

## 1.- DATOS DE LA ASIGNATURA

|                           |  |
|---------------------------|--|
| Nombre de la asignatura : | <b>Sistemas Eléctricos de Potencia</b> |
| Carrera :                 | <b>Ingeniería Electromecánica</b>      |
| Clave de la asignatura :  | <b>EMF-1024</b>                        |
| SATCA <sup>1</sup>        | <b>3 – 2 - 5</b>                       |

## 2.- PRESENTACIÓN

### Caracterización de la asignatura.

Esta asignatura considera el análisis en estado estable de los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP). El curso parte de la consideración de que el alumno ha adquirido las competencias previas correspondientes a las materias de máquinas eléctricas y análisis de circuitos eléctricos. Por tanto, se analiza especialmente el comportamiento de las líneas de transmisión y su modelado mediante parámetros distribuidos, así como los modelos aproximados de líneas considerando parámetros concentrados.

Asimismo, se considera el problema de flujos de potencia, en el cuál se estudia de manera detallada la deducción de las ecuaciones de balance de potencia. Dado que el conjunto de ecuaciones algebraicas resultante es no lineal, se emplean métodos iterativos para su solución, que son abordados con el suficiente nivel de profundidad para que el alumno sea capaz de implementar algoritmos computacionales de solución, utilizando lenguajes de alto nivel para su fácil implementación.

El empleo de software de alto nivel y especializado juega un papel muy importante en la comprensión y asimilación de conceptos. Será posible con estos medios que el alumno compruebe y valide los diferentes modelos estudiados en el curso, implementará algoritmos computacionales de solución y se concentrará en los conceptos esenciales.

La importancia de esta asignatura reside en que servirá como plataforma para el análisis de fenómenos de gran relevancia en la operación y control de los SEP. Así, el adquiere la habilidad de modelar matemáticamente los sistemas de potencia, resolverlos utilizando diferentes técnicas y obtener su punto operativo en estado estacionario. Además, la asignatura logrará que el alumno desarrolle su capacidad de auto aprendizaje que le sirva para analizar la operación y control de un SEP.

### Intención didáctica.

---

<sup>1</sup> Sistema de Asignación y Transferencia de Créditos Académicos

La primera parte del curso comprende un repaso de conceptos de teoría de circuitos, tales como potencia compleja, factor de potencia, etc. El profesor debe relacionarlo directamente con los SEP.

La segunda parte del curso comprende el modelado de las líneas de transmisión de una red eléctrica, de tal manera que el ingeniero desarrolle la habilidad necesaria para seleccionar el modelo adecuado, que vaya acorde con el fenómeno que esté analizando. Deberá ser capaz de comprobar y validar los modelos de las líneas de transmisión utilizando software de alto nivel y software especializado que contenga los modelos implementados.

La tercera parte del curso analiza el problema de flujos de potencia y las técnicas de solución del conjunto de ecuaciones resultante. El alumno debe desarrollar la habilidad para elaborar sus propios algoritmos de solución. Nuevamente el uso del software antes mencionado juega un papel muy importante, y el profesor debe de fomentar la creatividad del ingeniero para que la implementación de algoritmos sea una tarea motivante en el análisis. Una vez que se han implementado los algoritmos de solución, el profesor debe de utilizar software especializado para dar énfasis en los problemas más comunes en la operación de los SEP. Esto permitirá que el ingeniero desarrolle su capacidad de razonamiento y pueda dar una interpretación adecuada del punto operativo en estado estable.

### 3.- COMPETENCIAS A DESARROLLAR

| Competencias específicas:  | Competencias genéricas:  |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"><li>• Identificar los elementos básicos que componen y se consideran para el análisis de sistemas eléctricos de potencia.</li><li>• Aplicar la teoría de electricidad y magnetismo, así como especificaciones de diseño de conductores para el cálculo de parámetros de líneas de transmisión.</li><li>• Representar por medio de un circuito y matemáticamente un sistema de potencia práctico en estado estacionario.</li><li>• Realizar el análisis de flujos de potencia para obtener puntos de estado estacionario y análisis de contingencias de un sistema eléctrico de potencia.</li><li>▪ Conocer los principios para la operación y control de un sistema eléctrico de potencia.</li></ul> | <p data-bbox="824 296 1206 329"><u>Competencias instrumentales</u></p> <ul style="list-style-type: none"><li>▪ Capacidad de análisis y síntesis</li><li>▪ Capacidad de organizar y planificar</li><li>▪ Conocimientos básicos de la carrera</li><li>▪ Leer en una segunda lengua</li><li>▪ Manejo de software computacional</li><li>▪ Habilidades de gestión de información (habilidad para buscar y analizar información proveniente de fuentes diversas)</li><li>▪ Solución de problemas</li><li>▪ Toma de decisiones.</li></ul> <p data-bbox="824 800 1206 833"><u>Competencias interpersonales</u></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Capacidad crítica y autocrítica</li><li>• Trabajo en equipo</li><li>• Habilidades interpersonales</li><li>• Capacidad de comunicarse con profesionales de otras áreas</li><li>• Compromiso ético</li></ul> <p data-bbox="824 1129 1154 1163"><u>Competencias sistémicas</u></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Capacidad de aplicar los conocimientos en la práctica</li><li>• Habilidades de investigación</li><li>• Capacidad de aprender</li><li>• Capacidad de adaptarse a nuevas situaciones</li><li>• Capacidad de generar nuevas ideas (creatividad)</li><li>• Búsqueda del logro</li></ul> |

#### 4.- HISTORIA DEL PROGRAMA

| Lugar y fecha de elaboración o revisión  | Participantes   | Evento  |
|--|---|---|
| <p>Instituto Tecnológico Superior de Irapuato del 24 al 28 de agosto de 2009.</p>  | <p>Representantes de los Institutos Tecnológicos de:<br/>Apizaco, Centla, Ciudad Jiménez, Ciudad Juárez, Delicias, Huichapan, Irapuato, Jocotitlán, La Sierra Norte de Puebla, Lagos de Moreno, Lázaro Cárdenas, Lerdo, Libres, Linares, Los Mochis, Minatitlán, Occidente del Estado de Hidalgo, Ocotlán, Oriente del Estado de Hidalgo, Parral, Puerto Vallarta, Tamazula De Gordiano, Tijuana, Tlalnepantla, Tlaxco, Toluca, Tuxtepec, Xalapa y Zacatecas.</p> | <p>Reunión Nacional de Diseño e Innovación Curricular para el Desarrollo y Formación de Competencias Profesionales de la Carrera de Ingeniería Electromecánica.</p> |
| <p>Desarrollo de Programas en Competencias Profesionales por los Institutos Tecnológicos del 1 de septiembre al 15 de diciembre de 2009.</p> | <p>Academias de Ingeniería Electromecánica de los Institutos Tecnológicos de:<br/>Superior de Irapuato</p>  | <p>Elaboración del programa de estudio propuesto en la Reunión Nacional de Diseño Curricular de la Carrera de Ingeniería Electromecánica.</p>                       |
| <p>Instituto Tecnológico de Mexicali del 25 al 29 de enero del 2010.</p>   | <p>Representantes de los Institutos Tecnológicos de:<br/>Apizaco, Centla, Ciudad Jiménez, Ciudad Juárez, Huichapan, Irapuato, Jocotitlán, La Sierra Norte de Puebla, Lagos de Moreno, Lázaro Cárdenas, Lerdo, Libres, Los Mochis, Mexicali, Minatitlán, Occidente del Estado de Hidalgo, Ocotlán, Oriente del Estado de Hidalgo, Parral, Puerto Vallarta, Tamazula de Gordiano, Tlaxco, Toluca, Tuxtepec, Xalapa y Zacatecas.</p>                                 | <p>Reunión Nacional de Consolidación de los Programas en Competencias Profesionales de la Carrera de Ingeniería Electromecánica.</p>                                |

## 5.- OBJETIVO GENERAL DEL CURSO

Identificar los elementos básicos que componen y se consideran para el análisis de sistemas eléctricos de potencia.

Representar mediante un circuito y matemáticamente un sistema de potencia práctico para su análisis en estado estacionario.

Realizar el análisis de flujos de potencia para obtener puntos de estado estacionario y análisis de contingencias de un sistema eléctrico de potencia.

Conocer la aplicación de flujos de potencia para la operación de un sistema eléctrico de potencia.

## 6.- COMPETENCIAS PREVIAS

- Conocer la teoría del cálculo matricial.
- Conocer la teoría del cálculo diferencial e integral
- Solucionar sistemas de ecuaciones algebraicas lineales y no lineales.
- Conocer las leyes fundamentales de la electricidad y magnetismo.
- Aplicar la teoría de análisis de circuitos para resolver circuitos en corriente directa, monofásicos y trifásicos en corriente alterna.
- Conocer los principios de operación y modelado de máquinas eléctricas estáticas y rotatorias.
- Conocer y aplicar modelos matemáticos para analizar el comportamiento de redes eléctricas.
- Conocer la teoría de electricidad y magnetismo, así como especificaciones de diseño de conductores.

## 7.- TEMARIO

| Unidad | Temas               | Subtemas   |
|--------|---------------------|--|
| 1      | Conceptos Básicos   | 1.1 Introducción a los conceptos básicos<br>1.2 Potencia en circuitos de CA monofásicos<br>1.3 Potencia compleja<br>1.4 El triangulo de potencia<br>1.5 Dirección del flujo de potencia<br>1.6 Voltaje, corriente y potencia en circuitos trifásicos balanceados<br>1.7 Cantidades en por unidad<br>1.8 Cambio de base de cantidades en por unidad |
| 2      | Impedancia serie de | 2.1 Tipos de conductores   |

|   |                                       |  |
|---|---------------------------------------|--|
|   | líneas de transmisión                 | <p>2.2 Resistencia</p> <p>2.3 Valores tabulados de resistencia</p> <p>2.4 Inductancia de un conductor debida al flujo interno</p> <p>2.5 Enlaces de flujo entre dos puntos externos a un conductor aislado</p> <p>2.6 Inductancia de una línea monofásica de dos conductores</p> <p>2.7 Enlaces de flujo de un conductor dentro de un grupo</p> <p>2.8 Inductancia de líneas de conductores compuestos</p> <p>2.9 El uso de tablas</p> <p>2.10 Inductancia de líneas trifásicas con espaciamiento equilátero</p> <p>2.11 Inductancia de líneas trifásicas con espaciamiento asimétrico</p> <p>2.12 Cálculo de inductancia para conductores agrupados</p> |
| 3 | Capacitancia de Líneas de transmisión | <p>3.1 Campo eléctrico de un conductor largo y recto</p> <p>3.2 Diferencia de potencial entre dos puntos debida a una carga</p> <p>3.3 Capacitancia de una línea de dos conductores</p> <p>3.4 Capacitancia de una línea trifásica con espaciamiento equilátero</p> <p>3.5 Capacitancia de una línea trifásica con espaciamiento asimétrico</p> <p>3.6 Efecto del suelo sobre la capacitancia de las líneas de transmisión trifásicas</p> <p>3.7 Cálculos de capacitancia para conductores agrupados</p> <p>3.8 Líneas trifásicas con circuitos paralelos</p>  |
| 4 | Líneas de transmisión                 | <p>4.1 Representación de líneas</p> <p>4.2 La línea de transmisión corta</p> <p>4.3 La línea de longitud media</p> <p>4.4 La línea de transmisión larga: solución de ecuaciones diferenciales</p> <p>4.5 La línea de transmisión larga: interpretación de las ecuaciones</p> <p>4.6 La línea de transmisión larga: forma hiperbólica de las ecuaciones</p> <p>4.7 El circuito equivalente de una línea larga</p> <p>4.8 Flujo de potencia a través de una línea de transmisión</p>   |

|   |                                |   |
|---|--------------------------------|---|
|   |                                | <p>4.9 Compensación reactiva de las líneas de transmisión</p> <p>4.10 Uso de software especializado para el análisis de líneas de transmisión.</p>  |
| 5 | Análisis de flujos de potencia | <p>5.1 Introducción al problema de flujos de potencia</p> <p>5.2 El método de Gauss-Seidel</p> <p>5.3 EL método de Newton-Raphson</p> <p>5.4 La solución de flujos de potencia de Newton-Raphson</p> <p>5.5 El método desacoplado de flujos de potencia</p> <p>5.6 Estudios de flujos de potencia en el diseño y operación de sistemas</p> <p>5.7 Análisis de contingencias N-1 en base a flujos de potencia</p> <p>5.8 Uso de software para realizar análisis de flujos de potencia.</p> |

## 8.- SUGERENCIAS DIDÁCTICAS

El profesor debe:

Dominar plenamente esta disciplina, conocer a detalle los diferentes modelos matemáticos presentados en el curso. Desarrollar la capacidad para elaborar rutinas computacionales que implementen algoritmos de solución; orientar el trabajo del estudiante y potenciar en él la autonomía, que le servirá para utilizar el software especializado sin la constante guía del profesor. Tomar en cuenta el conocimiento de los estudiantes como punto de partida, ya que le permitirá atacar en las etapas iniciales del curso sus debilidades y así evitar obstáculos para la construcción de nuevos conocimientos. Además, debe de propiciar las siguientes actividades,

- Investigar en libros de texto, artículos, internet, etc. acerca de temas que serán vistos en clase por el maestro. Seleccionar de las diferentes fuentes consultadas los conceptos más importantes, así como buscar aplicaciones científicas y/o tecnológicas de ellos.
- Sintetizar la información recopilada en reportes escritos con los conceptos fundamentales de los temas. Probar y experimentar con los modelos y las expresiones matemáticas presentadas en el curso, para discutir en clase su comportamiento.
- Propiciar la discusión de los diferentes puntos de vista observados y enfoques dados a un mismo estudio.
- Desarrollo de prácticas para motivar la realización propuestas técnicas de los alumnos, para mejorar la interpretación de los resultados de experimentos realizados.
- Desarrollar proyectos, basados en la utilización e implementación de algoritmos de solución, donde el resultado final dependa de la interacción entre grupos.
- Desarrollo de trabajo extra clase resolviendo problemas mediante diferentes formas y/o metodologías existentes.
- Desarrollo de reportes escritos en forma particular, haciendo especial hincapié en la calidad de la redacción y la coherencia de ideas, de tal manera que los reportes realizados sean de calidad óptima. En ellos el alumno mostrará el desarrollo de su capacidad de análisis, dejando de lado los reportes que sean de buena calidad de formato pero que carezcan de sentido teórico, práctico y consistencia entre los razonamientos presentados.



## 9.- SUGERENCIAS DE EVALUACIÓN

- El profesor evalúa en forma continua y formativa, por lo que debe considerar el desempeño en cada una de las actividades de aprendizaje, haciendo especial énfasis en:
  - Información obtenida durante las investigaciones solicitadas plasmada en documentos escritos.
  - El nivel de comprensión de conceptos por medio de reportes escritos de las observaciones hechas durante las actividades, así como de las conclusiones obtenidas de dichas observaciones.
  - La calidad de la información obtenida durante las investigaciones solicitadas plasmada en documentos escritos.
  - Exámenes escritos para comprobar el manejo de aspectos teóricos y declarativos.
  - Desarrollo teórico de temas mediante exposiciones.
  - Reportes de investigaciones hechas en equipo y de manera individual.
  - Propuestas de solución a problemas técnicos mediante la aplicación de teorías.
  - Realización de prácticas de laboratorio.

## 10.- UNIDADES DE APRENDIZAJE

### Unidad 1: **Conceptos Básicos**

| <i>Competencia específica a desarrollar</i>   | <i>Actividades de Aprendizaje</i>   |
|---|---|
| Conocer y aplicar los principios básicos para el análisis de sistemas eléctricos de potencia. | <ul style="list-style-type: none"><li>• Representar un sistema eléctrico de potencia por medio de un diagrama unifilar.</li><li>• Calcular la potencia compleja monofásica y trifásica de circuitos que representan un sistema eléctrico de potencia.</li><li>• Realizar problemas de corrección del factor de potencia en base al triángulo de potencia.</li><li>• Discutir resultados obtenidos de un análisis de dirección de flujo de potencia.</li><li>• A partir de un sistema eléctrico de potencia, realizar la selección de base para la representación de parámetros, voltajes y corrientes en cantidades en por unidad, realizar cambio de base.</li><li>• Resolver un circuito trifásico en cantidades en por unidad.</li><li>• Realizar reportes de análisis de resultados, contemplando observaciones y conclusiones de prácticas de laboratorio asociadas al capítulo.</li></ul> |

## Unidad 2: Impedancia serie de líneas de transmisión

| <i>Competencia específica a desarrollar</i>  | <i>Actividades de Aprendizaje</i>   |
|--|---|
| <p>Determinar la resistencia serie de conductores en base a su longitud y temperatura.</p> <p>Calcular la inductancia serie de líneas de transmisión monofásicas y trifásicas.</p> | <ul style="list-style-type: none"><li>• Investigar, aplicar y reportar el concepto de resistencia, la ecuación para el cálculo de resistencia de un conductor largo y corrección de resistencia por temperatura.</li><li>• Investigar, aplicar y reportar la ley de Ampere para el cálculo de intensidad de campo magnético.</li><li>• Investigar y reportar los conceptos de Flujo magnético, enlace de flujo e inductancia.</li><li>• En base a la ley de ampere deducir las ecuaciones de inductancia propia y mutua de un conductor.</li><li>• Resolver problemas de cálculo de inductancia de líneas de transmisión considerando factores de composición y distribución geométrica de conductores.</li><li>• Usar tablas de características eléctricas de conductores para el cálculo de inductancia de líneas de transmisión.</li></ul> |

## Unidad 3: Capacitancia de líneas de transmisión

| <i>Competencia específica a desarrollar</i>  | <i>Actividades de Aprendizaje</i>  |
|--|--|
| <p>Calcular la capacitancia asociada a líneas de transmisión monofásicas y trifásicas.</p> | <ul style="list-style-type: none"><li>• Investigar y aplicar la ley de Gauss para el obtener la ecuación para determinar el campo eléctrico debido a una carga y a un conductor largo infinito.</li><li>• Deducir la ecuación de la diferencia de potencial entre dos puntos producida por una carga puntual.</li><li>• Investigar el concepto de capacitancia.</li><li>• Deducir la ecuación de la capacitancia para una línea de dos conductores paralelos.</li><li>• Resolver problemas de cálculo de capacitancia de líneas trifásicas sin considerar el efecto del suelo.</li><li>• Investigar y discutir el método de las imágenes.</li><li>• Resolver problemas de cálculo de</li></ul> |

|  |  |
|--|--|
|  | <p>capacitancia de líneas trifásicas considerando el efecto del suelo.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Resolver problemas de cálculo de la capacitancia en líneas trifásicas con circuitos paralelos.</li> <li>• Realizar un programa computacional para el cálculo de parámetros de líneas.</li> </ul> |
|--|--|

#### Unidad 4: Líneas de Transmisión

| <i>Competencia específica a desarrollar</i>  | <i>Actividades de Aprendizaje</i>   |
|--|---|
| <p>Analizar las relaciones voltaje corriente de líneas de transmisión considerando diferentes modelos matemáticos.</p> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Deducción del modelo matemático de la línea corta.</li> <li>• Deducción del modelo matemático de la línea media (parámetros concentrados).</li> <li>• Deducción del modelo matemático de la línea larga (parámetros distribuidos).</li> <li>• Analizar y discutir los modelos equivalentes de líneas largas.</li> <li>• Deducir la ecuación de flujo de potencia a través de una línea de transmisión.</li> <li>• Investigar y discutir el concepto de compensación reactiva de la línea de transmisión.</li> <li>• Realizar reportes de análisis de resultados, contemplando observaciones y conclusiones de prácticas de laboratorio asociadas al capítulo.</li> </ul> |

#### Unidad 5: Análisis de Flujos de Potencia

| <i>Competencia específica a desarrollar</i>  | <i>Actividades de Aprendizaje</i>   |
|--|---|
| <p>Conocer y resolver el problema de de flujos de potencia.</p> <p>Conocer la aplicación del análisis de flujos de potencia como una herramienta para la operación de sistemas eléctricos de potencia.</p> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Investigar y discutir los métodos de Gauss-Seidel y Newton-Raphson para la solución de ecuaciones algebraicas no lineales.</li> <li>• Revisar la formulación del problema de flujos de potencia en forma polar.</li> <li>• Aplicar el método de Gauss-Seidel para el análisis de flujos de potencia de un sistema eléctrico pequeño.</li> <li>• Aplicar el método de Newton-Raphson para el análisis de flujos de potencia de un sistema eléctrico pequeño.</li> <li>• Aplicar el método desacoplado rápido</li> </ul> |

|  |   |
|--|---|
|  | <p>para el análisis de flujos de potencia de un sistema eléctrico pequeño.</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Utilizar software para realizar el análisis de flujos de potencia de redes de gran escala.</li><li>• Realizar un reporte de comparación de resultados de flujos de potencia obtenidos por medio de los diferentes métodos.</li><li>• Realizar el análisis de contingencias N-1 para simular condiciones de operación insegura de un sistema eléctrico.</li><li>• En base al análisis de contingencias N-1 investigar y proponer acciones correctivas para contingencias dañinas.</li></ul> |
|--|---|

## **11.- FUENTES DE INFORMACIÓN**

1. John J. Grainger y W. D. Stevenson, Análisis de sistemas de potencia, Traducción de la primera edición en inglés, Mc Graw Hill, México, 1996.
2. A. Gomez-Expósito, A. J. Conejo y C. Cañizares, Electric Energy Systems: Análisis Operation and Control, 1st Edition, CRC Press, USA ,2009.
3. Hadi Saadat, Power system analysis, 2st Edition, Mc Graw Hill, 2002.
4. A. J. Wood y B. F. Wollemborg, Power generation operation and control, 2th. Edition, Wiley Interscience, New York, NY, USA, 1996.
5. Glen W. Stagg y Ahmed H. El-Abiad, Computer methods in power system analysis, 1st Edition, Mc Graw Hill, Kogashuka, 1968

## **12.- PRÁCTICAS PROPUESTAS**

1. Cálculo y medición de potencia activa y reactiva monofásica.
2. Cálculo y medición de potencia activa y reactiva trifásica en un sistema balanceado.
3. Corrección del factor de potencia.
4. Sincronización de un generador síncrono al sistema eléctrico nacional.
5. Armar un sistema maquina-línea-carga para comprobar resultados proporcionados por medio de simulaciones del análisis de flujos de potencia.
6. Cálculo experimental de las curvas PV a diferentes factores de potencia en líneas compensadas y no compensadas.
7. Compensar en serie una línea de transmisión para ver su efecto en su regulación de voltaje y en su SIL.
8. Compensar en paralelo una línea de transmisión para ver su efecto en su regulación de voltaje y en su SIL.
9. Asistir a una visita industrial (Subestación, central de generación o centro de control).