



Universidad Nacional de Río Cuarto
Facultad de Ingeniería

PROGRAMA ANALÍTICO

DEPARTAMENTO: ELECTRICIDAD Y ELECTRÓNICA

CARRERA: INGENIERÍA ELECTRICISTA

ASIGNATURA: DINÁMICA DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

CÓDIGO: 0473

AÑO ACADÉMICO: 2018

PLAN DE ESTUDIO: 2006

UBICACIÓN EN EL PLAN DE ESTUDIO: 1ER. CUATRIMESTRE DE 5to. AÑO

ORIENTACIÓN: SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

DOCENTE A CARGO: Mg. Ing. Diego Moitre – Profesor Titular

EQUIPO DOCENTE: Mg. Ing. Diego Moitre – Profesor Titular
Dr. Fernando Magnago – Profesor Titular

RÉGIMEN DE ASIGNATURAS:

<i>Aprobada</i>	<i>Regular</i>
0433	0430
0460	0431

ASIGNACIÓN DE HORAS:

Semanales: 5 (cinco) horas

Totales → Teóricas: 35 (treinta y cinco horas)
 → Prácticas → Resolución de problemas: 15 (quince horas)
 → Laboratorio de simulación: 20 (veinte horas)
 → Seminario: 5 (cinco horas)

CARÁCTER DE LA ASIGNATURA: Optativa

OBJETIVOS DE LA ASIGNATURA:

Capacitar al estudiante en los conceptos básicos, en los modelos matemáticos y en la metodología utilizados en la evaluación del comportamiento dinámico (transitorio electromecánico) aplicados a la planificación de la expansión, a la programación de la operación y a la operación en tiempo real



Universidad Nacional de Río Cuarto
Facultad de Ingeniería

de Sistemas Eléctricos de Potencia tanto industriales como interconectados, con especial énfasis en el SADI (Sistema Argentino De Interconexión).

CONTENIDOS:

○ **Contenidos Mínimos**

Introducción a la Estabilidad de Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP). El modelo matemático elemental. Respuesta del SEP a pequeños disturbios. Modelado y simulación de la máquina síncrona. Sistemas de control automático de tensión: su efecto sobre la estabilidad del SEP. Sistemas de control automático de la velocidad del motor primario. Modelado de reguladores de turbinas a vapor, turbinas hidráulicas, turbinas a gas, ciclos combinados. Normas ANSI/IEEE. Modelado de la carga. Estudios de Estabilidad Dinámica y Transitoria aplicados a SEP. Uso de software dedicado.

○ **Programa Analítico**

TEMA 1: INTRODUCCION A LA ESTABILIDAD DE SEP

- 1.1 Estabilidad de SEP: definiciones. Estabilidad Transitoria y Estabilidad Dinámica. Máquinas síncronas. Oscilaciones de potencia en líneas de transmisión. Efecto de un desbalance de potencia sobre los componentes del SEP. Métodos de simulación.
- 1.2 Modelo matemático elemental: la ecuación de oscilación. Unidades. El par del motor primario: máquinas controladas y no controladas. El par electromagnético. Curva potencia vs. ángulo de una máquina síncrona. Representación elemental (o clásica) de una máquina síncrona en estudios de estabilidad. Coeficientes de potencia sincronizante. Frecuencia natural de oscilación de una máquina síncrona.
- 1.3 Sistema de una máquina conectada a barra infinita – modelo clásico. Criterio de áreas iguales. Angulo critico de corte. Modelo clásico de un sistema multimáquina. Ejemplo de estudio de estabilidad clásico para el SEP IEEE_9_bus. Deficiencias del modelo clásico.

TEMA 2: RESPUESTA DEL SEP A PEQUEÑOS DISTURBIOS

- 2.1 Respuesta del SEP a pequeños disturbios (Estabilidad Dinámica). La máquina síncrona no controlada. Efecto desmagnetizante de la reacción de armadura. Efectos de pequeños cambios de velocidad. Modos de oscilación de un SEP multimáquinas no controladas.
- 2.2 La máquina síncrona controlada. Regulador automático de tensión con una constante de tiempo de retardo. Control de velocidad con una constante de tiempo de retardo. Distribución de los desbalances de potencia. Linealización. El caso especial $t=0^+$. Comportamiento promedio antes de la acción de control ($t=t_1$).



TEMA 3: MODELADO Y SIMULACION COMPUTACIONAL DE LA MAQUINA SINCRONA

- 3.1 Transformación de Park-Blondel. Formulación de las ecuaciones en el espacio de estado. Corrientes como variables de estado. Circuito equivalente de una máquina síncrona. Flujos concatenados como variables de estado. Inductancias subtransitorias, transitorias y constantes de tiempo. Modelos simplificados de la máquina síncrona. Ensayos de frecuencia con la máquina síncrona detenida. IEEE Std 115TM – 2009.
- 3.2 Ecuaciones de régimen permanente y diagramas fasoriales. Máquina conectada a barra infinita a través de una línea de transmisión. Máquina conectada a barra infinita con carga local a bornes de la máquina. Determinación de las condiciones de régimen permanente. Condiciones de precontingencia para un sistema multimáquina. Determinación de los parámetros de máquina a partir de los datos de los fabricantes. Simulación computacional de la máquina síncrona. IEEE Std 1110TM – 2002.
- 3.3 Linealización del modelo del generador síncrono con las corrientes como variables de estado. Linealización de la carga para el problema de una máquina. Linealización del modelo del generador síncrono con los flujos concatenados como variables de estado. Modelo lineal simplificado (DeMello&Concordia). Coeficientes Heffron-Phillips. Efecto de la carga en la estabilidad. Diagrama de bloques del modelo lineal simplificado. Representación del modelo lineal simplificado en el espacio de estado.

TEMA 4: CONTROL AUTOMATICO DE TENSION

- 4.1 Configuraciones y definiciones del control automático de tensión (AVR: Automatic Voltage Regulator). Normas IEEE: Std 421.1TM – 2007; Std 421.2TM-1990; Std 421.3TM-1997; Std 421.4TM-2004; Std 421.5TM-2005. Informes IEEE: Committee Reports 1968, 1969, 1973, 1981, 1996. Requerimientos y componentes del AVR. Tipos de sistemas de excitación. Índices de comportamiento dinámico. Funciones de control y protección. Representación computacional del AVR. Parámetros típicos. Respuesta del AVR. Descripción por variables de estado del AVR.
- 4.2 Efecto del AVR sobre los límites de potencia del generador síncrono. Efecto del AVR sobre la estabilidad transitoria. Efecto del AVR sobre la estabilidad dinámica. Análisis por el método del lugar de las raíces de una máquina controlada conectada a barra infinita. Señales estabilizantes suplementarias (PSS). Análisis lineal de generador síncrono estabilizado. Estudios computacionales de Estabilidad Dinámica.

TEMA 5: CONTROL AUTOMATICO DE VELOCIDAD DEL MOTOR PRIMARIO

- 5.1 El regulador de velocidad de Watt. El regulador de velocidad isócrono (astático con realimentación). Ecuaciones incrementales de la turbina. El regulador de velocidad con estatismo (droop).



Universidad Nacional de Río Cuarto

Facultad de Ingeniería

- 5.2 Turbina a vapor como motor primario. Modos de control de una central eléctrica. Generación térmica. Modelo de una central con turbinas a vapor. Control de la turbina a vapor. Calderas a combustible fósil. Sistema de generación de vapor en centrales nucleares.
- 5.3 Turbina hidráulica como motor primario. Tipos de turbina. Ecuaciones, función de transferencia y diagrama de bloques del sistema hidráulico.
- 5.4 Turbina de combustión como motor primario. Ciclos combinados como motor primario.

TEMA 6: MODELADO DE LA RED DE TRANSMISION

- 6.1 Introducción. Representación matricial de una red pasiva. Red de transmisión en estado transitorio. Conversión a un marco de referencia común. Conversión de coordenadas de máquina a coordenadas del sistema. Relación entre corrientes y tensiones de máquina. Orden del sistema. Máquinas representadas por el modelo elemental.
- 6.2 Modelos lineales de la red de transmisión. Formulación híbrida del modelo lineal de la red de transmisión. Ecuaciones de red con el modelo de máquina con los flujos concatenados como variables de estado. Ecuaciones del sistema completo. Ejemplo de formulación de las ecuaciones del sistema en el SEP IEEE_9_bus.
- 6.3 Implementación computacional de modelos de líneas aéreas trifásicas y de cables de potencia.

TEMA 7: MODELADO DE LA CARGA

- 7.1 Conceptos básicos de modelado de la carga. Modelos estáticos de carga compuesta: impedancia constante, corriente constante, potencia constante, modelo ZIP, modelo combinado. Modelos de carga dependientes de la frecuencia. Modelos dinámicos de la carga. Implementación computacional.
- 7.2 Modelado de motores síncronos trifásicos. Implementación computacional.
- 7.3 Modelado de motores asíncronos trifásicos. Ecuaciones básicas de la máquina asíncrona. Modelo de motor asíncrono trifásico usado en estudios de estabilidad. Operación en régimen permanente equilibrado. Alternativas constructivas del rotor. Estimación de parámetros de motores asíncronos trifásicos. Algoritmo computacional de Ansuji, Shokooch y Schinzingher.

TEMA 8: ANALISIS DE ESTABILIDAD DE SEP MULTIMAQUINAS

- 8.1 Estabilidad Dinámica (de pequeña perturbación). Valores y vectores propios de la matriz de estado. Matrices modales. Oscilaciones libres de un sistema dinámico. Valores propios y estabilidad. Forma de los modos dinámicos. Sensibilidad de los valores propios en relación a los elementos de la matriz de estado. Factores de participación: el enfoque de Verghese, Perez Arriaga y Schweppe. Controlabilidad y Observabilidad: Teorema de Estructura



Universidad Nacional de Río Cuarto

Facultad de Ingeniería

Canónica de Kalman. Métodos de cálculo de valores y vectores propios. Características de los problemas de estabilidad dinámica.

- 8.2 Ejemplo de estudio de Estabilidad Transitoria en el SEP IEEE_9_bus con cargas de impedancia constante. Aplicación de los estudios de Estabilidad Transitoria: tiempo crítico de eliminación de falla, tiempo crítico de separación, transferencia rápida de carga, desprendimiento de carga, dinámica de motores. Uso de software dedicado.

TEMA 9: METODOS PARA MEJORAR LA ESTABILIDAD DE SEP

- 9.1 Métodos para mejorar la Estabilidad Transitoria. Interruptores de alta velocidad. Reducción de la reactancia del sistema de transmisión. Compensación shunt. Frenado dinámico. Conexión/desconexión de reactores shunt. Operación independiente de los polos de los interruptores. Conexión/desconexión de fase. Apertura/cierre rápido de válvulas de vapor. Disparo de generadores. Formación controlada de islas/desprendimiento de carga. AVR de elevada velocidad de respuesta.
- 9.2 Métodos para mejorar la Estabilidad Dinámica (de pequeña perturbación). Tipos alternativos de PSS: basados en la velocidad del eje, basados en señales de potencia activa y velocidad, basados en la frecuencia. PSS digitales. Control suplementario con compensadores estáticos de potencia reactiva (SVC).

TEMA 10: CONTROL AUTOMATICO DE LA GENERACION

- 10.1 Introducción al control en tiempo real de la generación. Modelos dinámicos del generador síncrono, del regulador de velocidad del motor primario, del regulador de tensión, de la demanda, de las líneas de enlace de áreas interconectadas. IEEE Std 858TM-1993: IEEE Standard Definitions in Power Operations Terminology.
- 10.2 Control automático de la generación (AGC: Automatic Generation Control). Características de la generación. Control primario. Control secundario. Control terciario. Implementación del AGC como control multinivel.

METODOLOGÍA DE ENSEÑANZA:

Clases teóricas expositivas (Power Point). Resolución de problemas. Laboratorio de simulación (uso de software dedicado). Seminario basado en estudio y discusión de artículos técnicos y normas. Todo el material didáctico será soportado en el Aula Virtual de la Facultad (<https://cursos.ing.unrc.edu.ar/cursos/>)



MODALIDAD DE EVALUACIÓN:

- Evaluaciones :** Tareas escritas de carácter práctico.
Un proyecto computacional.
Una presentación oral con informe escrito en un Seminario.
- Calificaciones:** La nota final (NF) del curso se obtendrá a partir de

$$NF=0,7 * (0,60 NP + 0,40 NT) + 0,3 NS$$

Donde: **NS** (Nota Seminario)
NP (Nota del Proyecto Computacional)
NT (Nota promedio de Tareas)

Para acceder a la regularidad o promoción de la materia será necesario obtener en cada caso las siguientes notas finales:

Nota Final	Condición del alumno
$NF < 5$	LIBRE
$5 \leq NF < 7$	REGULAR
$NF \geq 7$	PROMOCIONADO

La modalidad de **PROMOCIONADO** exige la obtención de una calificación **promedio** de siete (7) puntos (*sin registrar instancias evaluativas de aprobaciones con notas inferiores a seis puntos*) Un estudiante que no hubiere alcanzado la nota mínima de seis (6) puntos, tendrá derecho al menos a una instancia de recuperación para mejorar sus aprendizajes y mantenerse así en el sistema de promoción.

La modalidad de **EXAMEN REGULAR** consiste en la realización de un coloquio conceptual en el que el estudiante deberá desarrollar los principales conceptos de tres (3) temas del programa de estudios vigente de la materia que serán seleccionados por el tribunal examinador.

La modalidad de **EXAMEN LIBRE** consiste en la realización de un práctico computacional que se desarrollará en la Sala de Simulación usando el software dedicado con el que se trabajó durante el curso y de un coloquio conceptual en el que el estudiante deberá desarrollar los principales conceptos de tres (3) temas del programa de estudios vigente de la materia que serán seleccionados por el tribunal examinador.



CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES:

Semana N°	Docente	Temas del Programa Analítico	Actividades
1	D. Moitre	1.1; 1.2; 1.3	Clase teórica; Laboratorio de simulación; Resolución de problemas
2	D. Moitre	2.1; 2.2	Clase teórica; Laboratorio de simulación; Resolución de problemas
3	D. Moitre	3.1; 3.2	Clase teórica; Laboratorio de simulación; Resolución de problemas
4	D. Moitre	3.3; 4.1	Clase teórica; Laboratorio de simulación; Resolución de problemas
5	D. Moitre	4.2	Clase teórica; Laboratorio de simulación; Resolución de problemas
6	D. Moitre	5.1; 5.2	Clase teórica; Laboratorio de simulación; Resolución de problemas
7	D. Moitre	5.3;5.4	Clase teórica; Laboratorio de simulación; Resolución de problemas
8	D. Moitre	5.1; 5.2	Clase teórica; Laboratorio de simulación; Resolución de problemas
9	D. Moitre	5.3;5.4	Clase teórica; Laboratorio de simulación; Resolución de problemas
10	D. Moitre	6.1; 6.2;6.3	Clase teórica; Laboratorio de simulación; Resolución de problemas
11	D. Moitre	7.1; 7.2;7.3	Clase teórica; Laboratorio de simulación; Resolución de problemas
12	D. Moitre	8.1;8.2	Clase teórica; Laboratorio de simulación; Resolución de problemas
13	D. Moitre	9.1; 9.2	Clase teórica; Laboratorio de simulación; Resolución de problemas
14	F. Magnago D. Moitre	10.1; 10.2	Clase teórica; Laboratorio de simulación; Resolución de problemas
15	D. Moitre F. Magnago	SEMINARIO	PRESENTACION SEMINARIO



BIBLIOGRAFÍA:

Título	Autor/es	Editorial	Año de Edición	Ejemplares Disponibles
Power System Control and Stability. Second Edition	P. Anderson & A. Fouad	IEEE Press – Wiley Interscience, USA.	2.003	1
Power System Dynamics: Stability and Control. Second Edition.	J. Machowski; J. Bialek; J. Bumby	Wiley, USA.	2.008	1
Power System Dynamics and Stability	P. Sauer & M. Pai	Stipes Publishing L:L:C., USA.	2.006	1
Power System Dynamics: Stability and Control. Second Edition.	K. Padiyar	Anshan Limited, UK.	2.004	1
Power System Stability and Control	P. Kundur	McGraw-Hill, Inc. USA	1.994	1
Power System Oscillations	G. Rogers	Kluwer Academic Publishers	2.010	1
Small Signal Analysis of Power System	M. Pai; D. Sen Gupta; K. Padiyar	Narosa Publishing House	2.007	1
Power System: Small Signal Stability Analysis and Control.	D. Mondal; A. Chakrabarti; A. Sen Gupta	Elsevier Academic Press	2.014	1
Transients in Electrical Systems: Analysis, Recognition, and Mitigation	J. C. Das	McGraw-Hill, USA	2010	1
Power Systems Analysis. Second Edition.	A. R. Bergen & V. Vittal.	Prentice –Hall, USA.	2.000	1
Power System Protection	P. Anderson	IEEE Press – Wiley Interscience, USA.	1.999	1
Understanding Symmetrical Components for Power System Modeling	J. Das	IEEE Press – Wiley Interscience, USA.	2.017	1
Modern Control Engineering. Fifth Edition	K. Ogata	Prentice –Hall, USA	2.009	1
Discrete-time Control Systems. Second Edition	K. Ogata	Prentice –Hall, USA	1.995	1
MATLAB for Control Engineers	K. Ogata	Pearson Prentice –Hall, USA	2.008	1
IEEE Transactions on Power Systems, International Journal of Electric Power Systems Research, International Journal of Electrical Power & Energy Systems	Artículos a indicar de las distintas referencias durante el desarrollo del curso. Disponibles en la Biblioteca Electrónica de Ciencia y Tecnología, Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva			
Procedimientos para la programación de la operación, el despacho de cargas y el cálculo de precios. Versión XXVI.	CAMMESA	-----	2.016	----



Universidad Nacional de Río Cuarto
Facultad de Ingeniería

SOFTWARE:

MATLAB® Versión 7.10.0; Control System Toolbox - Simulink

ETAP® 11.1.1; (Versión Educativa)

PSS/E™ 32.0; (Versión Educativa)

DIGSILENT 14.1; (Versión Educativa)

POWERWORLD SIMULATOR®; (Versión Educativa)

MATHPOWER® Versión 3.2; (Versión Educativa)

Firma Docente Responsable

Firma Secretario Académico