



## Facultad de Ingeniería Comisión Académica de Posgrado

### Formulario de Aprobación Curso de Actualización 2015

#### Asignatura: Máquinas Eléctricas

(Si el nombre contiene siglas deberán ser aclaradas)

**Profesor de la asignatura <sup>1</sup>:** Ing. Gerardo Otero, Gr.3, IIE  
(título, nombre, grado o cargo, Instituto o Institución)

**Profesor Responsable Local <sup>1</sup>:** Ing. Gerardo Otero, Gr.3, IIE  
(título, nombre, grado, Instituto)

**Otros docentes de la Facultad:** Ing. Mauricio Riera, Gr.3, IIE; Ing. Pablo Toscano, Gr.2, IIE  
(título, nombre, grado, Instituto)

**Docentes fuera de Facultad:**  
(título, nombre, cargo, Institución, país)

**Instituto ó Unidad:** IIE  
**Departamento ó Area:** Potencia

<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)

**Fecha de inicio y finalización:** 2do. Semestre 2015

**Horario y Salón:** A definir

**Horas Presenciales:** 98 horas.

**Arancel:** 4378 UI

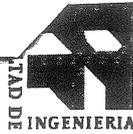
**Público objetivo y Cupos:** Egresados de Ingeniería Eléctrica e Ingeniería Industrial Mecánica.  
(si corresponde, se indicará el número de plazas, mínimo y máximo y los criterios de selección)

#### Objetivos:

El curso tiene como objetivos principales:

- Dar una formación básica sobre los principios generales de la conversión electromecánica de la energía a través de los dispositivos y máquinas clásicas de campo electromagnético.
- Proporcionar bases sólidas para el modelado de las máquinas eléctricas a partir del cálculo de sus inductancias.
- Realizar el estudio detallado de las máquinas sincrónicas, en régimen permanente, lineal y saturado.
- Dar una introducción al conocimiento de los métodos generales de análisis del comportamiento en régimen transitorios de máquinas eléctricas.

Se estudia con detalle las características del campo giratorio en las máquinas de corriente alterna, y a partir del mismo se determina las relaciones de energía y par y se calcula las inductancias propias y mutuas en dichas máquinas. Se revisa la deducción del circuito equivalente de la máquina de inducción polifásica en régimen equilibrado permanente, sus modos de funcionamiento y principales características, con alimentación normal y doblemente alimentada. Se introduce la máquina de inducción monofásica como un caso particular de máquina trifásica en régimen desequilibrado, y se indica sus principales características. Se realiza un modelado de la máquina sincrónica a partir de las relaciones de tensiones inducidas, energía y par resultantes del campo giratorio, y también un modelado detallado a partir de sus ecuaciones eléctricas, con los valores de inductancias deducidos a partir del campo giratorio, y sus ecuaciones transformadas. Se estudia el régimen permanente a partir de las consideraciones de tensiones inducidas, energía y par, y también como caso particular del modelado general válido para regímenes transitorios, y se estudia algunos regímenes transitorios particulares.



## Facultad de Ingeniería Comisión Académica de Posgrado

---

### Conocimientos previos exigidos:

Electromagnetismo. Teoría de circuitos, en especial manejo de notación vectorial compleja (fasores) y concepto de potencia eléctrica.

### Conocimientos previos recomendados:

Curso de Introducción a la Electrotécnica

---

### Metodología de enseñanza:

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

- Horas clase (teórico):60
- Horas clase (práctico):24
- Horas clase (laboratorio):
- Horas consulta:4
- Horas evaluación: 6
  - Subtotal horas presenciales: 94
- Horas estudio: 23
- Horas resolución ejercicios/prácticos:23
- Horas proyecto final/monografía: 10
  - Total de horas de dedicación del estudiante: 150

---

### Forma de evaluación:

La evaluación se compone de dos Pruebas Parciales de Práctico (ejercicios del tipo del práctico más preguntas de aplicación práctica del teórico), más una Prueba de Teórico (desarrollo de un tema del curso elegido al azar dentro de un conjunto de temas preseleccionados por los docentes), más un Trabajo/Monografía Entregable, al final del curso.

La Prueba de Teórico es tomada conjuntamente con la 2da Prueba Parcial de Práctico. El Trabajo/Entregable es presentado por los estudiantes ante los docentes y el resto de los estudiantes del curso en las 2 últimas clases prácticas.

### Procedimientos de evaluación/aprobación:

1. Las Pruebas Parciales de Práctico se notará con un máximo de 80 puntos para la suma de ambas. El puntaje máximo asignado a cada prueba, así como su duración, se informará con antelación a las mismas, y dependerá del grado efectivo de avance del curso (Teórico y Práctico) a la fecha de realización de la Primera Prueba Parcial.
2. La Prueba de Teórico se notará con un máximo de 10 puntos.
3. El Trabajo/Entregable se notará con un máximo de 10 puntos, en los que se evaluará el trabajo realizado así como la calidad de la presentación realizada ante los docentes y la clase.
4. De acuerdo a los resultados obtenidos, el estudiante quedará habilitado a:
  1. Rendir Examen Total (Práctico más Teórico) si obtiene entre 25 y 50 puntos en la suma de ambas Pruebas Parciales de Práctico, sin contabilizar los puntajes obtenidos en la Prueba de Teórico ni en el Trabajo/Entregable .



## Facultad de Ingeniería Comisión Académica de Posgrado

2. Rendir Examen Parcial (sólo preguntas de teórico) si obtiene 50 o más puntos en la suma de ambas Pruebas Parciales de Práctico y menos de 70 puntos totales (sumando a lo anterior los puntajes obtenidos en la Prueba de Teórico y en el Trabajo/Entregable).
3. Exonerar la asignatura si obtiene 70 o más puntos totales (sumando los puntajes obtenidos en ambas Pruebas Parciales de Práctico, en la Prueba de Teórico y en el Trabajo/Entregable).

Los Exámenes Totales consisten en una prueba práctica escrita (ejercicios y problemas similares a los de las Pruebas Parciales), que en caso de aprobación es seguida de una prueba de teórico. La prueba práctica escrita es eliminatória en caso de no aprobación de la misma. La prueba de teórico consiste en preguntas y/o desarrollos de temas tratados en el teórico del curso. Las pruebas de teórico se tomarán en forma oral convencional o en forma escrita, dependiendo de la cantidad de estudiantes rindiendo examen.

Los Exámenes Parciales consisten en una prueba de teórico de iguales características a las de la parte teórica de los Exámenes Totales.

### Temario:

1. Introducción. ( T=1 hs. | P=0 hs.) Presentación del curso. Breve reseña histórica sobre la evolución de las máquinas eléctricas. Consideraciones generales sobre la energía, sus fuentes, su conversión, y el rol de las máquinas eléctricas en la misma. Importancia de la normalización.
2. Sistemas polifásicos. ( T=2 hs. | P=2 hs.) Sistemas monofásico, trifásico, y polifásicos generales. Resolución de sistemas trifásicos simétricos en régimen desequilibrado. Impedancias directa, inversa y homopolar. Diagonalización de la matriz de inductancias. Autovalores y autovectores de la transformación de Fortescue.
3. Revisión de Circuitos Magnéticos y Transformadores. ( T=7 hs. | P=4 hs.) Repaso de circuitos magnéticos. Materiales magnéticos. Pérdidas en el hierro. Imanes permanentes. Revisión de bobinas y transformadores monofásicos. Circuitos equivalentes de secuencia directa, inversa y homopolar de transformadores trifásicos. Corrientes y tensiones armónicas en los transformadores trifásicos.
4. Fundamentos de la conversión electromecánica de la energía. ( T=6 hs. | P=2 hs.) Balance de energía en un convertidor electromecánico de campo magnético. Convertidor ideal. Energía y co-energía almacenadas en el campo magnético. Fuerza y par de origen magnético. Sistemas de simple y doble excitación. Ecuaciones dinámicas de los convertidores. Conceptos básicos de las máquinas giratorias. Convertidor giratorio monofásico de doble excitación. Par de reluctancia y par de inducción mutua. Convertidor giratorio bifásico de doble excitación: condición de existencia de conversión electromecánica. Fuerza normal y tangencial aplicada por el campo electromagnético.
5. Campo giratorio. ( T=10 hs. | P=2 hs.) Fuerza magnetomotriz de entrehierro creada por: espira diametral, bobinado distribuido discreto, y continuo. Campo (f.m.m.) giratorio creado por un sistema trifásico. Teorema de Ferraris. Reducción del contenido armónico con bobinado distribuido. Campo multipolar. Efecto del número de fases. Campo giratorio elíptico. Bobinado monofásico. Campos giratorios armónicos. Nociones sobre la disposición de los bobinados trifásicos: bobinados en dos capas de paso reducido. Flujo de arrollamiento por fase, fem inducida. Coeficiente de distribución del bobinado. Inductancias propias y mutuas en estructuras de entrehierro constante y de entrehierro periódico (polos salientes). Energía y par en el campo giratorio.
6. Conceptos básicos de máquinas sincrónicas. ( T=10 hs. | P=8 hs.) Descripción física de la máquina sincrónica (MS). MS de rotor cilíndrico. Régimen permanente, diagrama vectorial, circuito equivalente. Ensayos. Reactancia sincrónica. Potencia activa y reactiva. Par. Curvas en V o de Mordey. Estabilidad. Ecuación de pequeñas oscilaciones. Límites de operación. Funcionamiento como motor sincrónico. MS de polos lisos con saturación. Método de Potier. MS de polos salientes en régimen lineal. Diagramas vectoriales.  $X_d$  y  $X_q$ . Circuito equivalente. Ensayo de deslizamiento. Par. Límites de operación. MS de polos salientes en régimen saturado: método de Blondel.
7. Revisión de Máquinas de inducción polifásicas. ( T=6 hs. | P=4 hs.) Constitución de las máquinas de inducción. Circuito equivalente. Ensayos. Balance energético: curva par-velocidad. Modos de funcionamiento: motor, generador, freno. Modos de funcionamiento de la máquina de inducción doblemente alimentada. Diagrama circular. Métodos de arranque. Motores de barras profundas y doble jaula.

8. Máquinas de inducción monofásicas. (  $T=2$  hs. $|P=0$  hs.) Análisis como máquina trifásica en régimen desequilibrado y por doble campo giratorio. Circuito equivalente. Curva par-velocidad. Dispositivos de arranque.
9. Modelado de las máquinas sincrónicas. (  $T=4$  hs. $|P=0$  hs.). Modelado de los amortiguadores. Máquina sincrónica ideal. Representación circuital de la MS. Inductancias. Ecuaciones en componentes de fase de la MS de polos salientes.
10. Transformaciones. (  $T=2$  hs. $|P=0$  hs.) Generalidades sobre las transformaciones. Componentes simétricas y componentes relativas. Condiciones impuestas a las matrices de transformación. Diagonalización de matrices simétricas y circulares: transformaciones de Fortescue, Clarke y Concordia. Transformación de Park original y normalizada. Interpretación de las transformaciones de Concordia y Park.
11. Máquinas sincrónicas en ecuaciones transformadas. (  $T=4$  hs. $|P=0$  hs.) Simplificación de las ecuaciones de la MS de polos salientes aplicando la transformación de Park normalizada. Ecuaciones de MS en notación operacional. Potencia eléctrica y par electromagnético. Resultados de la aplicación de la transformación de Park original. Ecuaciones e impedancias operacionales. Reactancias y constantes de tiempo (sincrónica, transitoria y subtransitoria).
12. Máquinas sincrónicas en régimen permanente.-(  $T=2$  hs. $|P=0$  hs.) Régimen permanente a velocidad sincrónica. Funcionamiento en vacío. Funcionamiento con carga simétrica. MS de rotor cilíndrico.
13. Regímenes transitorios de máquinas sincrónicas. (  $T=4$  hs. $|P=2$  hs.) Estudio de algunos regímenes transitorios particulares. Establecimiento de la tensión en vacío. Cortocircuito trifásico del generador en vacío. Aproximaciones usuales.

#### Bibliografía:

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

La bibliografía indicada a continuación es deliberadamente extensa, debido a que las máquinas eléctricas, las teorías explicativas de su funcionamiento y la enseñanza de las mismas tienen una larga historia de desarrollo. Por otra parte han existido y existen aún diferentes enfoques en cuanto a la naturaleza de las cuestiones básicas a tratar en un curso sobre el tema, desde tratamientos de índole más física orientados a explicar el funcionamiento, especialmente en régimen permanente, hasta enfoques más analíticos y algebraicos orientados al desarrollo de modelos que permitan la simulación del desempeño de las máquinas eléctricas rotativas, en particular en régimen transitorio.

Como los objetivos del presente curso cubren ambos enfoques, enfatizando el primero y presentando el segundo en forma introductoria, no se dispone de una única referencia bibliográfica abarcativa de ese espectro, y del nivel de profundidad y extensión acorde al curso. Por lo cual se recomienda las siguientes dos referencias de la lista indicada más abajo:

- [1] C.B.Gray - Electrical Machines and Drive Systems. Longman Sci. & Tech. Publications, London, & J.Wiley, New York, 1989. Máquinas Eléctricas y Sistemas Accionadores. Ed. Alfaomega, México, 1993.
- [15] J.L.Alonso, A.Portillo. - Apuntes del curso de Máquinas Eléctricas II. Facultad de Ingeniería, Montevideo, (Curso dictado desde 1987 a 1997).

Adicionalmente, algunos temas de los capítulos 4 y 5 están basados en la referencia [5] (ver anexo).

#### A.- Libros básicos de referencia. ([\*]= Disponibles en Biblioteca IIE.)

- [1] C.B.Gray - Electrical Machines and Drive Systems. Longman Sci. & Tech. Publications, London, & J.Wiley, New York, 1989. Máquinas Eléctricas y Sistemas Accionadores. Ed. Alfaomega, México, 1993. [\*]
- [2] A.E.Fitzgerald, Ch.Kingsley, A.Kusko. - Electric Machinery (3rd ed.). McGraw-Hill, New York, 1969. Teoría y Análisis de las Máquinas Eléctricas. Ed. Hispano Europea, Barcelona, 1975. [\*]

- 
- [3] L.W.Matsch. - Electromagnetic and Electromechanical Machines. International Textbook Co., New York, 1972. Máquinas Electromagnéticas y Electromecánicas. Ed. Representaciones y Servicios de Ingeniería, México, 1974. [\*]
- [4] G.Séguier, F.Notelet. - Electrotechnique Industrielle. Ed. Technique et Documentation, Paris, 1977. [\*]
- [5] J.Chatelain. - Machines Electriques - Traité d'Electricité de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Vol. X. Presses Polytechniques Romandes, Lausanne, 1983.
- [6] M.Liwschitz - Garik, C.C.Whipple. - A.C. Machines. Van Nostrand, New York, 1946. [\*] - D.C. Machines. Van Nostrand, New York, 1946. [\*] Máquinas de Corriente Alterna. C.E.C.S.A., México, 1970. [\*] Máquinas de Corriente Continua. C.E.C.S.A., México, 1970. [\*]
- [7] M.Kostenko, L.Piotrovsky. - Electrical Machines. 1. D.C.Machines, 2.A.C.Machines. Mir, Moscow, 1968/69. [\*] (Existe en traducción al español).
- [8] A.S.Langsdorf. - Principles of Direct Current Machines. McGraw- Hill, New York, 1940. [\*] - Theory of Alternating Current Machinery. McGraw-Hill, New York, 1955. [\*] (Existe traducciones al español).
- [9] G.J.Thaler, M.L.Wilcox. - Electric Machines. Dynamics and Steady State. Wiley, New York, 1966. [\*] Máquinas Eléctricas - Estado dinámico y permanente. Ed. Limusa, México, 1969.
- [10] L.V.Bewley. - Alternating Current Machinery. MacMillan, New York 1949. [\*]
- [11] P.C.Krause. - Analysis of Electric Machinery. McGrawHill, New York, 1986. [\*]
- [12] P.C.Krause, O.Wasynczuk, S.D.Sudhoff. - Analysis of Electric Machinery and Drive Systems. Wiley, New York, 2002.
- [13] R. Sanjurjo Navarro. - Máquinas Eléctricas. McGraw-Hill, Madrid, 1989.

**B. - Apuntes y Publicaciones universitarias.**

- [14] A.G.Cisa. - Apuntes del curso de Máquinas Eléctricas. Oficina de Publicaciones de la Facultad de Ingeniería, Montevideo, (Fascículos de fechas diversas).
- [15] J.L.Alonso, A.Portillo. - Apuntes del curso de Máquinas Eléctricas II. Facultad de Ingeniería, Montevideo, (Curso dictado desde 1987 a 1997).
- [16] Ph.Barret. - Electrotechnique Générale. Ecole Supérieure d'Electricité, Paris. Tome 1 (Publication No.2272), 1972; Tome 2 (Publ. No.2532), 1976.

**C. - Obras complementarias y de profundización**

- [17] J.Lesenne, F.Notelet, G.Séguier. - Introduction à l'Electrotechnique Approfondie. Ed. Technique et Documentation, Paris, 1981. [\*]
- [18] J.Meisel. - Principles of Electromechanical Energy Conversion. McGraw-Hill, New York, 1966.
- [19] M.Jufer. - Transducteurs Electromécaniques - Traité d'Electricité de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Vol.IX. Ed.Georgi, Lausanne, 1979.

- 
- [20] C.G.Veinott. - Fractional and Subfractional Horsepower Electric Motors. McGraw-Hill, New York, 1975. Motores Eléctricos de Potencia Fraccionaria y Subfraccionaria. Ed. Marcombo-Boixareu, Barcelona, 1978. [\*]
- [21] D.C.White, H.H.Woodson. - Electromechanical Energy Conversion, Wiley, New York, 1959. [\*]
- [22] J.Kirtley - *Electric Machines. MIT graduate course 6.685.* <http://ocw.mit.edu/courses/electrical-engineering-and-computer-science/6-685-electric-machines-fall-2005/>

**Comentarios específicos a las referencias bibliográficas:**

A.- Referencias Básicas

- [1] Libro moderno, conceptual, con énfasis en el análisis del campo magnético en el interior de las máquinas y en la transmisión de la energía y generación del par. Revisión de nociones básicas de Electromagnetismo y de materiales magnéticos. Incluye estudio de los convertidores de electrónica de potencia más frecuentemente empleados para la alimentación de las máquinas.
- [2] Libro clásico, la 6ta. edición es una versión moderna, con aplicaciones de cálculo en Matlab. La 3ra edición fue empleada como texto en el Plan 74, es menos adaptada a cursos más recientes. La versión en español de 1975 disponible en Biblioteca de Fing. tiene muchos errores de imprenta.
- [3],[4] Libros similares entre sí en enfoque y profundidad, menos conceptuales que [1] y [2], pero de tratamiento matemático más detallado. [3] Emplea una terminología algo anticuada.
- [5] Obra mucho más extensa que las anteriores, orientada a la teoría general de las máquinas eléctricas, para el estudio de regímenes transitorios. Excede ampliamente los objetivos del curso.
- [6],[7],[8] Conjunto de libros clásicos y de referencia. Sumamente completos y profundos en la presentación de cada tipo de máquina. Por su detalle de tratamiento exceden los contenidos del curso. Tienen un tratamiento algo anticuado, sin un enfoque unificador de los diversos tipos de máquina.
- [9] Orientado al estudio de regímenes transitorios, y el régimen permanente como un caso particular. Ejercicios y problemas interesantes.
- [10] Obra clásica, como [6],[7],[8], restringida sólo al estudio de máquinas de corriente alterna, de gran concisión y claridad conceptual.
- [11],[12] Libros modernos orientados específicamente a la teoría general y la simulación de regímenes transitorios.
- [13] Enfoque más bien conceptual, similar a [2] (3rd ed.), con tratamiento matemático más preciso y moderno.

B.- Apuntes de cursos.

- [14] Apuntes universitarios. Referencia de todos los cursos de máquinas eléctricas dictados en la Facultad hasta 1988. Tratamientos y enfoques similares a los de [10].
- [15] Apuntes universitarios. Referencia básica para los caps. 4, 9, 10, 11, 12 y 13.
- [16] Apuntes universitarios. Referencia para los caps. 4, 5, 6, 7, 8.

C.- Obras complementarias y de profundización.

- [17] Referencia básica para la teoría general de máquinas eléctricas y los regímenes transitorios.
- [18] Obra bastante teórica, una de varias que surgieron luego de [21]. Interesante para el estudio de convertidores distintos de las máquinas convencionales.
- [19] Interesante para el estudio de convertidores distintos de las máquinas convencionales, en particular electroimanes, relés y motores paso a paso.

- [20] Libro más bien técnico. Muy completo panorama de tipos constructivos y principio de funcionamiento de pequeños motores y sus dispositivos de arranque.
- [21] Obra clásica de referencia para la teoría general de las máquinas eléctricas, de gran profundidad teórica y tratamiento matemático muy formal.
- [22] Curso de posgrado moderno del MIT. Tratamiento detallado y riguroso de los fenómenos físicos involucrados en las máquinas eléctricas. Parte de conocimientos de electromagnetismo más avanzados que los de la formación corriente de nivel de grado. Incluye simulaciones numéricas.