. Los enlaces a estos documentos son fácilmente distribuidos y compartidos de una forma muy ágil a través de los entornos de gestión de aprendizaje tipo Moodle o Blackboard. Todo ello con una apariencia que es común a todos los contenidos como se muestra en la figura 3.

En el caso de las asignaturas de desarrollo de software empotrado se ha usado un entorno de edición y compilación para C/C++ basado en Eclipse.

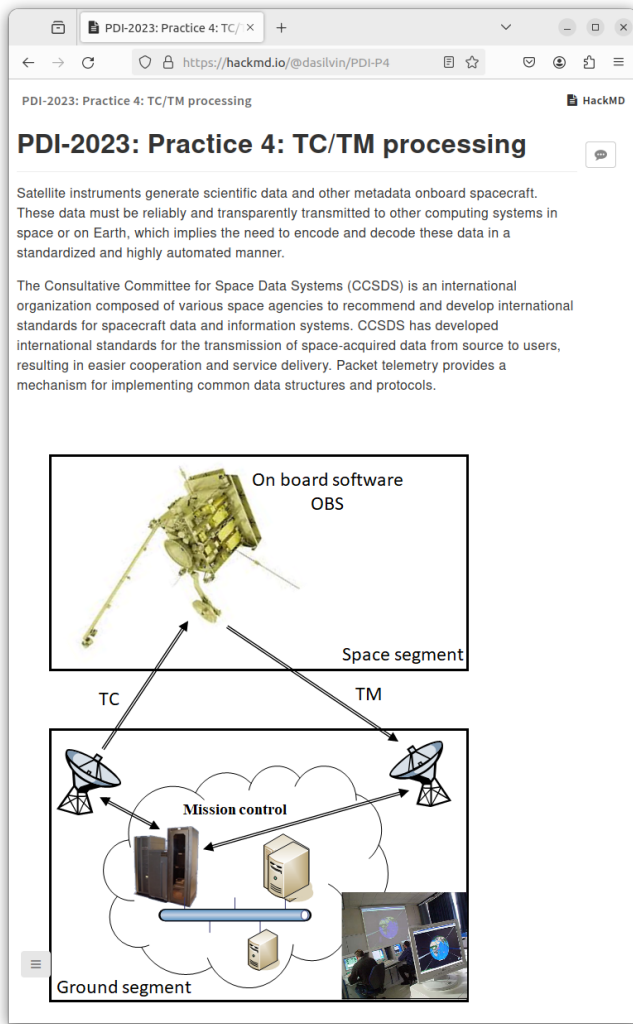


Fig. 3. Ejemplo de enunciado online con HackMD-Collaborative Markdown Knowledge Base

Los proyectos que se desarrollan en este entorno usarán en cada asignatura las herramientas de desarrollo GNU específicas (toolchain) para su entorno de ejecución. Por defecto se incluye un proyecto Eclipse completamente configurado como ejemplo de cada entorno. Para la asignatura Arquitecturas tolerantes a fallo se ha incluido Matlab en la máquina virtual. A continuación se describen brevemente cada uno de los entornos de laboratorio:

1) *Fundamentos de la programación*: Los programas desarrollados en este laboratorio son independientes de la plataforma por lo que usan el compilador GNU gcc para arquitecturas Intel cuyos binarios pueden ejecutarse directamente en la máquina virtual.

2) *Programación de dispositivos e interfaces*: En este laboratorio se desarrolla software empotrado para una máquina desnuda con un procesador RISC-V por lo que se debe usar una toolchain GNU RISC-V para realizar la compilación cruzada.

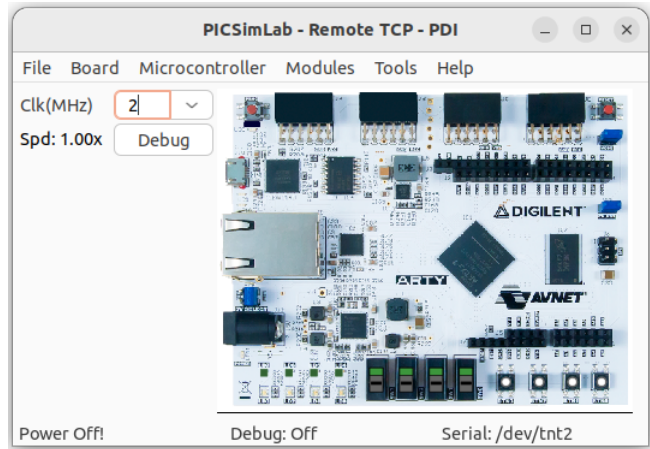


Fig. 4. Simulador de la placa Arty-A7 con un SOC RISC-V

Los programas realizados son ejecutados sobre un entorno simulado que se muestra en la figura 4 que reproduce el comportamiento de una placa Arty-A7 basada en la FPGA Arty A7-100T de Xilinx sobre la que se ha sintetizado un SoC que integra un procesador RISC-V y diversos controladores de interfaces de comunicaciones como son líneas serie UART e interfaces SPI. Este entorno de simulación está basado en [13]

3) *Sistemas operativos*: En esta asignatura se usa la placa Arty-A7 real mostrada en la figura 5, con la configuración descrita anteriormente. El objetivo es introducir al alumno en la necesidad de utilizar sistemas de software que ayuden a proporcionar niveles de abstracción lo suficientemente altos como para acometer el desarrollo de sistemas aún más complejos mediante el uso de sistemas operativos de tiempo real. En este laboratorio se usa RTEMS [14] como sistema operativo de tiempo real con su toolchain para RISC-V.

4) *Arquitecturas tolerantes a fallo*: En esta asignatura se ejercitan los mecanismos más típicos para lograr tolerancia a fallos en la transmisión y procesamiento de la información. Los TM/TC incluyen campos con códigos detectores y correctores de error. Mediante ejercicios de programación en Matlab se consolidarán los conceptos presentados en teoría. Los programas se ejecutarán directamente desde el entorno de desarrollo Matlab en la máquina virtual sin necesidad de ningún equipamiento adicional.

5) *Sistemas de gestión de datos a bordo*: En este laboratorio se aborda el estudio del ODBH, su especificación técnica, el diseño de su arquitectura desde una perspectiva de alto nivel y los aspectos de diseño detallado e implementación en un hardware real. Para ello se utilizará una placa Nexys A7, mostrada en la figura 6 y que también está basada en la FPGA Arty A7-100T de Xilinx sobre la que se ha sintetizado un SoC que integra un procesador LEON3, muy utilizado en misiones de la agencia Espacial Europea (ESA), y diversos controladores de comunicaciones ya mencionados anteriormente. En este laboratorio se usa también RTEMS como sistema operativo de tiempo real con la toolchain para la familia de procesadores LEON [15].

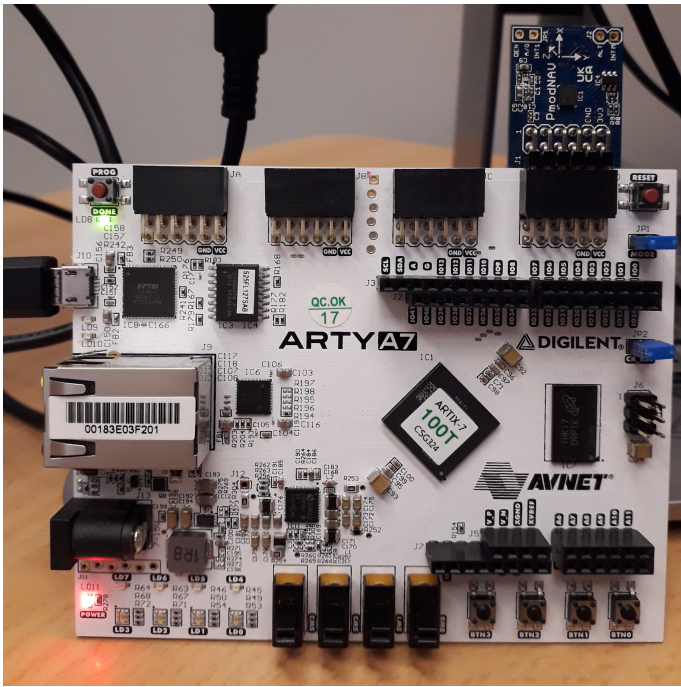


Fig. 5. Placa Arty-A7 real con SOC RISC-V y sensor SPI

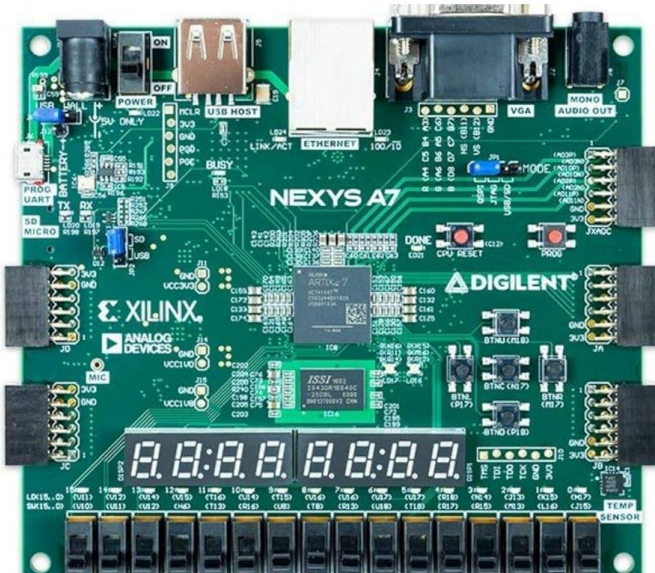


Fig. 6. Placa Nexys-A7 con un SOC LEON3

IV. CONCLUSIONES

Este artículo presenta las líneas generales del grado de “Física e Instrumentación Espacial”, diseñado para responder a las demandas de la industria espacial actual y cómo adecuar la formación y la transferencia de conocimientos a las nuevas realidades. Este grado cubre las áreas de conocimiento necesarias para el desarrollo de sistemas espaciales que no están cubiertas por las titulaciones aeroespaciales clásicas. Desde un punto de vista multidisciplinar, esto incluye no sólo aspectos físicos como la dinámica espacial sino también

aspectos tecnológicos relacionados con el software de vuelo y la ingeniería de sistemas.

También se ha descrito el caso de uso usado para lograr una correcta coordinación vertical en la impartición de la materia “Gestión de datos a bordo” y el uso de una única máquina virtual con todas las herramientas necesarias para las prácticas de las diferentes asignaturas.

Los resultados de esta metodología, en comparación con una aproximación tradicional basada en prácticas y entornos independientes, muestran una mejora en las capacidades formativas trabajadas en las asignaturas, incluyendo una mejora de la calidad de la programación, mejor organización del trabajo y cumplimiento de plazos y una visión mucho más práctica. Esta percepción del grupo de profesores se deriva de la experiencia previa en la impartición de contenidos tecnológicos semejantes en grados de Ingeniería de Telecomunicación e Informática en los que no se ha usado esta metodología.

Desde la experiencia del grupo de investigación, la participación activa tanto en proyectos de investigación espacial como en la propuesta de nuevas titulaciones, aunque supone un reto, también es muy gratificante profesionalmente, así como muy apreciada por los estudiantes.

Actualmente la titulación se encuentra en su tercer año y ha tenido muy buena acogida. Se ha ofertado un cupo anual de 50 plazas y la nota de corte ha sido superior a 12,4 puntos sobre 14 en los tres cursos. Desde una perspectiva de género, la distribución de alumnos y alumnas es en torno al 50%.

REFERENCES

- [1] S. Roy, Y. Dong, L. Baber, and B. Ahn, “Classroom to Workplace: Knowledge and Skills Learned by Recently Hired Aerospace Engineers,” *Journal of Aerospace Information Systems*, vol. 19, no. 4, pp. 317–329, 2022.
- [2] L. N. Long, “On the need for significant reform in University Education, especially in Aerospace Engineering,” in *2015 IEEE Aerospace Conference*, 2015, pp. 1–7.
- [3] E. M. Atkins, “Education in the crosscutting sciences of Aerospace and Computing,” *Journal of Aerospace Information Systems*, vol. 11, no. 10, pp. 726–737, 2014.
- [4] Universidad de Alcalá, “Grado en Física e Instrumentación Espacial,” <https://www.uah.es/es/estudios/Grado-en-Fisica-e-Instrumentacion-Espacial/>, 2024, [Online; accessed 1-Mar-2024].
- [5] S. Dalledonne, M. V. Prest, M. Hermes, and L. Pohl, “Space education in Europe: status and prospects,” *4th Symposium on Space Educational Activities*, 2022. [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:251121207>
- [6] R. Asenjo, S. González, F. Corbera, Á. Navarro, A. Rodríguez, J. Villalba, E. Hendrix *et al.*, “La plataforma Raspberry Pi como base para la coordinación vertical,” *Enseñanza y Aprendizaje de Ingeniería de Computadores*, 2017.
- [7] C. Carbonell, S. Cardona, I. Domínguez-Candela, V. Fombuena, M. F. López-Pérez, J. Lora, and R. Sanchis, “Project-based learning as a coordination methodology between subjects in a Chemical Engineering degree,” in *INTED2021 Proceedings*. IATED, 2021, pp. 5965–5974.
- [8] J. Linares-Pellicer, J. Orta-López, J. Salavert-Torres, M. J. Segura Flor, J. A. Silvestre Cerdà, and R. Sanchis, “Towards inter-subject project-based learning in programming-related courses at computer science studies,” *EDULEARN Proceedings (Internet)*, pp. 3973–3978, 2020.
- [9] M. Ferré, C. García-Barroso, M. García-Famoso, D. Sánchez, and A. Valls, “Comprehensive simulation of a software project throughout several subjects,” *IEEE Revista Iberoamericana de Tecnologías del Aprendizaje*, vol. 15, no. 4, pp. 262–271, 2020.

- [10] S. Sánchez, M. Prieto, Óscar R. Polo, P. Parra, A. da Silva, Óscar Gutiérrez, R. Castillo, J. Fernández, and J. Rodríguez-Pacheco, "HW/SW co-design of the Instrument Control Unit for the Energetic Particle Detector on-board Solar Orbiter," *Advances in Space Research*, vol. 52, no. 6, pp. 989–1007, 2013.
- [11] European Cooperation for Space Standardization, "ECSS-E-ST-70-41C-Telemetry and Telecommand Packet Utilization," <https://ecss.nl/standard/ecss-e-st-70-41c-space-engineering-telemetry-and-telecommand-packet-utilization-15-april-2016/>, 2016, [Online; accessed 20-Mar-2024].
- [12] Matt Cone, "Markdown Guide," <https://www.markdownguide.org/>, 2024, [Online; accessed 20-Mar-2024].
- [13] Fernando Gamboa, "PICSimLab - Programmable IC Simulator Laboratory," <https://github.com/lcgamboa/picsimlab/>, 2024, [Online; accessed 20-Mar-2024].
- [14] The RTEMS Project, "Real-Time Executive for Multiprocessor Systems," <https://www.rtems.org/>, 2024, [Online; accessed 20-Mar-2024].
- [15] The Euroean Space Agency, "Microprocessors," https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering/Onboard_Computers_and_Data_Handling/Microprocessors, 2024, [Online; accessed 20-Mar-2024].