

---

**Formulario de aprobación de curso de posgrado/educación permanente**

**Asignatura: Generación Eólica**

(Si el nombre contiene siglas deberán ser aclaradas)

**Modalidad:**

(posgrado, educación permanente o ambas)

Posgrado

Educación permanente

---

**Profesor de la asignatura <sup>1</sup>: M.Sc. Ing. Ignacio Afonso, Gr.3 – IIE**

(título, nombre, grado o cargo, instituto o institución)

**Profesor Responsable Local <sup>1</sup>:**

(título, nombre, grado, instituto)

**Otros docentes de la Facultad:**

(título, nombre, grado, instituto)

**Docentes fuera de Facultad:**

(título, nombre, cargo, institución, país)

<sup>1</sup> Agregar CV si el curso se dicta por primera vez.

(Si el profesor de la asignatura no es docente de la Facultad se deberá designar un responsable local)

[Si es curso de posgrado]

**Programa(s) de posgrado: Maestría y Doctorado en Ingeniería Eléctrica; Diploma en Sistemas Eléctricos de Potencia; Diploma en Ingeniería de la Energía, Maestría y Doctorado en Ingeniería de la Energía.**

**Instituto o unidad: IIE**

**Departamento o área:** Departamento de Potencia

---

**Horas Presenciales: 62**

(se deberán discriminar las horas en el ítem Metodología de enseñanza)

**Nº de Créditos:6**

[Exclusivamente para curso de posgrado]

(de acuerdo a la definición de la UdelaR, un crédito equivale a 15 horas de dedicación del estudiante según se detalla en el ítem Metodología de enseñanza)

**Público objetivo: Ingenieros Electricistas y Electrónicos.**

**Cupos: No tiene**

(si corresponde, se indicará el número de plazas, mínimo y máximo y los criterios de selección. Asimismo, se adjuntará en nota aparte los fundamentos de los cupos propuestos. Si no existe indicación particular para el cupo máximo, el criterio general será el orden de inscripción, hasta completar el cupo asignado)

---

**Objetivos:**

1. Presentar los principios básicos de funcionamiento y control de generadores eólicos.
2. Estudiar el impacto de la inserción de parques eólicos en la operación y control de sistemas eléctricos.

3. Brindar elementos básicos para comprender el modelado de aerogeneradores y parques eólicos para la realización de estudios electromecánicos.

---

**Conocimientos previos exigidos:** Principios de funcionamiento y control de máquinas eléctricas, electrónica de potencia, control, estabilidad de sistemas eléctricos de potencia.

**Conocimientos previos recomendados:**

Diseño, protección y control de instalaciones de media y alta tensión.

Estudios de flujo de potencia. Simulación dinámica de sistemas eléctricos.

---

**Metodología de enseñanza:**

(comprende una descripción de la metodología de enseñanza y de las horas dedicadas por el estudiante a la asignatura, distribuidas en horas presenciales -de clase práctica, teórico, laboratorio, consulta, etc.- y no presenciales de trabajo personal del estudiante)

Descripción de la metodología:

[Obligatorio]

Detalle de horas:

- Horas de clase (teórico):56
- Horas de clase (práctico):0
- Horas de clase (laboratorio):0
- Horas de consulta:3
- Horas de evaluación:3
  - Subtotal de horas presenciales:62
- Horas de estudio:28
- Horas de resolución de ejercicios/prácticos:0
- Horas proyecto final/monografía:0
  - Total de horas de dedicación del estudiante:90

---

**Forma de evaluación:**

[Indique la forma de evaluación para estudiantes de posgrado, si corresponde]

[Indique la forma de evaluación para estudiantes de educación permanente, si corresponde]

Una prueba individual escrita al finalizar el curso. Para la aprobación del curso es necesario alcanzar un mínimo de 60 puntos en el examen final, sobre un total de 100 puntos.

---

**Temario:**

**PARTE 1 - INTRODUCCION**

**1. Introducción a los aerogeneradores.**

- Descripción general del estado del arte y revisión de la evolución de la tecnología de los generadores eólicos.
- Descripción de los principales componentes, tanto eléctricos como mecánicos, que conforman un aerogenerador moderno.

**2. Principios de conversión de la energía eólica.**

- Definición del recurso eólico.
- Formulación de las ecuaciones que expresan la potencia extraída del viento por un aerogenerador de eje horizontal.
- Cálculo de los límites físicos para la extracción de energía del viento.
- Dedución de los parámetros que afectan la capacidad de extracción de potencia de una turbina eólica.
- Modelado aerodinámico del rotor.

## **PARTE 2 – OPERACIÓN Y CONTROL DE TURBINAS EÓLICAS**

### **3. Introducción a los sistemas de control aerodinámico.**

- Análisis del porque de la necesidad de contar con controles aerodinámicos.
- Descripción de los diferentes tipos de control aerodinámico utilizados en los aerogeneradores modernos.
- Relación entre el sistema de control aerodinámico y la "lógica de operación" de un aerogenerador.

### **4. Sistemas de control en turbinas eólicas de velocidad variable.**

- Carencias de los sistemas de generación eólica de velocidad fija y su evolución hacia el desarrollo de tecnologías de aerogeneradores de velocidad variable.
- Fundamentos y la lógica de operación de los aerogeneradores de velocidad variable.
- Interrelación entre el control de la turbina y el generador eléctrico.

## **PARTE 3 – OPERACIÓN Y CONTROL DE GENERADORES EOLICOS**

### **5. DFIG en régimen permanente**

- Repaso genérico del modelado de MI.
- Modelado en régimen permanente y modos de operación de una máquina de inducción doblemente alimentada.

### **6. Introducción a las transformaciones modales y su aplicación al modelado de aerogeneradores**

- Necesidad del estudio de transformaciones modales (Clarke y Park) para el estudio del comportamiento dinámico de los generadores eólicos.
- Limitaciones del concepto de fasor e introducción al estudio de vectores espaciales.
- Definiciones de potencias activa y reactiva instantáneas.
- Control dinámico de potencia.

### **7. Modelado dinámico de aerogeneradores DFIG**

- Aplicación de las transformaciones modales para el estudio dinámico de la máquina de inducción.
- Revisión del modelo en régimen permanente desde la perspectiva de las transformaciones modales.
- Modelado y control de los convertidores de red y máquina en régimen de operación normal.
- Interacción entre los sistemas de control aerodinámicos y los sistemas de control de máquina.

### **8. Reducción dinámica en régimen de operación normal.**

- Metodología de cálculo del modelo simplificado utilizado para análisis dinámico a partir del modelo completo de aerogeneradores DFIG y Full-Converter.
- Primeras conclusiones sobre el comportamiento de generadores eólicos integrados a una red de potencia y generadores sincrónicos.

**9. DFIG & Huecos de tensión**

- Repaso general de conceptos asociados a huecos de tensión.
- Desarrollo de un modelo para poder visualizar los fenómenos dentro del DFIG asociados a la ocurrencia de un hueco de tensión.
- Interpretación de los resultados obtenidos mediante el modelo desarrollado.
- Impacto sobre el generador de los huecos de tensión.
- Impacto sobre el convertidor de los huecos de tensión.
- Mecanismos de protección de la máquina frente a huecos de tensión.

**10. Cortocircuitos y transitorios.**

- Repaso de aspectos generales del aporte al cortocircuito de un generador sincrónico.
- Analizar la relación entre los Grid Code y el aporte a los cortocircuitos de los aerogeneradores modernos.
- Comparación entre aporte a cortocircuitos de generadores sincrónicos clásicos y aerogeneradores modernos.
- Describir el comportamiento del aerogenerador ante un hueco de tensión/cortocircuito desde el punto de vista de la red.

**11. Arranque del DFIG.**

- Características del arranque de un DFIG.
- Limitaciones impuestas por el convertidor back-to-back.
- Procedimiento de arranque.

**PARTE 4 – INTEGRACION A LA RED DE PARQUES EOLICOS**

**12. Aspectos operativos para la integración a la red.**

- Aspectos importantes a analizar en los estudios para la integración masiva de generación eólica a la red.
- Requerimientos establecidos en los grid code para la conexión de generadores eólicos a la red eléctrica.
- Relación entre los estudios de integración y los requerimientos incluidos en los grid code.

**13. Proyectos eléctricos y control de parques eólicos**

- Desarrollo de proyectos eólicos y estudios de recurso.
- Interconexión a las redes de alta tensión y diseño de la barra colectora.
- Criterios para el diseño de la red de distribución interna.
- Descripción técnica de las máquinas y diseño eléctrico de subestaciones elevadoras de aerogeneradores.
- Aspectos principales de diseño de centros de control de parques eólicos.
- Intercambio de información con el operador de la red.

**14. Modelado de aerogeneradores y parques eólicos para flujo de carga - estabilidad transitoria - cortocircuitos.**

- Evolución de los modelos electromecánicos de aerogeneradores en programas de simulación.
- Descripción de modelos genéricos y de modelos propios de fabricantes.
- Utilización de los modelos y sus limitaciones.
- Validación de modelos dinámicos.
- Modelado de parques eólicos.

**15. Impacto de parques eólicos en la estabilidad del sistema eléctrico**

- Repaso de conceptos básicos de estabilidad de sistemas eléctricos.
- Influencia de los parques eólicos sobre la estabilidad de tensión.

- Influencia de los parques eólicos sobre la estabilidad angular y frecuencia.

**PARTE 5 – Generación eólica Offshore**

**16. Aerogeneradores Offshore y su integración a la red**

- Descripción de las principales características de este tipo de proyectos para generación eólica.
- Características del tipo de aerogeneradores utilizados.
- Sistemas de conexión a la red eléctrica.
- Estado actual de la generación Offshore a nivel mundial

---

**Bibliografía:**

(título del libro-nombre del autor-editorial-ISBN-fecha de edición)

- Wind power in power systems. T. Ackermann. J.Wiley & Sons. ISBN 0-470-85508-8. Año 2005.
- Induction generators for wind power. V. Akhmatov. Multi-Science Publishing Co.. ISBN: 0-906522-40-4. Año 2005.
- Wind energy generation modelling and control. O. Anayalara. J.Wiley & Sons. ISBN: 978-0-470-71433-1. Año 2009.
- Optimal control wind energy systems. I. Munteanu. Springer. ISBN 978-1-84800-079-7. Año 2008.
- Vector control of three-phase machines. N.P.Quang, J.A. Dittrich. Springer. ISBN: 978-3-540-79028-0. Año 2008.
- Variable speed generators. I. Boldea. CRC Press. ISBN: 978-0-8493-5715-2. Año 2006.
- Voltage-sourced converters in power systems. A. Yazdani. IEEE Press. ISBN: 978-0-470-52156-4. Año 2010.
- Wind turbine control systems. F.D. Bianchi, H. De Battista, R.J. Mantz. Springer. ISBN 1-84628-492-9. Año 2007.
- The Induction Machine Handbook. I. Boldea. CRC Press. ISBN 0-8493-0004-5. Año 2002.
- Doubly Fed Induction Machine: Modeling and Control for Wind Energy Generation. Gonzalo Abad. IEEE Press. ISBN-13: 978-0470768655. Año 2011.
- Sistemas eólicos de producción de energía eléctrica. José Luis Rodríguez Amenedo. Rueda, S.L . ISBN-13: 978-8472071391. Año 2003.
- Offshore Wind Energy Generation: Control, Protection, and Integration to Electrical Systems, Olimpo Anaya-Lara, David Campos-Gaona, Edgar Moreno-Goytia, Grain Adam, Wiley ISBN: 978-1-118-53962-0, junio 2014 .
- Offshore Wind Turbines: Reliability, availability and maintenance, Peter Tavner, IET ISBN 978-1-84919-229-3, 2012.



## Facultad de Ingeniería Comisión Académica de Posgrado

---

### Datos del curso

---

**Fecha de inicio y finalización:** 2° semestre

**Horario y Salón:** A confirmar

**Arancel:**

[Si la modalidad no corresponde indique "no corresponde". Si el curso contempla otorgar becas, indíquelo]

**Arancel para estudiantes inscriptos en la modalidad posgrado:**

**Arancel para estudiantes inscriptos en la modalidad educación permanente:4742 UI**

---