



POLITÉCNICA

INTERNATIONAL
CAMPUS OF
EXCELLENCE

COORDINATION PROCESS OF
LEARNING ACTIVITIES
PR/CL/001



E.T.S. de Ingenieros de
Telecomunicación

ANX-PR/CL/001-01

LEARNING GUIDE

SUBJECT

93001306 - Advanced Concepts For Photovoltaic Cells

DEGREE PROGRAMME

09BP - Master Universitario En Energia Solar Fotovoltaica

ACADEMIC YEAR & SEMESTER

2023/24 - Semester 2

Index

Learning guide

1. Description.....	1
2. Faculty.....	1
3. Prior knowledge recommended to take the subject.....	2
4. Skills and learning outcomes	3
5. Brief description of the subject and syllabus.....	4
6. Schedule.....	6
7. Activities and assessment criteria.....	8
8. Teaching resources.....	10
9. Other information.....	12

1. Description

1.1. Subject details

Name of the subject	93001306 - Advanced Concepts For Photovoltaic Cells
No of credits	6 ECTS
Type	Optional
Academic year of the programme	First year
Semester of tuition	Semester 2
Tuition period	February-June
Tuition languages	English
Degree programme	09BP - Master Universitario en Energia Solar Fotovoltaica
Centre	09 - Escuela Tecnica Superior De Ingenieros De Telecomunicacion
Academic year	2023-24

2. Faculty

2.1. Faculty members with subject teaching role

Name and surname	Office/Room	Email	Tutoring hours *
Elisa Antolin Fernandez	IES-106	elisa.antolin@upm.es	Sin horario. Solicitar previamente en el correo elisa.antolin@upm. es
Alejandro Datas Medina		a.datas@upm.es	Sin horario. Solicitar previamente en el correo a.datas@upm.es

Carlos Algora Del Valle	IES-104	carlos.algora@upm.es	Sin horario. Solicitar previamente por correo en carlos.algora@upm .es
Antonio Marti Vega (Subject coordinator)	IES-108	antonio.marti@upm.es	Sin horario. Solicitar previamente en el correo antonio.marti@upm .es

* The tutoring schedule is indicative and subject to possible changes. Please check tutoring times with the faculty member in charge.

3. Prior knowledge recommended to take the subject

3.1. Recommended (passed) subjects

- Caracterizaci3n De Dispositivos Y Materiales Fotovoltaicos
- F3sica De Materiales Fotovoltaicos
- Fundamentos De C3lulas Solares

3.2. Other recommended learning outcomes

- Fundamentos de semiconductores (Fundamentals of semiconductors)
- Electr3nica b3sica (Fundamentals of electronics)
- Matem3ticas: Derivadas e integrales (Mathematics: derivatives and integrals)
- Sistemas de ecuaciones diferenciales lineales (Linear differential equation systems)

4. Skills and learning outcomes *

4.1. Skills to be learned

CB10 - 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.

CB6 - 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

CB7 - 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

CB8 - 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

CB9 - 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

CE2 - Conocimiento, análisis y propuestas de nuevos conceptos, métodos o dispositivos para la conversión fotovoltaica.

CE3 - Realización, desarrollo e innovación de procesos tecnológicos para la fabricación de dispositivos fotovoltaicos.

CG5 - Gestión de la información: buscar y gestionar recursos bibliográficos adecuados con eficiencia, aprender a continuar los estudios de manera ampliamente autónoma como base para la futura actividad de investigación e innovación

CG7 - Trabajo en contextos internacionales: Llevar a cabo un proceso sustancial de investigación con seriedad e integridad académicas, integrado en un grupo de I+D+i con proyección internacional

CG8 - Aplicar metodologías, procedimientos, herramientas y normas del estado del arte para la creación de nuevos componentes tecnológicos; Construir nuevas hipótesis y modelos, evaluarlos y aplicarlos a la resolución de problemas

CG9 - Comunicar juicios, y conocimientos a audiencias especializadas y no especializadas, de una manera razonada, clara y sin ambigüedades

CT3 - Uso de la lengua inglesa: comprender los contenidos de clases magistrales, conferencias y seminarios en lengua inglesa; redactar en inglés informes y artículos científico-técnicos usando herramientas informáticas; realizar exposiciones públicas en inglés de trabajos, resultados y conclusiones de investigación, por ejemplo, en las asignaturas del Máster o en congresos de carácter mayoritariamente internacional o en estancias en centros extranjeros, todo ello con la ayuda de medios informáticos audiovisuales

CT4 - Liderazgo de equipos: realizar trabajos en equipo (como los de algunas de las actividades de evaluación de las asignaturas), integrarse en un grupo de investigación participando activamente en sus reuniones, colaborando con iniciativa propia en trabajos o proyectos de I+D+i; interaccionar con efectividad con los miembros del equipo de trabajo multidisciplinar

4.2. Learning outcomes

RA3 - Comprensión a nivel fundamental del funcionamiento de una célula solar

RA1 - Diseño de la estructura de una célula solar en función de sus parámetros internos (dopajes, espesores...) y propiedades de material

RA2 - Tipos y características de células solares avanzadas

* The Learning Guides should reflect the Skills and Learning Outcomes in the same way as indicated in the Degree Verification Memory. For this reason, they have not been translated into English and appear in Spanish.

5. Brief description of the subject and syllabus

5.1. Brief description of the subject

La asignatura se plantea como continuación de la asignatura de Fundamentos de células solares. En un primer bloque, se dedican unos temas a comprender el funcionamiento de una célula solar a nivel fundamental estudiando sus límites de eficiencia termodinámicos y el modelo del balance detallado. En un segundo bloque, se enseña al alumno a obtener la característica corriente-tensión de una célula solar convencional a partir de sus parámetros estructurales (dopajes, espesores...) y del material con el que esté hecha la célula (movilidad, tiempos de vida, coeficientes de absorción). En un tercer bloque, se estudian células avanzadas concretas como, por ejemplo, las células de portadores calientes, las células solares de banda intermedia, células basadas en nuevos materiales como las perovskitas, las células multiunión más avanzadas, etc. El estudio de estas células, no solo nos permite comprender su funcionamiento, sino también analizar críticamente diversos aspectos relacionados

con los procesos de conversión fotovoltaica estudiados en los primeros temas.

The subject is proposed as a continuation of the subject "Fundamentals of solar cells". In a first block, some topics are dedicated to understanding the operation of a solar cell at a fundamental level, studying its thermodynamic efficiency limits and the detailed balance model. In a second block, the student is taught to obtain the current-voltage characteristic of a conventional solar cell based on its structural parameters (doping, thickness...) and the material with which the cell is made (mobility, life, absorption coefficients). In a third block, specific advanced cells are studied, such as hot carrier cells, intermediate band solar cells, cells based on new materials such as perovskites, the most advanced multijunction cells, etc. The study of these cells not only allows us to understand their operation, but also to critically analyze various aspects related to the photovoltaic conversion processes studied in the first topics.

5.2. Syllabus

1. Límites termodinámicos de los procesos de conversión fotovoltaicos (parte I)/Thermodynamic limits of photovoltaic energy conversion (part I)
2. La teoría del balance detallado y los fenómenos de reciclaje de fotones/Detailed balance theory and photon recycling
3. Límites de eficiencia de células de heteroestructura/Limiting efficiency of heterojunction solar cells
4. Límites termodinámicos de los procesos de conversión fotovoltaicos (parte II)/Thermodynamic limits of photovoltaic energy conversion (part II)
5. Revisión de las ecuaciones de continuidad de los semiconductores/Review of semiconductor continuity equations
6. La célula solar en equilibrio: modelo de vaciamiento total/ The solar cell in equilibrium: full depletion model
7. La célula solar en oscuridad y polarizada: The solar cell in dark conditions and biased
8. La célula solar iluminada: principio de superposición y eficiencia cuántica/ The solar cell under illumination: superposition principle and quantum efficiency
9. La célula solar de portadores calientes/ The hot carrier solar cell
10. La célula solar de banda intermedia/The intermediate band solar cell
11. Otros tipos de células (orgánicas, dye...)/ Other types of solar cells (organic, dye...)
12. Células de tipo perovskita/Perovskite solar cells
13. Células multiunión/Multijunction solar cells

6. Schedule

6.1. Subject schedule*

Week	Classroom activities	Laboratory activities	Distant / On-line	Assessment activities
1	Tema I Duration: 04:00 Lecture		Recorded lecture Duration: 02:00 Lecture	
2	Tema II Duration: 00:00 Lecture Tema III Duration: 02:00 Lecture		Recorded lecture Duration: 02:00 Lecture	
3	Tema IV Duration: 02:00 Lecture Tema V Duration: 02:00 Lecture		Recorded lecture Duration: 02:00 Lecture	
4	Tema VI Duration: 04:00 Lecture		Recorded lecture Duration: 02:00 Lecture	
5	Tema VII Duration: 04:00 Lecture		Recorded lecture Duration: 02:00 Lecture	
6	Tema VIII Duration: 04:00 Lecture		Recorded lecture Duration: 02:00 Lecture	
7	Tema IX Duration: 04:00 Lecture			
8	Tema X Duration: 02:00 Lecture Tema XI Duration: 02:00 Lecture			
9	Tema XII Duration: 02:00 Lecture Tema XIII Duration: 02:00 Lecture			

10	Tema XIV Duration: 02:00 Lecture Ejercicios Duration: 02:00 Problem-solving class			
11	Ejercicios Duration: 04:00 Problem-solving class			
12	Ejercicios Duration: 04:00 Problem-solving class			
13				
14				
15				
16				
17				<p>No hay evaluación progresiva. La evaluación global consistirá en una única prueba escrita final donde el alumno deberá responder a unas preguntas cortas de carácter conceptual y resolver algún problema que requiera aplicar los conocimientos adquiridos</p> <p>Written test Continuous assessment and final examination Presential Duration: 03:00</p>

Depending on the programme study plan, total values will be calculated according to the ECTS credit unit as 26/27 hours of student face-to-face contact and independent study time.

* The schedule is based on an a priori planning of the subject; it might be modified during the academic year, especially considering the COVID19 evolution.

7. Activities and assessment criteria

7.1. Assessment activities

7.1.1. Assessment

Week	Description	Modality	Type	Duration	Weight	Minimum grade	Evaluated skills
17	No hay evaluación progresiva. La evaluación global consistirá en una única prueba escrita final donde el alumno deberá responder a unas preguntas cortas de carácter conceptual y resolver algún problema que requiera aplicar los conocimientos adquiridos	Written test	Face-to-face	03:00	100%	5 / 10	CG3 CT3 CE3 CG8 CT4 CE2 CG5 CG7 CG9 CB6 CB7 CB8 CB9 CB10

7.1.2. Global examination

Week	Description	Modality	Type	Duration	Weight	Minimum grade	Evaluated skills
17	No hay evaluación progresiva. La evaluación global consistirá en una única prueba escrita final donde el alumno deberá responder a unas preguntas cortas de carácter conceptual y resolver algún problema que requiera aplicar los conocimientos adquiridos	Written test	Face-to-face	03:00	100%	5 / 10	CG3 CT3 CE3 CG8 CT4 CE2 CG5 CG7 CG9 CB6 CB7 CB8 CB9 CB10

7.1.3. Referred (re-sit) examination

Description	Modality	Type	Duration	Weight	Minimum grade	Evaluated skills
Prueba escrita individual consistente en la respuesta a unas preguntas cortas de carácter conceptual y en la resolución de algún problema que requiera la aplicación de los conocimientos adquiridos	Written test	Face-to-face	03:00	100%	5 / 10	CG3 CT3 CE3 CG8 CT4 CE2 CG5 CG7 CG9 CB6 CB7 CB8 CB9 CB10

7.2. Assessment criteria

Se evaluará a todos los alumnos mediante una prueba final que consistirá en un examen individual y escrito. El examen constará de una primera parte con preguntas de tipo test y una segunda parte en la que el alumno deberá resolver algún ejercicio que normalmente requerirá de cálculos numéricos. Se permitirá el uso de libros y apuntes. La puntuación máxima que se podrá obtener en el examen será de 10 puntos, distribuidos a lo largo de las preguntas de mismo y el alumno deberá obtener un mínimo de 5 puntos para aprobar.

All students will be assessed through a final test that will consist of an individual and written exam. The exam will consist of a first part with multiple choice questions and a second part in which the student must solve an exercise that normally requires numerical calculations. The use of books and notes will be allowed. The maximum score that can be obtained in the exam will be 10 points, distributed throughout the questions and the student must obtain a minimum of 5 points to pass.

8. Teaching resources

8.1. Teaching resources for the subject

Name	Type	Notes
Artículo de explicación del reciclaje de fotones/Paper explaining photon recycling	Bibliography	A. Martí, J. L. Balenzategui, and R. F. Reyna, Photon recycling and Shockley's diode equation, Journal of Applied Physics, vol. 82, no. 8, pp. 4067-4075, Oct. 1997, doi: 10.1063/1.365717.
Artículo de revisión de la teoría del balance detallado/Paper reviewing detailed balance	Bibliography	A. Martí and G. L. Araújo, Limiting efficiencies for photovoltaic energy conversion in multigap systems, Solar Energy Materials and Solar Cells, vol. 43, no. 2, pp. 203-222, Sep. 1996.
Artículo de revisión de los límites de eficiencia fotovoltaica/Paper reviewing efficiency limits of PV	Bibliography	A. Martí and G. L. Araújo, Limiting efficiencies for photovoltaic energy conversion in multigap systems, Solar Energy Materials and Solar Cells, vol. 43, no. 2, pp. 203-222, Sep. 1996.
Artículo para la explicación de los límites de eficiencia de las células de heterounión/Article for the explanation of the efficiency limits of heterojunction cells	Bibliography	A. Martí, Limiting Efficiency of Heterojunction Solar Cells IEEE J. Photovoltaics, vol. 9, no. 6, pp. 1590-1595, Nov. 2019, doi: 10.1109/JPHOTOV.2019.2932626.
Explicación del funcionamiento de la célula de portadores calientes	Bibliography	A. Martí and A. Luque, Electrochemical Potentials (Quasi-Fermi Levels) and the Operation of Hot-Carrier ... IEEE J. Photovoltaics, vol. 3, no. 4, p 1298, 2013
Artículo original célula solar de banda intermedia/Original paper of the intermediate band solar cell	Bibliography	A. Luque and A. Martí, Increasing the Efficiency of Ideal Solar Cells by Photon Induced Transitions at Intermediate Levels, PHYSICAL REVIEW LETTERS, p. 4.

Revisión de la física de los semiconductores/Review of semiconductor physics	Bibliography	M. Kelvy, Física del estado sólido y semiconductores. Lima: Limusa, 1989.
Modelo de Hovel para la célula en iluminación/Hovel model for the solar cell under illumination	Bibliography	H. J. Hovel, Solar Cells vol. 11. New York: Academic Press, 1975.
Concepto de contacto selectivo/selective contact concept	Bibliography	P. Würfel, Physics of Solar Cells: From Basic Principles to Advanced Concepts. Chichester: John Wiley & Sons, 2009.
Modelo original de la teoría del balance detallado/Detailed balance original work	Bibliography	W. Shockley and H. J. Queisser, "Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells," Journal of Applied Physics, vol. 32, pp. 510-519, 1961.
Explicación detallada de los contactos selectivos de la hot carrier solar cell /Detailed explanation of the operation of the selective contacts in the hot carrier solar cell	Bibliography	A. Martí, E. Antolín, and I. Ramiro, "Thermodynamics of the Monoenergetic Energy-Selective Contacts of a Hot-Carrier Solar Cell" Phys. Rev. Appl., vol. 18, no. 6, p. 064048, Dec. 2022, doi: 10.1103/PhysRevApplied.18.064048.
Conceptos básicos de semiconductores/Basic semiconductor concepts	Bibliography	R. F. Pierret, Semiconductor Fundamentals, Modular Series on Solid State Devices, 2 ed. Reading: Addison Wesley, 1989.
Modelo del diodo (o célula solar en oscuridad)/ Diode model (or solar cell in the dark)	Bibliography	G. W. Neudeck, The pn Junction Diode vol. 2. Reading: Addison-Wesley, 1989.
video de las lecciones/Videos of the lectures	Web resource	La mayor parte de las clases se grabarán en vídeo y estarán disponibles en moodle/Most of the classes will be recorded on video and will be available on moodle
Apuntes del profesor/Teacher notes	Bibliography	Transparencias/Slides

9. Other information

9.1. Other information about the subject

La asignatura se relaciona con el ODS7.

The subject is related to ODS7