



d7/

**Facultad de Ingeniería  
Comisión Académica de Posgrado**

**Formulario de Aprobación Curso de Actualización 2013**

**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. Ciro Mata, docente libre, 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 2013.**

**Horario y Salón: A definir**

**Horas Presenciales:**

84 horas.

**Arancel: \$U 10100**

**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. 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.

---

**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):52
- Horas clase (práctico):24
- Horas clase (laboratorio):
- Horas consulta:4
- Horas evaluación:4
  - Subtotal horas presenciales:84
- Horas estudio: 52
- Horas resolución ejercicios/prácticos:24
- Horas proyecto final/monografía:-
  - Total de horas de dedicación del estudiante: 160

---

**Forma de evaluación:**

2 parciales de evaluación de 2 hs de duración c/u. En cada parcial se formulan preguntas (2 a 4) acerca del curso Teórico y se plantean ejercicios (1 o 2) similares a los realizados en las clases de Práctico.

Procedimientos de evaluación:

- I. Dos pruebas parciales de evaluación durante el semestre, de 2 hs. de duración c/u. Cada parcial se notará con un máximo de 50 puntos.
- II. De acuerdo a los resultados obtenidos, el estudiante podrá:
  - a) Ganar el curso si obtiene 25 o más puntos en la suma de ambas pruebas.
  - b) Si obtiene entre 25 y 50 puntos totales irá a examen total (Práctico más Teórico).
  - c) Si obtiene entre 50 y 70 puntos irá a Examen Teórico.
  - d) Si obtiene más de 70 puntos totales exonerará la asignatura.

---

**Temario:**

1. Introducción. ( T=1 hs.IP=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.IP=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.IP=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. Corrientes y tensiones armónicas en los transformadores trifásicos.

4. Fundamentos de la conversión electromecánica de la energía. ( T=4 hs.IP=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.
5. Campo giratorio. ( T=10 hs.IP=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=4 hs.IP=4 hs.) Descripción física de la máquina síncrona (MS). MS de rotor cilíndrico. Régimen permanente, diagrama vectorial, circuito equivalente. Ensayos. Reactancia síncrona. Potencia activa y reactiva. Par. Estabilidad. Ecuación de pequeñas oscilaciones. Límites de operación. Funcionamiento como motor síncrono. Curvas en V o de Mordey.
7. Revisión de Máquinas de inducción polifásicas. ( T=6 hs.IP=4 hs.) Constitución de las máquinas de inducción. Circuito equivalente. Ensayos. Balance energético: curva par-velocidad. Modos de funcionamiento: motor, generador, freno. Diagrama circular. Métodos de arranque. Motores de barras profundas y doble jaula.
8. Máquinas de inducción monofásicas. ( T=2 hs.IP=0 hs.) Análisis por doble campo giratorio. Circuito equivalente. Curva par-velocidad. Dispositivos de arranque.
9. Modelado de las máquinas sincrónicas. ( T=4 hs.IP=0 hs.) Modelado de los amortiguadores. Máquina síncrona ideal. Representación circuital de la MS. Inductancias. Ecuaciones en componentes de fase de la MS de polos salientes.
10. Transformaciones. ( T=2 hs.IP=0 hs.) Generalidades sobre las transformaciones. Componentes simétricas y componentes relativas. Condiciones impuestas a las matrices de transformación. Diagonalización de matrices simétricas y circulantes: 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=2 hs.IP=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 (síncrona, transitoria y subtransitoria).
12. Máquinas sincrónicas en régimen permanente.- Efectos no-lineales ( T=6 hs.IP=4 hs.) Régimen permanente a velocidad síncrona. Funcionamiento en vacío. Funcionamiento con carga simétrica. MS de rotor cilíndrico. 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.
13. Regímenes transitorios de máquinas sincrónicas. ( T=2 hs.IP=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)

#### 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. [\*]

Comentarios sobre la Bibliografía Los libros indicados en la Bibliografía en su mayoría son clásicos. En general todos exceden el contenido del curso en nivel y profundidad, aunque difieren de éste en la notación empleada y a veces también en el enfoque y/o presentación de algunos temas.