

**Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas**

**Facultad de Ingeniería Eléctrica**

**Departamento de Electroenergética**



## **TRABAJO DE DIPLOMA**

# **DISEÑO DE LAS PRÁCTICAS DE LABORATORIO DE LA ASIGNATURA MEDICIONES ELÉCTRICAS II**

**Autor: Salvador A. Ortega Díaz**

**Tutores: Ing. Lester J. Marrero Rodríguez**

**Ing. Jorge D. Raimundo Tagle**

**Consultante: Dr. C. Alberto Taboada Crispí**

**Santa Clara**

**2015**

**"Año 57 de la Revolución"**

**Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas**

**Facultad de Ingeniería Eléctrica**

**Departamento de Electroenergética**



## **TRABAJO DE DIPLOMA**

# **DISEÑO DE LAS PRÁCTICAS DE LABORATORIO DE LA ASIGNATURA MEDICIONES ELÉCTRICAS II**

**Autor: Salvador A. Ortega Díaz** [sortega@uclv.edu.cu](mailto:sortega@uclv.edu.cu)

**Tutores: Ing. Lester J. Marrero Rodríguez** [lesterr@uclv.edu.cu](mailto:lesterr@uclv.edu.cu)

**Ing. Jorge D. Raimundo Tagle** [denisrt@uclv.cu](mailto:denisrt@uclv.cu)

**Consultante: Dr. C. Alberto Taboada Crispí** [ataboada@uclv.edu.cu](mailto:ataboada@uclv.edu.cu)

**Santa Clara**

**2015**

**"Año 57 de la Revolución"**



Hago constar que el presente trabajo de diploma fue realizado en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería Eléctrica, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

---

Firma del Autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

---

Firma del Autor

---

Firma del Jefe de Departamento  
donde se defiende el trabajo

---

Firma del Responsable de  
Información Científico-Técnica

## **PENSAMIENTO**

"El futuro tiene muchos nombres. Para los débiles es lo inalcanzable. Para los temerosos, lo desconocido. Para los valientes es la oportunidad."

*Víctor Hugo*

## **DEDICATORIA**

A mis padres, que cada día se sientan orgullosos de mí y para que puedan ver el resultado de todos estos años de sacrificio.

A mis tíos Sonia y Luis, que han sido como unos padres para mí y que tanto han contribuido en mi formación.

A mis abuelos y en especial a mi abuela Consuelo por tener tanta paciencia para conmigo y ser la persona que llena de ternura mi corazón.

A mis hermanas, por toda la ayuda que me han brindado y que esto les sirva de ejemplo para terminar su carrera.

A mi novia por todo el apoyo y el amor que me ha brindado.

A toda mi familia de forma general le dedico este trabajo.

## AGRADECIMIENTOS

A mi padre, que siempre ha sido un ejemplo a seguir en todas las esferas de la vida y es la fuente de inspiración para alcanzar este sueño, y por todo el amor y la enseñanza que me ha brindado.

A mi madre por haberme dado la vida y haberse sacrificado tanto durante estos años y no flaquear nunca ante las adversidades de la vida.

A mi abuela Consuelo, por ser tan especial para mí, por darme tanto amor y llenar de fuerzas mi corazón para seguir adelante.

A mis tíos Sonia y Luis por su apoyo incondicional, por sacrificarse conmigo todos estos años y por ser como unos padres para mí.

A mis hermanas por estar siempre a mi lado y enfrentar cada situación o dificultad, por todo el apoyo, cariño y paciencia que han tenido conmigo.

A mi novia por siempre estar ahí para mí y por todo el apoyo y el amor que me ha brindado.

A mis tutores Ing. Lester J. Marrero Rodríguez e Ing. Jorge D. Raimundo Tagle por toda la paciencia y por su dedicación en todo este tiempo y sobre todo por su gran apoyo y todos los conocimientos transmitidos. Agradecer también a todos los profesores de la Facultad de Ingeniería Eléctrica que de una forma u otra aportaron a mi formación como ingeniero.

A mis amigos de siempre y a mis compañeros de estudio que compartieron todos estos años conmigo y en especial a Víctor R. Jara González y Rolando Pérez Gattorno que me ayudaron incondicionalmente y que aportaron mucho para llegar hasta este resultado.

## TAREA TÉCNICA

1. Estudiar los sistemas de conocimientos y habilidades contenido en el Programa Analítico de la asignatura Mediciones Eléctricas II para el plan de estudio D.
2. Actualizar los contenidos teóricos, prácticos y didácticos que se vinculen con las prácticas mediante textos y materiales de estudio publicados en Internet, incluido lo referente al lenguaje de programación Matlab y Simulink.
3. Preparar las prácticas de laboratorio para la asignatura Mediciones Eléctricas II.
4. Comprobar la preparación de las prácticas a través de su montaje y realización.

---

Firma del Autor

---

Firma del Tutor

## RESUMEN

El acelerado desarrollo tecnológico actual ha exigido la modernización en prácticamente todas las esferas del ser humano y la asignatura Mediciones Eléctricas no escapa de este fenómeno. Es por ello que la misma se encuentra llevando a cabo un serio período de actualización en aras de contribuir a una noción casi perfecta por parte del estudiante acerca de su futuro papel como ingeniero ante un evento de medición eléctrica.

Las prácticas de laboratorio hasta ahora existentes correspondientes a la asignatura Mediciones Eléctricas II se encuentran poco desarrolladas, por lo cual resulta inminente la actualización de las mismas en cuanto a la cantidad, medios y métodos de medición, y recursos didácticos. Basado en ello, el objetivo central del trabajo radica en el diseño de nuevas prácticas de laboratorio para la asignatura.

El número de prácticas diseñadas son siete y las mismas responden a cada tema tratado en la asignatura y al sistema de habilidades a dominar por el estudiante, además de tributar directamente a asignaturas importantes de años superiores, buscando siempre la ampliación del necesario vínculo teórico - práctico, así como la comunidad de las asignaturas. Se destaca además el empleo por vez primera de Matlab y Simulink en la solución de algunas prácticas cuyo montaje real es muy difícil de implementar. Con ello se profundiza el ejercicio con esta poderosa herramienta computacional, lo que resulta altamente novedoso. El resultado final del trabajo fue el diseño, ejecución y comprobación de cada una de estas prácticas.

## TABLA DE CONTENIDOS

|                                                                                                            |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| PENSAMIENTO .....                                                                                          | i   |
| DEDICATORIA .....                                                                                          | ii  |
| AGRADECIMIENTOS .....                                                                                      | iii |
| TAREA TÉCNICA.....                                                                                         | iv  |
| RESUMEN .....                                                                                              | v   |
| INTRODUCCIÓN .....                                                                                         | 1   |
| CAPÍTULO 1. CARACTERÍSTICAS DE LAS PRÁCTICAS DE LABORATORIO .....                                          | 5   |
| 1.1 Fundamentación metodológica de las prácticas de laboratorio.....                                       | 5   |
| 1.2 Programa analítico de mediciones electricas ll .....                                                   | 7   |
| 1.3 Realidad de las prácticas de laboratorio previas .....                                                 | 9   |
| 1.4 Aportes de las nuevas prácticas de laboratorio .....                                                   | 11  |
| 1.5 Estructuras de las prácticas de laboratorio .....                                                      | 13  |
| 1.6 Aspectos generales considerados en las prácticas de laboratorio reales .....                           | 15  |
| 1.7 Aspectos generales considerados en las prácticas de laboratorio simuladas en<br>matlab.....            | 18  |
| CAPÍTULO 2. PRÁCTICAS DE LABORATORIO .....                                                                 | 20  |
| 2.1 Transformadores de instrumentación.....                                                                | 20  |
| 2.2 Medición de potencia activa y potencia reactiva con instrumentos<br>electromecánicos y digitales ..... | 26  |
| 2.3 Medición de ángulo de fase y factor de potencia con instrumentos<br>electromecánicos y digitales ..... | 32  |
| 2.4 Medición de frecuencia con instrumentos electromecánicos y digitales .....                             | 37  |
| 2.5 Simulación de fuentes generadoras de armónicos .....                                                   | 43  |
| 2.6 Medición de parámetros eléctricos con un sistema de medición .....                                     | 50  |

|                                                                                                                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.7 Medición del ciclo de histéresis de un material ferromagnético .....                                                                                                         | 56 |
| CAPÍTULO 3. RESULTADOS DE LAS PRÁCTICAS DE LABORATORIO .....                                                                                                                     | 64 |
| 3.1 Resultados del laboratorio 1.....                                                                                                                                            | 64 |
| 3.2 Resultados del laboratorio 2.....                                                                                                                                            | 69 |
| 3.3 Resultados del laboratorio 3 .....                                                                                                                                           | 72 |
| 3.4 Resultados del laboratorio 4 .....                                                                                                                                           | 74 |
| 3.5 Resultados del laboratorio 5 .....                                                                                                                                           | 75 |
| 3.6 Resultados del laboratorio 6 .....                                                                                                                                           | 82 |
| 3.7 Resultados del laboratorio 7.....                                                                                                                                            | 86 |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....                                                                                                                                             | 90 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....                                                                                                                                                 | 91 |
| ANEXOS .....                                                                                                                                                                     | 93 |
| Anexo I Esquema de conexión del circuito trifásico para medir potencia activa y reactiva con el analizador de redes. ....                                                        | 93 |
| Anexo II Esquema de conexión del circuito empleado para medir parámetros eléctricos en un motor asincrónico trifásico mediante el sistema de medición PQP ENERGOTESTER.....      | 93 |
| Anexo III Esquema de conexión del circuito trifásico para medir ángulo de fase y factor de potencia con el fasímetro electromecánico.....                                        | 94 |
| Anexo IV Esquema de conexión de un sistema eléctrico de laboratorio para medir frecuencia mediante un frecuenciómetro electromecánico de vibración y el analizador de redes..... | 94 |
| Anexo V Esquema de conexión para medir el ciclo de histéresis de un material ferromagnético mediante el osciloscopio. ....                                                       | 95 |

## INTRODUCCIÓN

La formación de profesionales es el proceso que, de modo consciente y sobre bases científicas, se desarrolla en las instituciones de educación superior en Cuba, para garantizar la preparación integral de los estudiantes universitarios, que se concreta en una sólida formación científico - técnica humanística, y de altos valores ideológicos, políticos, éticos y estéticos, con el fin de lograr profesionales revolucionarios, cultos, competentes, independientes y creadores, para que puedan desempeñarse exitosamente en los diversos sectores de la economía y de la sociedad en general.

La formación de los profesionales se desarrolla de forma curricular (proceso docente educativo) y extracurricular.<sup>1</sup>

Para desarrollar el proceso docente educativo de una manera eficiente y segura, se erigen los planes de estudios.

El plan de estudio es el documento fundamental de carácter estatal que establece la dirección general y el contenido principal de la preparación del profesional. Está integrado por el Modelo del Profesional, el Plan del Proceso Docente y los Programas de las Disciplinas.

El plan de estudio se elabora para cada carrera en correspondencia con las necesidades sociales existentes en el país, los avances científicos y tecnológicos de la época actual y las particularidades de la profesión en cuestión. Actualmente, el plan de estudio implementado en la educación superior es el plan D.<sup>1</sup>

Una de las disciplinas básicas en la formación de ingenieros electricistas es Circuitos Eléctricos y Mediciones. Dentro de esta disciplina se encuentra la asignatura Mediciones Eléctricas, la cual estudia los métodos, instrumentos y cálculos usados para medir cantidades eléctricas. La enseñanza de las mediciones eléctricas se fundamenta en la necesidad de obtener la información para el análisis, control y protección de los procesos que se desarrollan en los sistemas y equipos eléctricos.

Esta asignatura se encuentra dividida en Mediciones Eléctricas I y Mediciones Eléctricas II, cada una de la cuales presenta su propio programa analítico.

Los programas analíticos de las asignaturas deben contener la información siguiente:

- a) Datos generales (nombre de la asignatura, de la disciplina y de la carrera; ubicación en el plan de estudio; fondo de tiempo total y por formas organizativas; la tipología de las clases).
- b) La relación de temas, definiéndose para cada uno: los objetivos, el contenido, la cantidad de horas y su distribución por formas organizativas y tipos de clases, y la evaluación. Dentro de los contenidos se encuentran: los conocimientos esenciales a adquirir y las habilidades principales a formar.
- c) Indicaciones metodológicas y de organización.
- d) El sistema de evaluación.
- e) Textos básicos y otras fuentes bibliográficas.

Por otra parte, las formas organizativas fundamentales del proceso docente educativo en la educación superior son:

- La clase.
- La práctica de estudio.
- La práctica laboral.
- El trabajo investigativo de los estudiantes.
- La autopreparación de los estudiantes.
- La consulta.
- La tutoría.

La clase tiene como objetivos la adquisición de conocimientos, el desarrollo de habilidades y la formación de valores e intereses cognoscitivos y profesionales en los estudiantes, mediante la realización de actividades de carácter esencialmente académico.

Las clases se clasifican sobre la base de los objetivos que se deben alcanzar y sus tipos principales son: la conferencia, la clase práctica, el seminario, la clase encuentro, la práctica de laboratorio y el taller.

En cada modalidad de estudio, el profesor debe utilizar adecuadamente las posibilidades que brinda cada tipo de clase para contribuir al logro de los objetivos educativos formulados en el programa analítico de la asignatura y del año académico que se desarrolla.

Finalmente, la práctica de laboratorio es el tipo de clase que tiene como objetivos que los estudiantes adquieran las habilidades propias de los métodos y técnicas de trabajo y de la investigación científica; amplíen, profundicen, consoliden, generalicen y comprueben los fundamentos teóricos de la disciplina mediante la experimentación, empleando para ello los medios necesarios.<sup>1</sup>

La práctica de laboratorio puede definirse como el proceso de enseñanza - aprendizaje facilitado y regulado por el profesor, que organiza temporal y espacialmente para ejecutar etapas estrechamente relacionadas, en un ambiente donde los alumnos pueden realizar acciones psicomotoras, sociales y de práctica de la ciencia, a través de la interacción con equipos e instrumentos de medición, el trabajo colaborativo, la comunicación entre las diversas fuentes de información y la solución de problemas con un enfoque disciplinar.<sup>2</sup>

Se puede asegurar, en el caso del científico, que ahí construye la ciencia, y en el caso del estudiante, que ahí se aprende lo qué es la ciencia.<sup>3</sup>

Las prácticas de laboratorio se realizan en instalaciones propias de las universidades o en las que existen en las unidades docentes u otras entidades laborales. Estas instalaciones llamadas comúnmente como laboratorios, son lugares equipados con diversos instrumentos, entre ellos los de medición, donde se realizan experimentos o investigaciones diversas, según la rama de la ciencia a la que se enfoque. Dichos espacios se utilizan tanto en el ámbito académico como en la industria y responden a múltiples propósitos, de acuerdo con su uso y resultados finales, sea para la enseñanza, para la investigación o para la certificación de la industria.<sup>4</sup>

A partir de las prácticas de laboratorio actuales de la asignatura Mediciones Eléctricas II, se derivan los siguientes aspectos.

### **Situación problemática**

Actualmente las prácticas de laboratorio correspondientes a la asignatura Mediciones Eléctricas II se encuentran poco desarrolladas en cuanto a la cantidad de las mismas,

medios y métodos de medición, y recursos didácticos; lo que limita la adquisición de conocimientos y habilidades en el estudiante.

### **Problema científico**

¿Cómo contribuir a la formación práctica del estudiante en la asignatura Mediciones Eléctricas II?

### **Objetivo general**

Diseñar las prácticas de laboratorio para la asignatura Mediciones Eléctricas II.

### **Objetivos específicos**

1. Estudiar los sistemas de conocimientos y habilidades contenido en el Programa Analítico de la asignatura Mediciones Eléctricas II para el plan de estudio D.
2. Actualizar los contenidos teóricos, prácticos y didácticos que se vinculen con las prácticas mediante textos y materiales de estudio publicados en Internet, incluido lo referente al lenguaje de programación Matlab y Simulink.
3. Preparar las prácticas de laboratorio para la asignatura Mediciones Eléctricas II.
4. Comprobar la preparación de las prácticas a través de su montaje y realización.

### **Estructura**

El trabajo está compuesto por tres capítulos. El primer capítulo destaca las características de las nuevas prácticas, su aporte y su repercusión en el sistema de habilidades de la asignatura. El segundo capítulo muestra las prácticas de laboratorio de la asignatura, las cuales serán empleadas por el estudiante. El tercer capítulo refleja una guía de solución de todas las prácticas, la cual podrá ser usada por el profesor y lo ayudará en su misión de valorar y evaluar el desempeño del estudiante.

### **Novedad y actualidad**

Se establece el trabajo con instrumentos digitales modernos como analizadores de redes y osciloscopios; y con bloques de simulación en Matlab, así como el empleo de situaciones que aproximan la práctica a la realidad presente en sistemas eléctricos de potencia e industriales.

## **CAPÍTULO 1. CARACTERÍSTICAS DE LAS PRÁCTICAS DE LABORATORIO**

### **1.1 Fundamentación metodológica de las prácticas de laboratorio.**

Dentro de los objetivos de la formación profesional en el campo de la ingeniería debe estar el permitir a los estudiantes desde las primeras etapas experimentar la ciencia y la tecnología de tal manera que les de la capacidad de una activa construcción de ideas y de explicaciones que conlleven al aumento de las oportunidades para desarrollar, aprovechar y generar nuevas tecnologías.<sup>5</sup>

Aristóteles (384 - 322 a.C.) y sus discípulos trataron de explicar las causas de los fenómenos partiendo de observaciones fragmentarias, con pleno menosprecio de la práctica (de la experimentación). La idea de Aristóteles era concebir la ciencia como un tipo de conocimiento demostrativo expresado en teorías, las que debían tener un formato deductivo que siguiera el modelo de las ciencias formales, en la cual algunas afirmaciones actuaban como principios a partir de los cuales luego se obtendrían consecuencias.

De todos los pensadores de la antigüedad sólo Arquímedes (287 - 212 a.C.) fue el precursor del nuevo enfoque metodológico de la investigación de la naturaleza, pues conjuntamente con el método deductivo empleó ampliamente el experimento como medio para descubrir y comprobar las hipótesis de las ciencias deductivas, desarrollando una nueva etapa de la ciencia que se caracteriza por el empleo intensivo de los métodos de la investigación empírica activa: el experimento y la observación. De estos métodos, el experimento, constituye el rasgo distintivo de la ciencia de la era moderna.<sup>6</sup>

La práctica de laboratorio se introduce en la educación a propuesta de John Locke hace casi trescientos años, al entender la necesidad de realización de trabajos prácticos experimentales en la formación de los alumnos, y a finales del siglo XIX ya formaba parte integral del currículo de las ciencias en Inglaterra y Estados Unidos.<sup>7, 8, 9</sup> Desde entonces, se ha mantenido una fe inamovible en la tradición que asume la gran importancia del trabajo práctico para la enseñanza de las ciencias.<sup>10</sup>

En las últimas décadas se han desarrollado investigaciones sobre las prácticas de laboratorio que permiten renovar los trabajos prácticos tradicionales; generando un amplio consenso en torno a la orientación del trabajo experimental como una actividad investigativa que juega un papel primordial en la familiarización de los estudiantes con la metodología científica. Sin duda, el trabajo práctico y, en particular las actividades de laboratorio, constituyen un hecho diferencial propio de la enseñanza de la ciencia y la tecnología.<sup>5</sup>

El *National Research Council* afirma que enseñar efectuando investigaciones y prácticas ofrece al personal docente la oportunidad de que sus alumnos desarrollen aptitudes para enriquecer el conocimiento técnico y científico. Lo anterior apoya la importancia de la construcción y documentación de un marco teórico para la enseñanza y el aprendizaje de la ciencia y la tecnología a través de una docencia basada en el trabajo práctico y la investigación.<sup>11</sup>

La aplicación de las diferentes alternativas de aprendizaje es una opción frente al desarrollo de la enseñanza tradicional, en la que prevalece la clase magistral.<sup>12</sup> La enseñanza tradicional no resulta completamente eficaz para un aprendizaje significativo, recomendando el empleo de métodos menos pasivos para el estudiante, afirmando que los mismos perciben el laboratorio como un lugar donde están activos. Es decir, que innovar en las prácticas de laboratorio teniendo en cuenta lo que el alumno ya sabe juega un papel fundamental en lo que este aprende.<sup>13</sup>

En síntesis, las prácticas de laboratorio aportan a la construcción en el estudiante de cierta visión sobre la ciencia, en la cual ellos pueden entender que acceder a la ciencia no es imposible y, además, que la ciencia no es infalible y que depende de otros factores o intereses (sociales, políticos, económicos y culturales).<sup>14</sup> La actividad experimental hace mucho más que apoyar las clases teóricas de cualquier área del conocimiento; su papel es importante en cuanto despierta y desarrolla la curiosidad de los estudiantes, ayudándolos a resolver problemas y a explicar y comprender los fenómenos con los cuales interactúan en su cotidianidad.<sup>15</sup>

En el área de ingeniería, un laboratorio bien diseñado es una valiosa herramienta que contribuye a reforzar la enseñanza y en el que los alumnos pueden lograr una mayor

comprensión imposible de lograr por otros medios. Estos pueden verificar un modelo, validar y limitar suposiciones y predecir rendimientos.<sup>4</sup> Las prácticas de laboratorio deben favorecer el análisis de resultados por parte de los estudiantes; la elaboración de un informe final, en el que se especifique claramente el problema planteado, las hipótesis emitidas, las variables que se tuvieron en cuenta, el diseño experimental realizado, los resultados obtenidos y las conclusiones; y, finalmente, producir una evaluación coherente con todo el proceso de resolución de problemas con criterios referidos al trabajo científico y al aprendizaje profundo.<sup>16, 17, 18</sup>

## 1.2 Programa analítico de mediciones electricas II

Como bien se dijo, el programa analítico de la asignatura Mediciones Eléctricas II contiene las características principales de la misma. A continuación se describen los rasgos principales de dicho programa con las modificaciones tenidas en cuenta a partir del diseño de las nuevas prácticas.

La tabla a continuación refleja la distribución de horas por tema, observándose la importancia, en cuanto a horas de prácticas se refiere, que se le brinda a la medición de magnitudes eléctricas, principal propósito de la asignatura en general.

Tabla 1. Plan temático.

| Temas                                 | C  | CP | L  | E  | Horas |
|---------------------------------------|----|----|----|----|-------|
| I. Medición de magnitudes eléctricas  | 6  | 4  | 6  | 5  | 42    |
| II. Medición de magnitudes magnéticas | 1  | -  | 1  | 1  | 6     |
| Horas                                 | 14 | 8  | 14 | 12 | 48    |

La asignatura presenta los siguientes objetivos generales instructivos:

1. Resolver la selección y explotación de instrumentos eléctricos y electrónicos para realizar mediciones de magnitudes asociadas a instalaciones electro energéticas.
2. Evaluar los errores en los resultados de las mediciones.

De manera análoga, el objetivo general educativo es contribuir a la formación de ingenieros electricistas capaces de:

1. Manifestar en sus actividades de estudio e investigación los más altos valores de nuestra sociedad: responsabilidad, compromiso, honestidad, modestia, desinterés y patriotismo.
2. Trabajar en forma organizada e independiente o en colectivo, siendo capaces de orientarse y adaptarse a situaciones nuevas, sentir la necesidad de estudiar y superarse constantemente.
3. Desarrollar una formación integral teórica - práctica, científico - técnica y estética de carácter profesional, que le permita de forma independiente resolver las tareas que le plantee la sociedad y adquirir nuevos conocimientos.
4. Utilizar el idioma español con eficiencia en su forma oral y escrita, a través del oficio adquirido por medio de las respuestas a preguntas, elaboración y defensa de informes bien estructurados.

Los sistemas de conocimientos y habilidades que propone la asignatura para el estudiante se agrupan en los dos temas de la misma.

En el caso del Tema I (Medición de magnitudes eléctricas), el sistema de conocimientos está conformado por los aspectos siguientes:

1. Transformadores de instrumentación o medición: principio de operación, conexiones y errores.
2. Medición de potencia y energía activa en circuitos monofásicos y trifásicos. Contadores de energía de inducción y electrónicos. Determinación de la demanda máxima.
3. Medición de potencia y energía reactiva. Convertidores de medición de potencia y energía. Analizadores de carga.
4. Medición de ángulo de fase y factor de potencia. Fasímetros electromecánicos y digitales.
5. Medición de frecuencia. Frecuencímetros electromecánicos y digitales.
6. Medición de señales no sinusoidales y transitorias. Análisis armónico de señales. Instrumentos analizadores de redes.

Por su parte, el sistema de habilidades comprende:

1. Conectar y operar transformadores de corriente.
2. Utilizar los métodos y medios de medición adecuados para medir las magnitudes eléctricas siguientes: tiempo, período, frecuencia, ángulo de fase, factor de potencia, potencia y energía activa y reactiva en circuitos monofásicos y trifásicos.
3. Realizar mediciones con wattímetros y contadores de energía conectando el circuito necesario y determinando los errores.
4. Operar un sistema de medición procesando las señales de los sensores en un elemento de control central.

En cuanto al Tema II (Medición de magnitudes magnéticas), el mismo contiene como sistema de conocimientos:

1. Medición de magnitudes magnéticas. Ensayo de materiales ferromagnéticos. Obtención de características estáticas y dinámicas.

Y como sistema de habilidades:

1. Utilizar métodos y medios de medición eléctrica para realizar mediciones de magnitudes magnéticas.<sup>19</sup>

El sistema de evaluación de la asignatura es amplio y diverso, comprendiendo dos pruebas parciales, cuatro seminarios, así como los informes de las prácticas de laboratorio y las evaluaciones sistemáticas de las clases prácticas.

En cuanto a la bibliografía, a pesar de que los textos básicos establecidos se encuentran atrasados sobremanera, se han incluido una serie de materiales complementarios de reciente edición en formato digital que propician una variada e instructiva biblioteca digital.

### **1.3 Realidad de las prácticas de laboratorio previas**

El presente trabajo no pretende injuriar el sistema de prácticas de laboratorio hasta ahora implementado, ya que muchos son los inconvenientes por los que ha atravesado la asignatura en los últimos tiempos, entre lo que se destaca en primer lugar, la inexperiencia en la materia del profesor en ejecución, y en segundo lugar, la falta de seriedad a la hora de

afrontar cambios, hoy en día con carácter casi obligatorio. No obstante, si se desea reflejar de alguna manera estas ineficiencias.

Desde hace algún tiempo ha sido notable la falta de preparación de un estudiante que hubiese culminado la asignatura. Esta afirmación comprobada a la hora del estudiante enfrentar alguna tarea en los años superiores que implicara el uso de las mediciones, teniendo el mismo prácticamente noción alguna de la materia en cuestión.

A esto hay que añadir la falta de medios de medición, lo que muchas veces atentaba en contra de la impartición de una determinada práctica de laboratorio, provocando un bache en la total comprensión de la disciplina.

Seguidamente se muestran las prácticas de laboratorio previas:

Tabla 2. Prácticas de laboratorio previas.

|     |                                                                       |
|-----|-----------------------------------------------------------------------|
| PL1 | Transformadores de corriente.                                         |
| PL2 | Transformadores de corriente (Simulada).                              |
| PL3 | Ajustes o calibración del MCI.                                        |
| PL4 | Medición de período, frecuencia y ángulo de fase con el osciloscopio. |
| PL5 | Sistemas automáticos de medición.                                     |

Como se puede observar, el número de prácticas resulta insuficiente para abarcar todo el contenido de la asignatura. A esto hay que añadir las dificultades a la hora de implementar algunas de ellas, como es el caso de las prácticas 1 y 3, ante la ausencia actual de transformadores de corriente reales y contadores de energía respectivamente. En el caso de las restantes prácticas, resulta notorio destacar su posible impacto positivo para la asignatura, y se habla de posible debido a que, por ejemplo el caso de las prácticas 4 y 5, no se encontraban junto al resto del programa de la asignatura, es decir, no se encontraban hechas, y en el caso de la práctica 2, la misma se encontraba simulada en la versión 6.5 de Matlab, una versión totalmente incompatible con las posteriores en cuanto a elementos de la aplicación Simulink se refiere, y que realmente no se emplea prácticamente en el contexto universitario actual. No obstante, se tuvo en consideración todo lo productivo de las mismas a la hora de reconfigurar el sistema de laboratorios.

#### 1.4 Aportes de las nuevas prácticas de laboratorio

Dentro de la carrera Ingeniería Eléctrica, la presencia de asignaturas que requieren un alto grado de horas prácticas es algo común. Tal es el caso de Mediciones Eléctricas II, donde es necesario que el estudiante se adiestre en el trabajo con la instrumentación y compruebe conocimientos teóricos, los cuales se adquieren mediante conferencias y seminarios. Esto exige al estudiante una mayor preparación y estudio individual, pero también lo motiva en el sentido de explorar este universo práctico. Además, se persigue que el estudiante interactúe de manera sólida con el idioma inglés y el trabajo con el lenguaje de programación Matlab y Simulink, algo fundamental para el especialista hoy en día. Por supuesto que estos aspectos, reflejados en el sistema de habilidades del programa de la asignatura, se cumplen cabalmente con las prácticas propuestas.

Como se mencionó previamente, el número de prácticas es siete y cada una responde a un tema específico de la asignatura, además de tributar de forma directa a asignaturas importantes de años superiores, lo que profundiza la relación entre las mismas.

El sistema de prácticas propuesto se refleja en la Tabla 3.

Tabla 3. Prácticas de laboratorio propuestas.

|     |                                                                 |
|-----|-----------------------------------------------------------------|
| PL1 | Simulación de transformadores de instrumentación.               |
| PL2 | Medición de potencia activa y reactiva.                         |
| PL3 | Medición de factor de potencia y ángulo de fase.                |
| PL4 | Medición de frecuencia.                                         |
| PL5 | Simulación de fuentes generadoras de armónicos.                 |
| PL6 | Medición de parámetros eléctricos con un sistema de medición.   |
| PL7 | Medición del ciclo de histéresis de un material ferromagnético. |

En el caso de la primera práctica, la misma es simulada en Simulink, e incluye, en comparación con su predecesora, la presencia del transformador de potencial. Básicamente, se pretende demostrar la influencia de la variación de algunos parámetros como la resistencia de pérdidas de núcleo, la impedancia de carga y la impedancia del burden en los errores de estos transformadores.

Para la segunda práctica se trabaja tanto con wattmetros electromecánicos como con el analizador de redes UT232 de la Corporación china UNI-T. Se efectúan mediciones de potencia activa y reactiva para una configuración que simula un circuito de distribución secundaria con la presencia de cargas monofásicas y trifásicas solas y combinadas. El estudiante calcula los errores en las mediciones y fortalece sus conocimientos de circuitos eléctricos trifásicos y se familiariza con la disciplina de sistemas eléctricos.

La tercera práctica es similar a la anterior, ya que se emplea el mismo circuito y se trabaja con el propio analizador de redes UT232, así como con fasímetros electromecánicos. El estudiante calcula también los errores en las mediciones y continua fortaleciendo sus conocimientos de circuitos eléctricos trifásicos y familiarizándose con los sistemas eléctricos de distribución.

Por medio de la práctica 4, el estudiante asimila la medición de frecuencia empleando nuevamente el analizador de redes UT232 y el frecuenciómetro electromecánico de vibración. Para ello, se implementa un circuito que consta de un motor de corriente directa compound, el cual se acopla a un generador sincrónico, que da a la salida un sistema de voltajes trifásicos cuya frecuencia es la que se mide. Se varía la velocidad del motor de corriente directa mediante la variación de la corriente del devanado de campo. El cambio de velocidad produce en el generador la variación de la frecuencia. Esta práctica se relaciona estrechamente con las asignaturas de sistemas, máquinas y accionamientos eléctricos.

En la quinta práctica se implementan dos sistemas industriales con carga no lineal en Simulink. En el primer caso se trata de un convertidor de 12 pulsos y en el segundo caso un horno de arco eléctrico de corriente alterna. El estudiante obtiene los armónicos de voltaje y corriente para cada caso antes y después de las variaciones orientadas. La práctica está relacionada con temas de aplicación industrial.

En la práctica 6 el estudiante opera el sistema de medición PQP ENERGOTESTER de la Corporación rusa OOO MARS - ENERGO, y efectúa la medición de magnitudes eléctricas en un motor asincrónico trifásico para tres estados de carga diferente. Además se efectúa la medición de la velocidad del motor para dichos estados de carga. El motor se acopla a un generador de corriente directa shunt - compound, que tiene a la salida resistencias que simulan la carga. Las magnitudes eléctricas son el voltaje, la corriente, el factor de

potencia, la potencia activa y reactiva, la energía activa y reactiva consumida en un tiempo especificado, y el valor de la THD y de los armónicos de voltaje individuales hasta el 11. Se orienta a partir de las mediciones recopiladas la confección de gráficos para visualizar el espectro de los armónicos individuales hasta el 11. Esta práctica se vincula estrechamente con las asignaturas de suministro, máquinas y accionamientos eléctricos.

Por último, la práctica 7 trata sobre la medición del ciclo de histéresis de un material ferromagnético a través del osciloscopio, tomando como dicho material el núcleo de un transformador de relación 110/6 V. El estudiante adquiere los valores relevantes de inducción magnética e intensidad de campo magnético del ciclo a través del osciloscopio, además de fortalecer sus conocimientos sobre teoría del campo electromagnético.

### **1.5 Estructuras de las prácticas de laboratorio**

Además de los aportes tratados anteriormente, con el nuevo folleto de prácticas de laboratorio se pretende, desde una óptica didáctica, no solo complementar la enseñanza - aprendizaje verbal, que concibe el desarrollo de habilidades manipulativas y de medición para la verificación del sistema de conocimientos, para aprender diversas técnicas de laboratorios y para la aplicación de la teoría de errores empleada para el procesamiento de la base de datos experimental y posterior interpretación de los resultados; sino también romper con este paradigma y abrirle paso a nuevas formas de enseñanza en donde el estudiante deje su actitud pasiva y asuma un rol activo y participativo en su aprendizaje, buscando aproximarle al estudio de la materia en calidad de científico e investigador, adoptando una actitud indagatoria, lo cual le posibilita formular hipótesis y plantearse problemas, elaborar estrategias para resolverlas, buscar y confrontar sistemáticamente la información pertinente, intercambiar opiniones y hallar pruebas para apoyar explicaciones.

Para ello, se editan las prácticas con una estructura retroalimentada y adaptada a las características propias de la asignatura. Esta estructura está compuesta por:

#### **1. Título:**

Término o expresión que comunica la denominación o la temática a desarrollar; también se puede identificar como nombre de la práctica, que en ocasiones coincide con el objetivo a alcanzar y/o el método para su realización.

## 2. Objetivo(s):

Incluyen reflexiones sobre lo que se pretende conseguir y como obtenerlo.

## 3. Materiales e instrumentos:

Son todos los recursos materiales: equipos, accesorios e instrumentos empleados en la práctica.

## 4. Fundamentación teórica:

Son conceptos relacionados al tema de la práctica, que facilitan el proceso y los objetivos a cristalizar, llegando con ello al establecimiento de definiciones conceptuales y operacionales. Las primeras se obtienen de los textos y segundas pueden construirse o adaptarse de otras conocidas, de acuerdo con las necesidades del trabajo. Contiene además esquemas, imágenes, ecuaciones, diagramas, etc.

Su principal propósito es la contribución a la formación y organización de las ideas previas que el estudiante posee sobre un tema determinado.

Las ideas previas permiten poseer conocimiento acerca de las concepciones con las que el estudiante enfrenta el aprendizaje de los conocimientos científicos; ponen de manifiesto que dicho aprendizaje lleva incorporado un problema de transformación conceptual y por lo tanto este proceso no sería una adquisición aparentemente; y su existencia muestra el desafío de enfrentar los procesos de aprendizaje bajo una óptica distinta.

## 5. Técnica operatoria:

Son los procedimientos y/o acciones a desarrollar que describen las actividades que el estudiante debe realizar para recibir las impresiones sensoriales que indican la existencia de un concepto teórico o para medir una variable. Incluye los gráficos del montaje experimental e ilustraciones explicativas, y la cantidad y tipo de mediciones, donde se tienen en cuenta las medidas de seguridad y protección.

Durante la técnica operatoria, queda a cargo del profesor llevar a cabo cuatro acciones fundamentales:

- Emisión de preguntas problémicas, las que tienen sus orígenes en la enseñanza socrática, la estrategia educativa más antigua y aún hoy la más poderosa, para

promover el pensamiento crítico. Con ella se formulan preguntas a los estudiantes en vez de darles respuestas. Se moldea una mente inquisitiva y exploradora mediante el sondeo continuo, a través de preguntas sobre un tema. Esta estrategia actúa como el equivalente lógico de la voz interna crítica que despliega la mente al desarrollar habilidades de pensamiento crítico.

- Experimentación y observación, acciones que de conjunto con el análisis de las situaciones problemáticas y la búsqueda de respuestas a ciertas interrogantes, van construyendo diferentes conceptos a nivel empírico como aproximaciones sucesivas al concepto teórico.
- Formulación de hipótesis, a partir de los resultados de la experimentación.
- Confrontación, donde se ponen a prueba los datos que fundamentan la hipótesis, comprobando su veracidad.

#### 6. Conclusiones:

Son procesos que permiten expresar la medida cuantitativa y cualitativa del proceso de asimilación o aprendizaje del estudiante respecto al cumplimiento de los objetivos propuestos, a través del procesamiento y expresión de los resultados experimentales mediante la tabulación de datos y la realización de gráficos.<sup>6</sup>

#### 7. Orientaciones para la confección del informe:

Son las aclaraciones emitidas al estudiante para la ejecución del informe final de la práctica, donde se incluye la orientación de tareas complementarias a la misma.

#### 8. Bibliografía:

Son los textos de los que se deriva la fundamentación teórica.

### **1.6 Aspectos generales considerados en las prácticas de laboratorio reales**

Para la ejecución de las prácticas de laboratorio reales se tuvieron en cuenta los siguientes términos:

#### 1. Elección del método a utilizar en la medición.

Para esta elección se consideró la exactitud a obtener en la medición, el orden de valor de las magnitudes a medir y los medios con que se dispone en el laboratorio.

## 2. Elección de los instrumentos a utilizar.

En función del método de medición a seguir se escogieron los instrumentos a utilizar de acuerdo a sus características estáticas y dinámicas, como son:

- a) Clase de precisión.
- b) Sensibilidad.
- c) Campo de medición, de manera tal que la magnitud a medir tuviera un valor comprendido entre el 20 y el 90% de la escala del instrumento.
- d) Apantallamiento frente a campos eléctricos y/o magnéticos.
- e) Forma de onda de la corriente eléctrica.
- f) Impedancia de entrada.

## 3. Dibujo del circuito utilizado.

Siempre se realizó aún siendo el esquema sencillo. Los circuitos se dibujaron utilizando símbolos convencionales e incluyendo todos los instrumentos.

## 4. Elaboración de las tablas para las mediciones.

Se prepararon las tablas para que, de forma ordenada y cómoda, quedaran recogidos todos los valores a medir, así como la referencia y principales características de los instrumentos utilizados.

Una vez preparada la práctica y conocido el proceso a seguir, se procede a realizar la medición, para lo que se tienen en cuenta los puntos siguientes:

### 1. Montaje del circuito:

- a) Distribución de los instrumentos de medición de forma que las lecturas pudieran realizarse de forma cómoda.
- b) Uso de conductores de sección adecuada a la corriente a circular por ellos.
- c) Conexiones cortas. Los cables largos tienen una mayor impedancia y pueden captar campos electromagnéticos externos con más facilidad. Además, el montaje del circuito con cables largos origina confusión en los estudiantes lo que puede provocar errores en las conexiones.

- d) Conexiones firmes.
  - e) Cables de diferentes colores para diferenciar los circuitos.
  - f) Instrumentos analógicos correctamente calibrados y ajustados.
  - g) En el montaje del circuito se respetan las normas de seguridad:
    - Asegurarse de que el puesto de trabajo esté sin energía antes de comenzar a trabajar.
    - Asegurarse que los condensadores estén descargados antes de trabajar con ellos.
    - Instrumentos de medición dispuestos en el calibre adecuado.
    - Instrumentos y dispositivos con envoltura metálica conectados a tierra.
2. Realización de la práctica cuando su montaje haya sido examinado por el profesor:
- a) Lecturas de los instrumentos utilizando escalas adecuadas y evitando los errores de paralaje.
  - b) Registro en las tablas de los valores leídos, tal como aparecen en la escala de los instrumentos. Las modificaciones a las lecturas se realizan posteriormente.
  - c) Lectura correcta de las indicaciones de algunos instrumentos con amortiguamiento dinámico.
  - d) Anotación de las condiciones ambientales en las que se realiza la práctica y que pueden influir en los resultados obtenidos.
  - e) Cuando el circuito está energizado es necesario respetar las normas de seguridad:
    - No fumar.
    - Estar de pie frente al puesto de trabajo para apartarse rápidamente en caso de peligro.
    - Conocer la ubicación del interruptor general para su desconexión en caso necesario.
    - No manipular los instrumentos con las manos húmedas.
    - Evitar el contacto con partes y elementos bajo tensión.
    - Velar por el consumo excesivo de algún equipo, ya que podría dañarse.

3. Desconexión del circuito finalizada la práctica y previa indicación del profesor, respetando las normas de seguridad:

- Desenergizar el circuito.
- Descargar todos los condensadores.
- Esperar la parada total de los elementos móviles del circuito (motores o generadores) antes de comenzar a manipularlos.
- Disponer los instrumentos de varias escalas en su escala mayor. En el caso de los multímetros, colocar la opción de medición de tensión alterna.
- No tocar los elementos que pudieran tener una temperatura alta tras finalizar la práctica.
- No tirar de los conductores para deshacer las conexiones, realizarlo como es debido.<sup>20</sup>

Terminada la práctica, los alumnos realizan el informe final que presenta el siguiente orden:

- a) Portada con datos generales: número de la práctica, título de la práctica, autor(es) y fecha de realización.
- b) Introducción, donde se explica en que consiste la práctica y para qué, cómo y por qué se realiza.
- c) Desarrollo, donde se ilustran los circuitos y esquemas empleados, tablas con los valores medidos, cálculos efectuados y resultados obtenidos.
- d) Conclusiones, que contiene los criterios acerca de la importancia de la práctica, la valoración de los medios y métodos empleados, así como de los resultados obtenidos.
- e) Bibliografía.

### **1.7 Aspectos generales considerados en las prácticas de laboratorio simuladas en matlab**

Para la preparación de las prácticas de laboratorio simuladas se tuvo en cuenta la necesidad de relacionar al estudiante con algunos temas un tanto difíciles de mostrar en la realidad.

Las mismas se montaron en la versión 7.10.0 (R2010a) de Matlab, presentando los siguientes términos:

1. Representación de los circuitos utilizados, caracterizándose los mismos por su fácil comprensión.
2. Operación con bloques de simulación conocidos.
3. Uso de la aplicación SimPowerSystems de Simulink.

Para la ejecución de la práctica, se respetan las normas de seguridad:

- No fumar.
- Estar correctamente sentado frente al monitor.
- No realizar en la computadora acciones ajenas a las actividades de la práctica.
- Apagar la computadora al finalizar la práctica.

Terminada la práctica, los alumnos realizan el informe final que presenta el mismo orden que en el caso de las prácticas reales.

## CAPÍTULO 2. PRÁCTICAS DE LABORATORIO

### 2.1 Transformadores de instrumentación

#### Objetivo

Comprobar el efecto de la corriente de excitación en los errores de relación y fase del transformador de corriente (TC) y el transformador de potencial (TP) a través de la simulación de los mismos en Matlab.

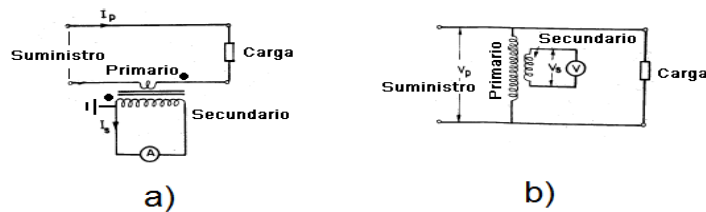
#### Fundamento teórico

Los transformadores de instrumentación o de medición, divididos en TC y TP, tienen la misión de extender el rango de los instrumentos en corriente alterna en los sistemas de energía eléctrica donde se realiza la generación, transmisión y distribución de la misma.

Estos transformadores presentan algunas ventajas, entre las que se destacan las siguientes:

1. Normalización de los instrumentos de medición a valores nominales de 100 - 120 V y 1 - 5 A.
2. Aislamiento de los instrumentos con respecto al voltaje del objeto de medición (sin unión galvánica), lo que permite la puesta a tierra de los mismos, con el consecuente incremento de la seguridad para el personal que opera dichos instrumentos.
3. Operación de varios instrumentos desde el secundario de un mismo transformador.
4. Bajo consumo de potencia en el circuito de medición.

En la figura 1 se representa el esquema de conexión de los transformadores de instrumentación tratados:



*Fig. 1. Diagramas esquemáticos de los transformadores de medición a) TC b) TP.*

El TC es llamado por algunos autores “transformador serie”, dada la forma en que su devanado primario es conectado al objeto de medición; mientras que para el TP el devanado primario es conectado al voltaje del objeto de medición, o sea, en paralelo.

Como se sabe, la impedancia interna de los amperímetros es relativamente baja, por lo que se puede afirmar que el TC trabaja en condiciones muy cercanas a las de corto circuito, mientras que para el TP es todo lo contrario, pues la relativamente alta impedancia interna de voltímetros o bobinas de potencial de otros instrumentos como los wattmetros y contadores de energía, permiten aseverar que el TP trabaja con su secundario prácticamente en circuito abierto.

En cuanto a la relación de vueltas entre el devanado primario y el devanado secundario, es obvio que para el TC, si la corriente por el secundario debe ser menor que la corriente por el primario, sería:

$$\frac{N_1}{N_2} < 1 \quad (1)$$

mientras que en el caso de los TP, como lo que se desea es obtener un voltaje proporcional al del objeto de medición, pero con una amplitud mucho menor, resultaría:

$$\frac{N_1}{N_2} > 1 \quad (2)$$

Como se observa en la figura 1, los instrumentos se conectan por secundario, por lo que para conocer el valor de la magnitud que se mide es necesario multiplicar la lectura del instrumento por el coeficiente de transformación del transformador.

Para el TC el coeficiente de transformación real ( $K_I$ ) está dado por:

$$K_I = \frac{I_1}{I_2} \quad (3)$$

mientras que el coeficiente de transformación real ( $K_U$ ) del TP se expresa como:

$$K_U = \frac{U_1}{U_2} \quad (4)$$

Pero estos coeficientes de transformación reales no son constantes, sino que dependen del régimen de trabajo del transformador; es decir de la corriente o tensión, del carácter y el valor del burden, de la frecuencia de la señal de alimentación y de la tecnología y calidad de los materiales empleados en la construcción de un transformador específico.

Entonces para determinar el valor de la magnitud que se mide se emplea otro coeficiente conocido como coeficiente de transformación nominal, el que siempre se indica en la chapa del equipo en forma de fracción cuyo numerador es el valor nominal de la magnitud del primario y su denominador el correspondiente al valor nominal por secundario. Para los TC se representará este coeficiente mediante  $K_{IN}$  y para los TP mediante  $K_{UN}$ .

Como los coeficientes de transformación real y nominal no son iguales, al determinar el valor de la magnitud que se mide utilizando el coeficiente nominal se introduce un error, cuyo valor relativo se determina para el TC como:

$$f_I = \frac{I'_1 - I_1}{I_1} \times 100 \quad (5)$$

donde:

$$I'_1 = K_{IN} I_2 \quad (6)$$

$$I_1 = K_I I_2 \quad (7)$$

por lo que:

$$f_I = \frac{K_{IN} - K_I}{K_I} \times 100 \quad (8)$$

y para el caso del TP, procediendo de forma similar, como:

$$f_U = \frac{K_{UN} - K_U}{K_U} \times 100 \quad (9)$$

Estos errores son denominados errores de relación.

Además del error de relación, cuando lo que se mide es función del ángulo de fase, aparece el llamado error de fase o angular, pues el transformador real no transfiere exactamente la fase de la magnitud del primario al secundario, en otras palabras, el ángulo entre la

magnitud del secundario ( $I_2$  para el TC o  $U_2$  para el TP) rotada  $180^\circ$  y la magnitud correspondiente del primario ( $I_1$  para el TC y  $U_1$  para el TP) no es igual a cero.

Estos errores pueden tener una influencia significativa cuando las magnitudes que se miden son relativamente grandes.

Técnica operatoria:

Se implementan en Simulink dos esquemas eléctricos. En el primer caso se trata de un TC (fichero TC.mdl) y en el segundo caso un TP (fichero TP.mdl).

A continuación se representan los diagramas monolineales de ambos sistemas:

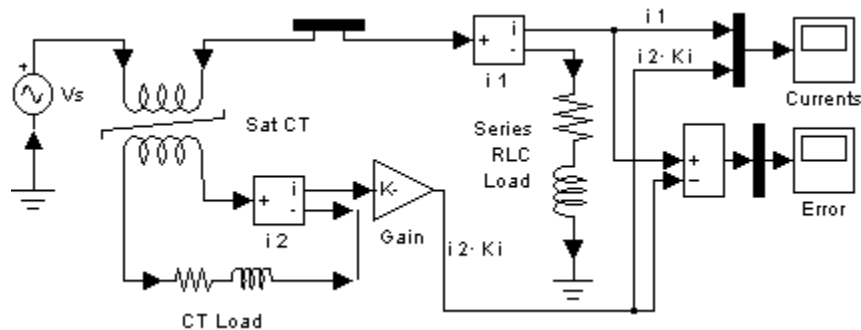


Fig. 1. TC.

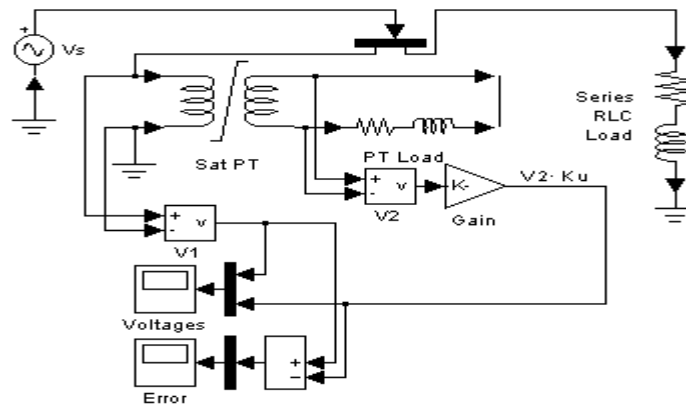


Fig. 2. TP.

Para el TC:

1. Simule el comportamiento del circuito con los parámetros iniciales preestablecidos. Observe la forma de onda de las corrientes mostrada en el bloque Currents y determine si existe alguna diferencia entre la corriente primaria ( $i_1$ ) y la corriente de

secundario multiplicada por el coeficiente de transformación nominal del TC ( $i2K_{IN}$ ), y justifique.

2. Sin variar los demás parámetros del circuito, complete la siguiente tabla en función de los valores de resistencia de pérdidas de núcleo ( $R_0$ ) correspondientes:

*Tabla 1: Valores pico de las corrientes ( $i_1$  e  $i2K_{IN}$ ) y el desfase entre ellas.*

| $R_0$ (pu) | Valor pico (A) |                | Desfase entre $i_1$ e $i2K_{IN}$ en segundos |
|------------|----------------|----------------|----------------------------------------------|
|            | ( $i_1$ )      | ( $i2K_{IN}$ ) |                                              |
| 50         |                |                |                                              |
| 10         |                |                |                                              |
| 5          |                |                |                                              |

Responda:

¿Qué le sucede a la corriente de excitación al disminuir la  $R_0$ ? Justifique.

¿Qué efecto provoca esto en los errores del TC? Justifique.

3. Retorne el valor de  $R_0$  a 50 pu. Aumente el valor de las potencias activa y reactiva de la carga en un 30% y simule (simplemente agregue delante del valor numérico correspondiente el texto “1.3\*”). ¿Qué le sucede a la forma de onda de la corriente de secundario? Justifique.

4. Retorne el valor de las potencias activa y reactiva de la carga a 18 MW y 6 MVar respectivamente. Aumente ahora el valor de la resistencia de carga del TC en un 30% y simule. ¿Qué le sucede a la forma de onda de la corriente de secundario? Justifique.

Para el TP:

1. Simule el comportamiento del circuito con los parámetros iniciales preestablecidos. Observe la forma de onda de los voltajes mostrada en el bloque *Voltages* y determine si existe alguna diferencia entre el voltaje primario ( $v_1$ ) y el voltaje secundario multiplicado por el coeficiente de transformación nominal del TP ( $v2K_{UN}$ ), y justifique.

2. Sin variar los demás parámetros del circuito, complete la siguiente tabla en función de los valores de resistencia de pérdidas de núcleo ( $R_0$ ) correspondientes:

Tabla 2: Valores pico de las tensiones ( $v_1$  e  $v_{2K_{UN}}$ ) y el desfase entre ellas.

| $R_0$ (pu) | Valor pico (V) |                   | Desfase entre $v_1$ y $v_{2K_{UN}}$ en segundos |
|------------|----------------|-------------------|-------------------------------------------------|
|            | ( $v_1$ )      | ( $v_{2K_{UN}}$ ) |                                                 |
| 50         |                |                   |                                                 |
| 10         |                |                   |                                                 |
| 5          |                |                   |                                                 |

Responda:

¿Qué le sucede a la corriente de excitación al disminuir la  $R_0$ ? Justifique.

¿Qué efecto provoca esto en los errores del TP? Justifique teniendo en cuenta el bajo valor de la impedancia de dispersión del primario.

3. Retorne el valor de  $R_0$  a 50 pu. Aumente el valor de las potencias activa y reactiva de la carga en un 30% y simule. ¿Qué le sucede a la forma de onda del voltaje de secundario? Justifique.
4. Retorne el valor de las potencias activa y reactiva de la carga a 18 MW y 6 MVar respectivamente. Aumente ahora el valor de la resistencia de carga del TP en un 30% y simule. ¿Qué le sucede a la forma de onda del voltaje de secundario? Justifique.

#### Informe del laboratorio

1. Reflejar los resultados de las mediciones realizadas.
2. Responder brevemente las preguntas formuladas.

#### Bibliografía

1. Brian D. Jenkins. *Introduction to Instrument Transformers*. Londres, 1967.
2. Arquímedes Salazar & Julio Fong. *Mediciones Eléctricas*. La Habana, 2004.

## 2.2 Medición de potencia activa y potencia reactiva con instrumentos electromecánicos y digitales

### Objetivo

Medir potencia activa y potencia reactiva mediante wattmetros electromecánicos y el analizador de redes UT232 en un sistema eléctrico de laboratorio.

### Materiales e instrumentos:

Reóstatos de  $47\ \Omega$  / 1000 W (4)

Choques inductivos de 10 A (4)

Analizador de redes UT232

Wattmetros electrodinámicos monofásicos D566T (3)

Wattmetro electrodinámico trifásico D581T

### Fundamento teórico

En nuestro país la energía eléctrica es distribuida a los consumidores a través de bancos de transformadores. Los transformadores empleados en los bancos son monofásicos y se conectan en delta por secundario para suministrar una tensión de 240 V entre fases a la carga.

Se utilizan con tres tipos de conexiones fundamentales:

1. Conexión estrella delta, que se le aplica a las cargas trifásicas o cargas combinadas donde la trifásica es predominante. Este tipo de conexión emplea tres transformadores: el primero llamado transformador de alumbrado, que es el de mayor potencia, ya que asume toda la carga monofásica y parte de la trifásica; y los dos restantes conocidos como transformadores de fuerza, que llevan el resto de la carga trifásica.
2. Conexión estrella delta abierta, que se usa para alimentar las cargas combinadas donde la monofásica es predominante. Esta conexión emplea dos transformadores: el de alumbrado, que asume toda la carga monofásica y parte de la trifásica; y el de fuerza, que lleva el resto de la trifásica.

### 3. Conexión de un transformador de fase a neutro o fase a fase, para alimentar las cargas monofásicas.

A menudo resulta necesario realizar mediciones de potencia en circuitos eléctricos de distribución con el objetivo de caracterizar las cargas. La adecuada medición de dicha magnitud en sistemas eléctricos es fundamental, pues en ella están basadas todas las operaciones comerciales entre los diferentes agentes de mercado. Por tal razón, este proceso debe realizarse de forma transparente para generar confianza entre los agentes participantes en los procesos de generación, transmisión y distribución, y comercialización de la energía eléctrica.

La potencia eléctrica es la relación de paso de energía de un flujo por unidad de tiempo; es decir, la cantidad de energía entregada o absorbida por un elemento en un tiempo determinado. En circuitos de corriente alterna (CA), tanto la energía disipada en un resistor como la almacenada por los elementos inductivos y capacitivos fluctúan con el tiempo. La parte de esta potencia que puede realizar trabajo útil, mediante su conversión a otras formas de energía denomina potencia activa o real y se denota con la letra  $P$ , mientras que la parte de la potencia que se intercambia entre los campos electromagnéticos de las fuentes y los elementos almacenadores de energía en el circuito se le denomina potencia reactiva y se identifica con la letra  $Q$ .

La medición de potencia en circuitos de CA puede realizarse de manera directa cuando se emplean wattmetros, los que presentan dos bobinas: la voltimétrica, conectada en paralelo con la carga y la amperimétrica, que se conecta en serie con la misma.

No obstante, en el último lustro, se ha efectuado un desarrollo acelerado e irreversible en esta esfera, traducido en una nueva gama de dispositivos de medición que han posibilitado contar con herramientas que permiten aumentar la velocidad y certeza en las mediciones. Un ejemplo claro son los analizadores digitales de redes.

#### **Técnica operatoria**

Para la medición de la potencia activa y reactiva se emplean esquemas tradicionales de conexión de wattmetros monofásicos, el wattmetro trifásico y el analizador de redes UT232, el que se representa en la figura 1.

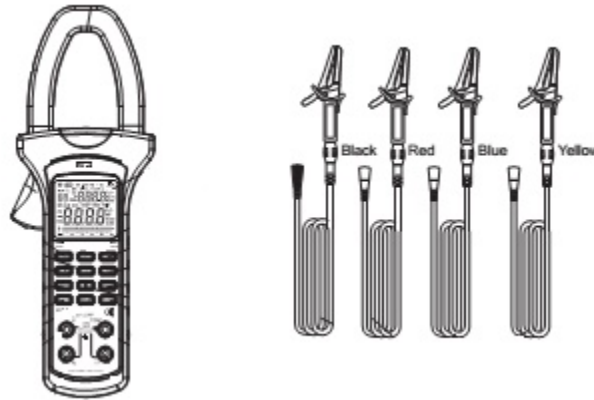


Fig. 1. Analizador de redes UT232.

Se simula a nivel de laboratorio el circuito de distribución secundaria de la siguiente imagen y se realizan las mediciones con cargas monofásicas y trifásicas solas y combinadas.

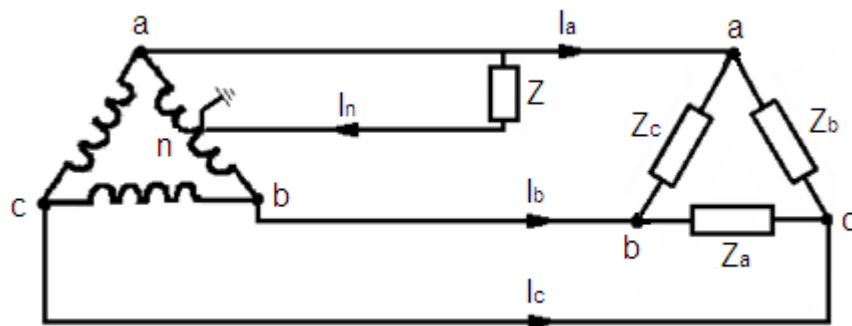


Fig. 2. Circuito de cuatro hilos.

Para el circuito:

$$Z_a = 48.7 + j139.5 \, \Omega$$

$$Z_b = 48.5 + j123.3 \, \Omega$$

$$Z_c = 47.3 + j110.8 \, \Omega$$

$$Z = 47 + j2.7 \, \Omega$$

Instrucciones:

1. Anote las características principales de los wattmetros electrodinámicos, según la tabla 1.
2. Monte el circuito de la figura 2. Llame al instructor para su revisión.

3. Energice el circuito, mida la potencia activa y reactiva en cada fase y total mediante al analizador de redes y complete la tabla 2. Al finalizar, desenergice el circuito y retire el analizador de redes.
4. Introduzca en el circuito los tres wattmetros monofásicos y realice la conexión de los mismos empleando la configuración adecuada para medir potencia activa (Teorema de Blondel). Llame al instructor para su revisión.
5. Energice el circuito, mida la potencia activa en cada fase y complete la tabla 3. Al finalizar, desenergice el circuito y retire los wattmetros.
6. Desconecte y retire del circuito la carga monofásica. Llame al instructor para su revisión.
7. Energice el circuito, mida la potencia activa y reactiva en cada fase y total mediante al analizador de redes y complete la tabla 4. Al finalizar, desenergice el circuito y retire el analizador de redes.
8. Introduzca en el circuito dos wattmetros monofásicos y realice la conexión de los mismos empleando la configuración adecuada para medir potencia activa. Llame al instructor para su revisión.
9. Energice el circuito, mida la potencia activa total y complete la tabla 5. Al finalizar, desenergice el circuito y retire los wattmetros.
10. Introduzca en el circuito los tres wattmetros monofásicos y realice la conexión de los mismos empleando la configuración adecuada para medir potencia reactiva. Llame al instructor para su revisión.
11. Energice el circuito, mida la potencia reactiva total y complete la tabla 6. Al finalizar, desenergice el circuito y retire los wattmetros.
12. Introduzca en el circuito el wattmetro trifásico y realice la conexión del mismo. Llame al instructor para su revisión.
13. Energice el circuito, mida la potencia activa y reactiva total y complete la tabla 7. Al finalizar, desenergice el circuito y retire el wattmetro.
14. Introduzca y conecte nuevamente la carga monofásica y desconecte y retire la trifásica. Llame al instructor para su revisión.

15. Energice el circuito, mida la potencia activa y reactiva mediante al analizador de redes y complete la tabla 8. Al finalizar, desenergice el circuito y retire el analizador de redes.
16. Introduzca en el circuito un wattmetro monofásico y realice la conexión del mismo. Llame al instructor para su revisión.
17. Energice el circuito, mida la potencia activa y complete la tabla 9. Al finalizar, desenergice el circuito y retire el wattmetro.

*Tabla 1. Características de los instrumentos electromecánicos.*

| Instrumento          | Clase de precisión | Campo de medición | Resistencia interna |
|----------------------|--------------------|-------------------|---------------------|
| Wattmetro monofásico |                    |                   |                     |
| Wattmetro trifásico  |                    |                   |                     |

*Tabla 2. Medición con el analizador de redes en el circuito de cuatro hilos.*

| Magnitud | Fase A | Fase B | Fase C | Total |
|----------|--------|--------|--------|-------|
| P (kW)   |        |        |        |       |
| Q (kVAr) |        |        |        |       |

*Tabla 3. Medición con wattmetros monofásicos en el circuito de cuatro hilos.*

| Magnitud | W <sub>1</sub> (fase A) | W <sub>2</sub> (fase B) | W <sub>3</sub> (fase C) | Total |
|----------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------|
| P (kW)   |                         |                         |                         |       |

*Tabla 4. Medición con el analizador de redes en el circuito de tres hilos.*

| Magnitud | Fase A | Fase B | Fase C | Total |
|----------|--------|--------|--------|-------|
| P (kW)   |        |        |        |       |
| Q (kVAr) |        |        |        |       |

*Tabla 5. Medición con wattmetros monofásicos en el circuito de tres hilos.*

| Magnitud | W <sub>1</sub> | W <sub>2</sub> | Total |
|----------|----------------|----------------|-------|
| P (kW)   |                |                |       |

*Tabla 6. Medición con wattmetros monofásicos en el circuito de tres hilos.*

| Magnitud | W <sub>1</sub> (fase A) | W <sub>2</sub> (fase B) | W <sub>3</sub> (fase C) | Total |
|----------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------|
| Q (kVAr) |                         |                         |                         |       |

*Tabla 7. Medición con el wattmetro trifásico en el circuito de tres hilos.*

| Magnitud | Total |
|----------|-------|
| P (kW)   |       |
| Q (kVAr) |       |

*Tabla 8. Medición con el analizador de redes en el circuito de un hilo.*

| Magnitud | Total |
|----------|-------|
| P (kW)   |       |
| Q (kVAr) |       |

*Tabla 9. Medición con el wattmetro monofásico en el circuito de un hilo.*

| Magnitud | Total |
|----------|-------|
| P (kW)   |       |

### **Informe del laboratorio**

1. Reflejar los resultados de las mediciones realizadas.
2. Realizar un comentario de los mismos.
3. Calcule el error relativo en la medición de las magnitudes totales con wattmetros electrodinámicos tomando como valor exacto las lecturas del analizador de redes.

### **Bibliografía**

1. Arquímedes Salazar & Julio Fong. *Mediciones Eléctricas*. La Habana, Cuba, 2004.
2. UNI-T Model UT232: Operating Manual. Uni-Trend Group Limited. Dongguan, China, 2007.

## **2.3 Medición de ángulo de fase y factor de potencia con instrumentos electromecánicos y digitales**

### **Objetivo**

Medir ángulo de fase y factor de potencia mediante fasímetros electromecánicos y el analizador de redes UT232 en un sistema eléctrico de laboratorio.

### **Materiales e instrumentos**

Reóstatos de  $47\ \Omega$  / 1000 W (4)

Choques inductivos de 10 A (4)

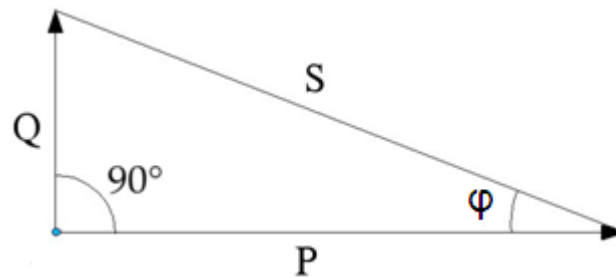
Analizador de redes UT232

Fasímetro electrodinámico 59C23

### **Fundamento teórico**

En los sistemas eléctricos de potencia es imprescindible el control de la potencia reactiva, ya que el aumento de este parámetro conlleva al incremento de las pérdidas de energía en las líneas de transmisión, los transformadores y generadores. Generalmente, este control se realiza sobre la base del factor de potencia de la carga, de ahí la importancia del estudio de la medición del factor de potencia y el ángulo de fase.

Se define el factor de potencia o  $\cos \varphi$  de un circuito de corriente alterna como la relación entre la potencia activa  $P$  y la potencia aparente  $S$ .



*Fig. 1. Triángulo de potencia.*

Da una medida de la capacidad de una carga de absorber potencia activa, por esta razón el factor de potencia es unitario en cargas puramente resistivas, y nulo en elementos inductivos y capacitivos ideales sin resistencia.

Como muestra la figura 1,  $\varphi$  es el ángulo entre  $P$  y el valor absoluto de  $S$ . Si las ondas de voltaje y corriente son puramente sinusoidales entonces  $\varphi = \varphi_v - \varphi_i$ ; siendo  $\varphi_v$  el ángulo del voltaje y  $\varphi_i$  el ángulo de la corriente.

La medición directa de estas magnitudes se realiza con el empleo de instrumentos especialmente diseñados y calibrados para este fin, llamados fasímetros.

Como se conoce, en la década de los ochenta del siglo pasado se comenzó la introducción en la industria de medidores basados en microprocesadores capaces de registrar cantidades eléctricas a partir de muestreo de datos y modelos matemáticos. Tras el marcado desarrollo de la tecnología, hoy se disponen de los conocidos analizadores de redes, con la capacidad para la adquisición en tiempo real y continuo a alta resolución de variables eléctricas, incluido el factor de potencia y/o el ángulo de fase.

### **Técnica operatoria**

Se simula a nivel de laboratorio el circuito de distribución secundaria de la figura 2 y se realizan las mediciones con cargas monofásicas y trifásicas solas y combinadas.

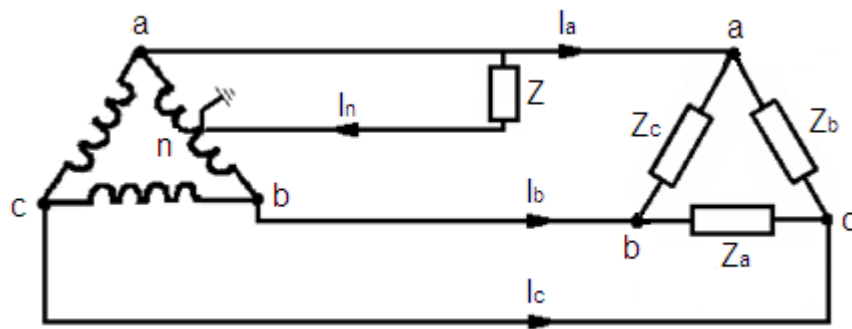


Fig. 2. Circuito de cuatro hilos.

Para el circuito:

$$Z_a = 48.7 + j139.5 \, \Omega$$

$$Z_b = 48.5 + j123.3 \, \Omega$$

$$Z_c = 47.3 + j110.8 \, \Omega$$

$$Z = 47 + j2.7 \, \Omega$$

### Instrucciones:

1. Anote las características principales del fasímetro electrodinámico, según la tabla 1.
2. Monte el circuito de la figura 2. Llame al instructor para su revisión.
3. Energice el circuito, mida el factor de potencia y el ángulo en cada fase mediante el analizador de redes y complete la tabla 2. Al finalizar, desenergice el circuito y retire el analizador de redes.
4. Desconecte y retire del circuito la carga monofásica. Llame al instructor para su revisión.
5. Energice el circuito, mida el factor de potencia y el ángulo en cada fase mediante el analizador de redes y complete la tabla 3. Al finalizar, desenergice el circuito y retire el analizador de redes.
6. Introduzca en el circuito el fasímetro electrodinámico y realice la conexión del mismo para medir el factor de potencia y el ángulo en cada fase. Llame al instructor para su revisión.

7. Energice el circuito, mida las magnitudes y complete la tabla 4. Al finalizar, desenergice el circuito y retire el fasímetro.
8. Introduzca y conecte nuevamente la carga monofásica y desconecte y retire la trifásica. Llame al instructor para su revisión.
9. Energice el circuito, mida el factor de potencia y el ángulo de fase mediante el analizador de redes y complete la tabla 5. Al finalizar, desenergice el circuito y retire el analizador de redes.
10. Introduzca en el circuito el fasímetro y realice la conexión del mismo. Llame al instructor para su revisión.
11. Energice el circuito, mida el factor de potencia y el ángulo de fase y complete la tabla 6. Al finalizar, desenergice el circuito y retire el fasímetro.

*Tabla 1. Características del fasímetro electrodinámico.*

| Instrumento | Clase de precisión | Campo de medición | Resistencia interna |
|-------------|--------------------|-------------------|---------------------|
| Fasímetro   |                    |                   |                     |

*Tabla 2. Medición con el analizador de redes en el circuito de cuatro hilos.*

| Magnitud | Fase A | Fase B | Fase C |
|----------|--------|--------|--------|
| PF       |        |        |        |

*Tabla 3. Medición con el analizador de redes en el circuito de tres hilos.*

| Magnitud | Fase A | Fase B | Fase C |
|----------|--------|--------|--------|
| PF       |        |        |        |
| PG       |        |        |        |

*Tabla 4. Medición con el fasímetro electrodinámico en el circuito de cuatro hilos.*

| Magnitud | Fase A | Fase B | Fase C |
|----------|--------|--------|--------|
| PF       |        |        |        |
| PG       |        |        |        |

*Tabla 5. Medición con el analizador de redes en el circuito de un hilo.*

| Magnitud | Total |
|----------|-------|
| PF       |       |
| PG       |       |

*Tabla 6. Medición con el fasímetro electrodinámico en el circuito de un hilo.*

| Magnitud | Total |
|----------|-------|
| PF       |       |
| PG       |       |

**Informe del laboratorio**

1. Reflejar los resultados de las mediciones realizadas.
2. Realizar un comentario de los mismos.
3. Calcule el error relativo en la medición de las magnitudes tomando como valor exacto las lecturas del analizador de redes.

**Bibliografía**

1. Arquímedes Salazar & Julio Fong. *Mediciones Eléctricas*. La Habana, Cuba, 2004.

2. UNI-T Model UT232: Operating Manual. Uni-Trend Group Limited. Dongguan, China, 2007.

## **2.4 Medición de frecuencia con instrumentos electromecánicos y digitales**

### **Objetivo**

Medir frecuencia mediante un frecuenciómetro electromecánico de vibración y el analizador de redes UT232 en un sistema eléctrico de laboratorio.

### **Materiales e instrumentos**

Máquina de corriente continua compound AL - 706

Máquina sincrónica AL - 406

Tacómetro electromecánico D - 3440

Reóstato  $R_1$  de  $47 \Omega$  / 1000 W

Reóstato  $R_2$  de  $3300 \Omega$  / 3000 W

Amperímetro  $A_1$  MSZ808

Miliamperímetro  $A_2$  3513T4.1

Fuente de laboratorio de corriente directa XJ17432L

Analizador de redes UT232

Frecuenciómetro de vibración TGL19469

Multímetro profesional digital UT70B

Panel y accesorios ALECOP

### **Fundamento teórico**

La frecuencia es un término empleado en física para indicar el número de veces que se repite en un segundo cualquier fenómeno periódico. La frecuencia se expresa en hercios (Hz); una frecuencia de 1 Hz significa que existe 1 ciclo u oscilación por segundo.

Entre los instrumentos electromecánicos para la medición de frecuencia se encuentra el frecuenciómetro de vibración, cuyo principio de funcionamiento se basa en la resonancia

mecánica. Consta de una bobina y un juego de láminas metálicas. El campo magnético asociado a la corriente que circula por la bobina atrae dos veces por ciclo a las láminas y dos veces ellas retornan a su posición. Por ello se puede decir que las láminas vibran con una frecuencia igual al doble de la frecuencia de la corriente que circula por la bobina. Estas láminas se diseñan de modo que la frecuencia de las oscilaciones libres de cada una sea distinta a la de las otras. La amplitud de la vibración de la lámina cuya frecuencia propia sea igual al doble de la frecuencia de la corriente que circula por la bobina, será mayor que la de las otras, y con ello se puede realizar la medición.

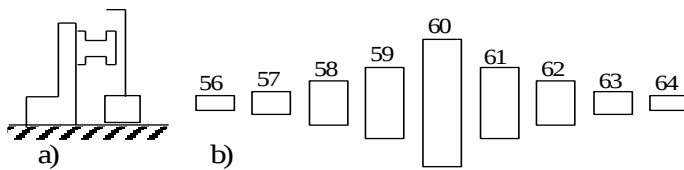


Fig. 1. Frecuenciómetro de vibración a) Esquema constructivo b) Vista frontal correspondiente a una frecuencia de 60 Hz.

Las máquinas de corriente directa fueron las primeras que surgieron, y aún hoy en día presentan gran aplicación. El devanado de campo en estas máquinas puede estar conectado a una fuente de corriente directa individual (caso de las máquinas excitadas independientemente), en paralelo con el circuito de armadura (campo shunt), en serie con este último (campo serie), o la presencia en la máquina de los dos campos: serie y paralelo (máquina compound).

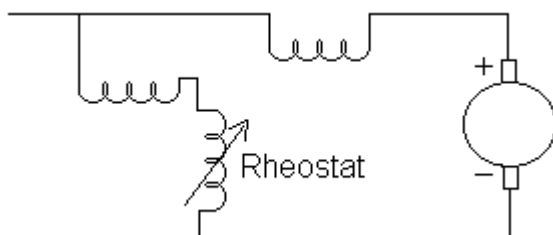


Fig. 2. Máquina de corriente directa compound.

El voltaje inducido debido a la rotación del enrollado de armadura a través del flujo del campo puede expresarse, según la ley de Faraday, como:

$$E_g = K_a' n\Phi \quad (1)$$

O, según la ley de voltaje de Kirchhoff, como:

$$E_g = V_T - I_a r_a \quad (2)$$

Siendo:

$K_a'$ : constante de armadura

$n$ : velocidad (rev/min)

$\Phi$ : flujo magnético (Wb)

$V_T$ : voltaje en los terminales (V)

$I_a$ : corriente de armadura (A)

$r_a$ : resistencia de armadura ( $\Omega$ )

Igualando ambas expresiones, se obtiene:

$$n = \frac{V_T - I_a r_a}{K_a' \Phi} \quad (3)$$

De donde se deduce que para variar la velocidad de un motor de corriente directa es posible mediante la variación de estos parámetros con excepción de  $I_a$ , que depende de la carga.

El método más económico y efectivo para el control de velocidad, y que se implementa en motores shunt y compound, resulta controlando la corriente por el devanado de campo, y de esta manera el flujo. La velocidad del motor se incrementa en la medida que se disminuye la corriente de campo.

Las máquinas sincrónicas son llamadas así debido a que su velocidad es función lineal de la frecuencia:

$$n_s = \frac{120 f}{p} \quad (4)$$

donde:

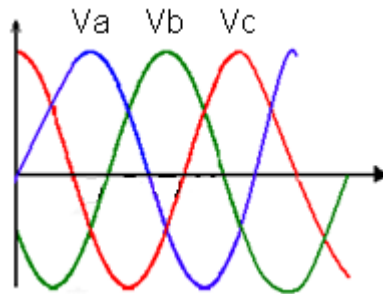
$n_s$ : velocidad sincrónica (rev/min)

$f$ : frecuencia (Hz)

$p$ : número de polos de la máquina

Así, cuando dos o más máquinas sincrónicas son conectadas a una misma línea de corriente alterna, lo harán girando en sincronismo, porque estarán operando a una misma frecuencia, por lo que  $n_s$  es específica para cada máquina.

Los generadores sincrónicos presentan en su estator un devanado trifásico simétrico (3 fases idénticas a 120 grados en el espacio), por lo que el movimiento del rotor a velocidad sincrónica genera entonces una fuente trifásica balanceada (3 voltajes iguales desfasados a 120 grados en el tiempo):



*Fig. 3. Diagrama de tiempo de los voltajes de salida de un generador sincrónico.*

Para la generación eléctrica de corriente alterna se necesita una fuente primaria de potencia mecánica que mueva el rotor del generador sincrónico. En la mayor parte de las plantas de generación en el mundo esta fuente primaria consiste en una turbina accionada por vapor de agua a alta presión y temperatura, obtenido a partir del calentamiento de agua en una caldera mediante el proceso de combustión de combustibles fósiles.

### **Técnica operatoria**

Para la medición de la frecuencia mediante instrumentos electromecánicos y digitales se emplea el frecuenciómetro electromecánico de vibración y el analizador de redes UT232 de la Corporación china UNI-T. Se usa un circuito que consta de un generador sincrónico al que se le acopla un motor de corriente directa compound que funciona como motor primario. El generador tiene como excitatriz la fuente de corriente directa y da a la salida un sistema de voltajes trifásicos. Se fijan entonces tres valores de frecuencias (55, 60 y 65 Hz) mediante el control de la velocidad del motor primario y tomando como referencia la lectura del analizador. Para estos valores de frecuencia se toman también las lecturas del frecuenciómetro de vibración, así como las lecturas del miliamperímetro  $A_2$  (muestra el

valor de la corriente de campo  $I_f$  en el motor), el amperímetro  $A_1$  (muestra el valor de la corriente de armadura  $I_a$  en el motor) y el tacómetro.

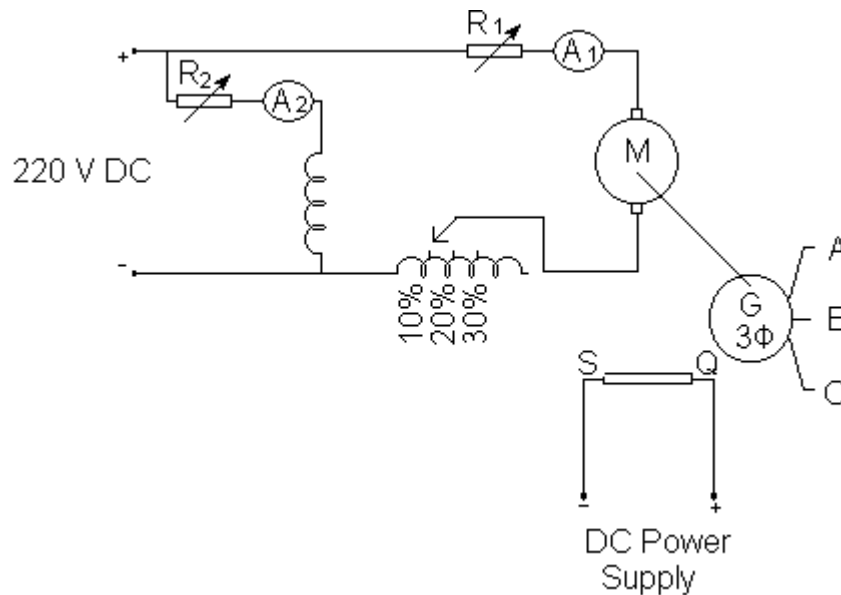


Fig. 4. Diagrama esquemático del circuito experimental para la medición de frecuencia.

#### Instrucciones:

1. Anote los datos de chapa del motor de corriente directa y el generador sincrónico según las tablas 1 y 2 respectivamente.
2. Anote las características principales del frecuenciómetro de vibración, el amperímetro y el miliamperímetro, según la tabla 3.
3. Monte el circuito de la figura 4. Llame al instructor para su revisión.
4. Ajuste el reóstato de campo  $R_2$  al 20% y compruebe que el de arranque  $R_1$  esté en su máximo valor.
5. Arranque el motor y lleve paulatinamente el reóstato de arranque a su mínimo valor.
6. Energice el circuito de campo del generador, comenzando por el valor cero de la fuente hasta un valor de aproximadamente 15 V.
7. Varíe la resistencia de campo  $R_2$  de manera que se obtengan las frecuencias de 55, 60 y 65 Hz tomando como referencia la lectura del analizador.
8. Mida para cada una de las frecuencias los datos especificados en la tabla 4.
9. Detenga el motor y la excitación del generador. Lleve  $R_1$  y  $R_2$  a sus valores iniciales.

*Tabla 1. Datos de chapa del motor de corriente directa compound.*

| Type  | Current Type | Volts | Amp. | kW | rev/min | Aisl. Cl | P |
|-------|--------------|-------|------|----|---------|----------|---|
|       |              |       |      |    |         |          |   |
| Exc.  |              |       |      |    |         |          |   |
| Volts | Amp.         |       |      |    |         |          |   |
|       |              |       |      |    |         |          |   |

*Tabla 2. Datos de chapa del generador sincrónico.*

| Type  | Current Type | Volts | Amp. | kVA | rev/min | Aisl. Cl | P | cos $\phi$ | f |
|-------|--------------|-------|------|-----|---------|----------|---|------------|---|
|       |              |       |      |     |         |          |   |            |   |
| Exc.  |              |       |      |     |         |          |   |            |   |
| Volts | Amp.         |       |      |     |         |          |   |            |   |
|       |              |       |      |     |         |          |   |            |   |

*Tabla 3. Características de los instrumentos electromecánicos.*

| Instrumento     | Clase de precisión | Campo de medición | Resistencia interna |
|-----------------|--------------------|-------------------|---------------------|
| Frecuenciómetro |                    |                   |                     |
| Amperímetro     |                    |                   |                     |
| Miliamperímetro |                    |                   |                     |

Tabla 4. Mediciones del circuito.

| Lectura del analizador (Hz) | Lectura del frecuenciómetro (Hz) | $I_a$ (A) | $I_f$ (A) | rev/min |
|-----------------------------|----------------------------------|-----------|-----------|---------|
| 55                          |                                  |           |           |         |
| 60                          |                                  |           |           |         |
| 65                          |                                  |           |           |         |

### Informe del laboratorio

1. Reflejar los resultados de las mediciones realizadas.
2. Realizar un comentario de los mismos.
3. Calcule el error relativo del frecuenciómetro de vibración tomando como valor exacto la lectura del analizador.

### Bibliografía

1. Arquímedes Salazar & Julio Fong. *Mediciones Eléctricas*. La Habana, Cuba, 2004.
2. George Mc Pherson. *An Introduction to Electrical Machines and Transformers*. 2<sup>nd</sup> Ed. St. Luis, USA.
3. UNI-T Model UT232: Operating Manual. Uni-Trend Group Limited. Dongguan, China, 2007.

## 2.5 Simulación de fuentes generadoras de armónicos

### Objetivo

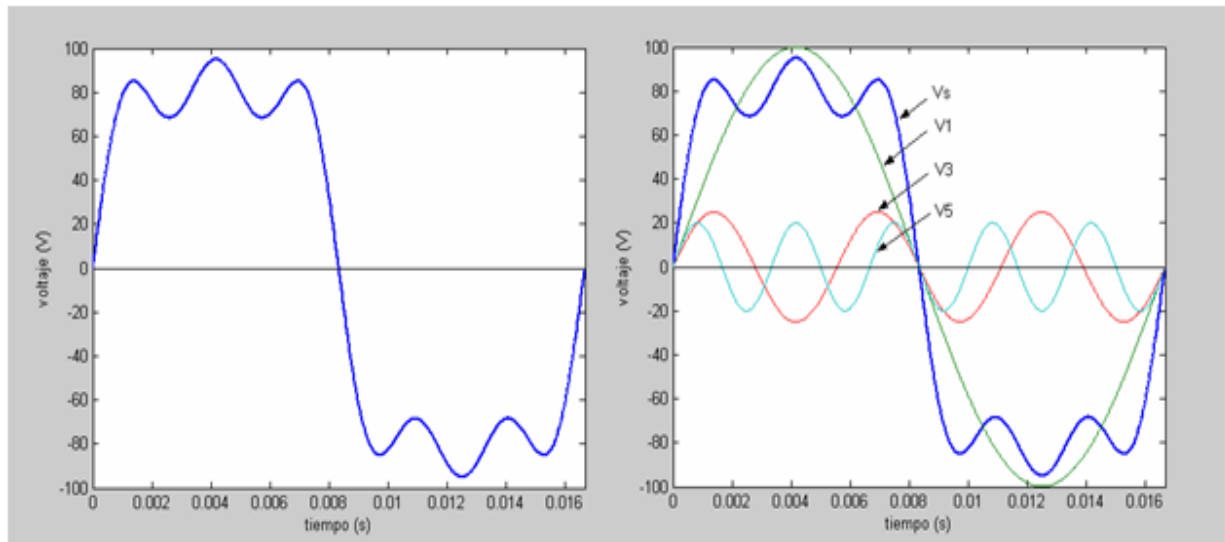
Estudiar el comportamiento de las cargas no lineales en los sistemas eléctricos a través de la simulación de fuentes generadoras de armónicos en Matlab.

### Fundamento teórico

Toda la teoría clásica de los circuitos eléctricos de corriente alterna se basa en el carácter sinusoidal del voltaje y la corriente. No obstante, la presencia en las redes de cargas no lineales provoca la aparición de formas de onda no sinusoidales en el sistema de corriente

alterna. Sin embargo, el matemático francés Jean Baptiste Joseph Fourier (1768 - 1830), demostró que toda onda continua y periódica (no importa su forma), puede ser representada por la suma de una serie de ondas sinusoidales cuyas frecuencias son múltiplo entero de la frecuencia de la onda original y que se denominan armónicos.

Por ejemplo, una onda de voltaje como la que se muestra en la figura 1 puede ser descompuesta en la suma de tres armónicos.



$$v(t) = 100\text{sen}(2\pi 60t) + 25\text{sen}(2\pi 180t) + 20\text{sen}(2\pi 300t)$$

Fig. 1. Onda de tensión con armónicos.

Los armónicos se numeran en orden creciente. El de más baja frecuencia se conoce como armónico fundamental o primer armónico, le sigue el segundo, de frecuencia doble, el tercero, de frecuencia triple, etc. Para una onda de frecuencia 60 Hz, los armónicos 2<sup>do</sup>, 3<sup>ro</sup>, 4<sup>to</sup> y 5<sup>to</sup> son:

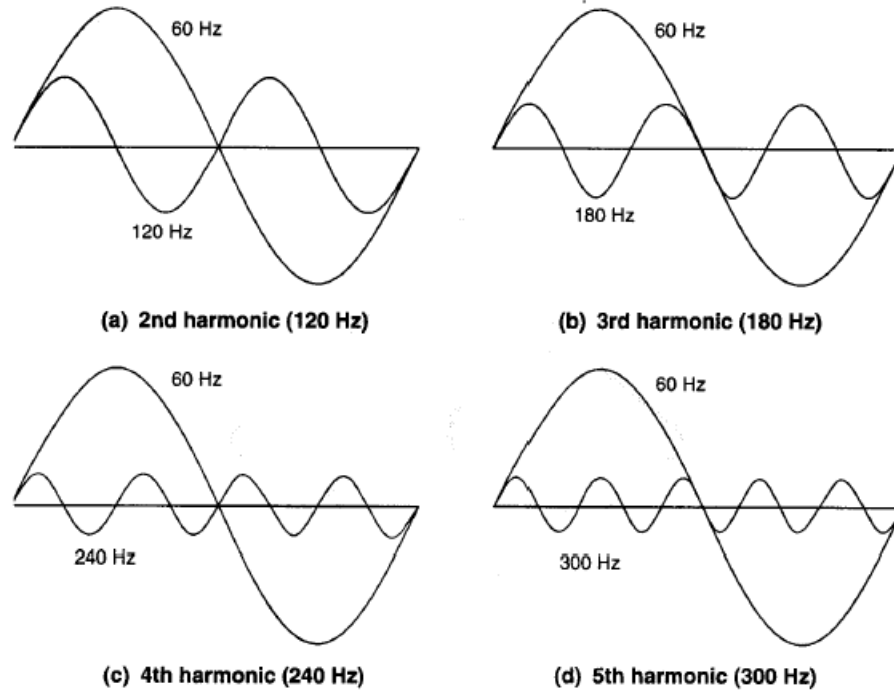


Fig. 2. Orden de los armónicos 2<sup>do</sup>, 3<sup>ro</sup>, 4<sup>to</sup> y 5<sup>to</sup> para  $f = 60$  Hz.

Los niveles de distorsión armónica se describen por el espectro completo de armónicos con las magnitudes y ángulos de fase de todos los armónicos individuales. Pero comúnmente se utilizan como medida de la distorsión los términos: distorsión armónica total (THD, por sus siglas en inglés) y distorsión total de la demanda (TDD, por sus siglas en inglés), definidos respectivamente como:

$$\%THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_{nom}} 100 \quad (1)$$

y

$$\%TDD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_L} 100 \quad (2)$$

Siendo:

$V_{nom}$ : voltaje nominal en el punto común de conexión entre la empresa suministradora y múltiples consumidores.

$V_n$ : distorsión individual para cada armónico de voltaje.

$I_L$ : carga máxima promedio del consumidor.

$I_n$ : distorsión individual para cada armónico de corriente.

Los sistemas eléctricos modernos contienen una gran cantidad de fuentes contaminantes o productoras de armónicos, dentro de las que se destacan fundamentalmente las cargas no lineales empleadas en la industria y en las instalaciones comerciales y residenciales. Estas pueden clasificarse en:

1. Fuentes de mediana y gran potencia.
2. Fuentes de baja potencia.
3. Máquinas rotatorias y transformadores.

Las fuentes contaminantes de mediana y gran potencia generalmente se concentran en los sistemas eléctricos industriales. Entre estas se encuentran los convertidores de seis pulsos y los hornos de arco eléctrico de corriente alterna.

Todos los convertidores en general transforman la corriente alterna en directa, caracterizándose por tener una mayor inductancia en el lado de directa; de esta manera, la corriente directa es casi constante y el convertidor actúa como una fuente de armónicos de tensión en el lado de directa y de armónicos de corriente en el lado de alterna.

Dentro de las características básicas de los convertidores está el número de pulsos, que no es más que la relación que existe entre el número de cúpulas de tensión rectificada que caben en un período de la fundamental. Mientras mayor sea el número de pulsos, menor será el contenido de armónicos del convertidor.

Otra de las características consiste en el control de fase, cuando las válvulas del convertidor están formadas por elementos controlados (tiristores) o no controlados (diodos). En el caso de los primeros, se puede variar la tensión de salida rectificada mediante un pulso de encendido, retardando a este con respecto al ángulo de conmutación natural. El ángulo de encendido se expresa por  $\alpha$  y se mide a partir del ángulo de conmutación natural.

El convertidor de seis pulsos o rectificador trifásico puente es uno de los convertidores más usados en la práctica, principalmente para producir voltajes y corrientes continuos que

generalmente impulsan cargas de gran potencia como motores de corriente directa. La figura siguiente muestra las formas de onda de las corrientes de fase en un convertidor de estas características con un ángulo de disparo de los tiristores de  $30^\circ$ .

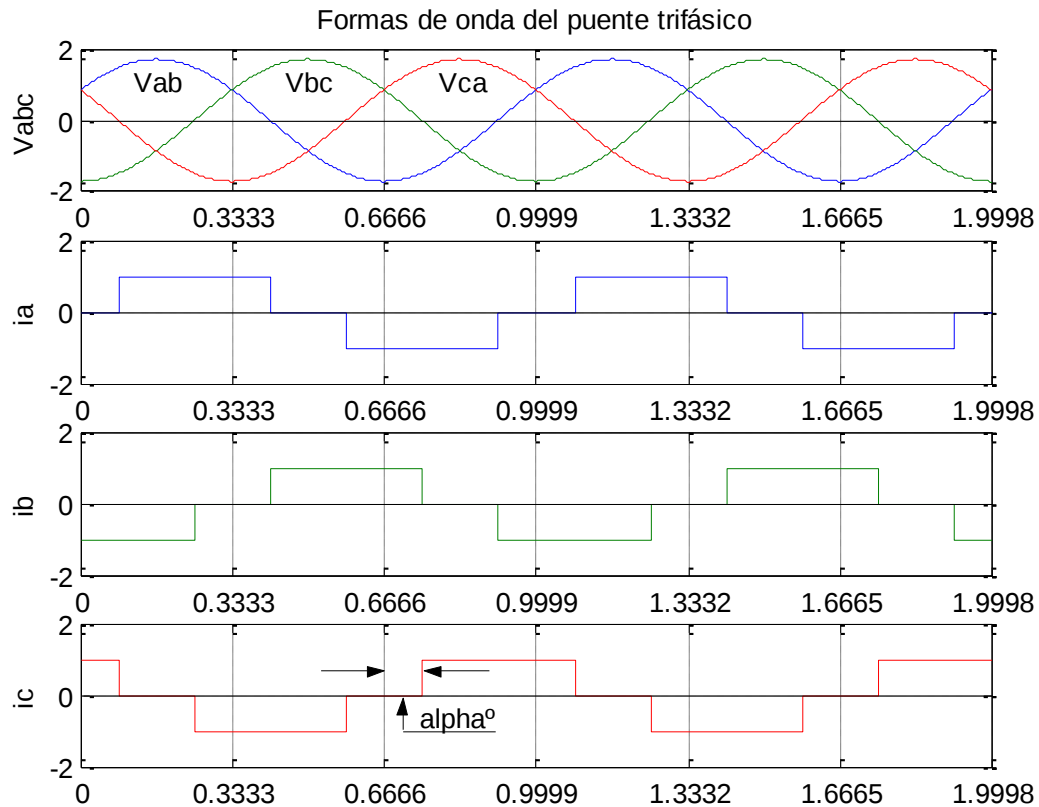


Fig. 3. Formas de onda de las corrientes de fase en un rectificador trifásico puente con  $\alpha = 30^\circ$ .

En el caso de los hornos de arco de corriente alterna, los mismos son ampliamente utilizados en la industria del acero. Básicamente, consta de un transformador que alimenta tres electrodos que producen un arco eléctrico de corriente alterna en una cuba.

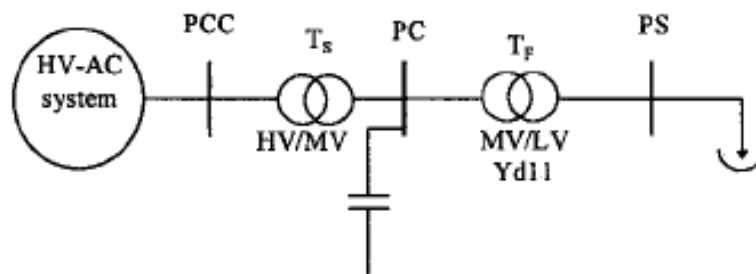


Fig. 4. Horno de corriente alterna.

En este tipo de horno se producen armónicos por las variaciones aleatorias de los instantes de establecimiento del arco, los cuales se combinan por los producidos por las características altamente no lineales del arco. Adicionalmente, las fluctuaciones de tensión debidas a las variaciones rápidas de la longitud del arco, producen frecuencias entre 0.1 y 30 Hz a cada lado de los armónicos característicos; efecto que es más acusado en el período de fusión, debido al movimiento errático de la chatarra y la interacción electromagnética entre los arcos.

Durante el proceso de refinado el arco es más estable, aunque todavía existe alguna modulación de su longitud por las ondulaciones que se presentan en la superficie del metal fundido.

En general, todos los elementos que influyen en el proceso de conversión de la energía bajo determinadas circunstancias originan armónicos diferentes a los característicos tanto en amplitud como en frecuencia, conocidos como interarmónicos.

### Técnica operatoria

Se implementan en Simulink dos sistemas industriales con carga no lineal. En el primer caso se trata de un convertidor de seis pulsos (archivo converter.mdl) y en el segundo caso un horno de arco eléctrico de corriente alterna (archivo arcfurnace.mdl).

A continuación se representan los diagramas monolineales de ambos sistemas:

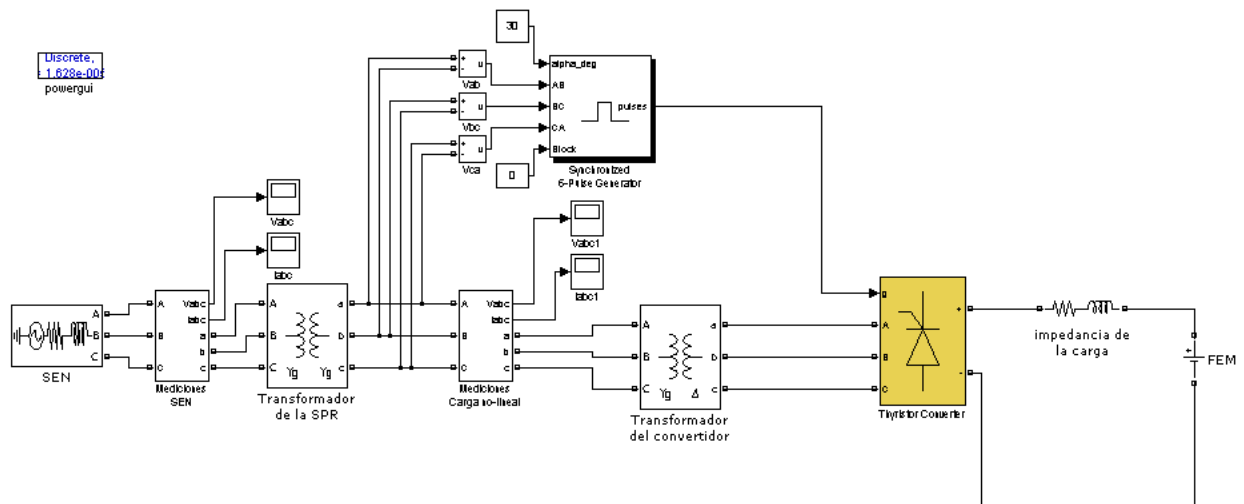


Fig. 5. Sistema industrial con convertidor de seis pulsos.

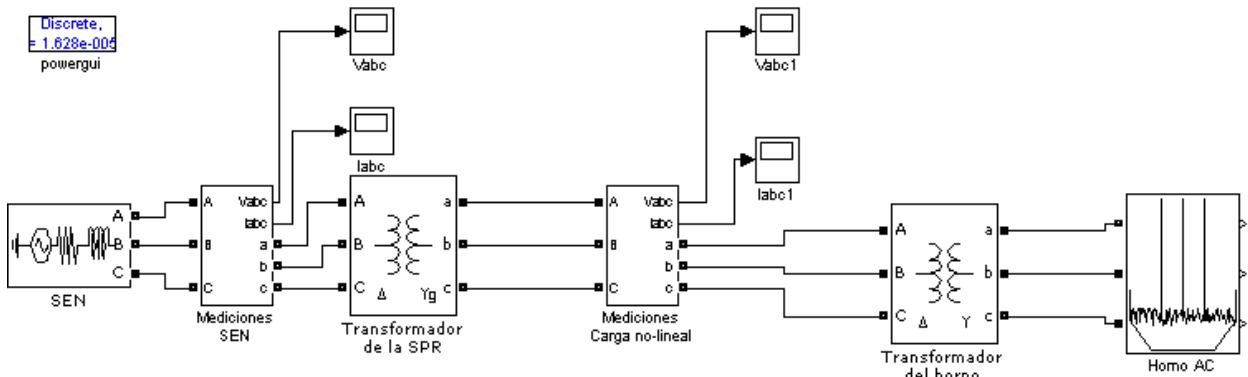


Fig. 6. Sistema industrial con horno de arco eléctrico de corriente alterna.

Para ambos casos:

1. Simule el comportamiento del sistema con los siguientes parámetros iniciales:

| Variante                   | Ángulo $\alpha$                                     |
|----------------------------|-----------------------------------------------------|
| Convertidor de seis pulsos | 30                                                  |
| Horno de arco eléctrico    | $U_{dp} = 35[1 \ 1 \ 1]$ ; $U_{dn} = 50[1 \ 1 \ 1]$ |

2. Utilizando el programa Powerview obtenga los armónicos de voltaje y corriente para la carga no lineal.
3. Aplicar las siguientes variaciones para la aparición de armónicos no característicos en el espectro de armónicos de la carga no lineal y evaluar mediante el Powerview como influyen estas variaciones en la aparición de dichos armónicos.

| Variante                   | Parámetro a variar         |
|----------------------------|----------------------------|
| Convertidor de seis pulsos | $V_a$ en la fuente         |
| Horno de arco eléctrico    | $U_{dn}$ (todas las fases) |

### Informe del laboratorio

1. Reflejar los resultados de las mediciones realizadas.
2. Realizar un comentario de los mismos.

### Bibliografía

1. Roger C. Dugan, Mark F. McGranaghan, Surya Santoso & H. Wayne Beaty. *Electrical Power Systems Quality*. 2nd Edition. McGraw-Hill. 2004.
2. Jos Arrillaga & Neville R. Watson. *Power System Harmonics*. 2nd Edition. Wiley. New York, 2003.
3. Muhammad H. Rashid. *Electrónica de Potencia*. Prentice Hall, México, 1993.
4. *Modeling and Simulation of the Propagation of Harmonics in Electric Power Networks*. IEEE Volume 11, No. 1, 1996.

## 2.6 Medición de parámetros eléctricos con un sistema de medición

### Objetivo

Medir voltaje, corriente, potencia activa y reactiva, factor de potencia, energía activa y reactiva y la distorsión armónica total (THD, por sus siglas en inglés) e individual hasta el armónico 11 de voltaje mediante el sistema de medición PQP ENERGOTESTER en un sistema eléctrico de laboratorio.

### Materiales e instrumentos

Máquina asincrónica AL - 506

Máquina de corriente continua compound AL - 706

Tacómetro electromecánico D - 3440

Reóstato  $R_1$  de  $47 \Omega$  / 1000 W

Amperímetro  $A_1$  MSZ808

Miliamperímetro  $A_2$  3513T4.1

Voltímetro V Д566Т

Reóstato  $R_2$  de  $47 \Omega$  / 1000 W

Reóstato  $R_3$  de  $47 \Omega$  / 1000 W

Reóstato  $R_4$  de  $47 \Omega$  / 1000 W

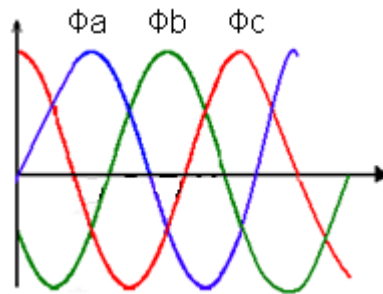
Multímetro profesional digital UT70B

## Panel y accesorios ALECOP

### Fundamento teórico

De manera general, los motores asincrónicos trifásicos son los más utilizados industrialmente, dadas sus grandes ventajas como la alimentación con energía eléctrica alterna, características constructivas relativamente simples y fuertes, bajo costo de manufactura y explotación, mantenimiento simple y buenas características de comportamiento.

El motor asincrónico trifásico presenta en su estator un devanado trifásico simétrico (3 fases idénticas a 120 grados en el espacio), y se energiza con una fuente trifásica balanceada (3 voltajes iguales desfasados a 120 grados en el tiempo). Cada fase al energizarse establece un flujo de dirección fija en el espacio y que varía su amplitud en el tiempo.



*Fig. 1. Diagrama de tiempo de los flujos.*

El flujo o campo magnético resultante, que estará dado por la suma de  $\Phi_a$ ,  $\Phi_b$  y  $\Phi_c$  en cada instante de tiempo, es de amplitud constante y cambia su dirección con el tiempo girando a la velocidad sincrónica, por lo que se denomina campo magnético rotatorio.

Una máquina de corriente continua, para operar como generador, requiere energizar su devanado de campo y hacer girar el rotor.

La FEM inducida en los terminales del rotor depende directamente de la magnitud del flujo y la velocidad, y si la velocidad es constante solo depende del flujo y variables constructivas.

En el caso de los generadores compound, a diferencia de otros generadores de corriente continua, ante la conexión y variación de la carga, manteniéndose constante la velocidad a la cual gira el motor primario, se mantiene prácticamente constante el voltaje a la salida.

En la figura 2 se representa un generador compound con carga. En la medida que la carga  $R_a$  conectada aumenta, la corriente  $I_L$  (y por tanto  $I_a$ ) aumenta, y si la FEM  $E_a$  es constante, el voltaje de salida  $V_a$  disminuye en la medida que aumenta la caída  $I_L R_a$ . Pero como la corriente  $I_f$  es función de  $V_a$ ,  $E_a$  no es constante porque disminuye el flujo, al disminuir  $I_f$  cuando  $V_a$  disminuye por el incremento de la carga.

No obstante el campo serie se puede ajustar para lograr contrarrestar la disminución de flujo dada la disminución de  $I_f$ . En este caso la corriente que circula por el campo serie ( $I_s$ ) es igual a la que circula por la carga  $I_L$ , entonces en la medida que por las razones anteriores disminuyera  $V_a$ , el campo serie reforzaría el flujo y aumentaría la FEM inducida para compensar los efectos y lograr menor disminución del voltaje con la carga o mantenerlo aproximadamente constante.

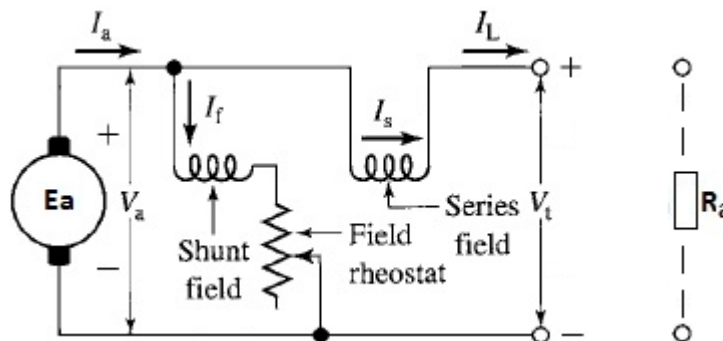


Fig. 2. Esquema del generador de corriente directa compound con carga.

### Técnica operatoria

Para la medición de las variables eléctricas mencionadas previamente se opera el sistema de medición PQP ENERGOTESTER de la Corporación rusa OOO MARS - ENERGO. Se emplea un circuito que consta de un motor asíncrono trifásico de 1 kW conectado en delta al que se le acopla un generador de corriente directa compound y resistencias a la salida que simulan la carga; para medir las variables en tres estados de carga diferente. Los coeficientes para cada estado de carga son:  $K_{c1} = 0$  (motor en vacío),  $K_{c2} = 0.4$  y  $K_{c3} = 0.6$ .

Se efectúa además la medición de la velocidad del motor para dichos estados de carga.

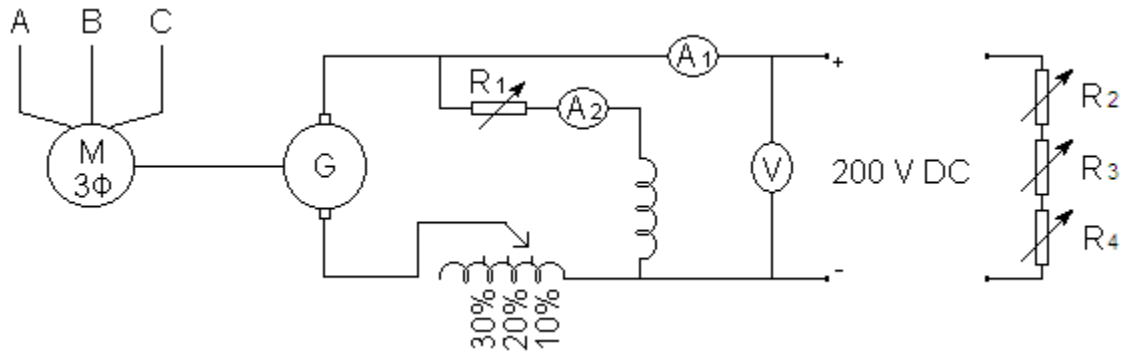


Fig. 3. Diagrama esquemático del circuito experimental para la medición de las magnitudes eléctricas.

### Instrucciones:

1. Anote los datos de chapa del motor asincrónico y el generador de corriente directa según las tablas 1 y 2 respectivamente.
2. Anote las características principales del voltímetro, el amperímetro y el miliamperímetro, según la tabla 3.
3. Monte el circuito de la figura 3. Llame al instructor para su revisión.
4. Deje abierto el circuito de armadura del generador.
5. Arranque el motor a voltaje y frecuencia nominal y ajuste la corriente por el campo del generador mediante el reóstato  $R_1$  de manera tal que el voltaje en vacío sea de 200 V.
6. Anote las mediciones que se orientan en la tabla 4.
7. Calcule el valor de resistencia que se requiere para establecer una carga de coeficiente  $K_{c2} = 0.4$ .
8. Cierre el circuito de armadura del generador conectando los reóstatos de carga ( $R_2$ ,  $R_3$  y  $R_4$ ) hasta alcanzar el valor calculado anteriormente y anote los valores pedidos en la tabla 5.
9. Calcule el valor de resistencia que se requiere para establecer una carga de coeficiente  $K_{c3} = 0.6$ .
10. Incremente la carga paulatinamente hasta alcanzar el nuevo valor calculado y complete la tabla 6. Al finalizar, desenergice el sistema y desconecte la carga del generador.

*Tabla 1. Datos de chapa del motor asincrónico.*

| Type | Current Type | Volts | Amp. | kW | rev/min | Aisl. Cl | Serv | f |
|------|--------------|-------|------|----|---------|----------|------|---|
|      |              |       |      |    |         |          |      |   |

*Tabla 2. Datos de chapa del generador de corriente directa.*

| Type  | Current Type | Volts | Amp. | kW | rev/min | Aisl. Cl | P |
|-------|--------------|-------|------|----|---------|----------|---|
|       |              |       |      |    |         |          |   |
| Exc.  |              |       |      |    |         |          |   |
| Volts | Amp.         |       |      |    |         |          |   |
|       |              |       |      |    |         |          |   |

*Tabla 3. Características de los instrumentos electromecánicos.*

| Instrumento     | Clase de precisión | Campo de medición | Resistencia interna |
|-----------------|--------------------|-------------------|---------------------|
| Voltímetro      |                    |                   |                     |
| Amperímetro     |                    |                   |                     |
| Miliamperímetro |                    |                   |                     |

Tabla 4. Mediciones del circuito para  $K_{c1}$  (motor en vacío).

| Carga | $I_a$<br>(A)           | $I_b$<br>(A) | $I_c$<br>(A)   | $V_{ab}$<br>(V) | $V_{bc}$<br>(V) | $V_{ca}$ (V) | $V_T$<br>(V) | $I_L$<br>(A) |
|-------|------------------------|--------------|----------------|-----------------|-----------------|--------------|--------------|--------------|
| 0%    |                        |              |                |                 |                 |              |              |              |
|       | kW                     | kVAr         | $\cos \varphi$ | kWh             | kVArh           | rev/min      | THD (%)      |              |
|       |                        |              |                |                 |                 |              |              |              |
|       | Armónicos $V_{ab}$ (%) |              |                |                 |                 |              |              |              |
|       | 1                      | 2            | 3              | 4               | 5               | 6            |              |              |
|       |                        |              |                |                 |                 |              |              |              |
|       | 7                      | 8            | 9              | 10              | 11              |              |              |              |
|       |                        |              |                |                 |                 |              |              |              |

Tabla 5. Mediciones del circuito para  $K_{c2}$ .

| Carga | $I_a$ (A)              | $I_b$ (A) | $I_c$ (A)      | $V_{ab}$ (V) | $V_{bc}$ (V) | $V_{ca}$ (V) | $V_T$ (V) | $I_L$ (A) |
|-------|------------------------|-----------|----------------|--------------|--------------|--------------|-----------|-----------|
| 40%   |                        |           |                |              |              |              |           |           |
|       | kW                     | kVAr      | $\cos \varphi$ | kWh          | kVArh        | rev/min      | THD (%)   |           |
|       |                        |           |                |              |              |              |           |           |
|       | Armónicos $V_{ab}$ (%) |           |                |              |              |              |           |           |
|       | 1                      | 2         | 3              | 4            | 5            | 6            |           |           |
|       |                        |           |                |              |              |              |           |           |
|       | 7                      | 8         | 9              | 10           | 11           |              |           |           |
|       |                        |           |                |              |              |              |           |           |

Tabla 6. Mediciones del circuito para  $K_{c3}$ .

| Carga | $I_a$ (A)              | $I_b$ (A) | $I_c$ (A)   | $V_{ab}$ (V) | $V_{bc}$ (V) | $V_{ca}$ (V) | $V_T$ (V) | $I_L$ (A) |
|-------|------------------------|-----------|-------------|--------------|--------------|--------------|-----------|-----------|
| 60%   |                        |           |             |              |              |              |           |           |
|       | kW                     | kVAr      | $\cos \phi$ | kWh          | kVArh        | rev/min      | THD (%)   |           |
|       |                        |           |             |              |              |              |           |           |
|       | Armónicos $V_{ab}$ (%) |           |             |              |              |              |           |           |
|       | 1                      | 2         | 3           | 4            | 5            | 6            |           |           |
|       |                        |           |             |              |              |              |           |           |
|       | 7                      | 8         | 9           | 10           | 11           |              |           |           |
|       |                        |           |             |              |              |              |           |           |

**Informe del laboratorio**

1. Reflejar los resultados de las mediciones realizadas.
2. Realizar un comentario de los mismos.
3. Grafique el espectro para los armónicos individuales hasta el 11 para cada lectura efectuada de los mismos.

**Bibliografía**

1. George Mc Pherson. *An Introduction to Electrical Machines and Transformers*. 2<sup>nd</sup> Ed. St. Luis, USA.
2. Jos Arrillaga & Neville R. Watson. *Power System Harmonics*. 2nd Edition. Wiley. New York, 2003.

**2.7 Medición del ciclo de histéresis de un material ferromagnético****Objetivo**

Determinar el ciclo de histéresis de un material ferromagnético mediante el osciloscopio.

### Instrumentos a utilizar

Transformador de fuerza de TV Krim-218 con relación 110/6 V

Resistencia variable de  $10\ \Omega / 2\ \text{A}$

Resistencia de  $480\ \text{k}\Omega$

Caja decádica de capacitancia RX7-0

Osciloscopio de dos canales AT7328S

### Fundamento teórico

Las propiedades magnéticas macroscópicas de un material lineal, homogéneo e isótropo se definen en función de la susceptibilidad magnética  $\chi_m$ , coeficiente adimensional que representa la proporcionalidad entre la magnetización o imanación  $M$  y la intensidad de campo magnético  $H$ , según la ecuación:

$$M = \chi_m H \quad (1)$$

La inducción magnética  $B$  está relacionada con estas dos variables:

$$B = \mu_0 (H + M) = \mu_0 H (1 + \chi_m) = \mu_0 \mu_r H = \mu H \quad (2)$$

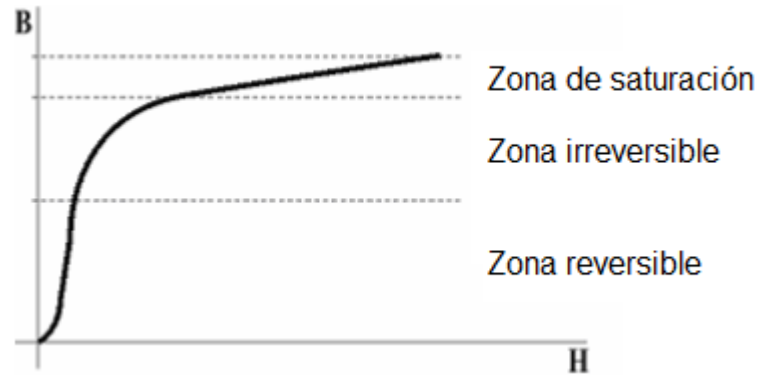
Siendo  $\mu$  la permeabilidad magnética del medio,  $\mu_0$  la permeabilidad magnética del vacío y  $\mu_r$  la permeabilidad relativa ( $\mu_r = 1 + \chi_m$ ).

Dependiendo del valor de  $\mu_r$ , los materiales pueden clasificarse en los siguientes grupos:

|                |                        |                 |
|----------------|------------------------|-----------------|
| $\mu_r \leq 1$ | $\chi_m \sim -10^{-5}$ | Diamagnéticos   |
| $\mu_r \geq 1$ | $\chi_m \sim 10^{-3}$  | Paramagnéticos  |
| $\mu_r \gg 1$  | $\chi_m$ de alto valor | Ferromagnéticos |

Los materiales ferromagnéticos presentan imanaciones grandes aún en presencia de campos magnéticos muy débiles y son los más usuales en las aplicaciones tecnológicas. En estos materiales, las intensas interacciones entre los momentos magnéticos atómicos los llevan a alinearse paralelamente unos a otros en regiones denominadas dominios magnéticos, incluso en ausencia de un campo externo.

Si aplicamos una intensidad de campo magnético o excitación magnética  $H$  creciente a una muestra de material ferromagnético, y representamos la inducción  $B$  en función de  $H$ , obtenemos la llamada curva de imanación o magnetización del material:



*Fig. 1. Curva de imanación o magnetización.*

En la figura 1 vemos que se pueden distinguir tres partes claramente diferenciadas en la curva de imanación. Se observa una primera zona reversible, en la cual si eliminamos el campo  $H$  exterior, la densidad de flujo también desaparece; una segunda zona irreversible; y una última parte, que representa la zona de saturación, en la cual la permeabilidad relativa es unitaria.

El valor de  $B$  que se produce en un material ferromagnético debido a una determinada excitación magnética  $H$  no es una función uniforme, sino que depende del material. Si introducimos una muestra de material ferromagnético en el interior de una bobina y hacemos variar  $H$  modificando la corriente que circula por la bobina, obtenemos la siguiente curva:

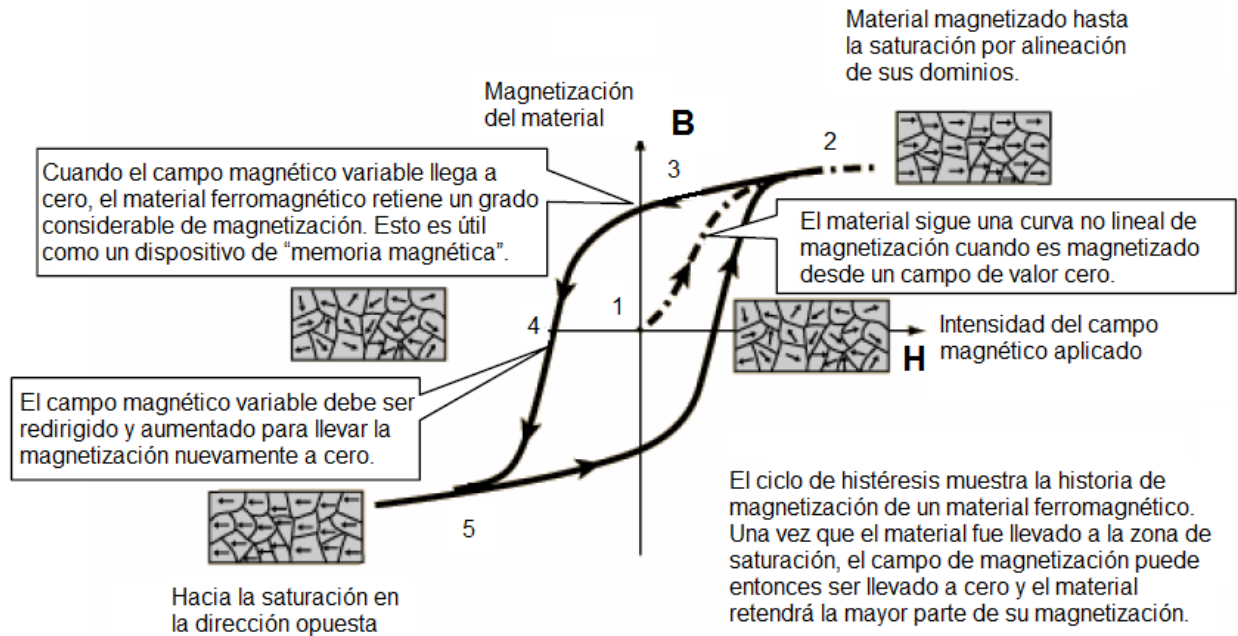
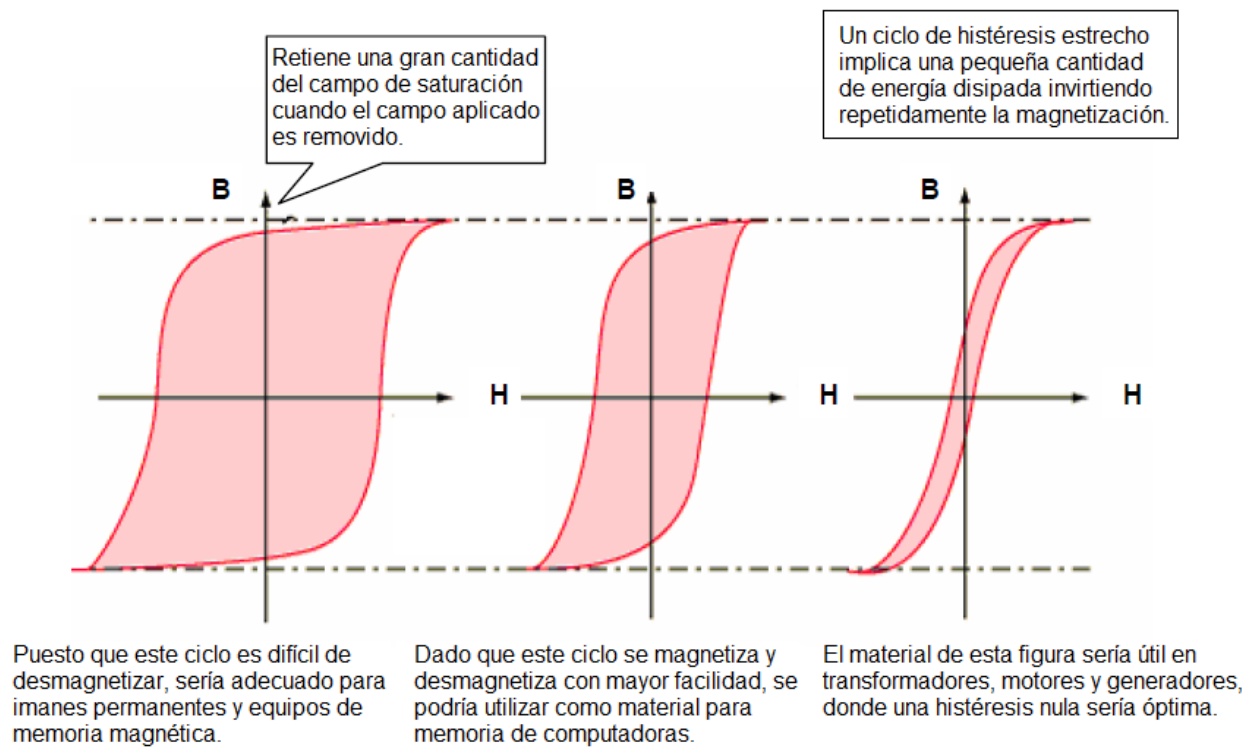


Fig. 2. Curva de histéresis.

En la figura 2, cuando  $H = 0$  en el punto 3, aún existe una cierta magnetización  $B = B_r$  que recibe el nombre de inducción remanente y constituye el estado de magnetización permanente de la muestra. Cuando  $B = 0$ , en el punto 4,  $H$  presenta un valor de  $H_c$  que se denomina campo coercitivo, que es el campo opuesto que es necesario aplicar para desmagnetizar la muestra. Si se continúa disminuyendo  $H$  hasta alcanzar  $H = -H_{m\acute{a}x}$ , punto 5, y después se invierte el sentido de cambio de  $H$ , se llega a formar una curva cerrada, que recibe el nombre de ciclo de histéresis.

El ciclo de histéresis es una representación gráfica de los diferentes estados por los que pasa el material ferromagnético a lo largo del ciclo de trabajo. Si la intensidad de campo  $H$  varía entre  $\pm H_{m\acute{a}x}$ , el material ferromagnético describe dentro del plano de estado  $B - H$  una gráfica, de modo que los valores que se obtienen aumentando  $H$  no coinciden con los obtenidos al hacer disminuir  $H$ . Si se parte de un punto situado en la curva de histéresis, por ejemplo el punto 2, y se vuelve a dicho punto recorriendo un ciclo, no encontraremos en la situación inicial, pero se ha disipado una energía que es proporcional al área encerrada bajo la curva  $B - H$ . Esta energía perdida se denomina "pérdidas por histéresis". A su vez, la temperatura del material aumenta durante este proceso.

Los materiales ferromagnéticos se utilizan extensamente en electroimanes, núcleos de transformadores, motores y generadores, en los cuales es deseable tener un campo magnético tan grande como sea posible con una corriente determinada. Ya que la histéresis disipa energía, los materiales que se utilizan en estas aplicaciones deben tener un ciclo de histéresis tan estrecho como sea posible. En los imanes permanentes por lo regular es deseable un ciclo de histéresis amplio, con una magnetización de campo cero intensa, y la necesidad de un campo inverso también intenso para desmagnetizar (ver figura3).



*Fig. 3. Ciclos de histéresis y su posible uso en distintas aplicaciones.*

### Técnica operatoria

Para la obtención del ciclo de histéresis se emplea como material ferromagnético el núcleo de un transformador de relación 110/6 V. Se usa un circuito que permite obtener señales proporcionales a la inducción magnética  $B$  en el núcleo y a la intensidad de campo magnético aplicado  $H$  y registrar la curva de histéresis a través de un osciloscopio de dos canales funcionando en el modo XY.

El circuito experimental utilizado para visualizar la curva de histéresis se muestra en la figura 4.

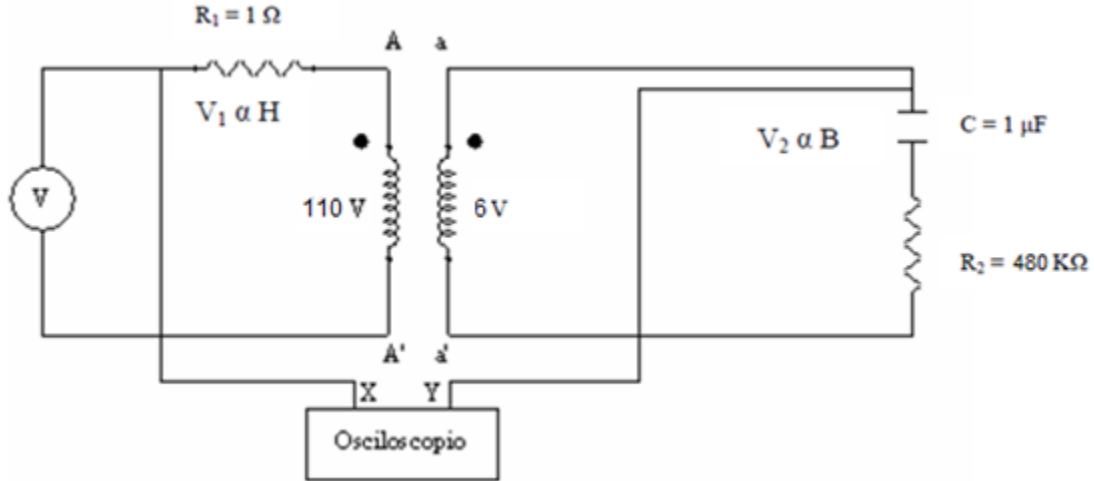


Fig. 4. Diagrama esquemático del circuito experimental para el estudio de la histéresis de una muestra magnética.

Para visualizar la curva de histéresis en el osciloscopio, teniendo en cuenta que este sólo permite medir tensiones, se representan  $B(t)$  y  $H(t)$  en función de diferencias de potencial proporcionales a las mismas.

#### Medida de $H(t)$ :

$H(t)$  es proporcional a las corrientes que circulan por los circuitos primario y secundario:

$$\oint_L H dl = Ni \quad (3)$$

Si se conecta una alta impedancia en el secundario del transformador, la corriente  $I_2(t)$  que circula por la misma será despreciable, por lo que esta situación se aproxima a la de vacío, donde solo circula corriente por el primario del transformador. O sea, si  $I_1(t) = I_0(t) + I_2(t)$ , e  $I_2(t)$  es pequeña, entonces  $I_1 \approx I_0$ , siendo  $I_0$  la corriente de excitación.

Para las condiciones del circuito la impedancia del secundario  $Z_2$  es:

$$Z_2 = R - j \frac{1}{\omega C} = 480000 - j \frac{1}{2\pi 60 \times 10^{-6}} = 480000 - j2652.6\Omega \quad (4)$$

Siendo esta una impedancia muy grande y predominantemente resistiva. Conociendo que  $V_2 = 6$  V, la corriente en el secundario será:

$$I_2 = \frac{V_2}{Z_2} = 12,5 \times 10^{-6} \text{ A} = 12,5 \mu\text{A} \quad (5)$$

A partir de la tensión en la resistencia de  $1\Omega$ , medida en el canal 1 del osciloscopio, se comprueba que el valor de  $I_1(t)$  que se obtiene es muy superior a  $12,5 \mu A$ , pudiéndose realizar la aproximación mencionada. Teniendo en cuenta estas consideraciones,  $H(t)$  será proporcional a  $I_1(t)$ . Si en el canal 1 del osciloscopio se mide  $V_1(t)$ , como muestra la figura, se estará midiendo una forma de onda proporcional a  $H(t)$  en el eje X.

### Medida de $B(t)$ :

Para la medida de  $B(t)$  se parte de la relación entre esta magnitud y el flujo magnético que atraviesa una superficie  $S$ :

$$\phi = \int B dS \quad (6)$$

Si  $B(t)$  es uniforme, tendremos que  $\Phi(t) = B(t)S$ , es decir, existe una proporcionalidad entre ambas magnitudes, de modo que presentarán la misma forma de onda.

Según la Ley de Faraday la FEM  $\varepsilon$  que aparece en la bobina del secundario, como consecuencia del flujo magnético variable que la atraviesa, es:

$$\varepsilon = -N_2 \frac{d\phi}{dt} = -N_2 S \frac{dB}{dt} \quad (7)$$

Donde  $N_2$  es el número de espiras del secundario.

El circuito RC tiene un valor de  $R$  mucho mayor al de la reactancia que ofrece  $C$ , por lo tanto la corriente en el secundario es prácticamente:

$$I_2 = \frac{\varepsilon}{R} \quad (8)$$

El voltaje a través de  $C$  es proporcional al campo magnético  $B$ :

$$V_2 = \frac{1}{C} \int I_2 dt = \frac{N_2 S B}{RC} \quad (9)$$

Por lo tanto, conectando los extremos del condensador en el canal 2 del osciloscopio puede obtenerse la señal del integrador  $V_2$  que es proporcional a  $B$  en el eje Y.

### Instrucciones:

1. Monte el circuito de la figura 4. Llame al instructor para su revisión.

2. Energice el mismo con tensión alterna de 110 V y frecuencia 60 Hz.
3. Cambie el osciloscopio al modo XY para obtener la curva  $V_2$  en función de  $V_1$ , que es representativa de la curva de histéresis magnética B - H del material estudiado. Al finalizar, desenergice el circuito.
4. Obtenga los valores especificados en la tabla 1 según el resultado del osciloscopio y el uso de las ecuaciones 3 (para el caso de  $H_{\text{máx}}$  y  $H_c$ ) y 9 (para el caso de  $B_{\text{máx}}$  y  $B_r$ ).

Tabla 1. Valores relevantes del ciclo de histéresis.

|                        |  |
|------------------------|--|
| $B_{\text{máx}}$ (T)   |  |
| $H_{\text{máx}}$ (A/m) |  |
| $B_r$ (T)              |  |
| $H_c$ (A/m)            |  |

### Informe del laboratorio

1. Reflejar los resultados de las mediciones realizadas, incluido el ciclo de histéresis.
2. Realizar un comentario de los mismos.

### Bibliografía

1. F.W. Sears, M.W. Zemansky, H.D. Young & R.A. Freedman. *University Physics*. Vol. II, Pearson Education, México, 2005.
2. Y. Kraftmakher. *Hysteresis loops of a ferromagnet*. 2005.
3. C. Heck. *Magnetic materials and their applications*. Ed. Butterworld.

## CAPÍTULO 3. RESULTADOS DE LAS PRÁCTICAS DE LABORATORIO

Hace algunos años, se estaba pensando en la mejora de las actividades de la asignatura Mediciones Eléctricas II, por lo cual era importante la actualización de las mismas en cuanto a la cantidad, medios y métodos de medición, y recursos didácticos. Como parte de este trabajo de actualización se realizó un conjunto de prácticas de laboratorios actualizadas teniendo en cuenta lo antes mencionado. Con el fin de mejorar todos estos aspectos, se presenta esta nueva edición, con su correspondiente manual del profesor. Se ha modificado sustancialmente la estructura de cara a realizar un estudio más en profundidad de cada práctica e ir asentando una serie de conceptos teóricos. Cada práctica esta soportada por un gran número de gráficos y tablas a completar, que ayudan a la comprensión de dichos conceptos y permiten llevarlo a la práctica.

### 3.1 Resultados del laboratorio 1

TC:



Fig. 1. Corrientes:  $i_1$  e  $i_{2KIN}$

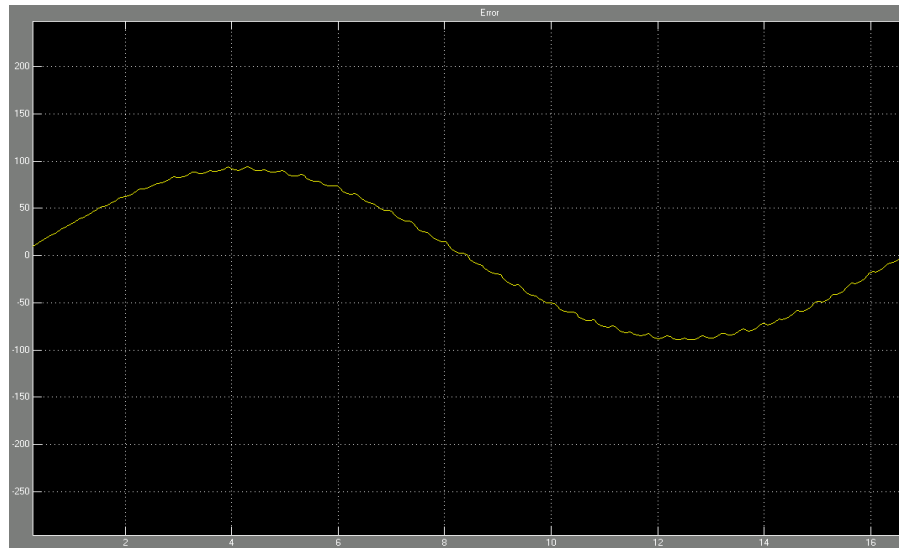


Fig.2. Error (diferencia entre las corrientes)

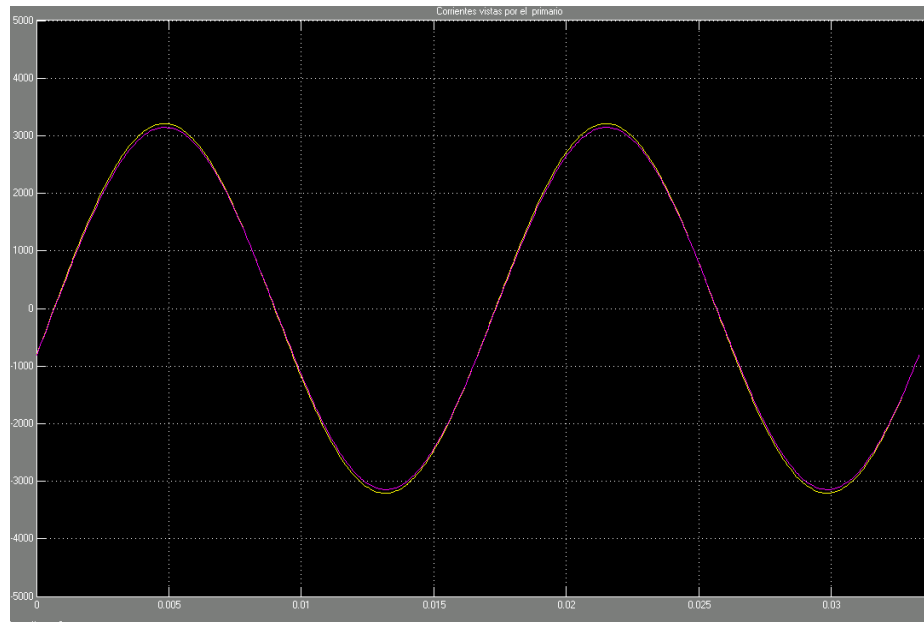
Si existe diferencia entre la corriente primaria ( $i_1$ ) y la corriente de secundario multiplicada por el coeficiente de transformación nominal del TC ( $i_2K_{IN}$ ) debido al error generado por emplear el coeficiente de transformación nominal en lugar del real.

Tabla 1: Valores pico de las tensiones ( $v_1$  e  $v_2K_{uN}$ ) y el desfase entre ellas.

| $R_0$<br>(pu) | Valor pico (A) |                 | Desfase entre $i_1$ e $i_2K_{IN}$ en segundos |
|---------------|----------------|-----------------|-----------------------------------------------|
|               | ( $i_1$ )      | ( $i_2K_{IN}$ ) |                                               |
| 50            | 4260           | 4173            | $0.017 \cdot 10^{-3}$                         |
| 10            | 4250           | 4865            | $0.094 \cdot 10^{-3}$                         |
| 5             | 4250           | 3540            | $0.176 \cdot 10^{-3}$                         |

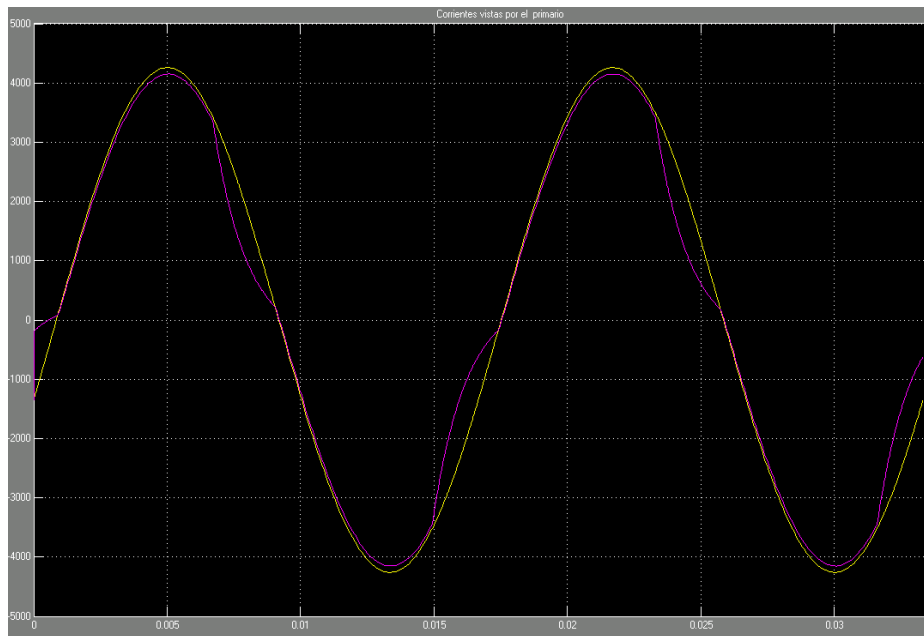
Al disminuir la  $R_0$ , la corriente de excitación aumenta, ya que su componente activa debido a las corrientes parásitas e histéresis aumenta.

El aumento de la corriente de excitación provoca un aumento de los errores del TC, ya que se hace mayor la FMM del transformador.



*Fig.3. Forma de onda de la corriente de secundario ante el aumento de la potencia activa y reactiva.*

La forma de onda de la corriente de secundario ante el aumento de la potencia activa y reactiva de la carga no cambia su forma, no obstante si se decrementa su valor pico.



*Fig.4. Forma de onda de la corriente de secundario ante el aumento del burden.*

La forma de onda de la corriente de secundario ante el aumento del burden se deforma, dado que esta situación conduce al incremento de la FEM del secundario, lo que aumenta la corriente de excitación, y por supuesto los errores del TC.

TP:

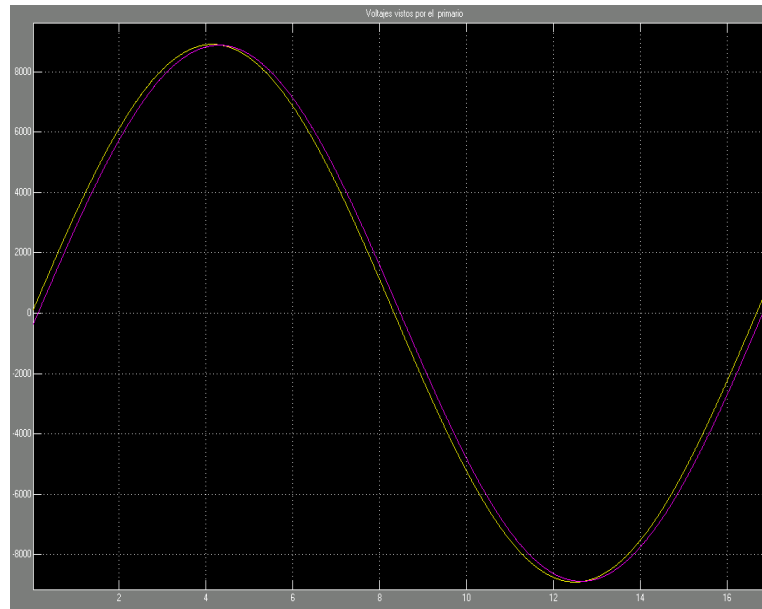


Fig.5. Voltajes:  $v_1$  y  $v_{2K_{UN}}$



Fig.6. Error (diferencia de los voltajes)

Tabla 2: Valores pico de las tensiones ( $v_1$  e  $v_{2K_{UN}}$ ) y el desfase entre ellas.

| $R_0$<br>(pu) | Valor pico (V) |                   | Desfase entre $v_1$ y<br>$v_{2K_{UN}}$ en segundos |
|---------------|----------------|-------------------|----------------------------------------------------|
|               | ( $v_1$ )      | ( $v_{2K_{UN}}$ ) |                                                    |
| 50            | 8910           | 8875              | $0.144 \cdot 10^{-3}$                              |
| 10            | 8910           | 8870              | $0.173 \cdot 10^{-3}$                              |
| 5             | 8910           | 8863              | $0.195 \cdot 10^{-3}$                              |

Al igual que en el caso del TC, al disminuir la  $R_0$ , la corriente de excitación aumenta, ya que su componente activa debido a las corrientes parásitas e histéresis aumenta.

El aumento de la corriente de excitación provoca un aumento de los errores del TP, ya que estos dependen en gran medida de este parámetro constructivo.

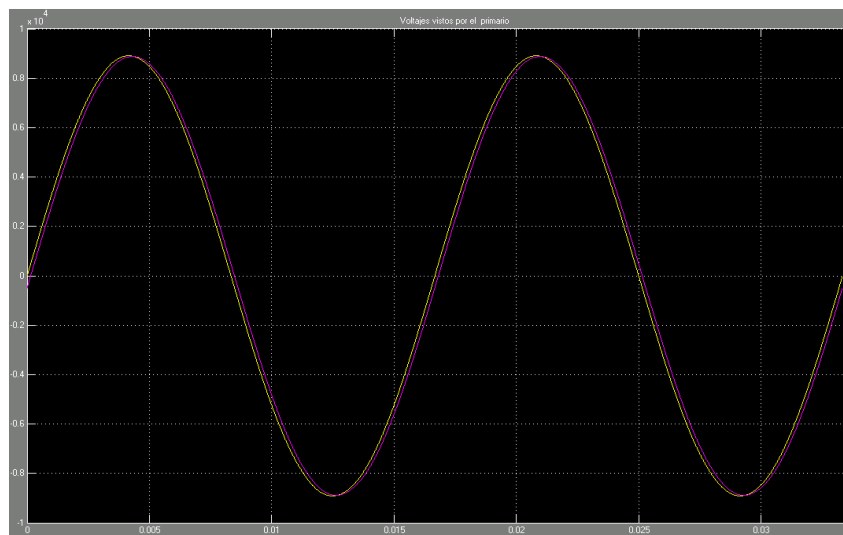
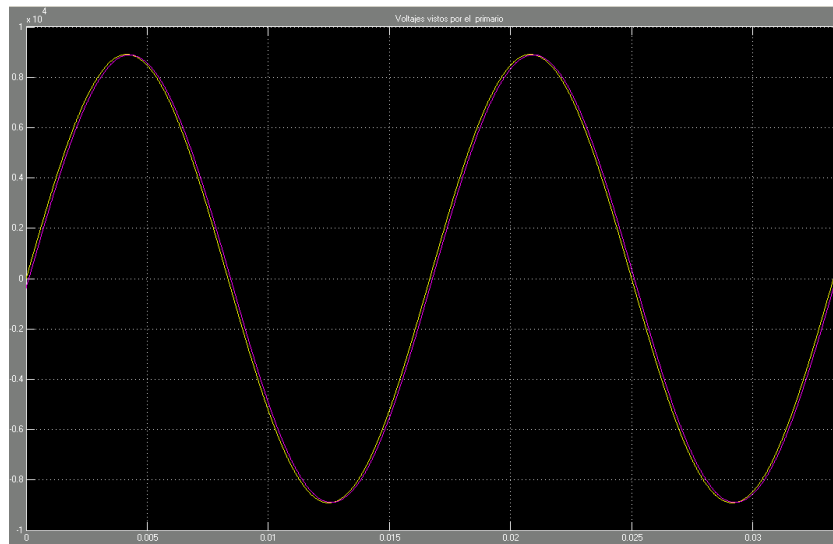


Fig.7. Forma de onda de la corriente de secundario ante el aumento de la potencia activa y reactiva.

La forma de onda de la corriente de secundario ante el aumento de la potencia activa y reactiva de la carga no cambia su forma, pero al variar la naturaleza de la carga si se afecta el valor de los errores.



*Fig.8. Forma de onda de la corriente de secundario ante el aumento del burden.*

La forma de onda de la corriente de secundario ante el aumento del burden no cambia su forma, aunque se observa que los errores dependen del valor y naturaleza del burden, debido a que el número de instrumentos conectados al secundario del TP incrementa el valor de los mismos.

### 3.2 Resultados del laboratorio 2

*Tabla 1. Características de los instrumentos electromecánicos.*

| Instrumento          | Clase de precisión | Campo de medición |
|----------------------|--------------------|-------------------|
| Wattmetro monofásico | 0.2                | 1500 W            |
| Wattmetro trifásico  | 0.5                | 3000 W            |

*Tabla 2. Medición con el analizador de redes en el circuito de cuatro hilos.*

| Magnitud | Fase A | Fase B | Fase C | Total |
|----------|--------|--------|--------|-------|
| P (kW)   | 340    | 220    | 20     | 580   |
| Q (kVAr) | 140    | 310    | 190    | 640   |

*Tabla 3. Medición con wattmetros monofásicos en el circuito de cuatro hilos.*

| Magnitud | W <sub>1</sub> (fase A) | W <sub>2</sub> (fase B) | W <sub>3</sub> (fase C) | Total |
|----------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------|
| P (kW)   | 360                     | 215                     | 17.5                    | 592.5 |

*Tabla 4. Medición con el analizador de redes en el circuito de tres hilos.*

| Magnitud | Fase A | Fase B | Fase C | Total |
|----------|--------|--------|--------|-------|
| P (kW)   | 150    | 130    | 130    | 410   |
| Q (kVAr) | 210    | 200    | 170    | 580   |

*Tabla 5. Medición con wattmetros monofásicos en el circuito de tres hilos.*

| Magnitud | W <sub>1</sub> | W <sub>2</sub> | Total |
|----------|----------------|----------------|-------|
| P (kW)   | 415            | 25             | 440   |

*Tabla 6. Medición con wattmetros monofásicos en el circuito de tres hilos.*

| Magnitud | W <sub>1</sub> (fase A) | W <sub>2</sub> (fase B) | W <sub>3</sub> (fase C) | Total           |
|----------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------|
| Q (kVAr) | $340/\sqrt{3}$          | $315/\sqrt{3}$          | $345/\sqrt{3}$          | $1000/\sqrt{3}$ |

\*Para obtener el valor de la potencia reactiva se utiliza la siguiente ecuación:

$$Q_{(kVAr)} = \frac{P_{(W)}}{\sqrt{3}}$$

*Tabla 7. Medición con el wattmetro trifásico en el circuito de tres hilos.*

| Magnitud | Total |
|----------|-------|
| P (kW)   | 408   |
| Q (kVAr) | 552   |

*Tabla 8. Medición con el analizador de redes en el circuito de un hilo.*

| Magnitud | Total |
|----------|-------|
| P (kW)   | 170   |
| Q (kVAr) | 50    |

*Tabla 9. Medición con el wattmetro monofásico en el circuito de un hilo.*

| Magnitud | Total |
|----------|-------|
| P (kW)   | 175   |

Hallar el error de medición de potencia activa para un circuito de cuatro hilos.

$$\delta = \frac{\Delta X}{X_{med}} = \frac{12.5}{592.5} = 2.11\%$$

Hallar el error de medición de potencia activa y reactiva para un circuito de tres hilos.

Potencia activa:

$$\delta = \frac{\Delta X}{X_{med}} = \frac{30}{440} = 6.81\%$$

Potencia reactiva:

$$\delta = \frac{\Delta X}{X_{med}} = \frac{2.65}{577.35} = 0.46\%$$

Hallar el error de medición de potencia activa en el circuito de un hilo.

$$\delta = \frac{\Delta X}{X_{med}} = \frac{5}{175} = 2.86\%$$

### 3.3 Resultados del laboratorio 3

*Tabla 1. Características del fasímetro electrodinámico.*

| Instrumento | Clase de precisión | Campo de medición     |
|-------------|--------------------|-----------------------|
| Fasímetro   | 1.5                | $\pm 1; \pm 90^\circ$ |

*Tabla 2. Medición con el analizador de redes en el circuito de cuatro hilos.*

| Magnitud | Fase A | Fase B | Fase C |
|----------|--------|--------|--------|
| PF       | -0.88  | -0.02  | -0.98  |
| PG       | 153°   | 92°    | 170°   |

*Tabla 3. Medición con el analizador de redes en el circuito de tres hilos.*

| Magnitud | Fase A | Fase B | Fase C |
|----------|--------|--------|--------|
| PF       | 0.61   | 0.57   | -0.65  |
| PG       | 307°   | 305°   | 130°   |

*Tabla 4. Medición con el fasímetro electrodinámico en el circuito de cuatro hilos.*

| Magnitud | Fase A | Fase B | Fase C |
|----------|--------|--------|--------|
| PF       | -0.90  | -0.015 | -0.94  |

*Tabla 5. Medición con el analizador de redes en el circuito de un hilo.*

| Magnitud | Total |
|----------|-------|
| PF       | 0.96  |
| PG       | 346°  |

*Tabla 6. Medición con el fasímetro electrodinámico en el circuito de un hilo.*

| Magnitud | Total |
|----------|-------|
| PF       | 0.94  |
| PG       | 345°  |

Hallar el error de medición de factor de potencia para un circuito de cuatro hilos.

$$\delta_A = \frac{\Delta X}{X_{med}} = \frac{0.02}{0.90} = 2.22\%$$

$$\delta_B = \frac{\Delta X}{X_{med}} = \frac{0.005}{0.015} = 3.33\%$$

$$\delta_C = \frac{\Delta X}{X_{med}} = \frac{0.04}{0.94} = 4.26\%$$

Hallar el error de medición de factor de potencia y ángulo de fase para un circuito de un hilo.

Factor de potencia:

$$\delta = \frac{\Delta X}{X_{med}} = \frac{0.02}{0.94} = 2.13\%$$

Ángulo de fase:

$$\delta = \frac{\Delta X}{X_{med}} = \frac{1}{345} = 0.29\%$$

### 3.4 Resultados del laboratorio 4

*Tabla 1. Datos de chapa del motor de corriente directa compound.*

| Type   | Current Type | Volts | Amp. | kW  | rev/min | Aisl. Cl | P  |
|--------|--------------|-------|------|-----|---------|----------|----|
| AL-706 | DC           | 220   | 3    | 0.6 | 1800    | F        | 32 |
| Exc.   |              |       |      |     |         |          |    |
| Volts  | Amp.         |       |      |     |         |          |    |
| 220    | 0.35         |       |      |     |         |          |    |

*Tabla 2. Datos de chapa del generador sincrónico.*

| Type   | Current Type | Volts | Amp. | kVA | rev/min | Aisl. Cl | P  | cos φ | f  |
|--------|--------------|-------|------|-----|---------|----------|----|-------|----|
| AL-406 | 3φ AC        | Δ 220 | 2.5  | 0.6 | 1800    | F        | 22 | 0.8   | 60 |
| Exc.   |              |       |      |     |         |          |    |       |    |
| Volts  | Amp.         |       |      |     |         |          |    |       |    |
| 220    | 0.6          |       |      |     |         |          |    |       |    |

*Tabla 3. Características de los instrumentos electromecánicos.*

| Instrumento     | Clase de precisión | Campo de medición | Resistencia interna |
|-----------------|--------------------|-------------------|---------------------|
| Frecuenciómetro | 0.5                | 55 - 65 Hz        | 0.65 kΩ             |

|                 |     |      |              |
|-----------------|-----|------|--------------|
| Amperímetro     | 0.5 | 10 A | 0.2 $\Omega$ |
| Miliamperímetro | 0.5 | 1 A  | 0.2 $\Omega$ |

*Tabla 4. Mediciones del circuito.*

| Lectura del<br>analizador (Hz) | Lectura del<br>frecuenciómetro (Hz) | $I_a$ (A) | $I_f$ (A) | rev/min |
|--------------------------------|-------------------------------------|-----------|-----------|---------|
| 55                             | 55.5                                | 3.1       | 0.12      | 1650    |
| 60                             | 60.5                                | 2.6       | 0.1       | 1800    |
| 65                             | 65                                  | 3         | 0.15      | 1950    |

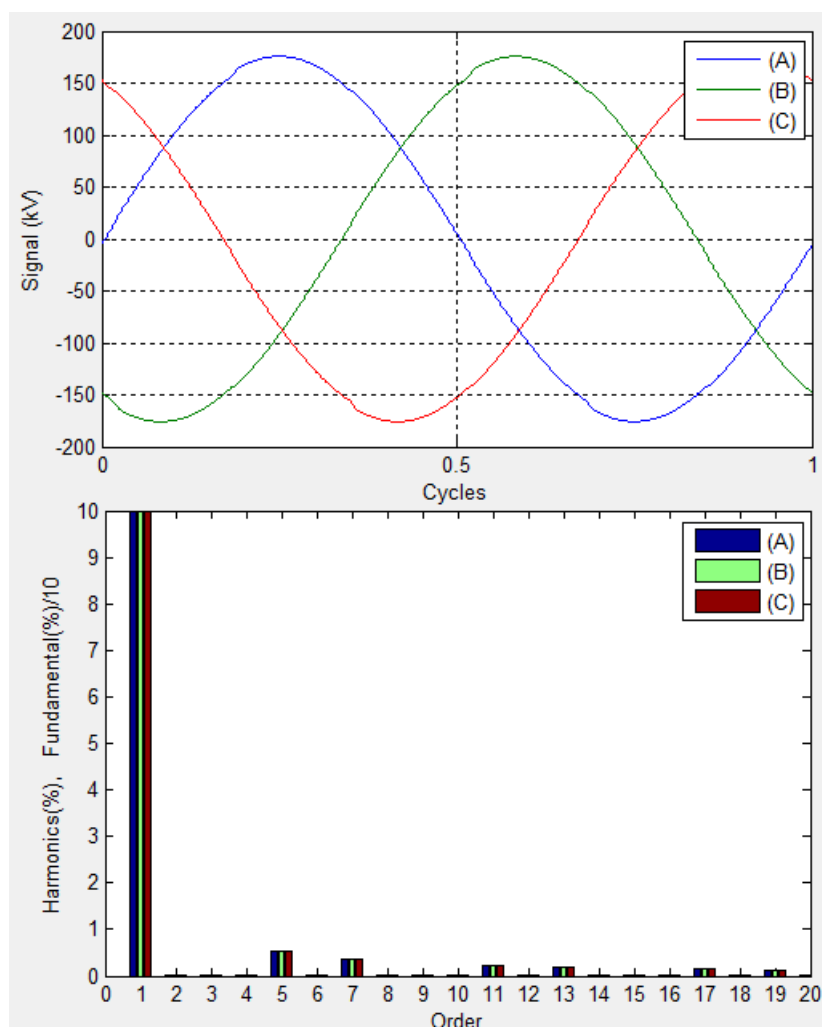
### 3.5 Resultados del laboratorio 5

Horno de arco eléctrico:

A continuación se reflejan en los principales nodos del sistema las formas de onda correspondientes a los voltajes y corrientes, así como los armónicos de dichas variables.

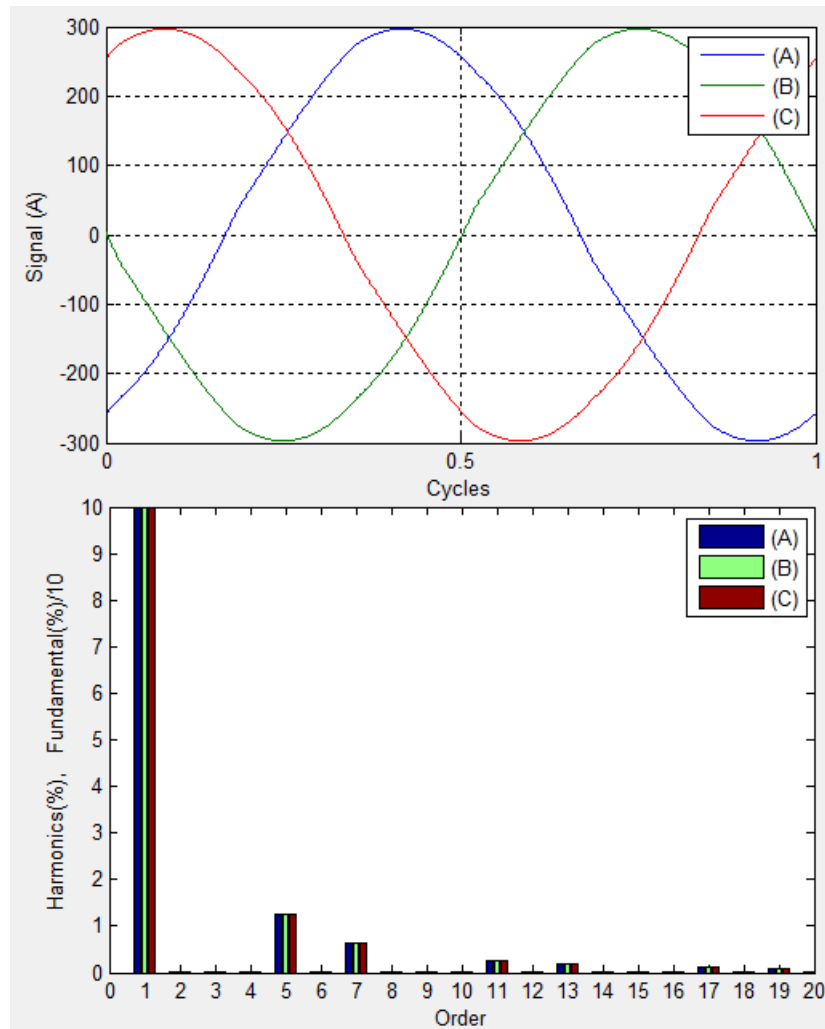
Nodo SEN:

 Voltaje:



Como se puede observar, las mediciones obtenidas reflejan como los armónicos más llamativos los de orden 5<sup>to</sup> y 7<sup>mo</sup>, aunque el por ciento de THD es bien bajo.

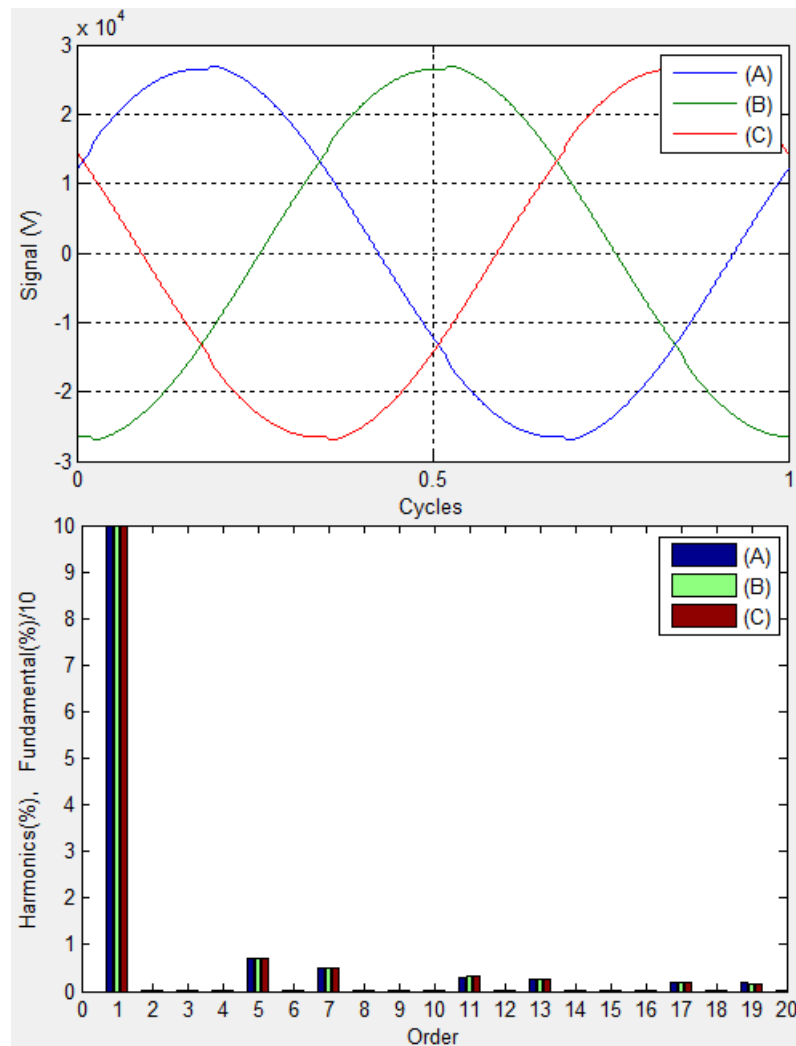
✚ Corriente:



Al igual que en el caso de los voltajes, en las corrientes los armónicos más interesantes continúan siendo los de orden 5<sup>to</sup> y 7<sup>mo</sup>, también con un THD bajo.

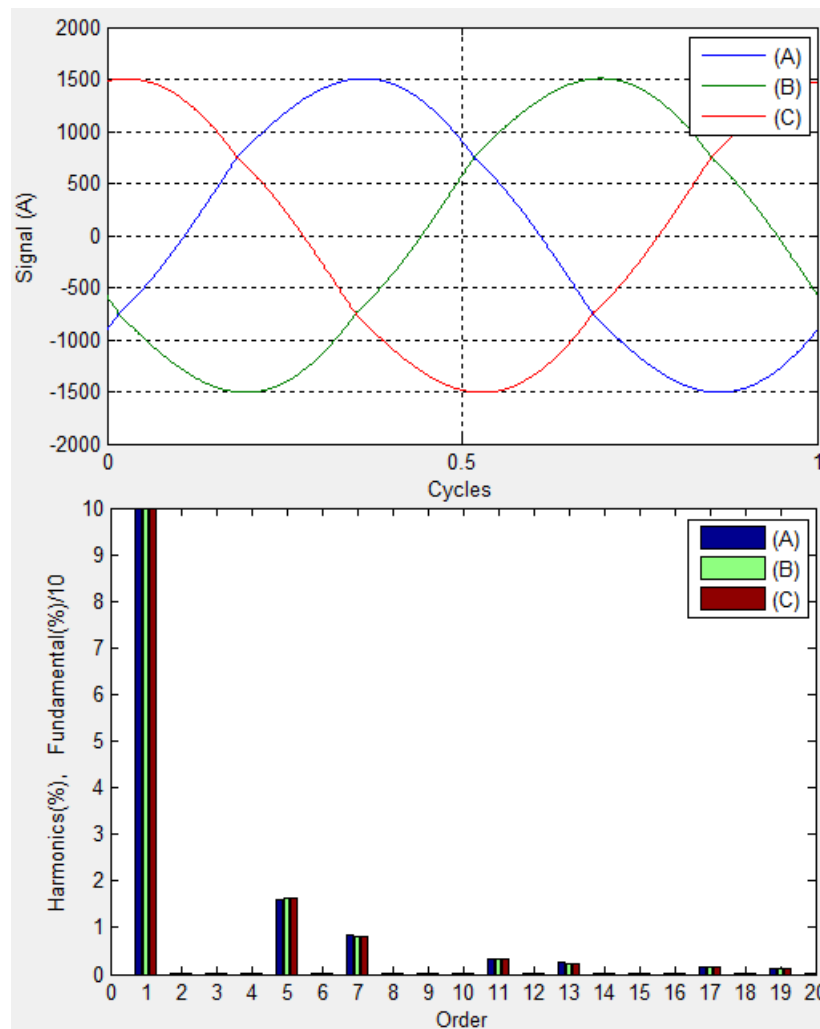
Carga no lineal:

⚡ Voltaje:



En este caso, el armónico de voltaje de más incidencia continúa siendo el 5<sup>to</sup>, con un ligero aumento de los armónicos 7<sup>mo</sup>, 11<sup>no</sup>, 13<sup>ro</sup>, 17<sup>mo</sup> y 19<sup>no</sup>, lo que puede ser corroborado con los valores de las mediciones obtenidas.

✚ Corriente:

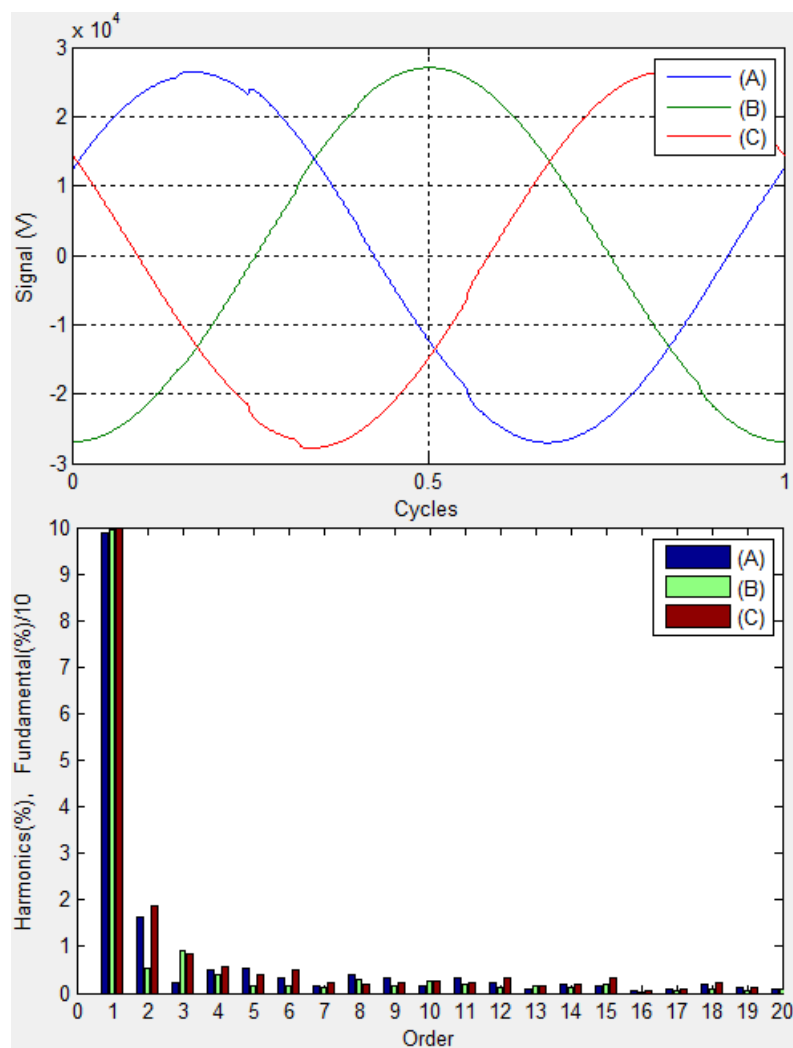


Las mediciones realizadas destacan un notable valor del 5<sup>to</sup> armónico por encima del resto. En este caso, THD se mantiene por debajo de un 2%.

Aquí se modifica el valor del parámetro  $U_{dn}$  en todas las fases, provocando la aparición de armónicos no característico en el espectro de armónicos de la carga no lineal. La variación de  $U_{dn}$  (%) resultó:

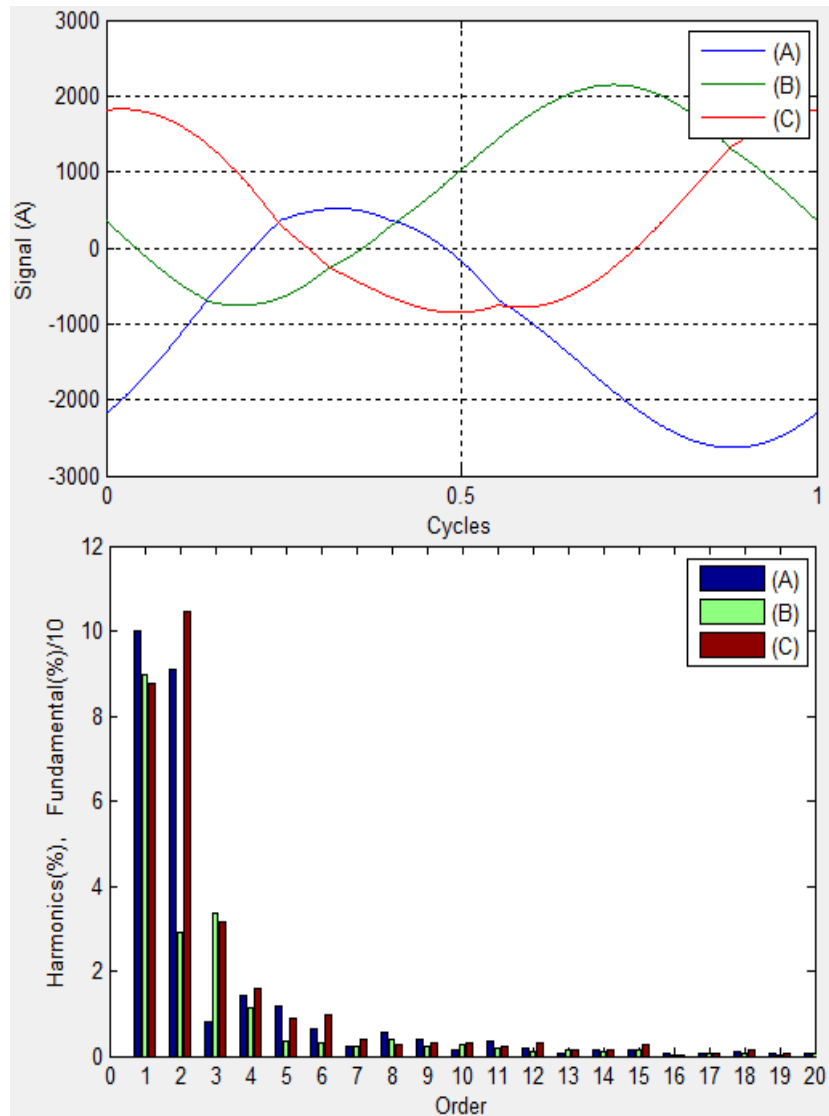
$$50 * [0,4 \quad 1,2 \quad 2]$$

⚡ Voltaje:



El espectro de armónicos reflejan la aparición con estas condiciones de armónicos de todos los órdenes, tanto pares como impares.

✚ Corriente:



Para la corriente ocurre la misma situación, incluso el armónico de 2<sup>do</sup> orden presenta un valor muy alto. Además se puede observar como las formas de onda de cada una de las fases ya no están desfasadas entre si 120°, es decir, que producto de estos armónicos, el sistema se encuentra bien distorsionado (altos valores de THD).

### 3.6 Resultados del laboratorio 6

*Tabla 1. Datos de chapa del motor asincrónico.*

| Type    | Current Type | Volts   | Amp.    | kW | rev/min | Aisl. Cl | Serv | f  |
|---------|--------------|---------|---------|----|---------|----------|------|----|
| AL-1106 | 3 $\phi$ AC  | 220/380 | 4.8/2.8 | 1  | 1800    | B        | C    | 60 |

*Tabla 2. Datos de chapa del generador de corriente directa.*

| Type   | Current Type | Volts | Amp. | kW  | rev/min | Aisl. Cl | P  |
|--------|--------------|-------|------|-----|---------|----------|----|
| AL-706 | DC           | 220   | 3    | 0.6 | 1800    | F        | 32 |
| Exc.   |              |       |      |     |         |          |    |
| Volts  | Amp.         |       |      |     |         |          |    |
| 220    | 0.35         |       |      |     |         |          |    |

*Tabla 3. Características de los instrumentos electromecánicos.*

| Instrumento     | Clase de precisión | Campo de medición | Resistencia interna |
|-----------------|--------------------|-------------------|---------------------|
| Voltímetro      | 0.2                | 250 V             | 5.3 k $\Omega$      |
| Amperímetro     | 0.5                | 10 A              | 0.2 $\Omega$        |
| Miliamperímetro | 0.5                | 1 A               | 0.2 $\Omega$        |

Tabla 4. Mediciones del circuito para  $K_{c1}$  (motor en vacío).

| Carga | $I_a$ (A)              | $I_b$ (A) | $I_c$ (A)  | $V_{ab}$ (V) | $V_{bc}$ (V) | $V_{ca}$ (V) | $V_T$ (V) | $I_L$ (A) |
|-------|------------------------|-----------|------------|--------------|--------------|--------------|-----------|-----------|
| 0%    | 2.05                   | 2.09      | 2.11       | 224          | 229.4        | 228.3        | 200       | 0         |
|       | kW                     | kVAr      | cos $\phi$ | kWh          | kVArh        | rev/min      | THD (%)   |           |
|       | 0.01                   | 0.2       | 0.05       | 0            | 0.03         | 1800         | 3.27      |           |
|       | Armónicos $V_{ab}$ (%) |           |            |              |              |              |           |           |
|       | 1                      | 2         | 3          | 4            | 5            | 6            |           |           |
|       | 100                    | 0.6       | 1.48       | 0.23         | 2.15         | 0.07         |           |           |
|       | 7                      | 8         | 9          | 10           | 11           |              |           |           |
|       | 0.94                   | 0.08      | 0.94       | 0.09         | 0.41         |              |           |           |

El valor de resistencia que se requiere para establecer una carga de coeficiente  $K_{c2} = 0.4$  es de  $100 \Omega$ .

Tabla 5. Mediciones del circuito para  $K_{c2}$ .

| Carga | $I_a$ (A)              | $I_b$ (A) | $I_c$ (A)  | $V_{ab}$ (V) | $V_{bc}$ (V) | $V_{ca}$ (V) | $V_T$ (V) | $I_L$ (A) |
|-------|------------------------|-----------|------------|--------------|--------------|--------------|-----------|-----------|
| 40%   | 2.74                   | 2.73      | 2.69       | 223.2        | 226.8        | 224.2        | 197       | 2         |
|       | kW                     | kVAr      | cos $\phi$ | kWh          | kVArh        | rev/min      | THD (%)   |           |
|       | 0.47                   | 0.17      | 0.58       | 0.16         | 0.06         | 1790         | 3.47      |           |
|       | Armónicos $V_{ab}$ (%) |           |            |              |              |              |           |           |
|       | 1                      | 2         | 3          | 4            | 5            | 6            |           |           |

|  |      |      |      |      |      |      |
|--|------|------|------|------|------|------|
|  | 100  | 0.59 | 1.73 | 0.23 | 2.25 | 0.06 |
|  | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   |      |
|  | 0.96 | 0.08 | 0.94 | 0.09 | 0.57 |      |

El valor de resistencia que se requiere para establecer una carga de coeficiente  $K_{c3} = 0.6$  es de  $66.7 \Omega$ .

*Tabla 6. Mediciones del circuito para  $K_{c3}$ .*

| Carga | $I_a$ (A)              | $I_b$ (A) | $I_c$ (A)   | $V_{ab}$ (V) | $V_{bc}$ (V) | $V_{ca}$ (V) | $V_T$ (V) | $I_L$ (A) |
|-------|------------------------|-----------|-------------|--------------|--------------|--------------|-----------|-----------|
| 60%   | 3.36                   | 3.47      | 3.41        | 224.2        | 225.9        | 222.6        | 192       | 3.1       |
|       | kW                     | kVAr      | $\cos \phi$ | kWh          | kVArh        | rev/min      | THD (%)   |           |
|       | 0.66                   | 0.16      | 0.7         | 0.33         | 0.08         | 1780         | 3.54      |           |
|       | Armónicos $V_{ab}$ (%) |           |             |              |              |              |           |           |
|       | 1                      | 2         | 3           | 4            | 5            | 6            |           |           |
|       | 100                    | 0.61      | 1.73        | 0.24         | 2.26         | 0.08         |           |           |
|       | 7                      | 8         | 9           | 10           | 11           |              |           |           |
|       | 0.95                   | 0.08      | 0.94        | 0.1          | 0.61         |              |           |           |

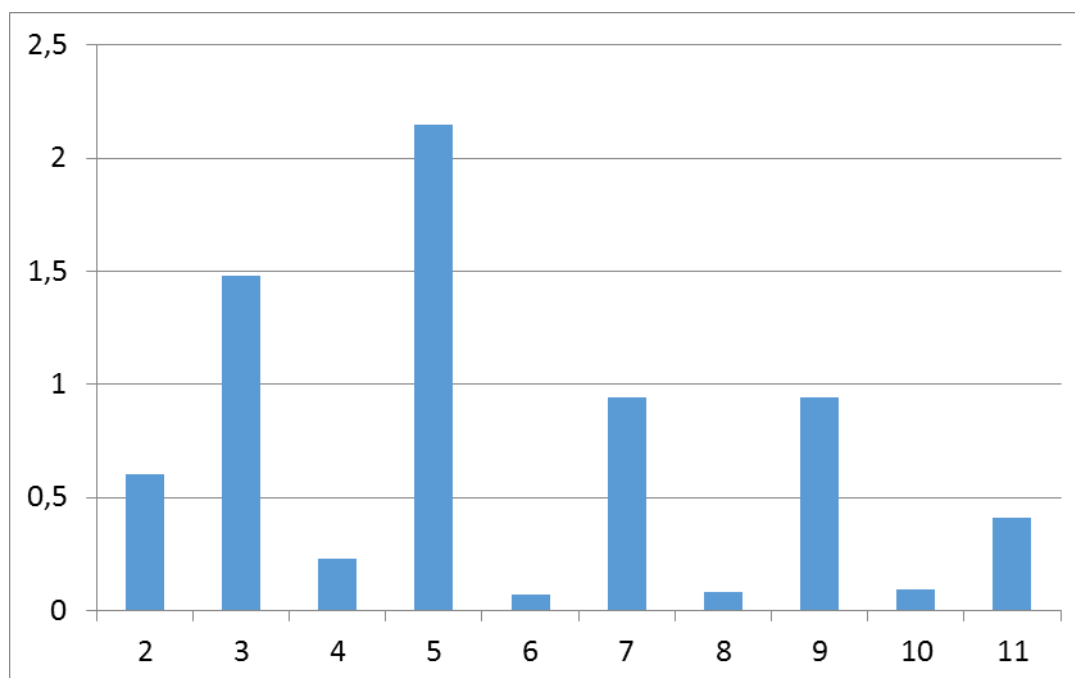


Fig. 1. Espectro de armónicos para  $K_{c1}$ .

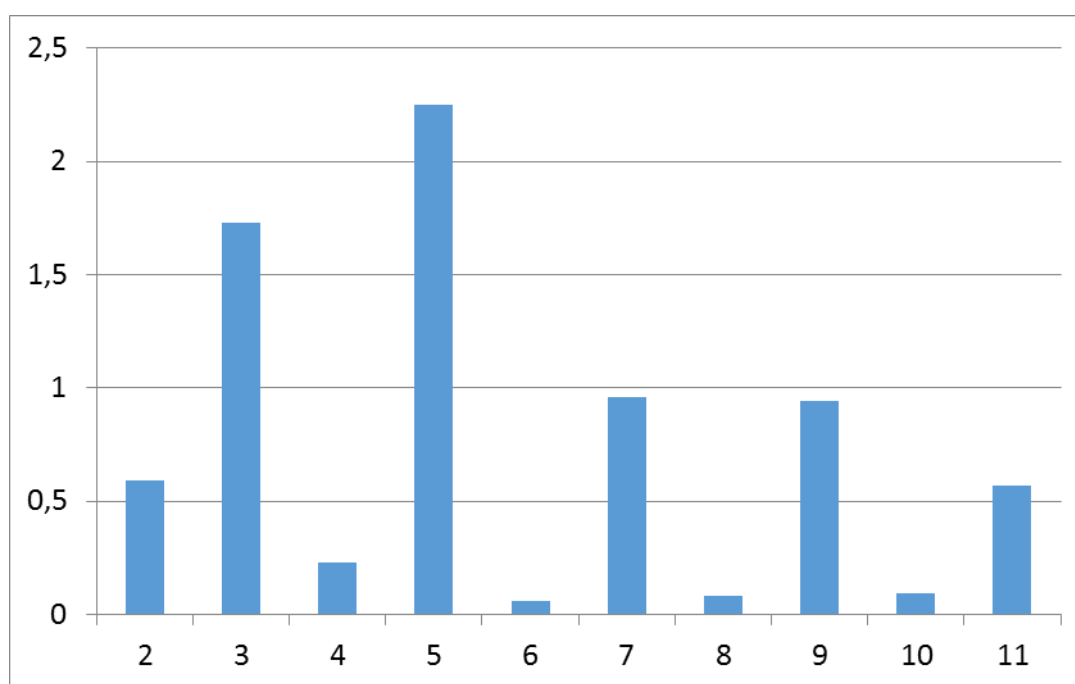


Fig. 2. Espectro de armónicos para  $K_{c2}$ .

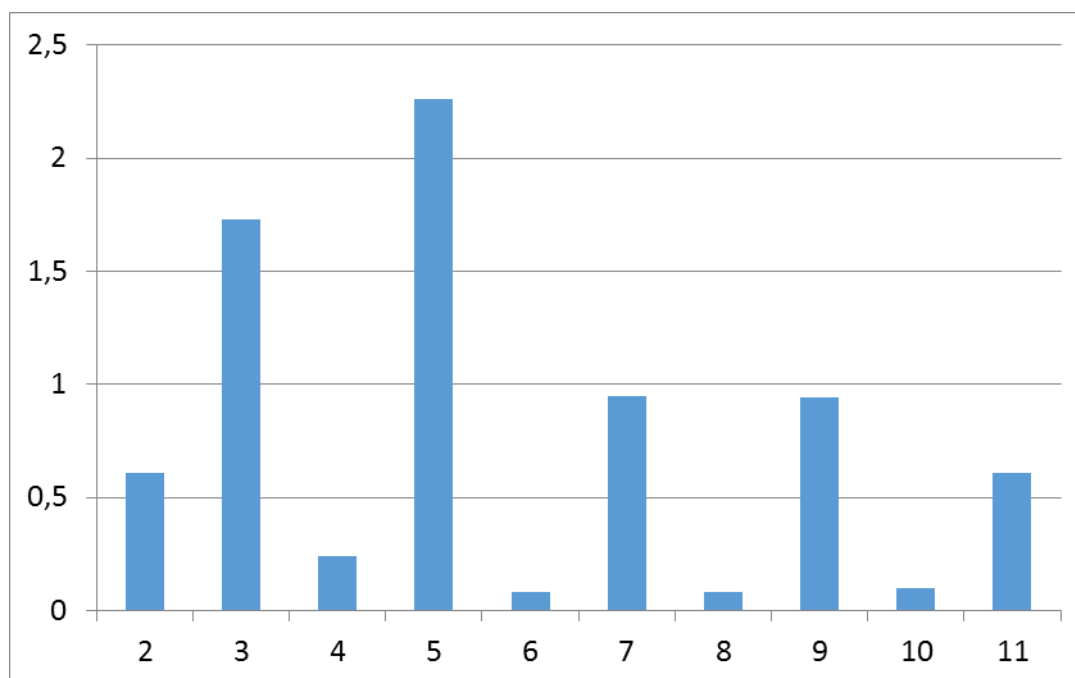


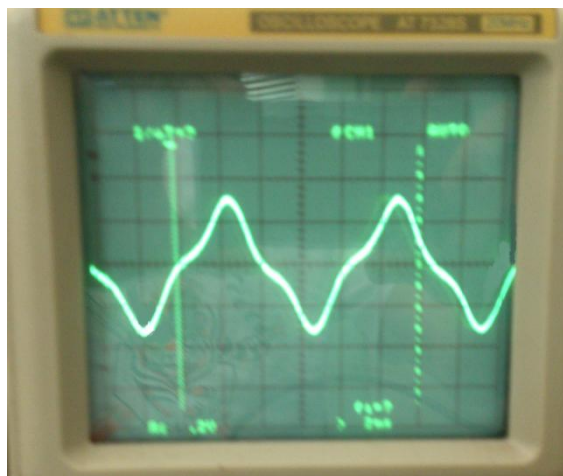
Fig. 3. Espectro de armónicos para  $K_{c3}$ .

Como se observa en las tres figuras, los armónicos 3<sup>ro</sup>, 5<sup>to</sup>, 7<sup>mo</sup> y 9<sup>no</sup> son los más notables, destacándose siempre el 5<sup>to</sup>. No obstante, aún el valor de este es muy inferior al 3% permisible que emite la norma IEEE 519 - 92 para la distorsión individual de voltaje en un nivel de tensión inferior a 69 kV.

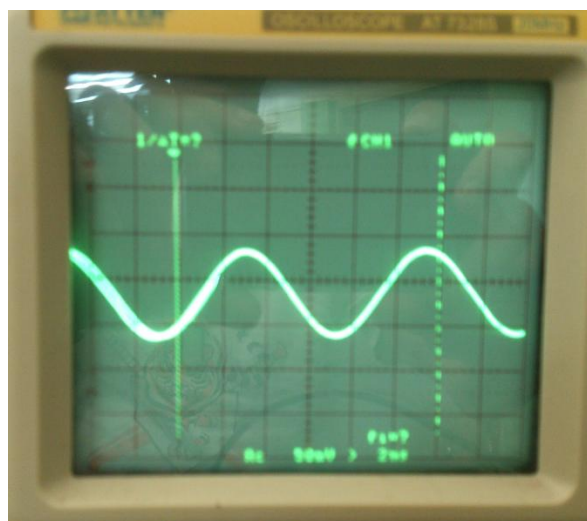
Esta norma recomienda igualmente no sobrepasar el nivel de 5% por parte de la THD, por lo que los valores medidos de este parámetro cumplen con la limitación.

### 3.7 Resultados del laboratorio 7

Con las conexiones establecidas al osciloscopio, pudimos obtener las señales de la tensión en la resistencia R1, y la señal de la tensión en el condensador (véase Figuras 1y 2).



*Fig.1. Señal en la resistencia R1.*



*Fig.2. Señal en el condensador C.*

Luego de disponer el osciloscopio en modo XY, pudimos obtener la curva de histéresis mostrada en la Figura 3.

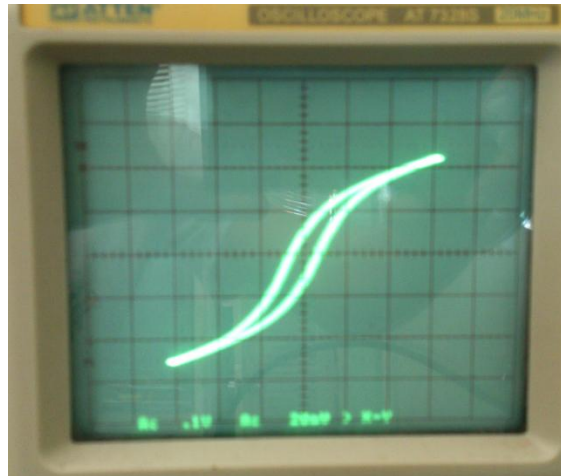


Fig.3. Curva de histéresis en el osciloscopio con una escala de 20mV en el canal2 y una escala de 0.1 V en el canal 1.

De los datos obtenidos a partir de la curva de histéresis de la Figura 3 podemos calcular los valores relevantes  $B_{m\acute{a}x}$ ,  $H_{m\acute{a}x}$ ,  $B_r$  y  $H_c$ .

Para hallar  $B_{m\acute{a}x}$ :

$$B_{m\acute{a}x} = \frac{V_2 \times R \times C}{N_2 \times S} = \frac{0.25 \times 480000 \times 1 \times 10^{-6}}{768 \times 6.75 \times 10^{-4}} = 0.23T$$

- Para hallar  $V_2$  se intercepta la curva de la Figura 3 con el eje “y” y el valor obtenido se multiplica por la escala, en este caso 20mV. De igual forma para calcular  $B_r$  se hace el mismo procedimiento pero teniendo en cuenta la intersección de la curva correspondiente para este campo.

Para hallar  $H_{m\acute{a}x}$ :

$$H_{m\acute{a}x} = \frac{N_1 \times I_1}{L} = \frac{42 \times 1.9}{0.3} = 266 A/m$$

$$I_1 = \frac{V_1}{R_1} = \frac{0.1 \times 1.9}{1} = 0.19A$$

(Para hallar  $V_1$  se intercepta la curva de la Figura 3 con el eje “x” y el valor obtenido se multiplica por la escala (0.1V). De igual forma para calcular  $H_c$  se hace el mismo procedimiento pero teniendo en cuenta la intersección de la curva correspondiente para este caso.

Para hallar  $B_r$ :

$$B_r = \frac{V_2 \times R \times C}{N_2 \times S} = \frac{0.06 \times 480000 \times 1 \times 10^{-6}}{768 \times 6.75 \times 10^{-4}} = 0.06 T$$

Para hallar  $H_c$ :

$$H_c = \frac{N_1 \times I_1}{L} = \frac{42 \times 0.2}{0.3} = 28 \text{ Av/m}$$

$$I_1 = \frac{V_1}{R_1} = \frac{0.1 \times 2}{1} = 0.2 A$$

*Tabla 1. Valores relevantes del ciclo de histéresis.*

|                         |      |
|-------------------------|------|
| $B_{\text{máx}}$ (T)    | 0.23 |
| $H_{\text{máx}}$ (Av/m) | 266  |
| $B_r$ (T)               | 0.06 |
| $H_c$ (Av/m)            | 28   |

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones

1. La práctica de laboratorio en la asignatura Mediciones Eléctricas II constituye un recurso importante en su proceso de enseñanza - aprendizaje, ya que contribuye a la adquisición por parte del estudiante de nuevas habilidades y modelos físicos de la realidad, por lo cual es merecedora de una mayor dedicación para su constante perfeccionamiento.
2. Con el presente trabajo se diseñaron las prácticas de laboratorio para la asignatura Mediciones Eléctricas II, caracterizándose las mismas por la actualización de contenidos teóricos, prácticos y didácticos, así como la introducción del trabajo con instrumentos digitales modernos como analizadores de redes y osciloscopios, bloques de simulación en Matlab y el empleo de situaciones que aproximan la práctica a la realidad presente en sistemas eléctricos de potencia e industriales.
3. En el trabajo se expone una guía de solución de todas las prácticas, la que será usada por el profesor y lo ayudará en su misión de valorar y evaluar el desempeño del estudiante.

### Recomendaciones

1. Introducir las nuevas prácticas de laboratorio en la asignatura Mediciones Eléctricas II.
2. Imprimir las prácticas de laboratorio de manera tal que siempre se disponga de un ejemplar en cada puesto de trabajo.
3. Colocar el material elaborado en la red para uso general del estudiante.
4. Mantener en constante actualización los métodos e instrumentos empleados en la ejecución de las prácticas.
5. Obtener nuevos instrumentos, materiales y dispositivos para el mejoramiento de estas prácticas y el diseño de otras.

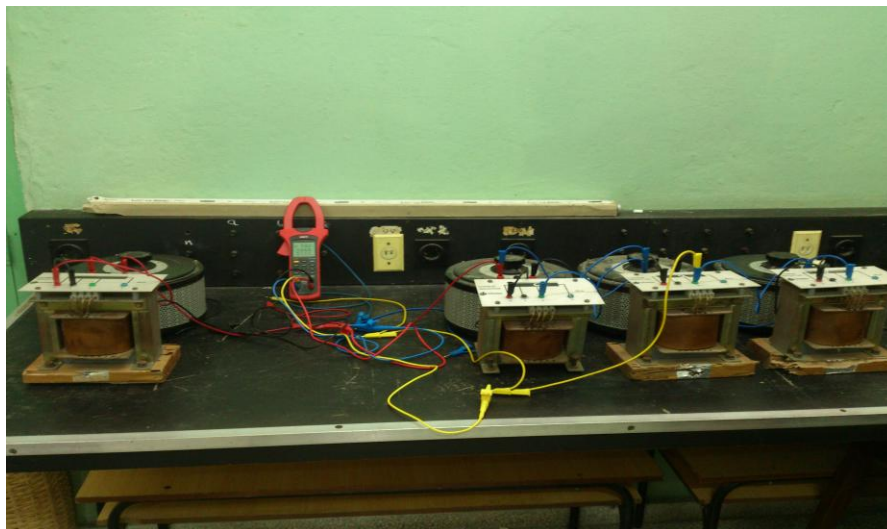
## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Reglamento. Trabajo Docente y Metodológico. Resolución No. 210/2007. Ministerio de Educación Superior, La Habana, Cuba, pp. 1 - 44.
2. Musso M.G, González J. (2011). *Importancia de las prácticas de laboratorio en el mundo abstracto del electromagnetismo*. Colombia.
3. Hermosillo, M. S. (2009). *El laboratorio escolar, reflejo del concepto de ciencia que manejan los docentes*. México. Disponible en: <http://www.angelfire.com/trek/biometriaygenetica/practicas.PDF>
4. Guadalupe L. (2006). *La importancia de los laboratorios*. Revista Construcción y Tecnología.
5. Urrea G., Niño J.A., García J.I., Alvarado J.P., Barragán G.A., Hazbón O. (2013). *Del aula a la realidad. la importancia de los laboratorios en la formación del ingeniero. Caso de estudio: ingeniería aeronáutica - Universidad Pontificia Bolivariana*. World Engineering Education Forum, Medellín, Colombia.
6. Cardona F.E. (2013). *Las prácticas de laboratorio como estrategia didáctica*. Trabajo de Grado para optar por el Título de Licenciada Básica en Ciencias Naturales con énfasis en Medio Ambiente. Universidad del Valle, Instituto de Educación y Pedagogía, Santiago de Cali, Colombia, pp. 1 - 32.
7. Gee B., Clackson S.G. (1992). *The Origen of Practical Work in the English School Science Curriculum*. School Science Review, No. 265, Vol. 73, pp. 79 - 83.
8. Layton D. (1990). *Student Laboratory practice and the history and philosophy of science en the student Laboratory and the science curriculum*. Editado por Elizabeth Hegarty - Hazel. Londres, Reino Unido.
9. Lock R. (1988). *A history of practical work in schools and universities: structures and strategies still largely unexplored*. The Australian Science teachers Journal, Vol. 32, pp. 31 - 39, Australia.
10. Barberá O., Valdés P. (1996). *El Trabajo Práctico en la Enseñanza de las Ciencias: Una Revisión*. Revista Enseñanza de las Ciencias No. 3, Vol. 14, pp. 365 - 379.

11. National Research Council (1996). *National Science Education Standards*. National Academy Press, Washington, Estados Unidos.
12. Scoles G., Pattacini H. (2012). *Innovación de una práctica de laboratorio docente en la asignatura química orgánica*. III Jornada de Educación Mediada por Tecnología. Sistemas de Educación Abierta y a Distancia (SEADI).
13. Torres L., Villareal M., Zapata P., Rodríguez J., Colmenares E., Moreno S. (2013). *Las prácticas de laboratorio en la enseñanza de la química en la educación superior*. Instituto de Ciencias de la Educación, Universidad Autónoma de Barcelona, España.
14. Hodson D. (1994) *Investigación y experiencias didácticas: Hacia un enfoque más crítico del trabajo de Laboratorio*. Revista Enseñanza de las Ciencias, No. 3, Vol. 12, pp. 299 - 313. The Ontario Institute for Studies in Education, Toronto, Canadá.
15. López A.M., Tamayo O.E. (2012) *Las prácticas de laboratorio en la enseñanza de las ciencias naturales*. Revista Latinoamericana de Estudios Educativos, No. 1, Vol. 8, pp. 145 - 166. Universidad de Caldas, Manizales, Colombia.
16. Hodson D. (1996). *Practical work in school science: exploring some directions for change*. Int. J. Science and Education No. 7, Vol. 18, pp. 755 - 760.
17. González E. (1994). *Las prácticas de laboratorio en la formación del profesorado de Física*. Tesis doctoral. Departamento de Didáctica de las Ciencias Experimentales. Universidad de Valencia, España.
18. Dourado L. (2006). *Concepções e práticas dos professores de Ciências Naturais relativas à implementação integrada do trabalho laboratorial e do trabalho de campo*. Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias, No. 1, Vol. 5, pp. 192 - 212. Disponible en: <http://www.saum.uvigo.es/reec>.
19. Programa Analítico de Mediciones Eléctricas II plan D (2010). Especialidad: Eléctrica, Disciplina: Circuitos Eléctricos y Mediciones.
20. Rodríguez M.A. (2015). *Recomendaciones para realizar prácticas en un laboratorio eléctrico*. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética, Universidad de Cantabria, España. Disponible en: <http://personales.unican.es/rodrigma/primer/publicaciones.ht>

## ANEXOS

### Anexo I Esquema de conexión del circuito trifásico para medir potencia activa y reactiva con el analizador de redes.



### Anexo II Esquema de conexión del circuito empleado para medir parámetros eléctricos en un motor asincrónico trifásico mediante el sistema de medición PQP ENERGOTESTER.



**Anexo III      Esquema de conexión del circuito trifásico para medir ángulo de fase y factor de potencia con el fasímetro electromecánico.**



**Anexo IV      Esquema de conexión de un sistema eléctrico de laboratorio para medir frecuencia mediante un frecuenciómetro electromecánico de vibración y el analizador de redes.**



**Anexo V**      **Esquema de conexión para medir el ciclo de histéresis de un material ferromagnético mediante el osciloscopio.**

