Presentación de la asignatura Subsistema de Potencia para el Máster en Ingeniería Espacial

Cristina Fernández, Pablo Zumel, Andrés Barrado

Grupo de Sistemas Electrónicos de Potencia
Departamento de Tecnología Electrónica
Universidad Carlos III de Madrid, España

***Abstract*—. La asignatura Subsistema de Potencia en el Master de Ingeniería Espacial presenta a los estudiantes el diseño de subsistemas generación, distribución y acondicionamiento de energía eléctrica en naves espaciales o satélites. Esta asignatura plantea diversos retos desde el punto de vista del profesor, como la generación de contenidos actualizados, su adaptación al currículum de los estudiantes y el contexto en el que se imparte, fuera del ámbito puramente eléctrico o electrónico. Después de poner en contexto la asignatura y describirla desde un punto de vista formal y pedagógico, se abordan los contenidos y la experiencia obtenida hasta el momento en su impartición.**

I. INTRODUCCIÓN

Algunas universidades españolas están haciendo un esfuerzo en la creación de nuevos másteres en temáticas muy actuales con el objetivo de captar alumnos motivados y con buenas calificaciones. En ese sentido, en la Universidad Carlos III de Madrid, además de los másteres universitarios en profesiones reguladas y los másteres universitarios de investigación, se ha hecho un esfuerzo en la propuesta de nuevos másteres universitarios académicos/profesionales como Máster Universitario en Ciberseguridad, Máster Universitario en Gestión y Desarrollo de Tecnologías Biomédicas, Máster Universitario en Industria Conectada 4.0, Máster Universitario en Internet de las Cosas, etc. Siguiendo esta línea, este curso se puso en marcha el nuevo Máster Universitario en Ingeniería Espacial, impartido en inglés.

El programa de estudios del Máster en Ingeniería Espacial se realizó pensando en el carácter internacional, integral, y multidisciplinar de los proyectos y misiones espaciales. Se busca proporcionar una completa formación en diseño e ingeniería de sistemas con una metodología docente orientada al desarrollo de proyectos espaciales, se abarcando de manera teórica y práctica las materias claves en tecnologías y aplicaciones espaciales. Para ello se incluye tanto el vehículo espacial, entendido como la plataforma en la que se integran diferentes subsistemas, y su dinámica orbital y de actitud, como las disciplinas relacionadas con el control, las comunicaciones, la transmisión de datos, así como las aplicaciones tecnológicas más relevantes. Además, el máster cuenta con una colaboración estrecha con el sector industrial tanto en la docencia como en las prácticas.

ESTRUCTURA DEL PLAN DE ESTUDIOS POR MATERIAS
MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA ESPACIAL

MATERIA	ASIGNATURA	ECTS	Tipo	Curso	Cuatr
SYSTEM ENGINEERING/INGENIERÍA DE SISTEMAS	*Space systems Engineering/Ingeniería de sistemas espaciales*	3	O	1	2
	Space Project Management *Gestión de proyectos espaciales*	3	O	1	1
	Spacecraft Predesign *Prediseño de vehículos espaciales*	3	O	1	2
	TOTAL ECTS MATERIA	9			
APPLIED TECHNOLOGIES/ TECNOLOGÍAS APLICADAS	Global Navigation Satellite Systems and Telecommunication Systems *Sistemas globales de navegación por satélite y sistemas de telecomunicaciones*	3	O	1	2
	Remote sensing, and scientific missions *Teledetección y misiones científicas*	3	O	1	2
	Space Security / Seguridad Espacial	3	O	1	2
	TOTAL ECTS MATERIA	9			
SPACECRAFT AND DYNAMICS/ VEHÍCULOS ESPACIALES Y DINÁMICA	Orbital Dynamics *Dinámica orbital*	3	O	1	1
	Space Environment *Entorno espacial*	3	O	1	1
	Space Propulsion *Propulsión espacial*	3	O	1	1
	Spacecraft Structure *Estructura de vehículo espacial*	2	O	1	2
	Attitude dynamics and Guidance Navigation and Control *Dinámica de actitud y guiado, navegación y control*	3	O	1	1
	Thermal Subsystem *Subsistema térmico*	2	O	1	2
	Power Subsystem *Subsistema de potencia*	2	O	1	2
	Complements to aerospace engineering *Complementos de ingeniería aeroespacial*	6	OP	1	1
	TOTAL ECTS MATERIA	24			
SPACE COMMUNICATION,SOFTWARE AND ELECTRONICS/ ELECTRÓNICA, SOFTWARE Y COMUNICACIONES ESPECIALES	Antennas and Radio Propagation *Antenas y propagación*	3	O	1	1
	Telecommunications and Signal Processing *Telecomunicaciones y procesado de señal*	3	O	1	1
	Onboard Data Handling and Telemetry *Gestión de datos abordo y telemetría*	3	O	1	2
	Space Electronics *Electrónica espacial*	3	O	1	2
	Onboard spacecraft software *Software espacial embarcado*	3	O	1	1
	Ground Segment and Operations *Segmento terreno y operaciones*	3	O	1	2
	Complements to telecomunications engineering *Complementos de ingeniería de la telecomunicación*	6	OP	1	1
	TOTAL ECTS MATERIA	24			
ADVANCED TOPICS IN SPACE ENGINEERING/ MATERIAS AVANZADAS EN INGENIERÍA ESPACIAL	Seminars on Advanced Topics *Seminarios en materias avanzadas*	3	O	2	1
	Launchers and Re-entry Lanzadores y re-entrada	3	OP	2	1
	Advanced Space Propulsion Propulsión Espacial Avanzada	3	OP	2	1
	Space robotics & Automation Robótica y automatización espaciales	3	OP	2	1
	Entrepreneurship & Innovation Emprendimiento e innovación	3	OP	2	1
	The Solar System El Sistema Solar	3	OP	2	1
	Earth Observation Data Processing Procesado de datos de observación de la Tierra	3	OP	2	1
	Manufacturing, Integration & Testing Fabricación, integración y testing	3	OP	2	1
	Big Data for Space Missions Big Data para misiones espaciales	3	OP	2	1
	TOTAL ECTS MATERIA	27			
MASTER THESIS/TRABAJO FIN DE MÁSTER	Master Thesis *Trabajo fin de máster*	12	TFM	2	1
	TOTAL ECTS MATERIA	12			

Figura 1. Plan de estudios del Máster en Ingeniería Espacial que actualmente se imparte en la Universidad Carlos III de Madrid

Para proporcionar la formación multidisciplinar necesaria, se requiere la participación de varios departamentos: Departamento de Bioingeniería e Ingeniería Aeroespacial, Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones, Departamento de Tecnología Electrónica, Departamento de Informática, Departamento de Ingeniería Telemática, Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática y el Departamento de Ingeniería Mecánica.

Este trabajo está centrado en la preparación y el análisis de los resultados de la asignatura "Subsistema de Potencia", impartida por profesores del Departamento de Tecnología Electrónica, orientada a conocer el sistema de distribución de potencia de los vehículos espaciales y muy especialmente los satélites. Se pretende no solo describir los contenidos propuestos, la metodología docente y el sistema de evaluación, sino hacer una reflexión sobre los resultados conseguidos y el esfuerzo del profesorado en preparar una formación de calidad en un contexto cada vez más especializado.

II. Contexto de la asignatura y competencias adquiridas

A. *Estructura del máster*

El master está dividido en un total de cinco materias, como se indica en la Figura 1. Cada materia incluye distintas asignaturas que pueden ser de carácter obligatorio (tipo O) u optativo (tipo OP). Se espera que cada materia dote de conocimientos específicos sobre ese campo concreto.

En particular, la asignatura de Subsistema de Potencia (materia Vehículos Espaciales y Dinámica) tiene carácter obligatorio y consta de 2 créditos impartidos en el segundo cuatrimestre. Es por tanto una asignatura corta, que se imparte en 10 sesiones con clases de 1,5 horas.

Tras cursar esta materia, los estudiantes poseen conocimientos sobre el vehículo, el entorno y los distintos modelos físicos necesarios para realizar el diseño de una plataforma espacial. De manera más detallada, los resultados del aprendizaje (y evaluables en una o más asignaturas de la materia) son:

- Razonamiento analítico, y orientado a la resolución de problemas (por ejemplo, modelado o análisis con incertidumbre).
- Experimentación, investigación y descubrimiento de conocimiento (por ejemplo, formulación de hipótesis o indagación experimental).
- Destrezas y actitudes personales (por ejemplo, iniciativa y disposición a asumir riesgos o pensamiento creativo).

B. *Competencias*

Las competencias básicas son:

- Poseer y comprender conocimientos que aporten una base u oportunidad de ser originales en el desarrollo y/o aplicación de ideas, a menudo en un contexto de investigación.
- Que los estudiantes sepan aplicar los conocimientos adquiridos y su capacidad de resolución de problemas en entornos nuevos o poco conocidos dentro de contextos más amplios (o multidisciplinares) relacionados con su área de estudio.
- Que los estudiantes sean capaces de integrar conocimientos y enfrentarse a la complejidad de formular juicios a partir de una información que, siendo incompleta o limitada, incluya reflexiones sobre las responsabilidades sociales y éticas vinculadas a la aplicación de sus conocimientos y juicios.
- Que los estudiantes sepan comunicar sus conclusiones y los conocimientos y razones últimas que las sustentan a públicos especializados y no especializados de un modo claro y sin ambigüedades.
- Que los estudiantes posean las habilidades de aprendizaje que les permitan continuar estudiando de un modo que habrá de ser en gran medida autodirigido o autónomo.

Las competencias generales son:

- Capacidad para la formulación, comprobación crítica y defensa de hipótesis, así como el diseño de pruebas experimentales para su verificación.
- Capacidad de realizar juicios de valor y priorizar en la toma de decisiones conflictivas utilizando un pensamiento sistémico.
- Capacidad para trabajar en equipos multidisciplinares de manera cooperativa para completar tareas de trabajo
- Capacidad para manejar el idioma inglés, técnico y coloquial.

Las competencias específicas son:

- Capacidad para comprender y aplicar los conocimientos, métodos y herramientas de la ingeniería espacial al análisis de los sistemas de potencia de los vehículos espaciales.

C. *Resultados del aprendizaje*

Los resultados del aprendizaje específicos a la asignatura Subsistema de Potencia son:

- Conocer los elementos que intervienen en el sistema de potencia de un vehículo espacial, y comprender sus principios de funcionamiento.
- Diseñar, de manera preliminar, un sistema de potencia de un caso de estudio de misión espacial.

El curso sobre el subsistema de potencia (EPS) analiza la producción, almacenamiento, conversión, distribución y gestión de la energía eléctrica en un vehículo espacial. Este curso aborda desde los requisitos hasta el proceso de diseño. Se estudian los principales componentes básicos del subsistema de potencia de las naves espaciales, tales como: las fuentes de potencia primaria, incluyendo las pilas de combustible, la energía solar fotovoltaica, la energía estática

y dinámica; el almacenamiento de energía, estudiando varios tipos de baterías; la distribución de energía basada en convertidores de potencia, MPPT, relés y protecciones; y finalmente la gestión de la potencia.

Además, durante el curso se desarrollan varios ejemplos de diseño, como la selección de la arquitectura EPS, el balance de potencia, el dimensionamiento de paneles solares y el dimensionamiento de baterías.

Gracias a este curso, el estudiante podrá obtener un conocimiento general sobre el sistema de distribución de potencia de las naves espaciales actuales.

III. DESCRIPCIÓN DE LA ASIGNATURA

A. Programa de la asignatura y sus contenidos

El programa de la asignatura se imparte siguiendo la planificación recogida en la Tabla 1, y consta de los siguientes puntos:

1. Descripción general del subsistema de potencia eléctrica
    - 1.1. Introducción
    - 1.2. Funciones del sistema de potencia
    - 1.3. Arquitectura e identificación de componentes
    - 1.4. Proceso de diseño
2. Fuentes primarias de energía
    - 2.1. Tipos de fuentes primarias
        - 2.1.1. Baterías primarias
        - 2.1.2. Pilas de Combustible
        - 2.1.3. Solar fotovoltaica
        - 2.1.4. Potencia estática
        - 2.1.5. Potencia Dinámica
    - 2.2. Comparativa
    - 2.3. Dimensionamiento de los paneles solares
3. Almacenamiento de energía
    - 3.1. Baterías secundarias
    - 3.2. Tipos de baterías
        - 3.2.1. Baterías de níquel
        - 3.2.2. Baterías de litio
        - 3.2.3. Baterías de plata
    - 3.3. Selección de la batería
    - 3.4. Sistema fotovoltaico-batería
    - 3.5. Dimensionamiento de las baterías
    - 3.6. Otras posibilidades de almacenamiento de energía
4. Distribución de energía
    - 4.1. Convertidor de potencia
    - 4.2. Lazos de control. MPPT
    - 4.3. Relés mecánicos y de estado sólido
    - 4.4. Protección y redundancias
5. Regulación y control de potencia
    - 5.1. Visión general
    - 5.2. Gestión de la energía

Tabla 1. Planificación resumida de la asignatura

Semana	Sesión	Clase 2	Evaluación
1	1	Introducción. Descripción general del subsistema de energía eléctrica	
1	2	Fuentes de energía primarias I	
2	3	Fuentes de energía primarias II. Dimensionamiento de los paneles solares	
2	4	Almacenamiento de energía I	
3	5	Almacenamiento de energía II. Dimensionamiento de las baterías	Examen parcial
3	6	Sistema de distribución de potencia I	
4	7	Sistema de distribución de potencia II. MPPT	
4	8	Sistema de distribución de potencia III	
5	9	Regulación de potencia y control	
5	10	Simulación del subsistema de potencia	

B. Metodología docente

En esta asignatura se propone una metodología clásica de clases magistrales y resolución de problemas:

- Exposiciones en clase del profesor con soporte de medios informáticos y audiovisuales, en las que se desarrollan los conceptos principales de la materia y se proporciona la bibliografía para complementar el aprendizaje de los alumnos.
- Resolución de casos prácticos, problemas, etc. planteados por el profesor de manera individual o en grupo.

Además, se pretendía introducir en la última sesión (sesión 10) una charla explicativa de algún experto del campo aeroespacial, como por ejemplo de la Agencia Espacial

Europea. Sin embargo, esta iniciativa no se pudo realizar porque debido a la crisis del COVID-19 se desaconsejó viajar al extranjero. Por tanto, la última sesión fue una exposición magistral por parte del profesor en la línea de las sesiones anteriores.

C. Sistema de evaluación

Actualmente la evaluación está basada en exámenes tipo test con preguntas de opción múltiple, una sola respuesta correcta y penalización en las respuestas incorrectas, combinados con cuestiones breves.

Se plantea un examen parcial en la sesión 5 para evaluar de los contenidos hasta esa sesión, con un peso del 40% en la nota final. Fuera de las clases, durante el período habilitado de exámenes, se realiza un examen final que evalúa de todos los contenidos de la asignatura, pero con menos énfasis en los que ya han sido evaluados y más en las últimas 5 sesiones. Este examen final tiene un peso del 60% en la nota final de la asignatura.

D. Discusión sobre la preparación de la asignatura

A la vista del contenido presentado, la asignatura presenta contenidos heterogéneos (convertidores, fuentes de energía, baterías, arquitecturas, etc.). La preparación de este tipo de asignatura con el grado de profundidad que requiere un máster no es sencilla si no forma parte de la investigación habitual de los profesores, e incluso en ese caso es poco probable que abarque todos los contenidos de la asignatura. Por ello se tomó una primera decisión de dividir la asignatura entre tres profesores.

En la preparación del material y la generación de los contenidos se encontraron diversos problemas:

- Los libros no son actuales y tiene una orientación muy sesgada hacia el sistema, de forma que se ven con poco detalle los componentes, los propios convertidores, y tienen muy poca aproximación de circuito eléctrico [1]-[3]**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**. Además, gran parte de la bibliografía es puramente descriptiva y es difícil encontrar información pública sobre sistemas comerciales [4]. El diseño de estos sistemas incorpora fenómenos más allá de lo puramente eléctrico/electrónico (órbitas, efectos de la radiación en los componentes, deterioro por oxígeno atómico, limitación de tensión en el vacío) y componentes de naturaleza variada (paneles solares, generadores termoeléctricos, pilas de combustible, baterías, convertidores de potencia, etc.) que son en general complejos por lo que se tiende a la descripción.
- Para el dimensionamiento del sistema, de los paneles y las baterías, no hay libros de problemas resueltos o ejemplos fácilmente accesibles. La información no descriptiva más detallada en abierto se encontró en el OCW del MIT [5], donde aparecían ejemplos completos de cálculo detallado e incluso se proporcionaban scripts para el dimensionamiento del sistema. El problema de esta documentación es que, si bien era potencialmente muy interesante, no era auto-contenida y era difícil de entender.
- El historial de los estudiantes es muy limitado en cuanto al conocimiento de circuitos eléctricos y electrónicos. Por supuesto tienen un conocimiento básico, pero no un manejo habitual.

Esto empuja a hacer una aproximación de la asignatura orientada del sistema al componente, de modo que se puede entender la funcionalidad de los diversos bloques, pero no el detalle de funcionamiento ni otro tipo de interacciones complejas como la estabilidad dinámica, el EMI, etc.

Los temas de dimensionamiento se abordaron de forma original, partiendo de ejemplos muy sencillos hasta llegar a ejemplos más realistas. Se proporcionaron a los alumnos scripts en Matlab que les permitieran valorar distintas alternativas de diseño con diferente grado de profundidad.

Para dotar al curso de mayor valor añadido, se hizo un esfuerzo especial en buscar soluciones comerciales que permitieran explicar el estado más actual de la tecnología. Un ejemplo de este tipo de contenido es el análisis de la impedancia interna de la batería SAFT VES160 [6].

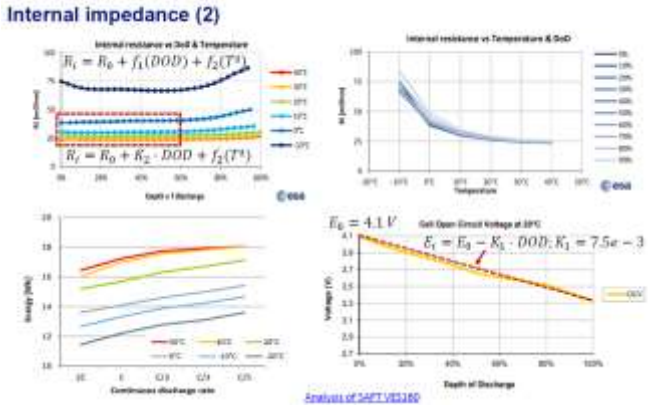

Figura 2. Ejemplo de análisis de la impedancia interna de la batería basándose en la información proporcionada para el modelo SAFT VES160

IV. Discusión, resultados de evaluación y opinión de los alumnos

La asignatura se ha impartido durante este curso en el formato presentado, contando con 23 alumnos. Casi el 20% de estos alumnos tenían como lengua materna un idioma que no era el español (inglés, alemán, etc.).

Si bien se completó en su totalidad la impartición de las clases y la realización del examen parcial, la entrega de este artículo ha sido anterior al examen final y los resultados de la encuesta de calidad docente de los alumnos.

Respecto a los resultados académicos, los conseguidos en el primer parcial se recogen en la Figura 3. En general fueron mejorables, con una nota media de aproximadamente 6 sobre 10 puntos, una nota máxima de 9 y una tasa de suspensos del 62%, con el 76% por encima del 4,5. Hay dos personas no presentadas no siguieron el curso desde el principio, por lo que el número de alumnos efectivo eran 21 y todos ellos participaron en la evaluación.

Los alumnos de este máster tienen diferente procedencia, pero se formó un grupo con alta motivación y muy interesado

en la asignatura y en sus estudios en general. Esto se refleja en el transcurso de las clases por sus intervenciones y dudas, así como en que varias personas acudieron a la revisión del examen para interesarse en las soluciones y en mejorar.

Como reflejo de su motivación, ellos mismos realizaron una encuesta motu propio, con el objetivo de proporcionar realimentación a los profesores y mejorar el máster de cara a años siguientes. La encuesta la realizaron por correo electrónico cerca del final de la impartición de la asignatura, de modo que ya se había realizado el examen parcial. Los resultados de estas encuestas fueron proporcionados por los alumnos para su publicación, y se recogen en la Figura 4 y la Figura 5.

Ante la pregunta "¿Cómo valorarías el test?" (Figura 4), refiriéndose al primer parcial, un 57,1% valoró el examen como justo, el 33,3% como que no se correspondía con los pensado de las lecciones e incluso un 9,5% (2 alumnos) lo valoró como imposible. Ante la pregunta "¿Cuál es la asignatura más difícil para ti?" (Figura 5), un 9,5% la considera la más complicada, estando este resultado correlado con los que opinaban que el examen era imposible.

Que aproximadamente 40% del alumnado se sorprendiera con el examen parcial resulta curioso para el profesorado. Por un lado, los alumnos habían sido avisados del formato del examen desde el primer momento y habían dispuesto de tiempo suficiente para prepararlo. Por otro lado, los profesores consideran que la mayor parte de las preguntas podían responderse directamente a partir del contenido de las trasparencias. En la Figura 6 se muestran dos preguntas: la primera de ellas es la que mayor número de aciertos tuvo, mientras que la dos tuvo un nivel de aciertos medio.

Además de 30 preguntas tipo test, también se incluyeron tres cuestiones relativas a dibujar el perfil de potencia de un panel, de una batería y la variación de energía de la batería, dado un perfil de consumo de potencia. En general estas cuestiones que requerían un mayor grado de reflexión por parte del alumno tuvieron muy malos resultados, y en el caso del cálculo de la energía en la batería durante un ciclo, solo un 19% proporcionó la solución correcta, y en la mayor parte de los casos ni siquiera lo intentaron. Esta cuestión se abordaba en la sesión 3 de dimensionamiento del sistema de potencia, y se proporcionó a los alumnos material adicional como problemas o scripts de Matlab para analizar diferentes perfiles de carga. De cara al futuro se destinará más tiempo a profundizar en este tema para mejorar la comprensión de los alumnos.

Al margen de las mejoras que deben incorporarse en sucesivas ediciones, esto confirma la idea de lo difícil que resulta a los alumnos abordar problemas de circuitos eléctricos o electrónicos, incluso si los cálculos se refieren a balances de potencia. La ausencia de bibliografía variada de resolución de problemas específicamente enfocado a arquitecturas de distribución de potencia plantea una reflexión sobre la necesidad de generar estos contenidos y la posibilidad real de que los alumnos lo apliquen en su devenir profesional a nivel de diseñadores. Lo que en realidad se debe buscar es que los alumnos de esta asignatura puedan ser interlocutores válidos con los equipos de especialistas que finalmente diseñan estos sistemas, más que sean diseñadores en sí. Estos estudiantes probablemente adopten un perfil profesional más generalista dentro del diseño de sistemas espaciales.

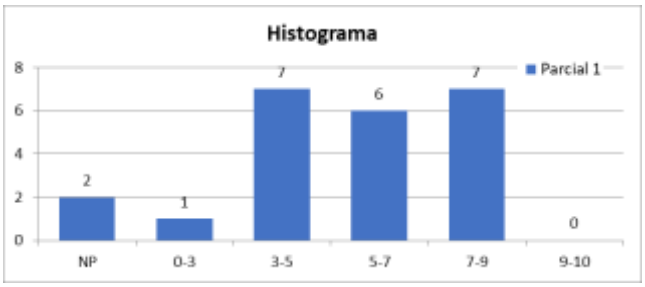

Figura 3. Resultados del primer parcial

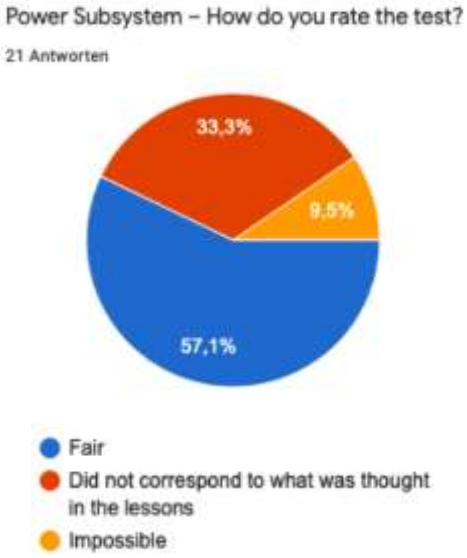

Figura 4. Respuestas de 21 alumnos a la pregunta "¿Cómo valoras el examen?"

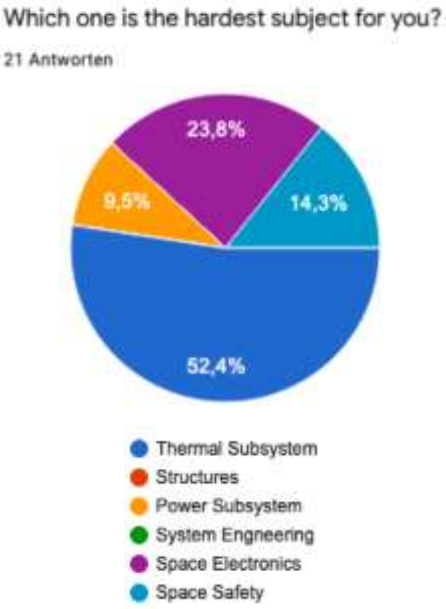

Figura 5. Respuestas de 21 alumnos a la pregunta "¿Cuál es la asignatura más difícil para ti?"

1. RTG as primary power source is intended for:
   - ☐ a mission to Mercury
   - ☐ a mission to Saturn
   - ☐ a mission to the Moon
   - ☐ GEO /LEO satellite
2. Bus voltage in a power subsystem:
   - ☐ should be as high as possible to reduce the current levels
   - ☐ should be as low as possible to increase the current levels
   - ☐ can be arbitrarily chosen
   - ☐ is directly related with the altitude of the orbit

Figura 6. Ejemplos de preguntas tipo test en el primer parcial

V. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado la asignatura obligatoria "Subsistema de Potencia", del Máster en Ingeniería Espacial impartido por primera vez este curso en la Universidad Carlos III de Madrid.

Desde el punto de vista de la preparación del curso, se dividió el trabajo entre varios profesores para cubrir los distintos aspectos tecnológicos. El historial de los alumnos y la duración escasa de la asignatura empujó a una orientación del sistema al componente. Preparar el contenido fue un reto debido a la escasa información comercial y al carácter altamente descriptivos los libros clásicos. Esto supuso la realización de un esfuerzo alto para la preparación de los temas relacionados con el dimensionamiento del sistema y los componentes.

El sistema de evaluación empleado ha estado basado en exámenes tipo test. La opinión de los alumnos respecto al primer examen parcial realizado reflejaba que algunos de ellos percibían dificultar en el examen a la vista del contenido impartido en clase. Desde el punto de vista del profesor no existía esta brecha y es debida a los conocimientos previos de los alumnos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo está financiado por FEDER/Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades – Agencia Estatal de Investigación (Proyecto DPI2017-88062-R).

REFERENCIAS

[1] Peter Fortescue (Editor), Graham Swinerd (Editor), John Stark (Editor). Spacecraft Systems Engineering, 4th Edition. Wiley. 2011; ISBN: 978-0-470-75012-4

[2] "Spacedraft power technologies" Hyder, Wiley, Halpert, Flood, Sabripour, Imperial College Press 2000

[3] "Spacedraft power systems" M.R. Patel, CRC PRess 2004

[4] "The Conquest of Space: Space Exploration and Rocket Science " edX Course, 2020

[5] "Satellite Engineering", OCW MIT 2003

[6] https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/ves16_cell_batt_design_yborthomieu.pdf