



FICHA TÉCNICA DE LA ASIGNATURA

| Datos de la asignatura | |
|------------------------|---|
| NombreCompleto | Decision support models in the electric power industry |
| Código | E000003591 |
| Título | Máster Universitario en Sector Eléctrico / Master in the Electric Power Industry |
| Créditos | 6,0 |
| Carácter | Obligatoria |
| Departamento / Área | Máster Universitario en Sector Eléctrico Máster Universitario en Sistemas de Energía Eléctrica |

| Datos del profesorado | |
|-----------------------|--|
| Profesor | |
| Nombre | Álvaro Baíllo Moreno |
| Departamento / Área | Departamento de Organización Industrial |
| Correo electrónico | alvaro.baillo@icai.comillas.edu |
| Profesor | |
| Nombre | Andrés Ramos Galán |
| Departamento / Área | Departamento de Organización Industrial |
| Despacho | Santa Cruz de Marcenado 26 [D-402] |
| Correo electrónico | Andres.Ramos@comillas.edu |
| Teléfono | 6150 |
| Profesor | |
| Nombre | Antonio Bello Morales |
| Departamento / Área | Instituto de Investigación Tecnológica (IIT) |
| Despacho | Santa Cruz de Marcenado 26 |
| Correo electrónico | abello@comillas.edu |
| Teléfono | 2716 |
| Profesor | |
| Nombre | Efraim Centeno Hernández |
| Departamento / Área | Departamento de Ingeniería Eléctrica |
| Despacho | Santa Cruz de Marcenado 26 [D-601] |
| Correo electrónico | Efraim.Centeno@iit.comillas.edu |
| Teléfono | 6279 |



| Profesor | |
|---------------------|---|
| Nombre | Javier García González |
| Departamento / Área | Departamento de Ingeniería Eléctrica |
| Despacho | IIT, Santa Cruz de Marcenado 26 [D-502] |
| Correo electrónico | Javier.Garcia@iit.comillas.edu |
| Profesor | |
| Nombre | Tomás Gómez San Román |
| Departamento / Área | Departamento de Ingeniería Eléctrica |
| Despacho | Santa Cruz de Marcenado 26 |
| Correo electrónico | Tomas.Gomez@comillas.edu |
| Teléfono | 6220 |

DATOS ESPECÍFICOS DE LA ASIGNATURA

| Contextualización de la asignatura |
|--|
| Aportación al perfil profesional de la titulación |
| Los modelos de ayuda a la decisión son ampliamente utilizados por los profesionales que desarrollan su actividad en el sector eléctrico. Esta asignatura pretende que los alumnos que la cursen comprendan la importancia de estos modelos y conozcan sus fundamentos y alcance teóricos, tanto desde la perspectiva de las compañías eléctricas, como de los operadores y de los reguladores. |
| Prerrequisitos |
| No existen prerrequisitos académicos, pero se recomienda que los alumnos estén familiarizados con las técnicas de optimización. |

| Competencias - Objetivos | |
|--------------------------|--|
| Competencias | |
| GENERALES | |
| CG01 | Haber adquirido conocimientos avanzados y demostrado, en un contexto de investigación científica y tecnológica o altamente especializado, una comprensión detallada y fundamentada de los aspectos teóricos y prácticos y de la metodología de trabajo en uno o más campos de estudio. |
| ESPECÍFICAS | |
| CE03 | Entender la importancia de los modelos de ayuda a la toma de decisiones en la planificación de los sistemas eléctricos y porqué es necesario articular las decisiones de planificación y de |



| | |
|-------------|--|
| | explotación de acuerdo a una jerarquía temporal y funcional. |
| CE04 | Explicar cuáles son las funciones de los distintos modelos utilizados en la planificación y explotación de los sistemas eléctricos en un contexto de mercado, y conocer cuáles son las técnicas de optimización y simulación más adecuadas para cada caso. |

Resultados de Aprendizaje

| | |
|------------|--|
| RA1 | Comprender la importancia de los modelos de ayuda a la toma de decisiones en la planificación de los sistemas eléctricos. |
| RA2 | Comprender por qué es necesario coordinar las decisiones de planificación y operación de acuerdo con una jerarquía temporal (corto, medio y largo plazo) |
| RA3 | Explicar las funciones de los diferentes modelos en un mercado de electricidad centralizado y liberalizado |
| RA4 | Entender cómo aplicar técnicas de optimización y simulación, e identificar cuál es la solución más adecuada para cada caso. |
| RA5 | Comprender la formulación matemática de los modelos presentados en el curso, para que los alumnos puedan aplicar este conocimiento a las posibles necesidades futuras en su carrera profesional. |
| RA6 | Ser capaz de especificar, diseñar y codificar modificaciones a los modelos presentados en el curso. |
| RA7 | Interpretar los resultados obtenidos por los prototipos utilizados en las sesiones prácticas |
| RA8 | Desarrollar un análisis crítico para evaluar adecuadamente las herramientas de apoyo a las decisiones como usuarios. |

BLOQUES TEMÁTICOS Y CONTENIDOS

Contenidos – Bloques Temáticos

Introducción

Introducción

Características de la electricidad

Jerarquía de los modelos de planificación y de explotación.

Funciones de los modelos en un entorno centralizado y en un entorno de mercado.

Modelos tradicionales (entorno centralizado)



Planificación de la explotación en el corto plazo

Unit-Commitment y despacho económico

Demanda cronológica y representación del tiempo

Equipo de generación convencional: centrales térmicas, hidráulicas y de turbinación-bombeo

Formulación matemática

Prototipo: datos de entrada y análisis de los resultados

Sesión práctica

Planificación de la explotación en el medio plazo

Curva monótona de demanda. Representación temporal por bloques de carga

Variables duales: coste marginal del sistema y valor del agua

Prototipo: datos de entrada y análisis de los resultados

Sesión práctica

Modelo de generación-red

Ecuaciones del flujo de cargas (activa y reactiva)

Flujo de cargas en DC

Modelado de las pérdidas de red

Formulación matemática

Prototipo: datos de entrada y análisis de los resultados

Sesión práctica

Impacto de las fuentes de energía renovables en la planificación de la generación a corto plazo

Modelado de la incertidumbre.

Reservas de operación

Unit-Commitment estocástico

Prototipo: datos de entrada y análisis de los resultados

Sesión práctica

Modelo de coordinación hidrotérmica estocástico de medio plazo

Programación hidráulica



Modelado de los sistemas hidroeléctricos. Embalses en cascada

Modelado de la incertidumbre de las aportaciones naturales Generación de árbol de escenarios

Formulación mediante técnicas optimización estocástica

Prototipo: datos de entrada y análisis de los resultados

Sesión práctica

Fiabilidad de la generación

Medidas de fiabilidad deterministas y estocásticas

Tabla de estado. Simulación del Monte Carlo

Modelo de coste de producción probabilístico

Prototipo: datos de entrada y análisis de los resultados

Sesión práctica

Modelos para un entorno de mercado

Introducción a los modelos de mercados eléctricos

Enfoques fundamental y cuantitativos

Clasificación de los modelos de los mercados eléctricos

Mecanismos de casación del mercado

Equilibrio de Nash

Planificación estratégica a corto plazo y elaboración de ofertas

Demanda residual

Modelo de programación horaria (unit-commitment) en un entorno de mercado

Elaboración de ofertas para el mercado diario

Modelado de la incertidumbre sobre el comportamiento de la competencia

Modelos de equilibrio de mercado para el medio plazo

Condiciones de optimalidad para problemas de optimización con restricciones (KKT)

Conjetura de Cournot. Variación conjetural. Modelo hidrotérmico

Modelo basado el Problema de Complementariedad Mixta (MCP)

Prototipo: datos de entrada y análisis de los resultados



Expansión de la generación en el largo plazo

Técnicas de modelado

Modelos centralizados

Modelos de equilibrio competitivo

Modelos de dinámica de sistemas

Planificación de la expansión de la red de transporte en el largo plazo

Modelos centralizados

Modelos de equilibrio

Prototipo: datos de entrada y análisis de los resultados

Sesión práctica

Planificación de la expansión de la red de distribución en el largo plazo

Planificación y operación de redes eléctricas de distribución inteligentes

Modelo de referencia

Series temporales y predicción

Análisis de series temporales

Predicción de la demanda.

Predicción de precios de la electricidad

Predicción de la generación renovable

Sesión práctica

Gestión de riesgos en los mercados eléctricos

Conceptos básicos de la gestión de riesgos

Gestión del riesgo de mercado

Modelos para medir y gestionar el riesgo de mercado

Ejemplo aplicado a un parque eólico

METODOLOGÍA DOCENTE

Aspectos metodológicos generales de la asignatura

La mejor forma de alcanzar una comprensión completa de esta asignatura es complementar los conceptos



teóricos presentados en el aula con sesiones prácticas, y programar un conjunto de actividades fuera de clase para reforzar el proceso de aprendizaje de los estudiantes.

Metodología Presencial: Actividades

Sesiones teóricas (40 horas): Presentación de los conceptos teóricos por los instructores con experiencia comprobada en el desarrollo de herramientas de apoyo a la toma de decisiones para el sector eléctrico. Estas conferencias incluirán presentaciones dinámicas, estudios de casos, y la participación e interacción con los estudiantes.

Sesiones prácticas (20 horas): bajo la supervisión del profesor, los estudiantes aplicarán los conceptos y las técnicas cubiertas en las sesiones de teoría a problemas reales y se familiarizarán con las herramientas de software desarrolladas para este curso. Estas sesiones se llevarán a cabo en la sala de ordenadores después del Tema 2 (planificación de la generación a corto plazo), Tema 3 (planificación de la generación a medio plazo), Tema 4 (modelo de generación-red), Tema 5 (Coordinación hidrotérmica estocástica a medio plazo), y Tema 15 (Análisis y predicción de series temporales).

Sesiones de tutoría (hasta 10 horas) para grupos o estudiantes individuales previa solicitud.

Metodología No presencial: Actividades

Estudio personal del material (60 horas): esta es una actividad individual de los alumnos en la que leerán, analizarán y cuestionarán las lecturas proporcionadas como material de referencia, y que serán discutidas con otros estudiantes y profesores en el aula.

Trabajos individuales o tareas a desarrollar en equipo (60 horas): actividades de aprendizaje que se llevarán a cabo individualmente o por parejas, fuera del aula.

RESUMEN HORAS DE TRABAJO DEL ALUMNO

| HORAS PRESENCIALES | |
|--|---|
| Clases magistrales y discusiones en clase: Presentación de los principales conceptos y procedimientos por parte del profesor y, en muchas ocasiones, profesionales del sector eléctrico. Incluirán estudios de casos, presentaciones dinámicas, participación de los alumnos en discusiones de contenidos en clase e interacciones grupales. | Sesiones prácticas: bajo la supervisión del profesor, los alumnos aplicarán los conceptos y técnicas cubiertos en las clases. Las sesiones tendrán lugar en laboratorios. |
| 40.00 | 20.00 |
| HORAS NO PRESENCIALES | |



| | |
|--|---|
| Estudio personal: Estudio personal del contenido del curso. Dentro de esta actividad individual, los alumnos revisarán y analizarán los contenidos proporcionados como material básico con los que podrán prepararse para discutir con otros alumnos, profesores y conferenciantes en el aula. | Lectura de artículos: lecturas de artículos científicos que se asignarán a los alumnos y que se presentarán durante el curso, para lo cual se requerirá lectura individual y / o trabajo grupal y estudio fuera del aula. |
| 60.00 | 60.00 |
| CRÉDITOS ECTS: 6,0 (180,00 horas) | |

EVALUACIÓN Y CRITERIOS DE CALIFICACIÓN

| Actividades de evaluación | Criterios de evaluación | Peso |
|--|--|------|
| Exámenes: preguntas de tipo tes y cuestiones a desarrollar | Comprensión de los conceptos teóricos. Aplicación de estos conceptos a la resolución de problemas. | 70 % |
| Informes de los trabajos realizados | Aplicación de conceptos teóricos a la solución de problemas. Capacidad para usar los modelos de ayuda a la decisión proporcionados en las sesiones prácticas. Interpretación y análisis crítico de los resultados numéricos obtenidos con los modelos. Habilidades de comunicación escrita. | 30 % |

Calificaciones

Teoría, 70%:

- Habrà un único examen final de recuperación (combinación de preguntas cortas a desarrollar preguntas de opción múltiple), con los mismos requisitos de calificación mínima que en la convocatoria ordinaria.

La evaluación práctica representará el restante 30%, de los cuales:

- Las calificaciones obtenidas de los informes de los trabajos prácticos realizados durante el curso se conservarán, con un peso del 15%.
- Trabajo monográfico, 15%. Cada alumno elegirá un problema de interés para la industria eléctrica y desarrollará individualmente un modelo de ayuda a la decisión que aplicará a un caso de estudio. Este trabajo se plasmará en un documento que contenga información sobre las fases seguidas en el desarrollo del modelo (especificación, formulación matemática e implantación), así como del análisis



de los resultados obtenidos.

Para aprobar el curso, la calificación promedio de esta recuperación debe ser mayor o igual a 5. Sin embargo, se aplicarán los siguientes requisitos sobre las calificaciones parciales: la calificación del examen final debe ser mayor o igual a 4 de 10 puntos y la nota del trabajo monográfico debe ser al menos 5 de 10 puntos. De lo contrario, la calificación final será la más baja de las dos notas.

Convocatoria ordinaria

La calificación de teoría tendrá un peso del 70% en la nota final. Se repartirá entre los dos exámenes siguientes:

- Examen intersemestral: 35%
- Examen final: 35%

A su vez, en cada uno de estos exámenes habrá dos secciones: sección 1 (preguntas cortas para desarrollar por el alumno) y sección 2 (preguntas de opción múltiple). El promedio de las notas obtenidas en la sección 1 de los dos exámenes (intersemestral y final) debe ser mayor o igual a 3 de 10 puntos para ser tomada en cuenta en el cómputo de la nota final de teoría. Análogamente, el mismo requisito aplica al promedio de las notas obtenidas en la sección 2. En caso de no cumplirse este requisito, el mínimo de ambas constituirá la nota final.

La calificación de los trabajos presentados por los alumnos representarán el 30% restante. Hay un conjunto de tareas que los estudiantes deben realizar por parejas o individualmente siguiendo las instrucciones del profesor. Los temas objeto de estas tareas son los siguientes: planificación de generación a corto plazo, planificación de generación a medio, fiabilidad de generación, gestión de riesgos en mercados de electricidad y series temporales.

Para aprobar el curso, la calificación de la parte de teoría debe ser mayor o igual a 5 de 10 puntos y las calificaciones de los exámenes intersemestral y final deben ser al menos 3 de 10 puntos. De lo contrario, la calificación final será la más baja de las dos.

PLAN DE TRABAJO Y CRONOGRAMA

| Actividades | Fecha de realización | Fecha de entrega |
|-----------------------|--------------------------------------|------------------|
| Examen intersemestral | Semana 7-9 | |
| Examen final | Semana 15 | |
| Sesiones prácticas | Semanas 2, 3, 4, 5, 6, 7, 11,12 y 13 | |
| | | |



| | | |
|---|------------------------|--|
| Revisión y autoaprendizaje de los conceptos cubiertos en las clases | Después de cada sesión | |
| Preparación de las sesiones prácticas | Antes de cada sesión | |
| Redacción del informe de cada trabajo | | Entre una y tres semanas después de la publicación de las tareas |
| Trabajo monográfico | | Sólo para la recuperación de la asignatura |
| Preparación para el examen final | Enero | |

BIBLIOGRAFÍA Y RECURSOS

Bibliografía Básica

- J. García-González, "Decision support models in electric power systems: Unit Commitment, Mid-Term planning model & Transmission constrained Economic Dispatch", class- notes. ETSI (ICAI), Universidad Pontificia Comillas, 2013.
- Wood, J., and Wollenberg, B.F., Sheble, G.B. "Power Generation Operation and Control", 3rd edition Wiley, New York, 2013.
- B. F. Hobbs, M. H. Rothkopf, R. P. O'Neill, H-P. Chao (eds.) "The Next Generation of Electric Power Unit Commitment Models", Kluwer Academic Publishers 2001
- J. A. Momoh "Electric Power System Applications of Optimization", 2nd edition. CRC Press. 2008
- Billinton, R. and Allan, R.N. "Reliability Evaluation of Power Systems", Springer, 1996.
- João P. S. Catalão (ed.) Electric Power Systems: "Advanced Forecasting Techniques and Optimal Generation Scheduling" CRC Press 2012
- M. C. Ferris, O. L. Mangasarian and J.-S. Pang "Applications and Algorithms of complementarity". Chapter 13. A Generation Operation Planning Model in Deregulated Electricity Markets based on the Complementarity Problem. pp. 273-298. Kluwer Academic Publishers. Boston, 2001.
- William W.S. Wei., "Time series analysis. Univariate and Multivariate Methods" 2nd edition. Pearson Addison Wesley. 2006.

Bibliografía Complementaria

Planificación a corto plazo:

- Stochastic-UC Padhy, N.P., "Unit commitment-a bibliographical survey," Power Systems, IEEE Transactions on , vol.19, no.2, pp.1196,1205, May 2004
- Takriti, S.; Birge, J.R.; Long, E., "A stochastic model for the unit commitment problem," Power Systems, IEEE Transactions on , vol.11, no.3, pp.1497,1508, Aug 1996
- J. García-González, R. Moraga, L. Matres-Santos, A. Mateo, "Stochastic joint optimization of wind generation and pumped-storage units in an electricity market", IEEE Transactions on Power Systems.



vol. 23

Coordinación hidrotérmica:

- J.W. Labadie "Optimal Operation of Multireservoir Systems: State-of-the-Art Review" JOURNAL OF WATER RESOURCES PLANNING AND MANAGEMENT MARCH/APRIL 2004 pp. 93-111
- J.M. Latorre, S. Cerisola, A. Ramos, A. Perea , R. Bellido "Coordinated hydro power plant simulation for multi-reservoir systems" Journal of Water Resources Planning and Management 140 (2), 216-227, Feb 2014 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000306.

Expansión del sistema de transporte:

- Latorre G; Cruz RD; Areiza JM; et al. "Classification of publications and models on transmission expansion planning" IEEE Transactions on Power Systems (18) 2 938-946 May 2003

Modelos de mercado:

- A. Mateo, A. Muñoz, J. García-González, "Modeling and forecasting electricity prices with input/output hidden Markov models", IEEE Transactions on Power Systems. vol. 20, no. 1, pp. 13-24, Febrero 2005.
- M. Ventosa, A. Baíllo, A. Ramos, M. Rivier "Electricity Market Modeling Trends Energy Policy" 33 (7): 897-913 May 2005
- J. García-González, J. Román, J. Barquín, A. González, "Strategic bidding in deregulated power systems", 13th Power Systems Computation Conference (PSCC '99). Trondheim, Noruega, 28 Junio - 2 Julio 1999
- Á. Baíllo, M. Ventosa, M. Rivier, A. Ramos, "Optimal offering strategies for generation companies operating in electricity spot markets", IEEE Transactions on Power Systems. vol. 19, no. 2, pp. 745-753, Mayo 2004.
- G. Morales-España, A. Ramos, J. García-González, "An MIP formulation for joint market-clearing of energy and reserves based on ramp scheduling", *IEEE Transactions on Power Systems*. vol. 29, no. 1, pp. 476-488, Enero 2014.

Gestión de riesgos:

- Cabero, J., A. Baíllo, S. Cerisola, M. Ventosa, A. García, F. Perán and G. Relaño. 2005. "A Medium-Term Integrated Risk Management Model for a Hydrothermal Generation Company". IEEE Transactions on Power Systems. 20 (3),1379-1388.
- Fleten, S. E., S. W. Wallance and W. T. Ziemba. 1997. "Portfolio management in a deregulated hydropower based electricity industry". Proceedings of the Third International Conference on Hydropower. Trondheim, Norway.
- J. García-González, E. Parrilla, A. Mateo, "Risk-averse profit-based optimal scheduling of a hydro-chain in the day-ahead electricity market", *European Journal of Operational Research*. vol. 181, no. 3, pp. 1354-1369, Septiembre 2007.

Planificación a largo plazo:

- Dyner, I. and E. R. Larsen. 2001. "From planning to strategy in the electricity industry". Energy Policy. 29,1145-1154.
- Ghanadan, R. and J. G. Koomey. 2005. "Using energy scenarios to explore alternative energy



pathways in California". Energy Policy. 33,1117-1142.

- Grant, R. 1998. "Contemporary Strategy Analysis". Blackwell Publishers: Malden, MA.
- Hobbs, B. F. and P. Meier. 2000. "Energy Decisions and the Environment: A Guide to the Use of Multicriteria Methods". Kluwer Academic Publishers.
- Kadoya, T., T. Sasaki, S. Ihara, E. Larose, M. Sandford, A. K. Gram, C. A. Stephens and C. K. Eubanks. 2005. "Utilizing System Dynamics Modelling to Examine Impact of Deregulation on Generation Capacity Growth". Proceedings of the IEEE. 93 (11)
- Merrill, H. M. and F. C. Schweppe. 1984. "Strategic Planning for Electric Utilities: Problems and Analytic Methods". Interfaces. 14 (1)
- Sánchez, J. J. 2008. "Strategic Analysis of the Long-Term Planning of Electric Generation Capacity in Liberalised Electricity Markets". PhD Thesis, Universidad Pontificia de Comillas: Madrid, Spain.
- Vries, L. De and P. Heijnen. 2006. "The influence of uncertainty upon generation adequacy". Proceedings of IAEE International Conference. Postdam, Germany
- Wogrin, Barquín, Centeno, "Capacity expansion equilibria in liberalized electricity markets: an EPEC approach", IEEE Transactions on Power Systems. vol. 28, no. 2, pp. 1531-1539, Mayo 2013.
- Wogrin, Centeno, Barquín, "Generation capacity expansion in liberalized electricity markets: a stochastic MPEC approach", IEEE Transactions on Power Systems. vol. 26, no. 4, pp. 2526-2532, Octubre 2011.