



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN

**PROPUESTA DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO PARA
LA MATERIA DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN QUE SE
IMPARTE EN LA CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
ELECTRÓNICA DE LA FES ARAGÓN UNAM**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO ELÉCTRICO ELECTRÓNICO

PRESENTA:

PAMELA GABRIELA CARMONA REYES

DIRECTOR DE TESIS:

M. en C. RODRIGO OCÓN VALDEZ



NEZAHUALCÓYOTL, ESTADO DE MÉXICO, 2016



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVIACIÓN DE
MÉXICO

Facultad de Estudios Superiores Aragón

DIRECCIÓN

PAMELA GABRIELA CARMONA REYES

Presente

Con fundamento en el punto 6 y siguientes, del Reglamento para Exámenes Profesionales en esta Facultad, y toda vez que la documentación presentada por usted reúne los requisitos que establece el precitado Reglamento; me permito comunicarle que ha sido aprobado su tema de tesis y asesor.

TÍTULO: "PROPUESTA DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO PARA LA MATERIA DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN QUE SE IMPARTE EN LA CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA ELECTRÓNICA DE LA FES ARAGÓN UNAM"

ASESOR: M. en C. RODRIGO OCÓN VALDEZ

Aprovecho la ocasión para reiterarle mi distinguida consideración.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"

Nezahualcóyotl, Estado de México, 31 de agosto de 2016

EL DIRECTOR

M. en I. GILBERTO GARCÍA SANTAMARÍA GONZÁLEZ



[Firma]
C p Secretaria Académica
C p Jefatura de Carrera de Ingeniería Eléctrica Electrónica
C p Asesor de Tesis

GGSG/JGPO/bra *[Firma]*

AGRADECIMIENTOS

Mi madre.

No tengo cómo pagarle a la persona que me ha dado todo lo que poseo. Gracias por todas las cosas que no soy. Gracias por enseñarme a permanecer de pie; por ti sé que siempre se puede comenzar de nuevo, sin importar las circunstancias que nos obliguen a hacerlo. Pero sobre todo, gracias por haber creído siempre en mí, estoy donde estoy debido a tu confianza. Nunca podré hacer lo suficiente para compensar todo tu sacrificio. Eres la mujer más hermosa y maravillosa en el mundo. Por favor no llores al leer ésto. Te amo.

Mis hermanos.

Diablos, es muy difícil escribir algo para el par de gays que ha crecido conmigo. Para quien me enseñó desde andar en bicicleta, hasta defenderme en una pelea, si eso fuera (o no) necesario; y quien, a pesar de mi desinterés, nunca se rinde para hablarme de maquillaje. Con ustedes me tocó aprender a compartirlo todo: padres, ropa, televisión, juguetes y ahora también, triunfos. Gracias por estar aquí.

Matías.

Cuando te vi por primera vez supe que mi propósito en la vida es ser para ti la persona más divertida del mundo. Naciste para ser el número uno, después de todo, eres el primer hijo, el primer nieto y el primer sobrino; yo te prometo estar ahí para ayudarte a ser el #1 en todo lo que te propongas. Espero verte llegar a tu propio momento y ojalá este trabajo te sirva de inspiración. Eres el legítimo dueño de mi corazón.

La Universidad Nacional Autónoma de México.

Jamás olvidaré la noche en que supe que la Universidad había abierto sus puertas para mí, desde entonces he vivido mi vida para merecer mi número de cuenta. Hoy más que nunca decir un Goya hace que se me quiebre la voz. Gracias por darme la oportunidad de mi vida. No tengo las palabras suficientes para describir cuánto amo a mi Universidad y lo mucho que he de contribuir para gratificar todo lo que me brindó. Ser azul y oro es lo mejor que me pasó en la vida.

M. en C. Rodrigo Ocón Valdez.

Maestro, si escribiera cada cosa por la que puedo y debo agradecerle... GRACIAS, principalmente, por el tiempo dedicado a la elaboración de este trabajo y por el apoyo siempre dispuesto. Por las recomendaciones y consejos brindados a lo largo de todos estos meses. Por sus brillantes ideas, finalmente esta tesis es una de ellas. Fue, es y será siempre un honor haber sido su alumna. Gracias por confiar en mí, prometo ser siempre digna de dicha confianza. Alguna vez comentamos que los buenos maestros forman parte de nuestra personalidad y, a decir verdad, usted ha moldeado parte de la mía. Le admiro y respeto a un nivel indescriptible.

M. en C. Norma Angélica Romero Badillo.

No es un secreto toda la admiración y el respeto que usted me merece. Es motivante encontrar a una mujer con la experiencia a la par de los hombres que dominan el mundo de la Ingeniería y, con más osadía que muchos de ellos. Es todo un ejemplo como profesional, persona y mujer. Alguien sin miedo de decir lo que piensa y de defenderlo a morir, alguien que no sabe rendirse. Siempre es grato compartir el tiempo con usted. Sus consejos, sus historias y su tan sentimentalmente nula forma de ver la vida, la han convertido en una persona memorable para mí. Lo dije antes y lo sostengo: Cuando sea grande quiero ser como usted.

Ing. Fernando Xavier Vázquez Martínez.

Quiero agradecerle por todo el apoyo y las facilidades que me diste para poder desarrollar el más grande, mejor, más difícil y más satisfactorio trabajo de toda mi vida, sin importarte que muchas veces eso implicara salir a última hora de la facultad. Por hacerme saber que las puertas del L3 siempre están abiertas para quienes desean trabajar. Gracias también por tu alegría, buena vibra y tu inagotable sonrisa.

Ing. Fernando Pantoja Rebollo.

Me es imposible dejar de lado al maestro que me inspiró a que el “Ing.” precediera mi nombre. Nunca me dio pena ser reconocida como la loca que adora al más odiado profesor de Prepa 3; al que te obliga a pensar o “quedar frito” en el intento, al que no sabe consentir a sus alumnos; al que te enseña a la mala y te hace sentir un imbécil; al que te exige dar lo mejor de ti; con quien 5 tras 5 no te hace perder el orgullo de ser su alumno; y quien, a cambio de todo eso, no pide más que lo justo; alguien con quien el aprendizaje es garantía. Usted me enseñó que “lo más” no es suficiente; que equivocarte y reprobar no significa nada, porque una vez que reprobaste el examen, el error estúpido que te hizo merecedor de un 5 nunca lo vuelves a cometer y, ese 5 con Pantoja es un honoris causa con cualquier otro profesor. Con usted aprendí a valorar la enseñanza por encima de la calificación. Esos traumas que me forjaron a tiempo resultaron grandes lecciones, los profesores más estrictos de FES Aragón ya no pudieron asustarme. Gracias por todo.

Mis compañeros de generación.

Llegar hasta este punto se lo debo también a ustedes, que lejos de competir, siempre buscamos ayudarnos entre todos: o todos hundidos o todos campeones. No pude encontrarme a un equipazo mejor; que con sus burlas, majaderías, asquerosidades y depravaciones, me hicieron sentir que cuatro años corrieron como agua entre las manos. Gracias chavos “ustedes son lo máximo”.

David H. Aparicio Morales.

Por más que lo intento no puedo recordar cómo fue que comenzamos a ser amigos, y aun así, después de cuatro años sigo siendo feliz por ello. Gracias por hacerme comer en lo que caminas entre dos edificios y no dejarme morir de hambre; por la adrenalina de dejar proyectos importantes a último minuto que terminan siendo satisfactorios y recordarme cada vez que el último momento parecía una mala idea. Por todas las noches de desvelo haciendo tareas, previos, reportes, series, etc. Gracias por tu paciencia cuando no quería entender algo que me explicabas. Gracias por compartir un café y parte de tu vida conmigo. Gracias por las múltiples anécdotas, chistes e historias contadas; es imposible aburrirse en tu compañía. Gracias por enseñarme tantas cosas. Eres un hombre admirable.

“Siempre hay algo más que aprender”

Pamela Gabriela Carmona Reyes



CONTENIDO GENERAL

INTRODUCCIÓN	11
ANTECEDENTES	12
OBJETIVO GENERAL	13
OBJETIVOS PARTICULARES	13
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	13
BREVE DESCRIPCIÓN DEL CONTENIDO	14
CAPÍTULO I	
SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA	16
I.1 DEFINICIÓN DE UN SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA	17
I.1.1 GENERACIÓN	18
I.1.1.1 Infraestructura de generación	23
I.1.2 TRANSMISIÓN	24
I.1.2.1 Componentes de un sistema de transmisión	24
I.1.2.2 Infraestructura de transmisión	26
I.1.3 SUBTRANSMISIÓN	27
I.1.3.1 Infraestructura de subtransmisión	27
I.1.4 DISTRIBUCIÓN	28
I.1.4.1 Arreglos de los sistemas de distribución	31
I.1.4.2 Infraestructura de distribución	33
CAPÍTULO II	
SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA	34
II.1 CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN	35
II.1.1 SISTEMAS AÉREOS	36
II.1.2 SISTEMAS SUBTERRÁNEOS	36
II.2 CARACTERÍSTICAS DE LA CARGA	37
II.2.1 CLASIFICACIÓN DE LAS CARGAS	37
II.2.1.1 Industrial	37
II.2.1.2 Comercial	38
II.2.1.3 Doméstica	39
II.3 PARÁMETROS FUNDAMENTALES EN REDES DE DISTRIBUCIÓN	39
II.3.1 CAÍDA DE TENSIÓN Y REGULACIÓN	39
II.3.2 CONCEPTO DE IMPEDANCIA	40
II.3.3 PÉRDIDAS	41



II.4 TRANSFORMADORES	41
II.4.1 TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN	42
II.4.2 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	43
II.5 APLICACIÓN DE CAPACITORES	47
II.5.1 POTENCIA ELÉCTRICA Y FACTOR DE POTENCIA	47
II.5.1.1 Medición del factor de potencia	48
II.5.2 COMPENSACIÓN DE POTENCIA REACTIVA	50
II.5.2.1 Bancos de capacitores	51
II.6 PROTECCIÓN DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN	51
II.6.1 PROTECCIÓN CONTRA SOBRECORRIENTES	52
II.6.1.1 Protección con relevadores	53
II.6.1.2 Protección con fusibles	53
II.6.1.3 Protección con restauradores	54
II.6.1.4 Protección con seccionadores	55
II.6.1.5 Coordinación de protecciones	55
II.6.2 PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES	56
II.6.2.1 Protección con apartarrayos	57
CAPÍTULO III	
PROPUESTA DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO	58
PRÁCTICA 1. <i>CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA CON CAPACITORES</i>	59
PRÁCTICA 2. <i>REGULACIÓN DE TENSIÓN</i>	73
PRÁCTICA 3. <i>TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN</i>	84
PRÁCTICA 4. <i>TRANSFORMADORES EN PARALELO</i>	96
PRÁCTICA 5. <i>DESPLAZAMIENTO DE FASE EN TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS</i>	107
PRÁCTICA 6. <i>CORRIENTE DE ARRANQUE EN TRANSFORMADORES Y MOTORES</i>	126
PRÁCTICA 7. <i>MEDICIÓN Y FACTURACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA</i>	145
CAPÍTULO IV	
CONCLUSIONES	159
ANEXO	
SOLUCIONARIO DE PRÁCTICAS	162
REFERENCIAS	206

INTRODUCCIÓN



ANTECEDENTES.

La energía eléctrica se ha convertido en la forma de energía más importante para la humanidad; tanto así que, a pesar de contar con múltiples formas para obtener beneficio de diversas fuentes de energía: como la energía del viento, del agua, el calor del sol, la energía lumínica, el gas natural, los combustibles fósiles, la energía proveniente del subsuelo, el uso de residuos orgánicos, la fuerza de movimiento de las corrientes marinas, reacciones nucleares, etc., todas estas fuentes terminan convirtiéndose en energía eléctrica. Incluso, la humanidad ha sido capaz de reproducir en la tierra la manera en que el sol genera su energía, esto en un reactor de fusión nuclear, pero no ha sido capaz de encontrar un tipo de energía que pueda hacer a la energía eléctrica obsoleta.

La energía eléctrica es universal, tiene aplicación en todas las actividades del ser humano; es imposible concebir una idea de lo que sería la vida moderna prescindiendo del uso de la electricidad. La energía eléctrica es el cimiento del desarrollo tecnológico. De hecho, e indiscutiblemente, la electricidad es el invento que más ha innovado al mundo; ha permitido crear todas las comodidades, algunas de ellas indispensables, para el ser humano, haciendo posible mejorar la calidad de vida conforme avanza la tecnología, y su vez, el avance de la tecnología impulsa el desarrollo de la electricidad.

Toda esta evolución tecnológica sería inexistente sin los especialistas en los diversos campos de la energía eléctrica, es por ello que a lo largo del globo existe un sinnúmero de universidades con oferta académica en esta disciplina.

Particularmente, el objetivo de la licenciatura de Ingeniería Eléctrica Electrónica de la FES Aragón es formar profesionales de alto nivel en el campo; capaces de diseñar, innovar, desarrollar, integrar, planear, crear tecnología y elevar los niveles de competitividad en la industria, para beneficio de la sociedad. Para cumplir con dicho objetivo, se ha dado a la tarea de proveer a los alumnos una formación académica sólida.

Las prácticas de laboratorio constituyen un recurso importante en la formación académica de los alumnos de áreas experimentales. Las prácticas referidas son un complemento a las clases teóricas, por lo que resultan una valiosa herramienta para reforzar la enseñanza. En numerosas ocasiones, el soporte experimental que brindan las clases de laboratorio permite a los alumnos esclarecer, repasar, aprender y profundizar los conocimientos adquiridos en las clases teóricas.



OBJETIVO GENERAL.

Implementar una propuesta de prácticas de laboratorio para la materia de Sistemas de Distribución que se imparte en la carrera de Ingeniería Eléctrica Electrónica de la FES Aragón UNAM.

OBJETIVOS PARTICULARES.

- Solventar la carencia de formatos de práctica necesarios para dar inicio a las clases de laboratorio de Sistemas de Distribución.
- Concebir el desarrollo de las prácticas utilizando los módulos didácticos con los que cuenta el laboratorio de energía eléctrica.
- Impulsar el manejo del equipo disponible en el almacén del laboratorio L3 de Ingeniería Eléctrica Electrónica.
- Que los procedimientos a realizar en cada una de las prácticas sean descritos con supremo detalle, con propósito de que no exista cabida a dudas que propicien errores de conexión.
- Evitar conexiones exorbitantes que puedan confundir a los alumnos; permitiendo así que, con procedimientos simples, los fenómenos analizados resulten significativos para los estudiantes.
- Que los temas estudiados en las prácticas permitan a los alumnos asimilar, complementar y aclarar los conocimientos adquiridos en las clases teóricas.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

En el semestre 2016-I comenzó a impartirse en la carrera de Ingeniería Eléctrica Electrónica de la FES Aragón la asignatura de Sistemas de Distribución, misma que, de acuerdo con el plan de estudios vigente, es de tipo teórico – práctico; sin embargo, al ser la primera vez que se imparte, no se cuenta con el material necesario para implementar las clases prácticas. Por este motivo, la materia correspondiente ha tenido un inconveniente relativo al aprovechamiento académico de los alumnos que la han cursado.

Precisamente, la intención de este proyecto es ofrecer las herramientas elementales para dar inicio a las clases de laboratorio de Sistemas de Distribución. Lo anterior, mediante el desarrollo de una serie de prácticas que permitan, tanto a los instructores como a los alumnos, utilizar el equipo y realizar los procedimientos descritos de una manera confiable y segura.



BREVE DESCRIPCIÓN DEL CONTENIDO.

El proyecto de tesis presentado a continuación consta de cuatro capítulos:

En el capítulo I se define, de forma general, al sistema eléctrico de potencia y a las distintas secciones que lo integran. Además, se proporcionan datos acerca de la infraestructura con la que contaba la Comisión Federal de Electricidad (CFE), hasta diciembre de 2015, en cada una de las secciones. Entre estos datos se encuentra la capacidad efectiva de generación de la CFE y de los productores independientes de energía (PIE), así como los tipos de centrales generadoras existentes y la capacidad en Mega Watts que proveen dichas centrales de manera individual; la capacidad instalada de transmisión, los kilómetros y el nivel de voltaje de líneas de transmisión; el nivel de voltaje de líneas de subtransmisión; la capacidad instalada de distribución, los kilómetros y el nivel de voltaje de líneas de distribución, el número de subestaciones de potencia y el número de transformadores de distribución.

En el capítulo II se describen, de manera breve, los aspectos más relevantes de los sistemas de distribución, con especial interés en las redes de distribución aérea. La finalidad de este apartado es encausar los temas que se tratan con mayor detalle en las prácticas planteadas en el capítulo III.

En el capítulo III se exponen formalmente las siete propuestas de prácticas para el laboratorio de Sistemas de Distribución:

- Práctica 1. Corrección del factor de potencia con capacitores.
- Práctica 2. Regulación de tensión.
- Práctica 3. Transformadores de distribución.
- Práctica 4. Transformadores en paralelo.
- Práctica 5. Desplazamiento de fase en transformadores trifásicos.
- Práctica 6. Corriente de arranque en transformadores y motores.
- Práctica 7. Medición y facturación de energía eléctrica.

Todas las prácticas están conformadas por ocho puntos, considerados fundamentales para alcanzar el máximo aprovechamiento de los conceptos que se tratan en cada una de ellas. Los puntos citados se enlistan y explican a continuación:

- Objetivos.
Los objetivos establecen las metas que se esperan cumplir en cada una de las prácticas.
- Introducción.
En esta sección, se explican los temas necesarios para que el alumno pueda apreciar la importancia que tienen los experimentos a realizar en el desarrollo de la práctica. Toda la información presentada es precisa, a fin de que la extensión de este punto sea lo más compacta posible.



- **Cuestionario previo.**
Consta de una serie de preguntas formuladas a partir de la información explicada en la introducción. Estas preguntas buscan que el alumno se presente a las clases de laboratorio con certeza de los eventos que podrá observar, ya que, frecuentemente, las clases teóricas van atrasadas a las clases de laboratorio.
- **Material.**
En este apartado se enlista el equipo que se utilizará para realizar los experimentos.
- **Desarrollo de la práctica.**
En este punto se describe, detalladamente, la secuencia de los procedimientos que deben seguirse para realizar la conexión correcta de los circuitos, tomar las mediciones y responder los cuestionamientos que se presentan a lo largo de los experimentos.
- **Cuestionario de evaluación.**
Como su nombre lo indica, es una serie de preguntas que tiene como fin evaluar los conocimientos adquiridos por los alumnos al finalizar la práctica.
- **Conclusiones.**
En este espacio los alumnos podrán redactar sus propias deducciones de los temas y experimentos analizados en las prácticas.
- **Referencias.**
En todas las prácticas se incluyen las fuentes de información consultadas para estructurar la introducción a las mismas. De este modo, los alumnos e instructores interesados pueden consultar información más ampliada de los temas estudiados en las prácticas.

En el capítulo IV se expresan las conclusiones finales de este proyecto, al igual que los trabajos que podrían surgir a consecuencia del mismo.

Finalmente, se incluye un anexo donde se presenta la solución a todos los desarrollos de las prácticas.

CAPÍTULO I

SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

I.1 DEFINICIÓN DE UN SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA.

El sistema eléctrico de potencia (SEP) es el conjunto de todos los elementos que se utilizan, desde la generación de energía eléctrica, su transmisión y hasta la distribución de la misma, para el suministro a los consumidores. Al SEP lo integran cuatro sectores fundamentales: la *generación*, *transmisión*, *subtransmisión* y *distribución* de energía eléctrica.

En la siguiente figura se muestra el diagrama unifilar simplificado de la estructura del sistema eléctrico de potencia.

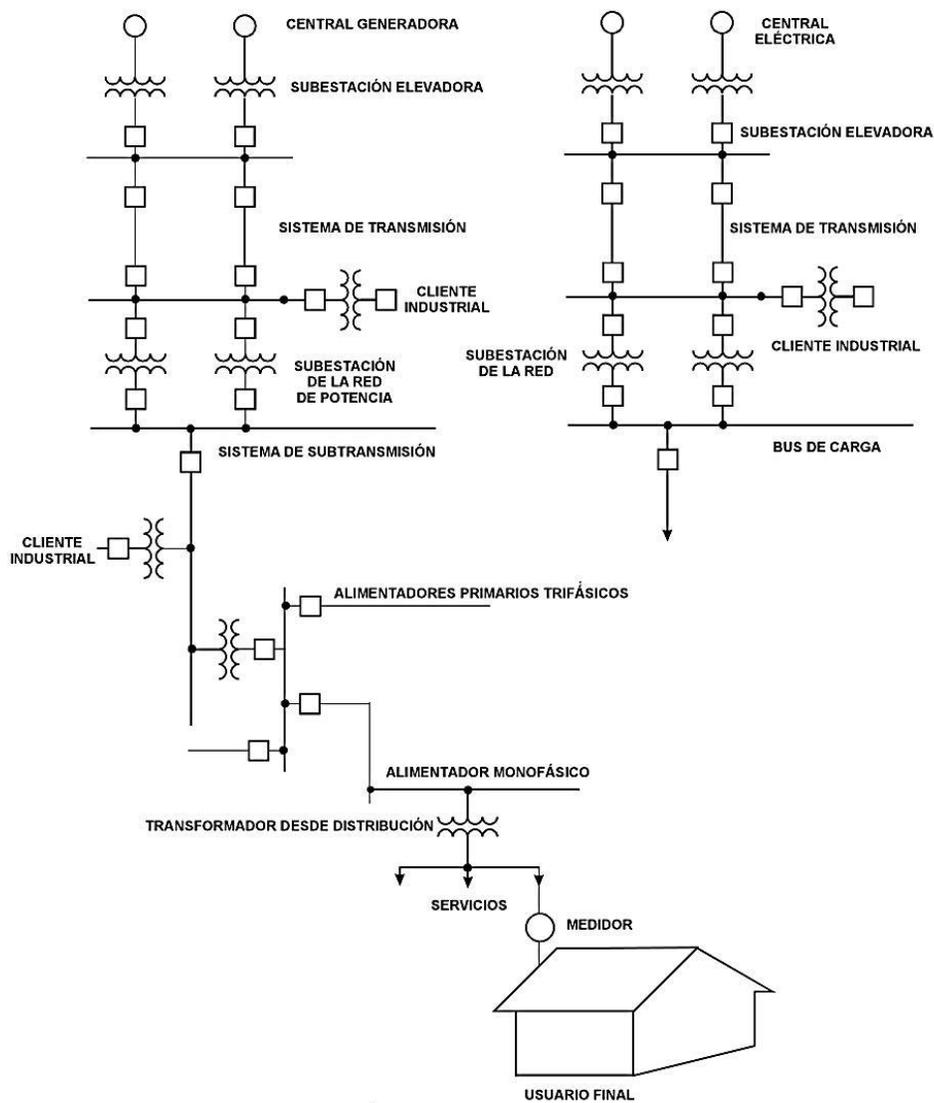


Figura I.1 Estructura del Sistema Eléctrico de Potencia.
(Fuente: Manual Eléctrico Viakon, Sistemas y redes de distribución)

I.1.1 GENERACIÓN.

El sector de generación compete a la conversión de otras fuentes de energía en energía eléctrica. Las centrales de generación son los establecimientos que llevan a cabo dicho proceso. A continuación, se da una breve descripción de algunas de estas centrales.

- **Centrales térmicas.**

Las centrales térmicas utilizan combustibles fósiles como materia prima, una fuente de energía no renovable que, además, emite gases contaminantes a la atmósfera. La combustión de los combustibles mencionados libera energía en forma de calor.

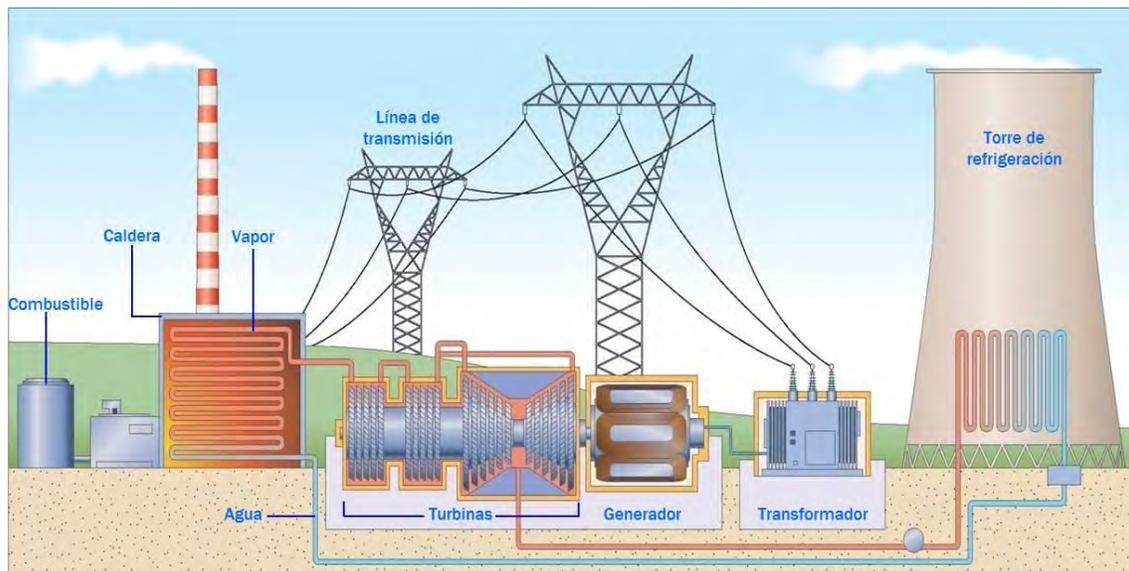


Figura I.2 Esquema de funcionamiento de una central térmica.

- **Centrales solares fotovoltaicas.**

Las centrales solares fotovoltaicas utilizan la luz solar, la cual incide en celdas solares para producir electricidad. Las celdas solares son dispositivos que, mediante el efecto fotoeléctrico, transforman energía luminosa en energía eléctrica. Estas celdas están construidas por una o más láminas de material semiconductor (generalmente silicio) y están recubiertas por un cristal transparente cuya función es dejar pasar, en la mayor medida posible, la radiación solar. Aunque tienen bajos e inestables niveles de producción, debido a que dependen de las condiciones meteorológicas, y los costos de fabricación son elevados, al no producir gases contaminantes, estas centrales son amigables con el ambiente.

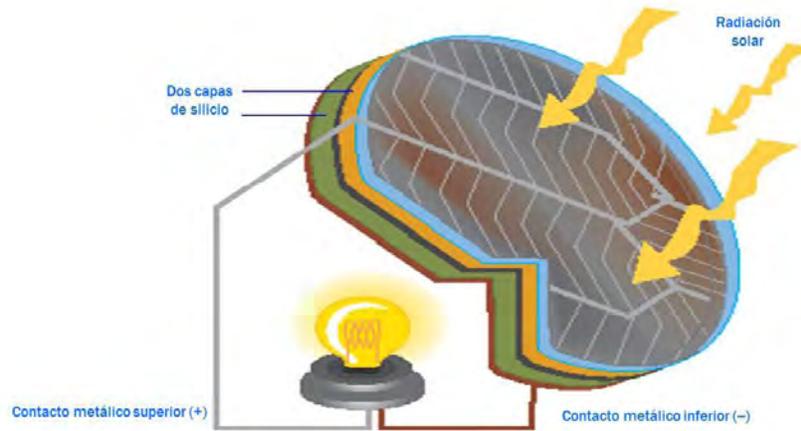


Figura I.3 Esquema de funcionamiento de una celda fotoeléctrica.

- **Centrales nucleares.**

La fuente de energía de estas centrales es el calor emitido mediante reacciones de fisión o fusión nuclear. Ambas reacciones liberan la energía almacenada en el núcleo de un átomo.

La reacción de fisión, presente en los reactores de las centrales nucleares tradicionales, se produce cuando el núcleo de un átomo de uranio se divide en dos, formando kriptón y bario; liberando una considerable cantidad de energía. A pesar de necesitar una gran cantidad de energía para provocar la reacción en cadena, una vez iniciada, se requiere muy poca energía para mantenerla; lo que significa que, con una pequeña porción de materia prima, puede producirse una gran cantidad de energía eléctrica. Aunque no emite gases contaminantes, los residuos nucleares de esta reacción son perjudiciales para los seres vivos.

Los reactores de fusión nuclear son una tecnología experimental, iniciada por científicos rusos a finales de 1940 con el reactor Tokamak, mejorada en 1997 con el reactor JET (Joint European Torus) construido en Inglaterra y unificada en el proyecto internacional ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), en el que participa la Unión Europea, Inglaterra, Estados Unidos, Rusia, Japón, China, Corea del Sur e India, donde comenzó en 2007 la construcción de un reactor en Francia que, se espera, sea capaz de operar como central generadora en el año 2030.

Propiamente, la reacción de fusión nuclear es aquella donde se juntan dos isótopos de hidrógeno: deuterio y tritio, dando lugar a una forma de helio, que inmediatamente se rompe y libera un neutrón, así como una notable cantidad de energía. Para que los átomos de deuterio y tritio se fusionen, es necesario obtener un nivel de presión inalcanzable en la Tierra, o bien, una temperatura de 150 000 000 °C, 10 veces la temperatura del núcleo del Sol. Como no existe un material que resista esta temperatura, se debe confinar la reacción dentro de un campo magnético, para impedir que ésta toque las paredes del reactor.

Pese a la importante cantidad de energía demandada para iniciar el proceso, una vez producida la reacción, la energía obtenida sería 10 veces más potente que la energía suministrada. Además, 1 kg de materia prima de fusión produce la misma energía de 10 000 000 kg de combustible fósil.

A pesar del costo excesivo de fabricación del reactor, esta central no produce gases contaminantes y debido a que no genera residuos radiactivos, es considerada como una fuente de energía alterna. Por si fuera poco, en caso accidente, no es necesaria la evacuación de población.

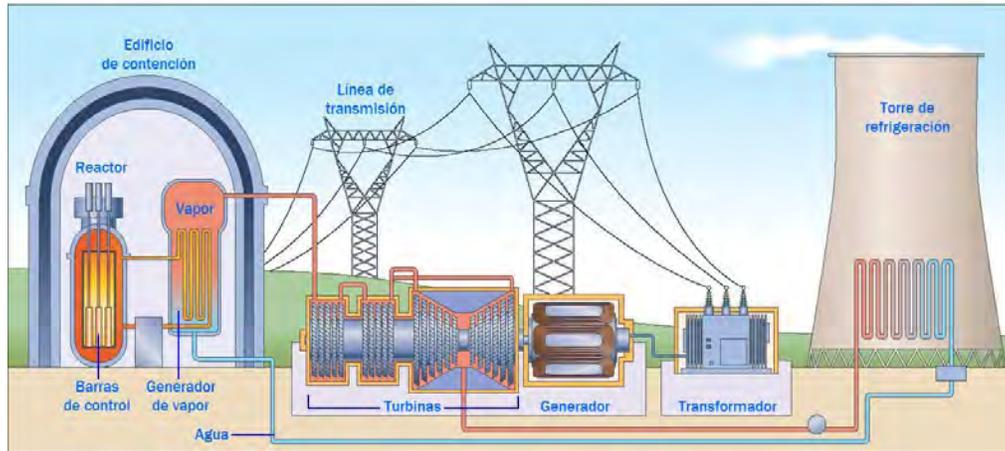


Figura I.4 Esquema de funcionamiento de una central eléctrica de fisión nuclear.

- **Centrales hidroeléctricas.**

Las centrales hidroeléctricas trabajan con agua. No emiten gases contaminantes. Son una fuente de energía renovable que, con el paso del tiempo, no demanda más materia prima, pues el agua que requiere para funcionar se reutiliza una y otra vez.

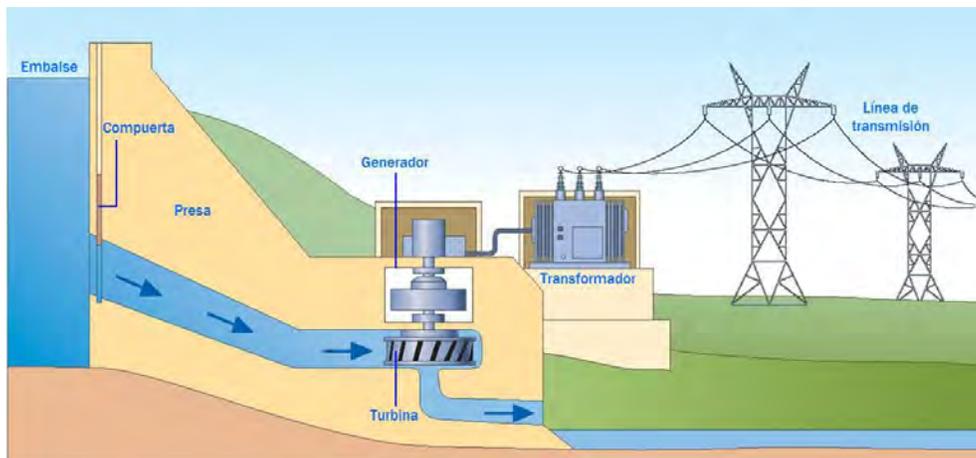


Figura I.5 Esquema de funcionamiento de una central hidroeléctrica.

- **Centrales geotérmicas.**

Las centrales geotérmicas utilizan el calor y la presión de depósitos acuíferos del subsuelo, ubicados cerca del magma terrestre. Los altos niveles de presión rompen la roca por encima del depósito, ocasionando que agua ardiente y vapor salgan expulsados hacia la superficie. Son una fuente de energía renovable. Sin embargo, estas centrales sólo pueden establecerse en zonas específicas.

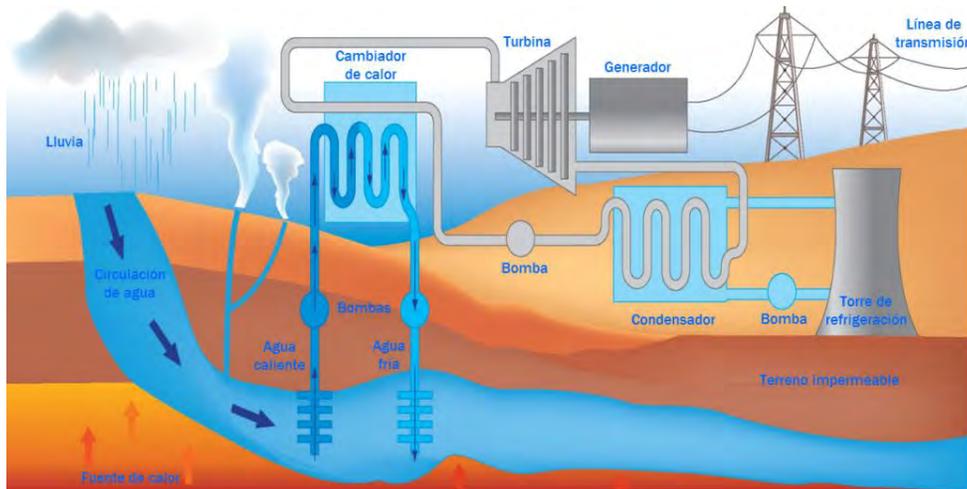


Figura I.6 Esquema de funcionamiento de una central geotérmica.

- **Centrales eólicas.**

Las centrales eólicas utilizan la energía del viento como materia prima para producir electricidad. Sin embargo, son dependientes de las condiciones meteorológicas y afectan a la fauna de los lugares en los que están establecidas: interfieren con las rutas migratorias de las aves. Son una fuente de energía renovable.

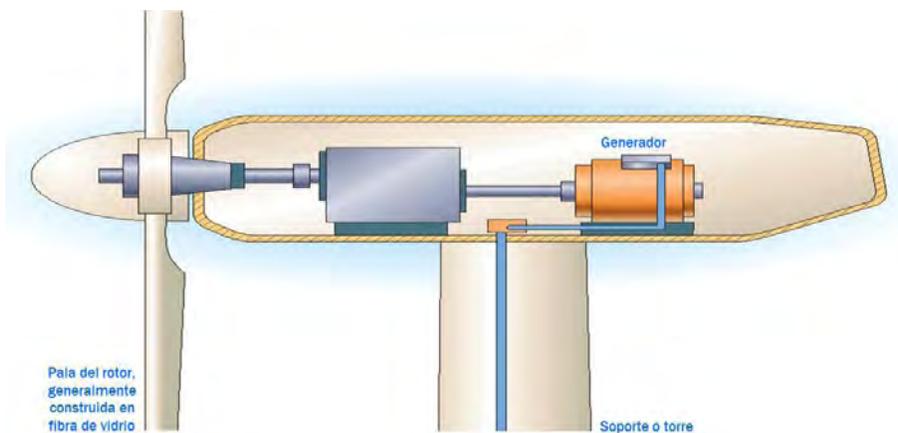


Figura I.7 Esquema de funcionamiento de un aerogenerador.

- **Centrales de bioenergía.**

Las centrales de bioenergía o centrales de biomasa utilizan recursos orgánicos como materia prima para producir energía eléctrica, por lo que el mayor problema de estas centrales de generación es asegurar el suministro estable de combustible. Además, este combustible debe utilizarse por debajo de la capacidad que tiene para regenerarse; de lo contrario, en vez de aprovecharse, los recursos orgánicos podrían agotarse.

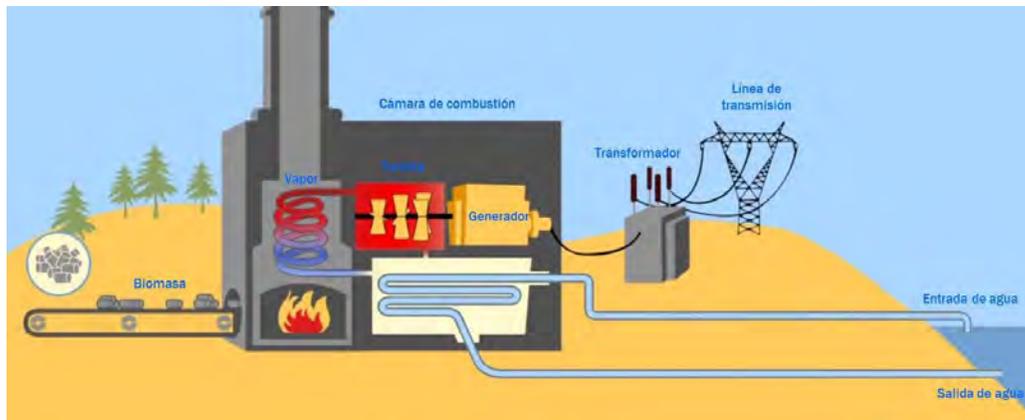


Figura I.8 Esquema de funcionamiento de una central de bioenergía.

- **Centrales de ciclo combinado.**

En las centrales de ciclo combinado trabajan simultáneamente dos ciclos termodinámicos (ciclo Brayton y ciclo Rankine) para transformar energía térmica (proveniente de gas natural y de vapor de agua, respectivamente) en energía eléctrica.

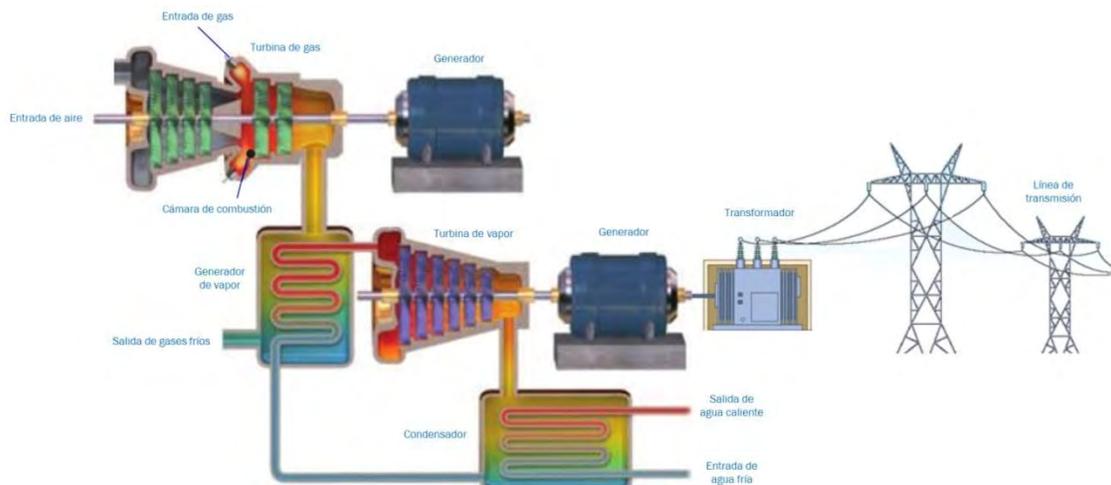


Figura I.9 Esquema de funcionamiento de una central de ciclo combinado.



Fuente: Los esquemas mostrados (figuras I.2 a I.9) han sido tomados de los *Recursos Didácticos de Endesa Educa, Grupo Enel*.

I.1.1.1 Infraestructura de generación.

Según datos del *Informe anual 2015* de la Comisión Federal de Electricidad, la capacidad de generación proviene de diez tipos de centrales: vapor (combustóleo y gas), carboeléctrica, geotermoeléctrica, ciclo combinado, turbogás, combustión interna, hidroeléctrica, eoloeléctrica, nucleoeeléctrica y solar fotovoltaica.

A diciembre de 2015, la infraestructura de generación estaba integrada por 188 centrales, con 1 020 unidades de generación. En conjunto, la capacidad instalada era de 54 852.2 Megawatts (MW).

En la siguiente tabla se muestra la capacidad efectiva de generación nacional, hasta diciembre del 2015, así como el número de centrales, unidades y porcentaje de participación de cada uno de los tipos de centrales de generación con las que cuenta el país.

Tabla I.1 Capacidad efectiva de generación.					
Generador	Tipo de central	Capacidad efectiva (MW)	Número de Centrales y de Unidades		Participación porcentual
			Centrales	Unidades	
CFE	Hidroeléctrica	12 027.8	62	176	21.9
	Vapor (Combustóleo y gas)	11 398.6	21	72	20.8
	Ciclo combinado	7 578.3	15	68	13.8
	Carboeléctrica	5 378.4	3	15	9.8
	Turbogás	2 736.5	41	94	5.0
	Geotermoeléctrica	873.6	4	40	1.6
	Combustión interna	303.9	7	56	0.5
	Eoloeléctrica	86.3	3	8	0.2
	Solar fotovoltaica	6.0	2	2	0.0
	Nucleoeeléctrica	1 510.0	1	2	2.8
Total CFE		41 899.4	159	533	76.4
Productores Independientes de Energía (PIE)	Ciclo combinado	12 339.9	23	77	22.5
	Eoloeléctrica	612.9	6	410	1.1
Total PIE		12 952.8	29	487	23.6
Total		54 852.2	188	1 020	100

Fuente: Informe Anual 2015, Comisión Federal de Electricidad. Cifras redondeadas. Incluye plantas móviles.

I.1.2 TRANSMISIÓN.

Los sistemas de transmisión de energía eléctrica son lo que se encargan de transportar la energía desde las plantas de generación hasta los centros de distribución.

I.1.2.1 Componentes de un sistema de transmisión.

- **Subestación elevadora.**

Para transmitir la energía de manera eficiente, es necesario elevar los niveles de voltaje que se alcanzan en las plantas generadoras (al elevar la tensión, se reduce la corriente que circula por un conductor eléctrico, reduciéndose también las pérdidas por efecto Joule). Los transformadores elevadores de estas subestaciones son los que realizan dicho procedimiento. Posterior a la elevación del voltaje de generación, la energía se canaliza a las líneas de transmisión.

Efecto Joule. Es el efecto que describe la pérdida de energía en forma de calor cuando una corriente eléctrica atraviesa un conductor.

La corriente eléctrica es el flujo de carga (electrones) a través de un material. Para que este flujo se genere, la fuerza de rozamiento mecánico debe ser mayor que la fuerza que se opone al flujo de electrones, lo que produce la disipación de energía en forma de calor.

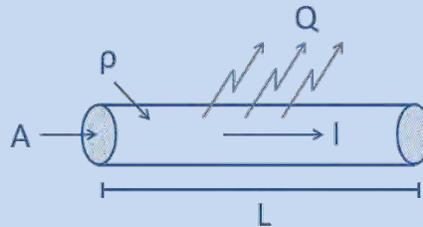


Figura I.10 Efecto Joule.

Matemáticamente:

$$P = I^2 R$$

La cantidad de calor disipado debido al paso de corriente eléctrica es proporcional al cuadrado de la intensidad (I) por la resistencia (R) del material. A su vez, la resistencia de un conductor eléctrico se define como el producto de la resistividad del material (ρ) por la longitud del conductor entre su área, es decir: $R = \rho \frac{L}{A}$

- **Líneas de transmisión.**

Las líneas de transmisión se componen, básicamente, de tres elementos: conductores, aisladores y estructuras de soporte.

De acuerdo con su longitud, las líneas de transmisión se clasifican en:

a. *Líneas cortas.*

Las líneas cortas tienen una longitud de hasta 80 km y operan con voltajes no mayores a 40 kV.

b. *Líneas medias.*

Las líneas medias tienen una longitud comprendida entre 80 y 240 km y pueden operar con voltajes de hasta 220 kV.

c. *Líneas largas.*

Las líneas largas tienen una longitud superior a 240 km y operan a más de 220 kV.

Los **conductores** recorren varios kilómetros y pueden estar contruidos de acero y aluminio o cobre. En su mayoría, los conductores que se utilizan son cables de aluminio trenzados alrededor de cables de acero, tal como se observa en la figura I.11. El aluminio es un excelente conductor de electricidad, sin embargo, es un material frágil; de ahí la función del acero (un material que posee alta resistencia tanto eléctrica como mecánicamente) que es proporcionar soporte a los conductores de aluminio. Los cables descritos son conocidos como *cables de aluminio desnudo con núcleo de acero*, o bien, conductores ACSR (*Aluminum Conductors Steel Reinforced*).

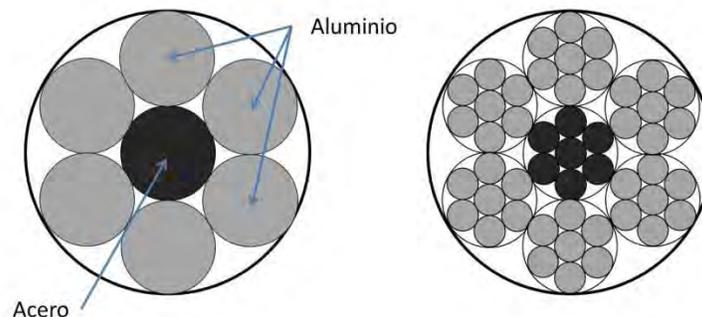


Figura I.11 *Conductor tipo ACSR.*

Se prefiere el uso de conductores ACSR por encima de los conductores de cobre trenzados debido a que el cobre necesario para cubrir las distancias de las líneas de transmisión incrementa el costo de éstas. Además, considerando el mismo valor de resistencia, los conductores de aluminio son más ligeros que los de cobre.



Pueden utilizarse diferentes tipos de conductores para fases e hilos de guarda. Los hilos de guarda son los cables sin tensión que van colocados por encima de las líneas de transmisión; éstos sirven para proteger a las estructuras de soporte (torres de transmisión) y los conductores de fase ante descargas atmosféricas que pudiesen interrumpir la continuidad del suministro de energía.

Fabricados de porcelana, vidrio o materiales sintéticos, los **aisladores** en la línea de transmisión tienen la función de sujetar los conductores a la estructura de soporte; a la vez que proporcionan aislamiento eléctrico a ambos elementos, separando el alto potencial en línea de transmisión de la torre al potencial de tierra.

<< Los aisladores no sólo soportan el peso de los conductores, corrientes de aire, cargas de hielo, entre otras varias fuerzas mecánicas, sino también soportan rayos ultravioleta, lluvia y niebla ácida, polvo y altos campos eléctricos continuos. >>¹

Las **torres de transmisión** son el sistema de estructuras que tiene como función sostener y mantener la distancia entre los cables de transmisión aérea de energía eléctrica, así como sujetar a los cables de guarda por encima de los cables de transmisión. Pueden variar en forma y tamaño, según el nivel de voltaje que transportan.

Algunas torres con funciones básicas, sólo soportan la carga de los cables y la fuerza del viento, están alineadas entre sí; estas estructuras se denominan *Torres de suspensión*. Por su parte, las torres que, además de soportar las cargas fundamentales, también soportan las cargas que genera su disposición, ya que su función es hacer cambios de dirección en la línea; estas estructuras se conocen como *Torres de deflexión*. Otro tipo de torres, que también soportan cargas fundamentales, tienen como función evitar el desperfecto de estructuras que pueda ocasionar la falla de otras estructuras, estas torres reciben el nombre de *Torres de atraque*. La primer y última torre de la línea de transmisión, las cuales soportan carga de un solo extremo, se designan como *Torres de remate*.

I.1.2.2 Infraestructura de transmisión.

La Comisión Federal de Electricidad opera con dos niveles de tensión en líneas de transmisión:

Tabla I.2 Niveles de tensión en líneas de transmisión.
400 kV
230 kV

Fuente: Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional, Secretaría de Energía.

¹ Zhangang, Yang., Hongbing, Li., Huaxing, Yu., Liang, Yu., Jixiang, Wu., Jiamin, Wu., Xianjun, Cui., Bin, Wu., Jing, Zhang. *Simulation of Electric Field Around Insulators in High Voltage Line.*

Según datos del *Informe anual 2015* de la Comisión Federal de Electricidad, al cierre de 2015, el sistema de transmisión de la CFE contaba con una capacidad instalada en operación de 166 279.6 Megavolts Ampere (MVA), en 486 subestaciones de potencia. Para transportar la energía eléctrica de un punto a otro, contaba con 57 784.51 kilómetros de líneas de transmisión, con un manejo de energía anual de aproximadamente 265 350 Gigawatts hora (GWh).



Figura I.12 Componentes de una línea de transmisión.

I.1.3 SUBTRANSMISIÓN.

El sistema de subtransmisión es abastecido por el sistema de transmisión y está conformado por líneas y subestaciones destinadas a suministrar energía al sistema de distribución, al igual que a los consumidores industriales que trabajen a niveles de voltaje de subtransmisión.

I.1.3.1 Infraestructura de subtransmisión.

La Comisión Federal de Electricidad opera en líneas de subtransmisión con los niveles de tensión mostrados en la tabla I.3.

Tabla I.3 Niveles de tensión en líneas de subtransmisión.				
161 kV	138 kV	115 kV	85 kV	69 kV

Fuente: Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional, Secretaría de Energía.



I.1.4 DISTRIBUCIÓN.

El sistema de distribución, tema de interés en este trabajo, canaliza la energía desde los puntos de transmisión hasta los consumidores finales.

El nivel de voltaje de transmisión se disminuye en una subestación reductora, ubicada cerca de los centros de consumo. Al contrario del caso del sistema de transmisión, son los transformadores reductores los que realizan este procedimiento. El voltaje de la subestación va desde 66 kV hasta 230 kV.

Partiendo de la subestación y hasta los consumidores finales, la energía eléctrica se distribuye en dos etapas. Por lo que, el sistema de distribución se divide en tres sectores fundamentales: *subestación de distribución, distribución primaria y distribución secundaria.*

- **Subestación de distribución.**

Generalmente, una subestación de distribución cuenta con los siguientes elementos:

- Transformadores.
- Cortacircuitos.
- Interruptores.
- Relevadores y dispositivos de protección.
- Reactores limitadores de corriente.
- Transformadores de instrumento.

Como ya se mencionó, los **transformadores de subestación** se localizan al final de la línea de transmisión y tienen la tarea de reducir los niveles de voltaje de transmisión a niveles de distribución.

Los **cortacircuitos** funcionan como interruptores que pueden abrir o cerrar, manual o automáticamente, cuando los valores nominales de corriente de línea, voltaje de línea o frecuencia, excedan sus valores máximos permitidos; de manera que detienen el flujo de corrientes de cortocircuito, evitando daños al equipo y a la línea de transmisión.

Los tipos más importantes de cortacircuitos son: Cortacircuitos de aceite, cortacircuitos de aire comprimido, cortacircuitos de hexafluoruro de azufre (SF_6) y cortacircuitos de vacío.

Aunque varían en su forma de extinguir arcos eléctricos y en su enfriamiento, básicamente, todos ellos funcionan por medio de un relevador de sobrecarga que puede detectar condiciones anormales en la línea. La bobina del relevador se conecta al secundario de un transformador de corriente (TC). El primario de dicho transformador conduce la corriente de línea de alguna de las fases. Si la corriente de línea excede su valor máximo permitido, la corriente en el secundario del

transformador hará que los contactos del interruptor se cierren. Al cierre, una fuente de corriente directa auxiliar energiza a la bobina de activación. El funcionamiento descrito puede observarse en la figura I.13.

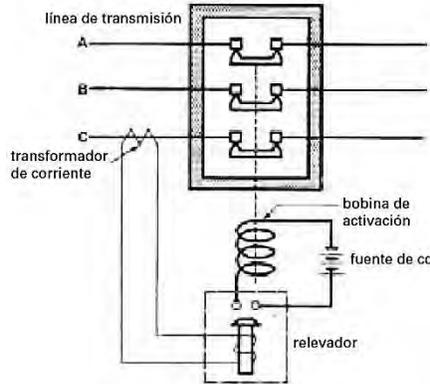


Figura I.13 Circuito básico de activación de un cortacircuito.
(Fuente: Wildi, Theodore. Máquinas eléctricas y sistemas de potencia)

Otros elementos de protección importantes son los **interruptores** y, en una subestación de distribución, los hay de diferentes tipos: *Interruptores de aire*, que pueden detener las corrientes de excitación de transformadores o las corrientes capacitivas de líneas de transmisión sin carga, pero no pueden interrumpir corrientes de carga. *Interruptores de desconexión*, que no pueden interrumpir una corriente, sino que se abren o cierran cuando la corriente es cero. Estos interruptores sirven para dar mantenimiento al sistema, pues permiten aislar cortacircuitos, transformadores, líneas de transmisión, etc., de una red activa. *Interruptores de conexión a tierra*, que abren o cierran sólo cuando se desenergizan líneas de transmisión. Estos interruptores de seguridad, que se utilizan mientras se realizan reparaciones al sistema, garantizan que una línea de transmisión esté efectivamente conectada a tierra.

Los **relevadores de protección contra sobrevoltajes**, mejor conocidos como *Pararrayos*, limitan los sobrevoltajes producidos por descargas atmosféricas que pueden dañar al equipo de la subestación. El extremo superior del relevador de protección está conectado a la línea a proteger; por su parte, el extremo inferior está firmemente conectado a tierra. De este modo, un pararrayos limita cualquier voltaje que sobrepase el nivel máximo permitido, derivando las descargas atmosféricas a tierra.

Normalmente, el bus o barra colectora de una subestación energiza a varios alimentadores, los cuales canalizan la energía eléctrica hacia los centros de consumo aledaños a la subestación. Como la impedancia de la barra colectora es muy baja, si llegase a ocurrir un cortocircuito en algún alimentador, las consecuencias pueden ser desastrosas. La corriente de cortocircuito del alimentador puede superar hasta cinco veces la capacidad de operación del cortacircuito, ocasionando su destrucción. Todo lo anterior resulta en una inminente e impetuosa explosión debida a la cantidad de energía liberada por el arco eléctrico.

Para evitar que esto suceda, los elementos que protegen al sistema en caso de que un alimentador se ponga en cortocircuito, son los **reactores limitadores de corriente**, que se conectan en serie con cada línea de alto voltaje. (Wildi, 2007, pp. 740 - 748)

- **Distribución primaria.**

La distribución primaria o sistema primario, es la parte del sistema de distribución que está entre la subestación de distribución y los transformadores de distribución.

Los transformadores de distribución reducen el voltaje de distribución (de 2.4 a 34.5 kV) hasta el voltaje final de consumo (110, 208, 220 V, etc.).

- **Distribución secundaria.**

La distribución o sistema secundario, es la parte del sistema de distribución que está entre los transformadores de distribución y los consumidores finales.

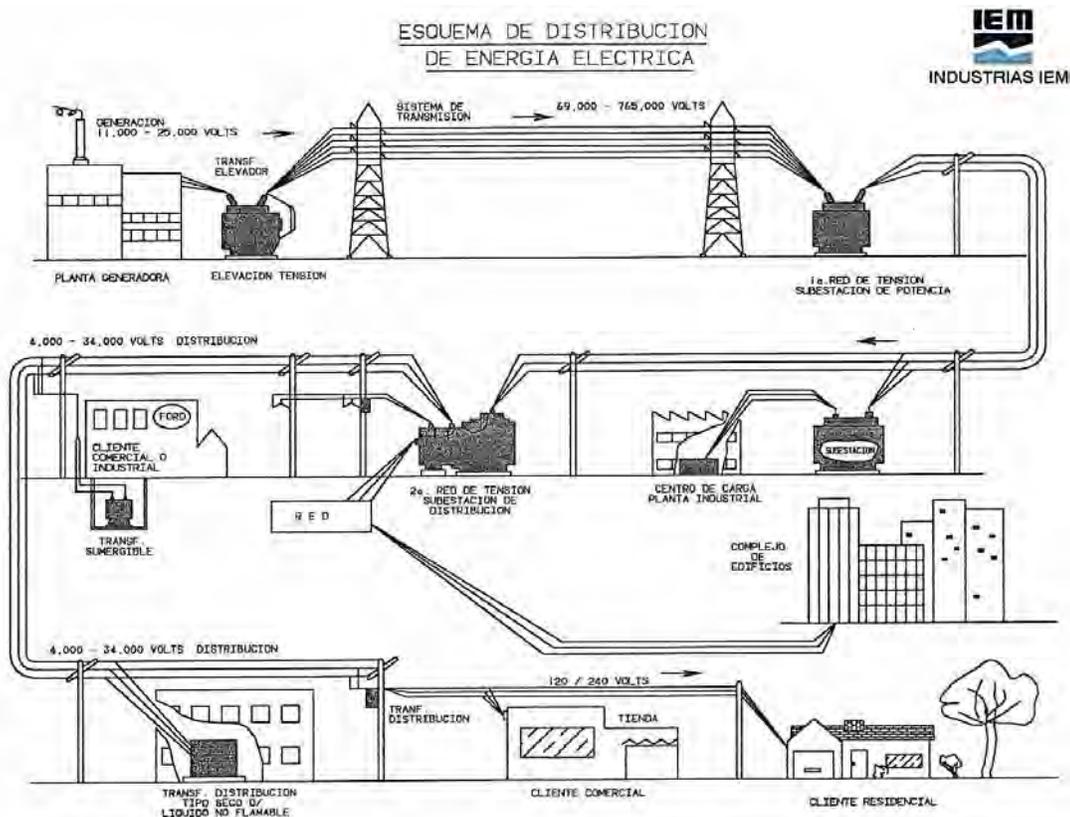


Figura I.14 Esquema de distribución de energía eléctrica. (Cortesía de Industrias IEM)

I.1.4.1 Arreglos de los sistemas de distribución.

Un arreglo en el sistema de distribución es la disposición física de las líneas de distribución de energía. A continuación analizaremos los principales arreglos de distribución.

- **Arreglo radial.**

En un arreglo radial, las líneas de distribución provienen directamente de la subestación.

Aunque estos arreglos son simples y económicos, ante un evento de falla en el sistema, todos los usuarios quedarían sin suministro eléctrico, razón por la cual este arreglo, tal cual, no se implementa. El mismo principio aplica en un sistema donde dos líneas radiales se conectan en paralelo, a fin de mantener el suministro de energía en caso de que se presente alguna falla en el sistema.

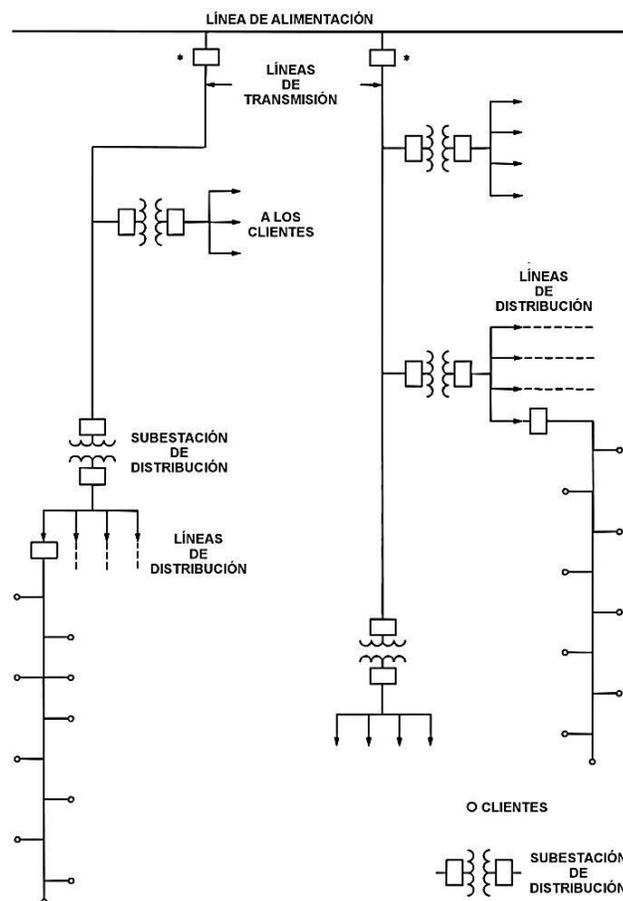


Figura I.15 Arreglo de distribución radial.

- **Arreglo en malla.**

En este arreglo la red se encuentra interconectada; la energía puede fluir desde distintos alimentadores. Como podemos observar en la figura I.16, esta disposición requiere más equipo que el arreglo radial, por lo que se incrementa su costo, pero también su confiabilidad. Los switches alrededor de la malla tienen la función de retirar una parte de la línea de servicio para que, en caso de falla, ésta pueda repararse sin interrumpir el suministro de energía a los consumidores.

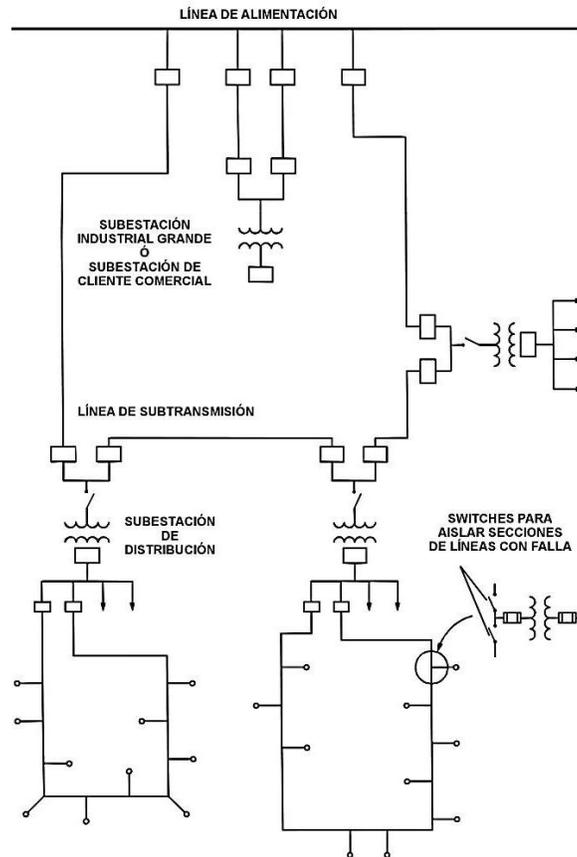


Figura I.16 Arreglo de distribución en malla.

Fuente: Las figuras I.15 y I.16 han sido tomadas de *Manual Eléctrico Viakon, Sistemas y redes de distribución.*

- **Arreglo en red.**

Este arreglo consiste en líneas secundarias en bóvedas subterráneas, con transformadores alimentando a la red, cada una o dos cuadradas. Esta disposición tiene como objetivo proporcionar un servicio altamente confiable a las áreas con gran densidad de carga, tales como: centros de ciudades, centros comerciales o centros de autoservicio.



I.1.4.2 Infraestructura de distribución.

La Comisión Federal de Electricidad opera en líneas de distribución con los niveles de tensión mostrados en la tabla I.4.

Tabla I.4 Niveles de tensión en líneas de distribución.
34.5 kV
23 kV
13.8 kV
6.6 kV

Fuente: Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional, Secretaría de Energía.

Según datos del *Informe anual 2015* de la Comisión Federal de Electricidad, al cierre de 2015, el sistema eléctrico de distribución de la CFE contaba con una capacidad instalada en operación de 55 464 Megavolts Ampere (MVA) en 1 922 subestaciones de potencia. Para distribuir la energía eléctrica a la población, contaba con 828 653 kilómetros de líneas de tensiones alta, media y baja, así como con alrededor de 1.42 millones de transformadores de distribución. Las cifras mencionadas se detallan en la tabla I.5.

Tabla I.5 Instalaciones de distribución.		
Instalación	Unidad	Cifra
Subestaciones	Número	1 922
Capacidad instalada	Megavolts Ampere	55 464
Líneas de alta tensión		52 327
Líneas de media tensión	Kilómetros	454 747
Líneas de baja tensión		321 579
Transformadores de distribución	Número	1 420 380

Fuente: Informe Anual 2015, Comisión Federal de Electricidad. Cifras redondeadas.

CAPÍTULO II
SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA



Como se mencionó en el Capítulo I, el sistema de distribución canaliza la energía eléctrica desde la subestación reductora hasta los consumidores finales y se divide, en su forma más simple, en tres sectores fundamentales: subestación de distribución, distribución primaria y distribución secundaria. Sin embargo, como muestra la tabla II.1, al sistema de distribución lo integran en total cinco sectores:

Sistema de Distribución	
Subestación de distribución	Es el sector que se encarga de reducir los niveles de voltaje provenientes de la línea de transmisión a niveles de distribución (de 2.3 a 34.5kV). Este proceso se realiza con transformadores reductores.
Distribución primaria	Son las redes que operan desde 1000 a 34 500 volts. En México, específicamente con voltajes de 6.6 kV, 13.2 kV, 13.8 kV, 23 kV o 34.5 kV.
Transformador de distribución	Es el transformador que reduce el nivel de voltaje de distribución al nivel de voltaje que utilizan los usuarios: 110, 208, 220 V.
Distribución secundaria	Son las redes que operan de 0 a 1000 volts. En México, generalmente, la red de distribución secundaria es trifásica de cuatro hilos de 115 a 127 volts de línea a neutro y de 200 a 220 volts entre líneas.
Medidores y acometidas	Las acometidas son las instalaciones que conectan la red de distribución secundaria hasta los usuarios finales; pasando a través del medidor de energía, el cual tiene la tarea de cuantificar y registrar el consumo de energía del usuario al que está conectado.

Tabla II.1 *Partes que integran al sistema de distribución.*

A continuación, se explican los aspectos más importantes del sistema de distribución de energía eléctrica, haciendo hincapié en las redes de distribución aéreas.

II.1 CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN.

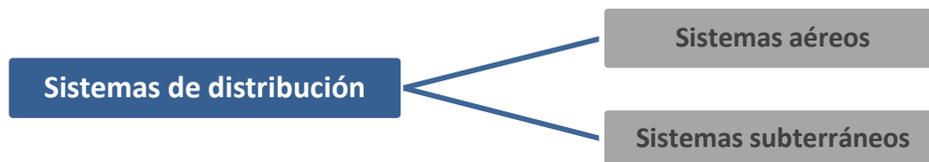


Figura II.1 *Clasificación de los sistemas de distribución.*



II.1.1 SISTEMAS AÉREOS.

En los sistemas aéreos, la distribución primaria y secundaria se realiza a través de postes de concreto y acero, donde también se ubican los transformadores de distribución.

Las redes de distribución aéreas son las más utilizadas en México. Aunque son menos costosas que las redes subterráneas, el riesgo de fallas en el suministro aumenta debido a condiciones atmosféricas como: lluvia, granizo, viento, polvo, sismos, lluvia ácida, rayos ultravioleta, gases contaminantes, descargas atmosféricas, etc. Otros factores de riesgo son: el contacto con ramas de árbol, vandalismo, choques automovilísticos, etc.

II.1.2 SISTEMAS SUBTERRÁNEOS.

En los sistemas subterráneos, la distribución primaria y secundaria se oculta bajo el suelo; no obstante, en algunas ocasiones los transformadores de distribución se instalan al nivel del suelo.

Un sistema subterráneo es mucho más confiable, pues los factores ambientales de riesgo del sistema aéreo no afectan al sistema subterráneo. Cabe mencionar que este sistema es más estético; sin embargo, también es casi 10 veces más costoso que un sistema aéreo equivalente.

Existen sistemas mixtos, en los cuales: la distribución primaria se realiza en postes y la distribución secundaria se realiza bajo tierra.

Para cualquiera de los sistemas, los principales objetivos son:

- Brindar al cliente un servicio continuo.
- Mantener la tensión de suministro a los consumidores dentro de los límites establecidos por la normativa vigente ($\pm 5\%$), a fin de que sus aparatos operen eficientemente.
- Establecer un equilibrio técnico y económico.
- Dimensionar las instalaciones considerando cargas futuras al sistema a un costo mínimo de operación.



II.2 CARACTERÍSTICAS DE LA CARGA.

El factor de diseño más importante de las redes de distribución es la carga, puesto que es el factor que determina la regulación, caídas de tensión y capacidad de conducción de los elementos constitutivos de la red.

El término *carga* se refiere a la cantidad de potencia demandada al sistema eléctrico y sus características son:

- Define el diseño de la red.
- Predice el valor de la demanda máxima.
- Normalmente se estima de manera estadística, con base en mediciones de redes similares.
- Varía de forma dinámica: no es constante.
- Depende del desarrollo de tecnologías modernas; cargas nuevas (computadoras, pantallas, videojuegos, etc.) ocasionan que los perfiles se modifiquen constantemente.

II.2.1 CLASIFICACIÓN DE LAS CARGAS.

Las cargas se clasifican según la demanda de potencia que presentan las instalaciones eléctricas durante el transcurso del día. De acuerdo con este criterio, se reconocen tres tipos de carga:

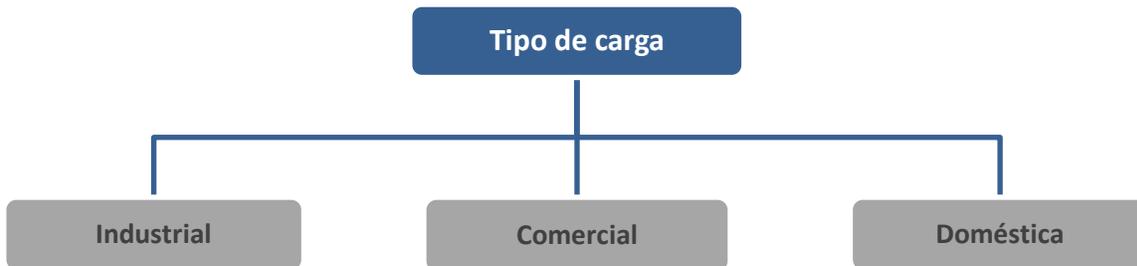


Figura II.2 *Clasificación de las cargas.*

II.2.1.1 Industrial.

Comprende a los grandes consumidores de energía eléctrica que normalmente reciben suministro eléctrico en alta tensión.

En la figura II.3 se puede observar que el perfil de carga industrial se mantiene casi constante durante el mediodía.

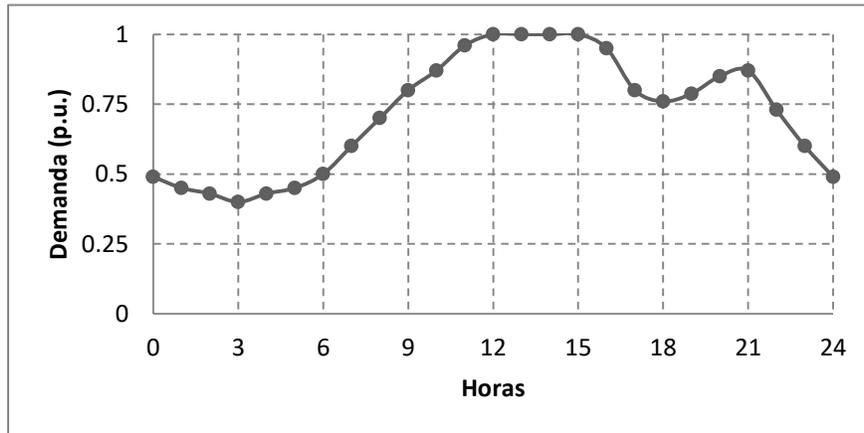


Figura II.3 Perfil de carga Industrial.

II.2.1.2 Comercial.

Integra a los sistemas de energía ubicados dentro de grandes complejos comerciales: bancos, escuelas, supermercados, aeropuertos, edificios, hospitales, centros comerciales, etc. Cada sistema tiene sus propias características, según lo exija la seguridad de las personas y los bienes que corresponden a cada uno. En consecuencia, en este tipo de carga, es indispensable contar con fuentes de respaldo que operen en caso de emergencia.

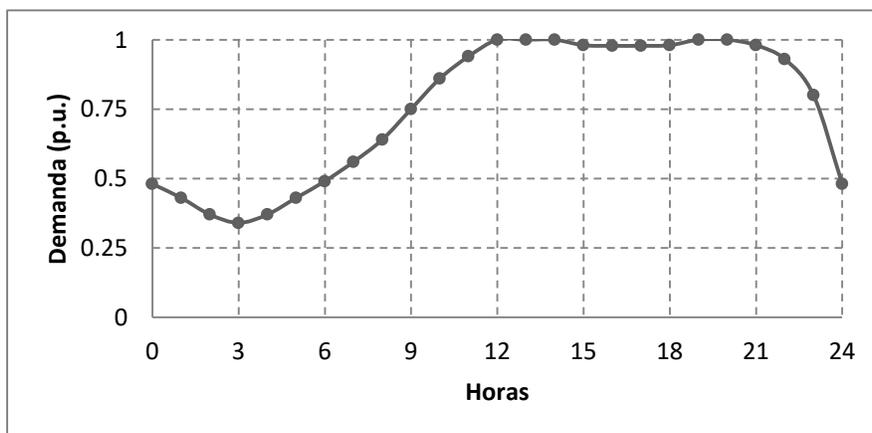


Figura II.4 Perfil de carga Comercial.

En la figura II.4 se puede apreciar que la carga comercial se mantiene aproximadamente al mismo nivel a lo largo del día.



II.2.1.3 Doméstica.

También llamada *carga residencial*, es la demanda de potencia destinada a alimentar poblaciones.

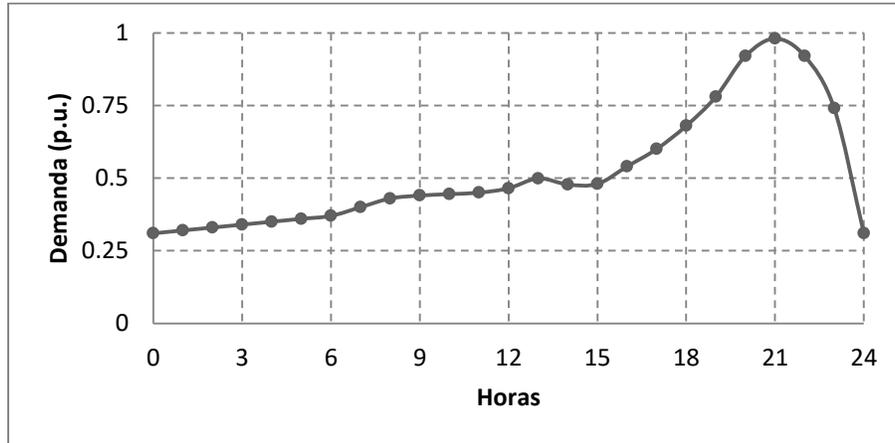


Figura II.5 Perfil de carga Doméstica.

En la figura II.5 se puede distinguir que el máximo de demanda es a las 21 hrs. Generalmente, el horario estelar de los canales de televisión.

II.3 PARÁMETROS FUNDAMENTALES EN REDES DE DISTRIBUCIÓN.

II.3.1 CAÍDA DE TENSIÓN Y REGULACIÓN.

Uno de los parámetros que determina la calidad de la energía eléctrica es el voltaje, esta es la razón por la que sus rangos de variación son valores estandarizados.

Todo equipo eléctrico está diseñado para operar a una tensión determinada. Su funcionamiento y tiempo de vida depende, en gran medida, de que dicho parámetro no varíe de forma considerable. Este rango de variación se conoce como *Regulación de voltaje*.

La Comisión Federal de Electricidad establece que:

- En media tensión, la regulación de voltaje no debe exceder de $\pm 1\%$ en condiciones normales de operación.
- En baja tensión, el porcentaje de caída de tensión debe ser, como máximo, de $\pm 5\%$ en sistemas trifásicos y $\pm 3\%$ en sistemas monofásicos.



En términos simples, la caída de tensión es la diferencia entre el voltaje en el extremo emisor y el voltaje en el extremo receptor de una línea. Por su parte, la regulación de voltaje es el valor, expresado en porcentaje, que determina la relación entre la tensión nominal a la que operan los equipos eléctricos y el nivel de tensión del suministro eléctrico.

Los otros aspectos que evalúan la calidad de la energía son la continuidad del servicio, la frecuencia constante, la forma senoidal y el defasamiento de 120° entre fases.

II.3.2 CONCEPTO DE IMPEDANCIA.

<< La impedancia de un dispositivo se define como la relación entre el voltaje fasorial que actúa a través de él y la corriente fasorial que fluye a través de él. >>²

Como los transformadores cambian los niveles de voltaje y corriente, cambia la relación entre ambos parámetros y, con esto, la impedancia.

Entonces, la impedancia del transformador de distribución está determinada por la magnitud de la regulación de tensión y la corriente de cortocircuito que fluye por los devanados del transformador cuando se presentan fallas en la red de distribución secundaria; una baja impedancia del transformador involucra altas corrientes de cortocircuito, y una alta impedancia involucra bajas corrientes; además, una baja impedancia da una mejor regulación que una alta impedancia.

En la *especificación CFE – K0000-01*, la Comisión Federal de Electricidad establece los valores de impedancia en función de la tensión del devanado primario de los transformadores de distribución:

Tabla II.2 Porcentaje de impedancia de los transformadores de distribución, según su nivel de voltaje primario.	
Tensión (kV)	Impedancia (%)
8.7 – 15	2.00 – 3.00
25	2.00 – 3.25
34.5	2.00 – 3.50

Fuente: Yebra Morón, Juan Antonio. *Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica*. 2009

Los valores de impedancia mostrados se miden a corriente y frecuencia nominales, a 85°C o 75°C , según corresponda. (Yebra Morón, 2009)

² Chapman, Stephen J. *Máquinas Eléctricas*.



II.3.3 PÉRDIDAS.

El sector energético sufre una cuantiosa pérdida de energía en los sistemas de distribución. Propiamente, las pérdidas de energía se describen como aquella energía eléctrica generada y transportada, que finalmente no corresponde a la energía que los consumidores remuneran. Esto sucede por la energía que se pierde entre los procesos de transmisión y distribución, o debido a que se ha suministrado ilegalmente; estas dos causas clasifican a las pérdidas de energía en *técnicas* y *no técnicas*.

Las pérdidas técnicas se refieren a la pérdida de energía en forma de calor, corrientes parásitas o por fenómenos de histéresis, propia de los componentes del sistema eléctrico, que aunque pueden reducirse, no es posible evitarlas.

La Comisión Federal de Electricidad establece que en sistemas de media y baja tensión, las pérdidas técnicas no deben ser mayores al 2%.

Por su parte, las pérdidas no técnicas es aquella energía suministrada cuyo costo no se solventa, ya sea por fallas en los equipos de medición, deficiencias administrativas de los proveedores de electricidad, el robo de energía al manipular los equipos que registran el consumo de electricidad, o bien, por las interferencias intencionales en la red de distribución.

II.4 TRANSFORMADORES.

Un transformador es un dispositivo eléctrico estático, que funciona de acuerdo al principio de inducción electromagnética de Faraday. Transfiere energía eléctrica de un circuito de corriente alterna a otro, elevando o reduciendo los valores de voltaje o corriente, manteniendo, en los dos casos, el valor de frecuencia constante.

Además de los transformadores de potencia que se han mencionado anteriormente, existen otros tipos de transformadores conocidos como *transformadores de instrumento*. Estos elementos tienen propósitos especiales que aplican con equipo eléctrico y en sistemas de potencia.

Los transformadores de instrumento se clasifican en *transformadores de potencial* y *transformadores de corriente*. Ambos, trabajan en conjunto con los dispositivos de protección, equipo de control e instrumentos de medición de las subestaciones; que al no poder soportar los niveles de tensión y corriente del sistema de potencia, se valen de los transformadores de instrumento para reducir a escala dichas magnitudes y hacer posible su medición.



- **Transformadores de potencial.**

Su función es reducir los valores de tensión del sistema a valores suficientemente bajos y directamente proporcionales al voltaje primario.

Los transformadores de potencial están diseñados para operar con niveles de corriente considerablemente más bajos que con los que trabajan los transformadores de potencia.

- **Transformadores de corriente.**

Proveen una corriente secundaria en fase pero mucho más pequeña y directamente proporcional a su corriente primaria. En otras palabras, toman la corriente de línea para reducirla a un nivel seguro y medible por los equipos antes mencionados.

II.4.1 TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN.

En el caso del transformador de distribución, es el dispositivo considerado como el punto de enlace entre las redes de distribución primaria y secundaria, ya que su tarea es reducir el nivel de voltaje de distribución al nivel de voltaje que utilizan los usuarios finales: 110, 208, 220 V.

Dependiendo de su aplicación, los transformadores de distribución pueden clasificarse en transformadores de distribución aérea y de distribución subterránea. Según su tipo de enfriamiento y medio aislante, se clasifican en transformadores sumergidos en aceite o transformadores tipo seco. Considerando su número de fases, también es posible clasificarlos en monofásicos y trifásicos.

Los transformadores de distribución aérea están diseñados para montarse en poste, para alimentar sistemas de distribución aérea. En cambio, los transformadores de distribución subterránea están diseñados para montarse en pedestal de concreto, para alimentar sistemas de distribución parcial o totalmente subterráneos; o bien, para ser montados en bóvedas subterráneas, para alimentar sistemas subterráneos. En la figura II.6 pueden observarse algunos ejemplos de estos transformadores.



Tipo poste trifásico.



Tipo pedestal trifásico.



Tipo sumergible trifásico.



Tipo poste monofásico.



Tipo pedestal monofásico.



Tipo sumergible monofásico.

Figura II.6 Tipos de transformadores de distribución sumergidos en aceite.
(Cortesía de Industrias IEM)

II.4.2 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS.

Los datos necesarios para especificar cualquier transformador son:

- **Número de fases.**

Depende del suministro de energía eléctrica disponible; el cual se determina según el tipo de carga a alimentar, pudiendo ser monofásica o trifásica.

- **Capacidad.**

Es la potencia nominal del transformador. Este valor depende de la carga del usuario; la carga del usuario, su vez, depende de la capacidad de los aparatos conectados a la red.

- **Frecuencia.**

Este valor debe ser igual al del sistema de generación.



- **Voltaje.**

Depende de la tensión de suministro en el lado primario del transformador y de la tensión de alimentación requerida por los aparatos y equipo eléctrico de los usuarios conectados al lado secundario.

- **Medio aislante y tipo de enfriamiento.**

Pueden ser tipo seco o sumergidos en aceite. Los transformadores tipo seco son aislados y enfriados con aire; los sumergidos en aceite usan dicho líquido como medio aislante y de enfriamiento.

- **Aislamiento.**

Se determina en función del voltaje nominal de cada devanado y es un valor establecido por el fabricante, a menos que el cliente especifique un valor especial.

- **Conexiones.**

Ambos devanados del transformador se pueden conectar en cualquiera de las conexiones conocidas. Algunas conexiones originan un desplazamiento del ángulo de fase entre las tensiones primaria y secundaria. Por ejemplo, la conexión delta – estrella produce un defasamiento de 30° .

- **Elevación de temperatura.**

Es el incremento de temperatura que se produce sobre el ambiente cuando el transformador trabaja con carga nominal en condiciones normales de operación.

- **Altura de operación.**

Es el dato de los metros sobre el nivel del mar al que el transformador fue diseñado para operar.

- **Características eléctricas.**

Establecen datos primarios como: porcentaje de impedancia, nivel básico de impulso, posición del tap central y número total de taps, etc.

<< El tap o cambiador de derivaciones es un medio para suministrar la tensión nominal al usuario, independientemente de la caída de tensión del sistema. >>³

- **Características mecánicas.**

Son los datos necesarios para manejar e instalar al transformador: peso, dimensiones, litros de líquido aislante, presión interna máxima, etc.

³ Yebra Morón, Juan Antonio. *Sistemas Eléctricos de Distribución*.



• **Equipo complementario.**

Pueden ser datos de medidores de flujo, nivel de aceite, de temperatura, etc., que son útiles para monitorear el funcionamiento óptimo del transformador.

Los parámetros mencionados siempre se exhiben en la placa de datos del transformador, tal como muestran los ejemplos de las figuras II.7 y II.8.

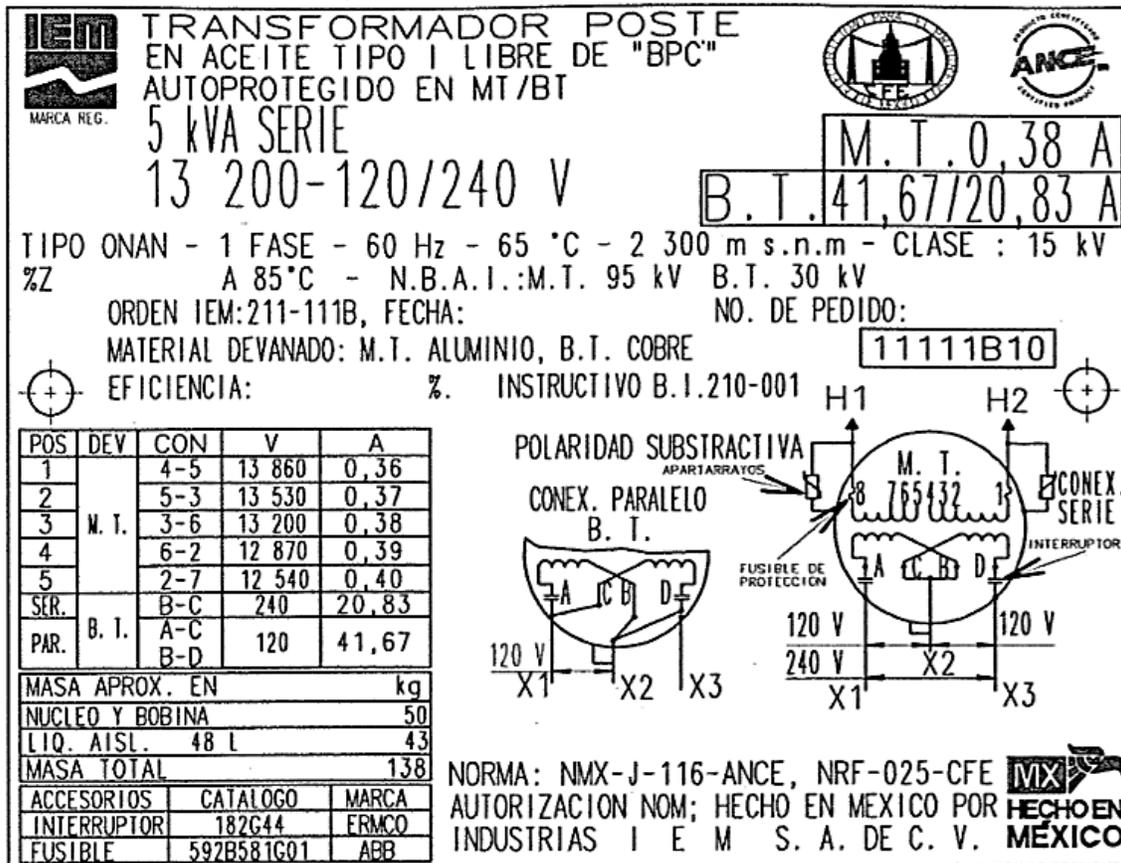


Figura II.7 Placa de datos de un transformador de distribución tipo poste monofásico.

(Cortesía de Industrias IEM)





TRANSFORMADOR TIPO PEDESTAL TRIFASICO



75 kVA

13 200 - 220Y/127 V

65°C ELEVACION DE TEMPERATURA A PLENA CARGA CONTINUA A 2 300 m s.n.m.

TIPO "ONAN" EN ACEITE *LIBRE DE BPC*

%Z A 85°C 60 Hz

LIQUIDO AISLANTE: 457 L

SERIE: ORDEN IEM: 259-344BX LIQUIDO AISLANTE: 457 L

INSTRUCTIVO B.1. 210-001; N°. PEDIDO: FECHA:

NIVEL BASICO DE AISLAMIENTO AL IMPULSO: MEDIA TENSION: 95 kV BAJA TENSION: 30 kV

MASA APROX. EN kg LIQUIDO AISLANTE 411 TANQUE 478 NUC-BOB. 323 TOTAL 1 212

EFICIENCIA %

SECCIONADOR RADIAL MEDIA TENSION

DIAGRAMA VECTORIAL

CONEXIONES

DEVANADO	V	A	CAMBIADOR DERIVACIONES		
			POS.	CONEC.	EN CADA FASE
MEDIA TENSION EN DELTA	13 860	3,12	1	4	CON 5
	13 530	3,20	2	5	CON 3
	13 200	3,28	3	3	CON 6
	12 870	3,36	4	6	CON 2
	12 540	3,45	5	2	CON 7
BAJA TENSION EN ESTRELLA	220Y/127	196,82	_____		

LAS CONEXIONES DE LAS DERIVACIONES DE MEDIA TENSION SON HECHAS POR UN CAMBIADOR OPERADO DESDE EL EXTERIOR DEL TANQUE. EL TRANSFORMADOR DEBE ESTAR DESCONECTADO DE LA LINEA AL CAMBIAR DERIVACION.

FUSIBLE	MARCA	CLASE (kV)	ESTILO
EXPULSION	GENERAL ELECTRIC	15,5	9F54LFC050
LIMITADOR CORRIENTE	COOPER	15,5	3544040M61M

DEV.	MATERIAL
M. T.	COBRE
B. T.	ALUMINIO

TRANSFORMADOR DISEÑADO Y FABRICADO BAJO NORMA NMX-J-285-2005-ANCE.

HECHO EN AUT. NOM.

MÉXICO HECHO EN MEXICO POR INDUSTRIAS IEM, S.A. DE C.V. **59344BX10-3**

Figura II.8 Placa de datos de un transformador de distribución tipo pedestal trifásico.

(Cortesía de Industrias IEM)

II.5 APLICACIÓN DE CAPACITORES.

II.5.1 POTENCIA ELÉCTRICA Y FACTOR DE POTENCIA.

A la potencia demandada por la componente resistiva de un circuito de corriente alterna, se le conoce como *Potencia real* o *Potencia activa*; a la demandada por la componente reactiva, como *Potencia reactiva*; y a la suma vectorial de las dos, como *Potencia aparente*. La relación descrita se puede apreciar en el triángulo de potencias ilustrado en la figura II.9.

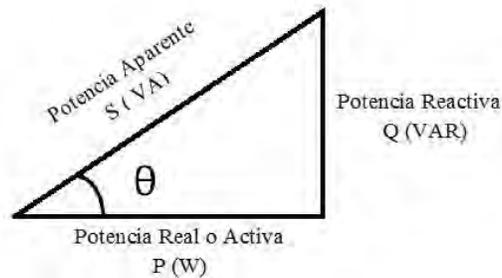
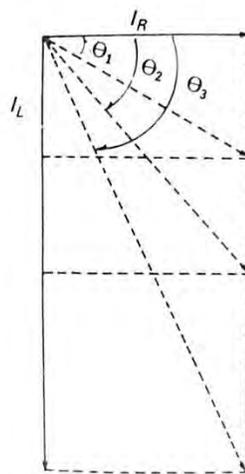


Figura II.9 *Triángulo de potencias.*

El factor de potencia (FP) se define como la relación entre la potencia real y la potencia aparente, por lo que se expresa como:

$$FP = \cos \theta = \frac{P}{S}$$



θ	F.P.
0°	1.0
10°	0.9848
20°	0.9396
30°	0.8660
40°	0.7660
50°	0.6427
60°	0.5000

Figura II.10 *Relación entre la corriente reactiva y la corriente activa para diferentes factores de potencia.*



En la figura II.10 es posible analizar que, manteniendo el mismo valor de corriente activa (I_R), cuanto mayor sea la corriente reactiva de tipo inductivo (I_L), mayor es el ángulo θ y, por consiguiente, más bajo el factor de potencia. Un factor de potencia bajo implica un alto consumo de corriente reactiva; lo que resulta en pérdidas excesivas y sobrecargas, tanto en los equipos eléctricos como en las líneas de transmisión y distribución. Esto puede generar la necesidad de cables de transporte de mayor calibre y, por supuesto, más costosos. Incluso, sería necesario invertir en nuevos equipos de generación y transformación si la potencia demandada llegase a sobrepasar la capacidad de los equipos existentes. Es por ello que las compañías de distribución de energía eléctrica estipulan cargos de penalización por bajo factor de potencia.

La Comisión Federal de Electricidad establece, conforme a las relaciones mostradas en la tabla II.3, una tarifa de penalización cuando el FP es menor al 90%, o bien, una bonificación cuando el FP es mayor a dicho porcentaje.

Tabla II.3 Tarifas debidas a una variación del factor de potencia		
Concepto	Fórmula	% Máximo aplicable
Bonificación (FP > 90%)	$\frac{1}{4} \left[1 - \left(\frac{90}{FP} \right) \right] \times 100$	2.5
Penalización (FP < 90%)	$\frac{3}{5} \left[\left(\frac{90}{FP} \right) - 1 \right] \times 100$	120

Fuente: Factor de Potencia, Comisión Federal de Electricidad.

II.5.1.1 Medición del factor de potencia.

Dependiendo de los instrumentos de medición utilizados, se tienen cuatro métodos para medir el factor de potencia:

- **Wattmetro, ampermetro y voltmetro.**

Las lecturas instantáneas de potencia (W), voltaje (V) y corriente (A) de los instrumentos permiten calcular el factor de potencia al usar las siguientes fórmulas:

En un sistema monofásico:

$$FP = \frac{P}{VI} \quad \text{donde:} \quad \begin{array}{l} V \text{ es la tensión al neutro.} \\ I \text{ es la corriente de línea.} \end{array}$$

En un sistema trifásico:

$$FP = \frac{P}{\sqrt{3} \times VI} \quad \text{donde:} \quad \begin{array}{l} V \text{ es la tensión entre fases.} \\ I \text{ es la corriente de línea.} \end{array}$$

El diagrama de conexiones de la figura II.11 muestra la disposición de los instrumentos mencionados para realizar esta medición.

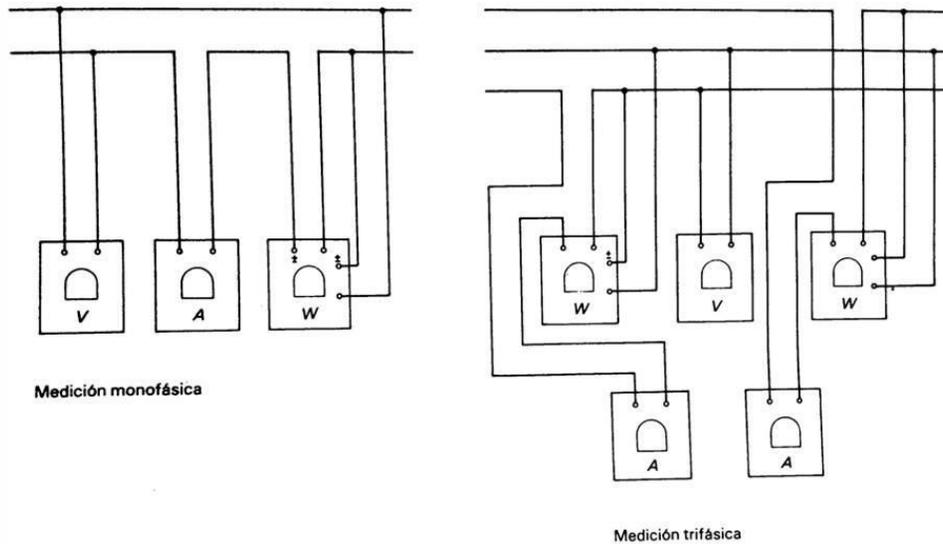


Figura II.11 *Medición de potencia.*

- **Wattorímetro, ampermetro y voltmetro.**

En este método, la potencia activa se calcula al contar las revoluciones del disco del wattorímetro durante un periodo específico y conociendo la constante del medidor (K_h).

$$P = \frac{3600 \text{ revoluciones } (K_h)}{\text{Tiempo (en segundos)}}$$

Posteriormente, con el promedio de las lecturas del ampermetro y del voltmetro, en ese mismo periodo, se calcula el factor de potencia, según sea el caso de un sistema monofásico o un sistema trifásico, utilizando las fórmulas descritas en el método anterior.

- **Wattorímetro y varhorímetro.**

Las lecturas mensuales de ambos instrumentos permiten calcular el factor de potencia, en el periodo seleccionado, por medio de la fórmula:

$$FP = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}$$

- **Wattmetro y medidor del factor de potencia.**

Este método proporciona el valor del factor de potencia sin necesidad de realizar cálculos.



II.5.2 COMPENSACIÓN DE POTENCIA REACTIVA.

En los sistemas eléctricos se pueden considerar dos tipos de cargas: cargas resistivas y cargas reactivas. Las cargas resistivas toman corrientes que se encuentran en fase con la tensión aplicada a las mismas, es por esto que la energía eléctrica que consumen se transforma por completo en trabajo mecánico, en calor, o en cualquier otra forma de energía no retornable a la red eléctrica; estas corrientes se conocen como *Corrientes activas*. Las cargas reactivas, idealmente, toman corrientes que se encuentran defasadas 90° respecto a la tensión aplicada y, por consiguiente, la energía eléctrica que las alimenta, se almacena en forma de un campo eléctrico o magnético y regresa a la red de energía; las corrientes de este tipo se conocen como *Corrientes reactivas*.

En las líneas de transmisión y distribución, transformadores, motores de inducción, equipos de soldadura, etc., la corriente que toman del sistema de energía está formada por dos componentes: la corriente activa y la *corriente magnetizante* o corriente reactiva, que es la que alimenta a los circuitos magnéticos de los equipos eléctricos. En el caso particular de las redes de distribución, la corriente reactiva necesaria para energizar los circuitos magnéticos de los transformadores es de carácter inductivo; está defasada 90° en retraso con respecto a la tensión.

Para realizar la compensación de potencia reactiva, y con ello elevar el factor de potencia, son empleados dos métodos:

- **Utilización de capacitores síncronos.**

El capacitor síncrono es una máquina síncrona funcionando como motor síncrono. Este tipo de motores está diseñado únicamente para controlar el factor de potencia. Suelen ser de gran tamaño y son capaces de proporcionar una cantidad elevada de potencia reactiva, tanto de carácter capacitivo como inductivo, según sea necesario; también pueden mejorar la estabilidad de las líneas de transmisión en el régimen transitorio. Aunque son considerados como una ayuda que mejora el factor de potencia, no constituyen una forma de compensación fácilmente controlable pues, cualquier motor síncrono se opera sobreexcitado para poder corregir el factor de potencia, lo que requiere una gran corriente y flujo de campo, que conllevan a un calentamiento significativo del rotor; su mantenimiento es bastante costoso.

- **Utilización de bancos de capacitores.**

Los bancos de capacitores proporcionan la potencia reactiva de tipo capacitiva que sea necesaria para compensar la potencia reactiva de tipo inductiva (requerida por motores, transformadores, etc.), mejorando el factor de potencia.

El uso de bancos de capacitores, comparado con los otros métodos de compensación de potencia reactiva, tiene grandes ventajas a un bajo costo por kVAr instalado; son de fácil operación y de mantenimiento sencillo y económico. Éste es el motivo de la aceptación universal que han tenido los capacitores de potencia en todos los sistemas de distribución de energía eléctrica. (Yebra, 1987)



II.5.2.1 Bancos de capacitores.

Los capacitores son dispositivos formados por dos placas conductoras, separadas por un elemento dieléctrico, que almacenan carga eléctrica al aplicar una diferencia de potencial entre sus terminales.

En los sistemas eléctricos se utilizan grupos de capacitores de potencia con arreglos serie – paralelo, mejor conocidos como *Bancos de capacitores*, con la finalidad de suministrar la capacidad de potencia reactiva necesaria para mantener el factor de potencia lo más próximo a la unidad y así, evitar la instalación de equipo de mayor capacidad en caso de que un transformador o un alimentador trabaje sobrecargado, o bien, si se debe adicionar carga a un generador que se encuentre operando a su capacidad nominal.

Además, al mejorar el factor de potencia de la carga se consigue:

- Liberar una cierta capacidad (en kVA) del sistema.
- Reducir las pérdidas por efecto Joule, principalmente en las líneas.
- Reducir las pérdidas de potencia.
- Elevar los niveles de tensión y, por lo tanto, mejorar la regulación.

Habitualmente, los capacitores de potencia o de alta tensión están sumergidos en líquidos dieléctricos, dentro de un tanque cerrado herméticamente y sus terminales salen al exterior a través de boquillas de porcelana.

II.6 PROTECCIÓN DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN.

Las redes de distribución aéreas están expuestas a una serie de contingencias, que pueden o no tener origen en la misma red, capaces de interferir en la continuidad del suministro de energía eléctrica. Los choques automovilísticos contra postes de distribución, la caída de ramas sobre las líneas, el viento, los sismos, el vandalismo, las descargas atmosféricas y los cortocircuitos son algunos ejemplos.

En los sistemas de distribución, ya sean aéreos o subterráneos, existen dos problemas básicos, que requieren soluciones a fin de disminuir el riesgo de interrupción del suministro de energía: las *sobretensiones y sobrecorrientes*.

Para reducir el número de circuitos que queden fuera de servicio en caso de falla y, por lo tanto, restringir el número de usuarios afectados, es indispensable cumplir con los requerimientos mínimos de suministro de potencia eléctrica, los cuales son:

- Disponer de conductores con calibre apropiado.
- Conocer el nivel básico de aislamiento del sistema.
- Conocer las características de la carga, incluyendo el máximo valor de carga conectada.



- Conocer el orden de los valores de corrientes de arranque.
- Planear las instalaciones considerando cargas futuras.

El nivel básico de aislamiento del sistema tiene que ser lo suficientemente alto como para soportar las condiciones normales de operación sin sufrir flameos, por lo que el material aislante debe poder operar a altas temperaturas.

Para minimizar el tiempo de falta de suministro eléctrico y la extensión de la falla misma, se deben implementar ciertas medidas:

- Disponer de circuitos opcionales que entren en operación para suplir a los circuitos que se encuentren en falla.
- Tener capacidad de reserva instalada en transformadores.
- Disponer de elementos capaces de discernir condiciones de falla interna de fenómenos de energización, como el arranque de motores y la puesta en marcha de transformadores.
- Disponer de dispositivos de acción rápida.
- Contar con una adecuada coordinación de protecciones.

II.6.1 PROTECCIÓN CONTRA SOBRECORRIENTES.

Tanto en sistemas de potencia como en instalaciones industriales, se debe determinar el valor de las corrientes de cortocircuito para hacer una selección adecuada del equipo de protección y la coordinación de éste. Se entiende por cortocircuito a una falla que demanda una corriente excesiva en el punto donde se produce.

<< Hay dos aspectos que se deben considerar al seleccionar una adecuada protección de sobrecorriente en un sistema de distribución. La primera es diseñar y mantener las instalaciones de tal forma que el sistema tenga un mínimo de fallas y la segunda es minimizar su efecto. >> ⁴

Si se presenta una falla permanente, este sistema de protección debe soportar las altas corrientes de arranque que ocurrirán simultáneamente después de una prolongada salida del circuito de distribución, permitiendo que el circuito pueda estabilizarse sin abrirse de nuevo, pues cuando se restablece el servicio, casi siempre, los motores de industrias y viviendas arrancan al mismo tiempo.

⁴ Yebra Morón, Juan Antonio. *Sistemas Eléctricos de Distribución*.

II.6.1.1 Protección con relevadores.

Los relevadores son dispositivos que accionan un interruptor si se producen condiciones anormales en el sistema, con el propósito de aislar fallas. Estos dispositivos realizan su función auxiliándose de señales de tensión y corriente derivadas de transformadores de instrumento.

El relevador de sobrecorriente que más se utiliza en la industria eléctrica es el que se basa en el principio del disco de inducción. El mismo principio es aplicado en los wathhorímetros de corriente alterna. Los componentes principales de este tipo de relevadores se muestran en la figura II.12. El disco se monta en una flecha rotatoria tensada por un resorte y el contacto móvil está sujeto a la flecha. El par en el disco se produce al circular corriente por el electroimán, dicho flujo induce una corriente en el disco; la interacción de las corrientes crea un par que hace girar al disco y este movimiento cierra o abre los contactos del relevador. El resorte restrictor regresa la flecha a su posición normal cuando el relevador es desenergizado.

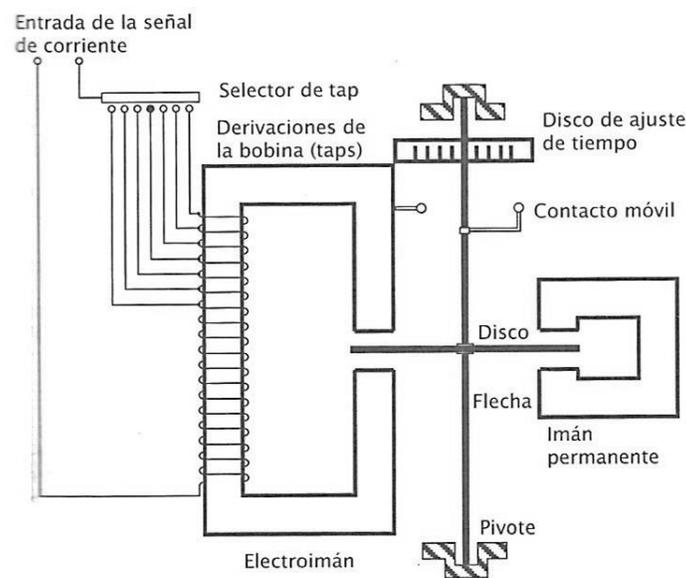


Figura II.12 Esquema del relevador de inducción magnética.
(Fuente: Yebra Morón, Juan Antonio. *Sistemas Eléctricos de Distribución*)

II.6.1.2 Protección con fusibles.

El fusible es un dispositivo de protección que opera cuando una sobrecorriente pasa a través de él. Su función es aislar la parte del circuito donde se presenta una falla del resto del alimentador y así impedir el daño a los equipos instalados en éste. Los fusibles se diseñan para fundirse antes de que la corriente de cortocircuito alcance su valor pico.



Estos dispositivos están fabricados con elementos de baja temperatura de fusión, como el estaño; o con elementos de alta temperatura de fusión, como la plata y el cobre.

- **Fusibles de expulsión.**

El elemento fusible está elaborado de materiales que producen gases capaces de desionizar al arco eléctrico que acciona al fusible. Algunos de los materiales citados son: fibra, melamina, ácido bórico y tetracloruro de carbono. Los gases desionizantes impiden el restablecimiento del arco eléctrico, pues aumentan la rigidez dieléctrica del aire encapsulado dentro del tubo.

Al producirse la falla, el elemento fusible se funde y emite gases que se acumulan dentro del tubo, comprimiendo y enfriando al arco eléctrico dentro del tubo mismo. Los gases producidos escapan al exterior por los extremos del tubo.

- **Fusibles limitadores de corriente.**

Su función en el sistema de distribución es proteger a transformadores y bancos de capacitores.

Un fusible limitador de corriente consiste, básicamente, de uno o más alambres de plata dentro de una cápsula tubular llena de arena. El elemento fusible se enrolla a lo largo de una pequeña columna de un material resistente a la temperatura. Cuando se presenta una falla, el elemento fusible se funde casi instantáneamente y el arco resultante cede su energía a la arena que lo rodea, esta energía funde la arena convirtiéndola en un material cristalino llamado fulgurita, a la vez que se extingue la corriente de cortocircuito. (Yebra, 2009)

II.6.1.3 Protección con restauradores.

Los restauradores son dispositivos capaces de distinguir entre fallas temporales y permanentes. Ante fallas temporales, da repetidas oportunidades a que la falla pueda suprimirse por sí sola o sea eliminada por los dispositivos de protección secundarios. En caso de que la falla no sea eliminada, el restaurador mantiene sus contactos abiertos definitivamente.

Los restauradores están diseñados para interrumpir cualquiera de las fases simultáneamente con suficiente rapidez para proteger conductores y equipo.

Este es el dispositivo que, cuando se interrumpe el suministro de energía, causa varios encendidos momentáneos de los aparatos electrodomésticos y la iluminación de las viviendas, para luego volver a la normalidad o quedar sin energía eléctrica indefinidamente.



II.6.1.4 Protección con seccionadores.

Este dispositivo es capaz de conectar y desconectar circuitos de distribución cuando tienen, o no, carga conectada. Además de aislar la falla, también confina la zona afectada a la mínima extensión, por lo que sólo resultan perjudicados los usuarios ubicados dentro de la zona citada.

<< Básicamente, un seccionador es un dispositivo de apertura y cierre de un circuito eléctrico, que abre sus contactos automáticamente mientras el circuito está desenergizado por la operación de un interruptor o un restaurador. Debido a que el seccionador no está diseñado para interrumpir corrientes de falla, se utiliza siempre en serie con un dispositivo de interrupción. >>⁵

La función principal del seccionador es proteger a los alimentadores, a la vez que reduce las áreas que quedan fuera de servicio en caso de que se presente una falla.

II.6.1.5 Coordinación de protecciones.

Para tener el menor número posible de circuitos fuera de servicio en condiciones de falla y así reducir al mínimo el número de usuarios afectados, además de seleccionar los elementos de protección adecuados y ubicarlos convenientemente, es necesario fijar el criterio de operación, de tal forma que sean accionados coordinadamente.

La coordinación de los dispositivos de protección contra sobrecorriente se la de la siguiente manera:

- **Coordinación fusible – fusible.**

Se selecciona un fusible de “protección” que es el encargado de resguardar al equipo y a la carga. Este fusible de “protección” se coordina con otro fusible de “respaldo”. El fusible de “respaldo” debe evitar que transcurra el 75% del tiempo mínimo de fundición del fusible de “protección” para evitar que este último resulte dañado.

- **Coordinación fusible – restaurador.**

El restaurador debe ajustarse para dos operaciones rápidas y dos lentas. En la primera operación eliminará un 80% de las fallas temporales, en la segunda un 10%. Antes de la tercera operación el fusible se debe fundir para eliminar fallas permanentes.

Para establecer la coordinación entre el restaurador y el fusible se utilizan dos condiciones: la primera, establece el máximo punto de coordinación y la segunda, el mínimo. El punto máximo de coordinación es la corriente correspondiente al punto de intersección entre la curva mínima de fundición del fusible y la curva rápida de máxima eliminación del restaurador. Por el contrario, el punto de mínima coordinación se obtiene al intersectar la curva de máxima fundición del fusible

⁵ Yebra Morón, Juan Antonio. *Sistemas Eléctricos de Distribución*.



con la curva lenta del restaurador. Si estas curvas no se intersectan, el punto de mínima coordinación es la mínima corriente de disparo del restaurador.

- **Coordinación restaurador – restaurador.**

Al igual que en la coordinación fusible – fusible se emplean dos restauradores: uno de “respaldo” y uno de “protección” con la misma secuencia de operación.

- **Coordinación restaurador – seccionador.**

Este arreglo es común en redes de distribución urbanas con alta densidad de carga. En principio, la coordinación se hace en forma semejante a la de restaurador – restaurador; pero en este caso, se instala un seccionador como “protección” y un restaurador como “respaldo”.

II.6.2 PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES.

Las sobretensiones que se presentan en un sistema de distribución se pueden clasificar, por su origen, en: internas y externas. Las sobretensiones de origen interno se deben principalmente a la operación de dispositivos de desconexión, a fallas monofásicas y a fenómenos de ferresonancia. Las de origen externo se deben principalmente a contacto directo de líneas de alta tensión y a descargas atmosféricas.

Las sobretensiones por operación de interruptores y de equipo de desconexión son de corta duración y alcanzan valores de dos a tres veces la tensión de operación del sistema.

Las sobretensiones por fenómenos de ferresonancia se presentan en sistemas trifásicos de tres hilos con transformadores con neutro aislado, por lo que la solución a este problema se da empleando sistemas trifásicos de cuatro hilos con transformadores con neutro conectado a tierra.

Las sobretensiones por contacto directo de líneas de alta tensión con otros circuitos, originan la falla de los elementos aislados a la menor tensión, propiciando la operación del equipo de protección y el aislamiento de la falla.

Las sobretensiones por descargas atmosféricas son las de menor duración, pero también son las más severas. Para proteger los equipos contra estas sobretensiones se utilizan *Apartarrayos*.



II.6.2.1 Protección con apartarrayos.

Básicamente, un apartarrayos es un dispositivo limitador de sobretensiones transitorias en líneas de distribución originadas por descargas atmosféricas.

El apartarrayos consiste en un entrehierro y una válvula. El entrehierro aísla la línea de la tierra bajo condiciones normales de operación, y la válvula es capaz de derivar corrientes transitorias a tierra; además, proporciona una alta impedancia a la corriente que sigue al transitorio.

Estos apartarrayos se ven sujetos a dos tensiones: la tensión de operación del sistema y las sobretensiones producidas por ondas viajeras. Bajo condiciones normales de operación el entrehierro permite que pase una mínima corriente a tierra; pero si se produce una sobretensión el aire del entrehierro se ioniza y cuando finalmente se genera el arqueo, la resistencia del entrehierro se hace cero y la corriente transitoria fluye a tierra. Ante esta condición la válvula presenta poca resistencia, a fin de permitir que la corriente transitoria fluya libremente. Después de que el transitorio se ha filtrado a tierra, la tensión de la válvula regresa a su nivel normal y la impedancia se eleva, quedando listo el apartarrayos para iniciar otro ciclo de operación. (Yebera, 2009)

CAPÍTULO III

PROPUESTA DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO



U.N.A.M.	Ingeniería Eléctrica Electrónica
F.E.S. Aragón	
Laboratorio de Sistemas de Distribución	

PRÁCTICA 1

CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA CON CAPACITORES

1. OBJETIVOS.

- a) Observar el comportamiento del factor de potencia del motor de inducción de jaula de ardilla cuando opera en vacío y con carga.
- b) Realizar la compensación de potencia reactiva para la corrección del factor de potencia en un motor de inducción trifásico.

2. INTRODUCCIÓN.

Hoy en día, la mayoría de las aplicaciones industriales tienen algunos medios para implementar la corrección del factor de potencia. Esto debido a que casi en cualquier aplicación, muchas cargas y motores tienden a absorber una cantidad sustancial de potencia reactiva de la red de alimentación de CA, lo que disminuye el factor de potencia. Esta situación es indeseable, ya que los proveedores de electricidad establecen costos mayores a los consumidores que tienen un factor de potencia significativamente menor que la unidad.

Por lo tanto, para evitar que su factura de electricidad incremente a causa de un bajo factor de potencia, es común para los gerentes de aplicaciones industriales con alta demanda de potencia reactiva que agreguen algunos medios para suministrar la potencia reactiva requerida y así, incrementar el factor de potencia de nuevo a la unidad. Esta técnica es llamada *Corrección del factor de potencia*. La corrección del factor de potencia se consigue, generalmente, al añadir capacitores a la aplicación industrial. Estos capacitores se ajustan para suministrar la cantidad exacta de potencia reactiva necesaria para restaurar el factor de potencia unitario.

La corrección del factor de potencia se implementa comúnmente en aplicaciones con cargas inductivas variables.

Triángulo de potencias.

Las potencias real, reactiva y aparente suministradas a una carga se relacionan por medio del triángulo de potencias. En la figura 1.1 se muestran dos triángulos de potencias, para el caso de cargas inductivas y capacitivas.

Normalmente, la cantidad $\cos \theta$ se conoce como el *factor de potencia* de una carga. Éste se define como la fracción de la potencia aparente (S) que en realidad suministra potencia real a la carga. Entonces:

$$FP = \cos \theta$$

donde θ es el ángulo de impedancia de la carga.

Recordemos que $\cos \theta = \cos (-\theta)$. Así, el factor de potencia producido por un ángulo de impedancia de $+30^\circ$ es exactamente el mismo que el factor de potencia producido por un ángulo de impedancia de -30° . Debido a que no se puede saber si una carga es inductiva o capacitiva tan solo por el factor de potencia, por lo general se define si la corriente va adelante o con retraso con respecto al voltaje cuando se hace referencia a un factor de potencia.

El triángulo de potencias clarifica las relaciones entre la potencia real, la potencia reactiva, la potencia aparente y el factor de potencia.

- La *potencia real* (P) representa la potencia que suministran las cargas conectadas; es la potencia que en el proceso de transformación de la energía eléctrica, se aprovecha como trabajo.

Se representa por medio de la siguiente ecuación y sus unidades son Watts (W).

$$P = VI \cos \theta [W]$$

- La potencia que se intercambia de manera continua entre la fuente y la carga, se conoce como *potencia reactiva* (Q). La potencia reactiva representa la energía que primero se almacena y luego se libera en el campo magnético de un inductor o en el campo eléctrico de un capacitor. Sus unidades son volts-amperes reactivos (var)

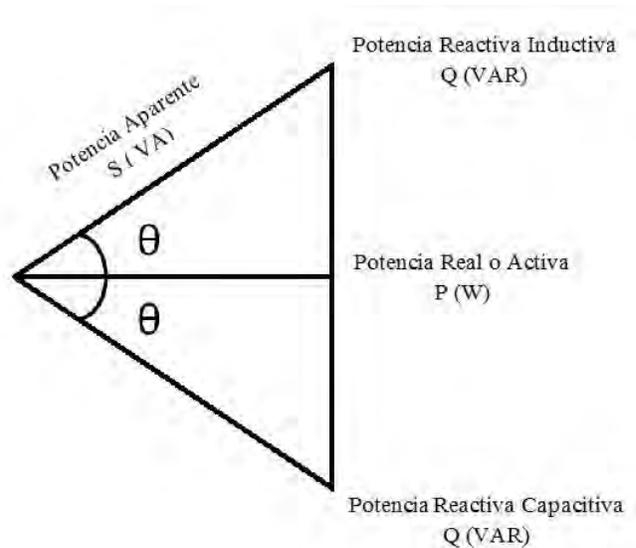


Figura 1.1 Triángulo de potencias.



La potencia reactiva de una carga está dada por:

$$Q = VI \text{ sen } \theta \text{ [var]}$$

Por convención, Q es positiva en el caso de cargas inductivas y negativa en el caso de cargas capacitivas, debido a que el ángulo de impedancia θ es positivo para cargas inductivas y viceversa.

- La potencia aparente (S) suministrada a una carga, se define como el producto de voltaje a través de la carga y la corriente en la carga. Es la potencia que “parece” ser suministrada a la carga si se ignoran las diferencias de ángulo de fase entre el voltaje y la corriente. Sus unidades son los volts-ampères (VA).

La potencia aparente de una carga está dada por:

$$S = VI \text{ [VA]}$$

El uso de bancos de capacitores para la corrección del factor de potencia.

La posibilidad de ajustar el factor de potencia de una o más cargas en un sistema puede afectar significativamente la eficiencia de operación del mismo. Como al reducirse el factor de potencia se incrementa la corriente, entonces se tiene también el correspondiente aumento de las pérdidas en conductores y transformadores. La mayoría de las cargas en un sistema de potencia normal son motores de inducción, por lo que casi invariablemente, los sistemas de potencia tienen un factor de potencia en retraso.

En la mayoría de los casos, la reactancia inductiva de una carga varía continuamente. Por ejemplo, esto sucede cuando motores o compresores están o no activos. En consecuencia, la variación de la demanda de potencia reactiva puede ser grande o pequeña, rápida o lenta, predecible o impredecible, dependiendo del tipo de aplicación.

Los dispositivos compensadores de potencia reactiva más utilizados son: capacitores, compensadores síncronos y motores síncronos sobreexcitados. Lo más común son los capacitores, ya que se utilizan desde los voltajes de distribución hasta los voltajes de baja tensión.

Corregir el factor de potencia en una aplicación industrial, donde la demanda de potencia reactiva varía con el tiempo, requiere de un capacitor cuya potencia reactiva también sea variable. Sin embargo, comercialmente, los capacitores variables de alta potencia no están disponibles. En sustitución, un banco de capacitores conmutados de diferentes valores de capacitancia se conecta en paralelo con la carga inductiva variable.

Dependiendo de la demanda de potencia reactiva, los capacitores se conectan o desconectan del sistema a fin de satisfacer dicha demanda de potencia reactiva, tanto como sea posible y así

mantener el factor de potencia lo más próximo a la unidad. Esto asegura que la mayoría de la potencia reactiva demandada por el sistema sea suministrada por los capacitores, por lo que prácticamente no hay potencia reactiva suministrada por el sistema de distribución. Entonces, desde el punto de vista del sistema de distribución, el factor de potencia de la aplicación industrial es muy cercano a uno.

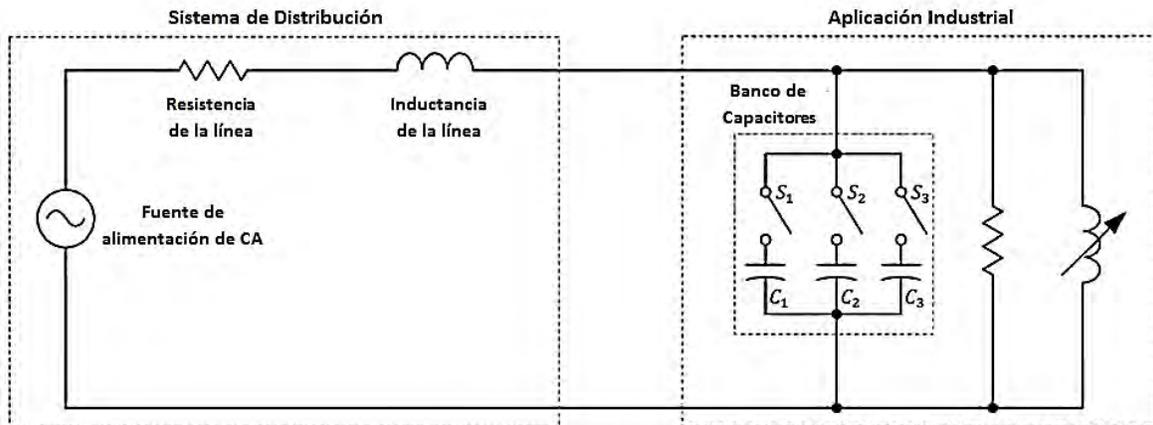


Figura 1.2 Un banco de capacitores de diferentes valores de capacitancia permite corregir el factor de potencia, incluso si varía la reactancia inductiva de la carga.

El montaje y operación de los bancos de capacitores es sencillo y su potencia se puede modificar reduciendo o aumentando el número de capacitores conectados en el banco. Cuando un capacitor se daña, es fácil sustituirlo por uno nuevo.



Figura 1.3 Banco de capacitores usado para la corrección del factor de potencia.



Método para el cálculo de la potencia del banco de capacitores.

Como se mencionó anteriormente, el factor de potencia es la relación entre la potencia activa y la potencia aparente; sin embargo, los equipos de medición de energía eléctrica miden el consumo de energía activa y reactiva, por lo que se prefiere utilizar el término $\tan \theta$ para determinar la capacidad de los bancos de capacitores.

En el triángulo de potencias de la figura 1.1 es posible observar que $\tan \theta$ es el cociente entre las potencias reactiva y activa consumidas en el mismo intervalo de tiempo, según refieran los equipos de medición.

La siguiente ecuación expresa la relación entre $\cos \theta$ y $\tan \theta$:

$$\tan \theta = \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \theta}}{\cos \theta}$$

La potencia reactiva (Q_C) que se necesita para la compensación se calcula a partir de la potencia activa (P) y ambas relaciones de factor de potencia; es decir, la conversión del factor de potencia existente en el sistema ($\tan \theta$) y la conversión del factor de potencia deseado ($\tan \theta'$):

$$Q_C = P(\tan \theta - \tan \theta')$$

Ejemplo: Calcule la capacidad del banco de capacitores que se requiere en una fábrica con 475 kW y un factor de potencia de 0.75, si se desea mejorar el factor de potencia de su instalación a 0.93.

Convirtiendo ambos factores de potencia:

$$\tan \theta = \frac{\sqrt{1 - (0.75)^2}}{0.75} = 0.882 \qquad \tan \theta' = \frac{\sqrt{1 - (0.93)^2}}{0.93} = 0.395$$

Sustituyendo valores:

$$Q_C = 475 \text{ kW} \left(0.882 \frac{\text{VAr}}{\text{W}} - 0.395 \frac{\text{VAr}}{\text{W}} \right)$$

$$Q_C = 475 \text{ kW} \left(0.487 \frac{\text{VAr}}{\text{W}} \right)$$

$$Q_C = 231.325 \text{ kVAr}$$

La potencia del banco de capacitores debe ser de 231.325 kVAr para cualquier valor nominal de tensión del sistema.



Un método más sencillo consiste en utilizar una tabla que sirve para encontrar el coeficiente K y así, determinar la potencia del banco de capacitores. También proporciona la equivalencia entre $\cos \theta$ y $\tan \theta$, por lo que resulta innecesario realizar la conversión del cálculo anterior.

El coeficiente K se obtiene cruzando el valor del factor de potencia existente en el sistema y el valor del factor de potencia deseado (ver figura 1.4). Posteriormente, el coeficiente K encontrado se multiplica por la potencia activa del sistema:

$$Q_c = P(K)$$

Utilizando los datos del ejemplo anterior, la metodología descrita y la tabla de la figura 1.4, el coeficiente $K = 0.487$, por lo tanto:

$$Q_c = 475 \text{ kW} \left(0.487 \frac{\text{VAr}}{\text{W}} \right)$$
$$Q_c = 231.325 \text{ kVAr}$$



Factor de potencia antes de la compensación (Valor existente)		Coeficiente "K" ($\tan \theta - \tan \theta'$) a multiplicar por la potencia instalada para alcanzar el factor de potencia deseado										
		0,9	0,91	0,92	0,93	0,94	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	1
	$\cos \varphi$	0,48	0,46	0,43	0,40	0,36	0,33	0,29	0,25	0,20	0,14	0,00
	$\tan \varphi$	0,48	0,46	0,43	0,40	0,36	0,33	0,29	0,25	0,20	0,14	0,00
0,4	2,29	1,805	1,832	1,861	1,895	1,924	1,959	1,998	2,037	2,085	2,146	2,288
0,41	2,22	1,742	1,769	1,798	1,831	1,840	1,896	1,935	1,973	2,021	2,082	2,225
0,42	2,16	1,681	1,709	1,738	1,771	1,800	1,836	1,874	1,913	1,961	2,002	2,164
0,43	2,1	1,624	1,651	1,680	1,713	1,742	1,778	1,816	1,855	1,903	1,964	2,107
0,44	2,04	1,558	1,585	1,614	1,647	1,677	1,712	1,751	1,790	1,837	1,899	2,041
0,45	1,98	1,501	1,532	1,561	1,592	1,626	1,659	1,695	1,737	1,784	1,846	1,988
0,46	1,93	1,446	1,473	1,502	1,533	1,567	1,600	1,636	1,677	1,725	1,786	1,929
0,47	1,88	1,397	1,425	1,454	1,485	1,519	1,532	1,588	1,629	1,677	1,758	1,881
0,48	1,83	1,343	1,370	1,400	1,430	1,464	1,467	1,534	1,575	1,623	1,684	1,826
0,49	1,78	1,297	1,326	1,355	1,386	1,420	1,453	1,489	1,530	1,578	1,639	1,782
0,5	1,73	1,248	1,276	1,303	1,337	1,369	1,403	1,441	1,481	1,529	1,590	1,732
0,51	1,69	1,202	1,230	1,257	1,291	1,323	1,357	1,395	1,435	1,483	1,544	1,686
0,52	1,64	1,160	1,188	1,215	1,249	1,281	1,315	1,353	1,393	1,441	1,502	1,644
0,53	1,6	1,116	1,144	1,171	1,205	1,237	1,271	1,309	1,349	1,397	1,458	1,600
0,54	1,56	1,075	1,103	1,130	1,164	1,196	1,230	1,268	1,308	1,356	1,417	1,559
0,55	1,52	1,035	1,063	1,090	1,124	1,156	1,190	1,228	1,268	1,316	1,377	1,519
0,56	1,48	0,996	1,024	1,051	1,085	1,117	1,151	1,189	1,229	1,277	1,338	1,480
0,57	1,44	0,958	0,986	1,013	1,047	1,079	1,113	1,151	1,191	1,239	1,300	1,442
0,58	1,4	0,921	0,949	0,976	1,010	1,042	1,073	1,114	1,154	1,202	1,263	1,405
0,59	1,37	0,884	0,912	0,939	0,973	1,005	1,039	1,077	1,117	1,165	1,226	1,368
0,6	1,33	0,849	0,878	0,905	0,939	0,971	1,005	1,043	1,083	1,131	1,192	1,334
0,61	1,3	0,815	0,843	0,87	0,904	0,936	0,97	1,008	1,048	1,096	1,157	1,299
0,62	1,27	0,781	0,809	0,836	0,87	0,902	0,936	0,974	1,014	1,062	1,123	1,265
0,63	1,23	0,749	0,777	0,804	0,838	0,87	0,904	0,942	0,982	1,030	1,091	1,233
0,64	1,2	0,716	0,744	0,771	0,805	0,837	0,871	0,909	0,949	0,997	1,058	1,200
0,65	1,17	0,685	0,713	0,74	0,774	0,806	0,84	0,878	0,918	0,966	1,007	1,169
0,66	1,14	0,654	0,682	0,709	0,743	0,775	0,809	0,847	0,887	0,935	0,996	1,138
0,67	1,11	0,624	0,652	0,679	0,713	0,745	0,779	0,817	0,857	0,905	0,966	1,108
0,68	1,08	0,595	0,623	0,65	0,684	0,716	0,75	0,788	0,828	0,876	0,937	1,079
0,69	1,05	0,565	0,593	0,62	0,654	0,686	0,72	0,758	0,798	0,84	0,907	1,049
0,7	1,02	0,536	0,564	0,591	0,625	0,657	0,691	0,729	0,766	0,811	0,878	1,020
0,71	0,99	0,508	0,536	0,563	0,597	0,629	0,663	0,701	0,741	0,783	0,85	0,992
0,72	0,96	0,479	0,507	0,534	0,568	0,6	0,634	0,672	0,721	0,754	0,821	0,963
0,73	0,94	0,452	0,48	0,507	0,541	0,573	0,607	0,645	0,685	0,727	0,794	0,936
0,74	0,91	0,425	0,453	0,48	0,514	0,546	0,58	0,618	0,658	0,7	0,767	0,909
0,75	0,88	0,398	0,426	0,453	0,487	0,519	0,553	0,591	0,631	0,673	0,74	0,882
0,76	0,86	0,371	0,399	0,426	0,46	0,492	0,526	0,564	0,604	0,652	0,713	0,855
0,77	0,83	0,345	0,373	0,4	0,434	0,466	0,5	0,538	0,578	0,62	0,687	0,829
0,78	0,8	0,319	0,347	0,374	0,408	0,44	0,474	0,512	0,552	0,594	0,661	0,803
0,79	0,78	0,292	0,32	0,347	0,381	0,413	0,447	0,485	0,525	0,567	0,634	0,776
0,8	0,75	0,266	0,294	0,321	0,355	0,387	0,421	0,459	0,499	0,541	0,608	0,75
0,81	0,72	0,24	0,268	0,295	0,329	0,361	0,395	0,433	0,473	0,515	0,582	0,724
0,82	0,7	0,214	0,242	0,269	0,303	0,335	0,369	0,407	0,447	0,489	0,556	0,698
0,83	0,67	0,188	0,216	0,243	0,277	0,309	0,343	0,381	0,421	0,463	0,53	0,672
0,84	0,65	0,162	0,19	0,217	0,251	0,283	0,317	0,355	0,395	0,437	0,504	0,645
0,85	0,62	0,136	0,164	0,191	0,225	0,257	0,291	0,329	0,369	0,417	0,478	0,602
0,86	0,59	0,109	0,14	0,167	0,198	0,23	0,264	0,301	0,343	0,39	0,45	0,593
0,87	0,57	0,083	0,114	0,141	0,172	0,204	0,238	0,275	0,317	0,364	0,424	0,567
0,88	0,54	0,054	0,085	0,112	0,143	0,175	0,209	0,246	0,288	0,335	0,395	0,538
0,89	0,51	0,028	0,059	0,086	0,117	0,149	0,183	0,23	0,262	0,309	0,369	0,512
0,9	0,48		0,031	0,058	0,089	0,121	0,155	0,192	0,234	0,281	0,341	0,484

Figura 1.4 Tabla del coeficiente "K" de compensación de potencia reactiva para el cálculo de la capacidad de un banco de capacitores.

Como se pudo analizar, el coeficiente K no es más que la diferencia de la equivalencia de los factores de potencia antes y después de la compensación:

$$K = \tan \theta - \tan \theta'$$



3. CUESTIONARIO PREVIO.

- 1) Defina el concepto de factor de potencia.
- 2) ¿Cuál es el comportamiento del factor de potencia cuando el motor de inducción opera en vacío y con carga?
- 3) Explique por qué se dice que los efectos de la reactancia capacitiva son contrarios a los efectos de la reactancia inductiva.
- 4) ¿Qué es un banco de capacitores?
- 5) Escriba la relación para determinar el factor de potencia de una carga por medio de la medición de la potencia real y la potencia reactiva.
- 6) Calcule la capacidad del banco de capacitores necesario en una instalación de 500 kW para llevar el factor de potencia de 0.75 a 0.95.

4. MATERIAL.

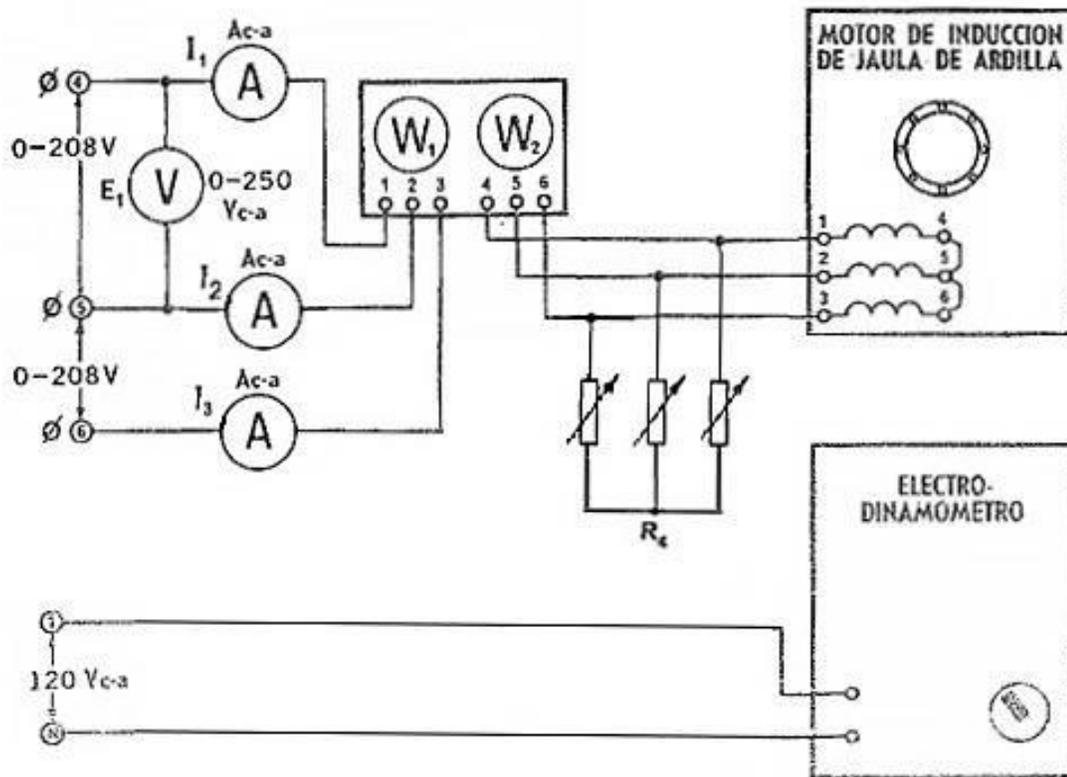
- | | |
|---|----------|
| - Módulo de fuente de alimentación. (120/208 V, 3 ϕ , 120 V_{CA}) | EMS 8821 |
| - Módulo de motor de inducción de jaula de ardilla. | EMS 8221 |
| - Módulo de electrodinamómetro. | EMS 8911 |
| - Módulo de capacitancia. | EMS 8331 |
| - Módulo de wattímetro trifásico. | EMS 8441 |
| - Módulo de medición de CA. (2.5/2.5/2.5 A) | EMS 8425 |
| - Módulo de medición de CA. (250 V) | EMS 8426 |
| - Tacómetro de mano. | EMS 8920 |
| - Banda de acoplamiento. | EMS 8942 |
| - Cables de conexión. | EMS 8941 |

5. DESARROLLO.

¡ATENCIÓN! En esta práctica se manejan altos voltajes, no hacer ninguna conexión cuando la fuente este energizada y siempre des energice la fuente después de cada medición.

5.1 EXPERIMENTO 1 – Compensación del factor de potencia con el motor en vacío.

- 1) Conecte el siguiente circuito.



- Acople el electrodinamómetro con el motor de inducción de jaula de ardilla por medio de la banda de acoplamiento.
- Conecte la fuente de alimentación trifásica variable (terminales 4, 5 y 6) en serie con los amperímetros de CA (a las terminales \pm), las salidas de 2.5 A de cada uno de los amperímetros deben conectarse a las terminales 1, 2 y 3 del wattímetro trifásico. Así mismo, las terminales 4, 5 y 6 del wattímetro trifásico deben conectarse a las terminales 1, 2 y 3, respectivamente, del motor de inducción de jaula de ardilla.
- Conecte un voltímetro a la fuente de alimentación (terminales 4 y 5), a fin de ajustar el voltaje a 208 V).
- Conecte los devanados del motor de inducción jaula de ardilla en estrella (terminales 4 con 5 y 5 con 6).
- Conecte las terminales del electrodinamómetro a las salidas de voltaje fijo de 120 V_{CA} de la fuente de alimentación (terminales 1 y N).
- Ajuste la perilla de control del dinamómetro en su posición extrema, haciéndola girar en sentido antihorario (a fin de proporcionarle al motor una carga de arranque de 0 lbf·plg.)
- Conecte el módulo de capacitancia en paralelo con el motor de inducción de jaula de ardilla (terminales 1, 2 y 3). Las terminales restantes del módulo de capacitancia deben conectarse en estrella. Verifique que todos los interruptores del módulo estén abajo.



2) Encienda la fuente de alimentación y aumente lentamente el voltaje, el motor debe comenzar a funcionar.

a. ¿Qué sucede con la potencia reactiva?

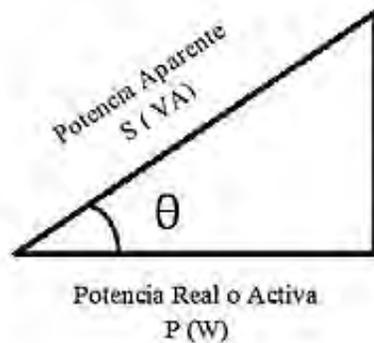
b. Realice las mediciones indicadas en la tabla 1.1

I_A (A)	
I_B (A)	
I_C (A)	
Velocidad (RPM)	
Potencia real (W)	
Potencia reactiva (VAr)	
Factor de Potencia	

Tabla 1.1 Características sin compensar el factor de potencia con el motor en vacío.

3) Sin reducir el voltaje, apague la fuente de alimentación.

4) Considerando el triángulo de potencias, calcule el factor de potencia y anote su resultado en la tabla 1.1.



$$f.p. = \cos \theta$$

$$\tan \theta = \left(\frac{Q}{P} \right)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{Q}{P} \right)$$

$$f.p. = \cos \left[\tan^{-1} \left(\frac{Q}{P} \right) \right]$$

5) Encienda la fuente de alimentación.

6) Ahora, para compensar el factor de potencia con reactancia capacitiva:

a. Suba los tres interruptores de 1200 Ω del módulo de capacitancia, realice las mediciones que pide la tabla 1.2.

b. Sin hacer ningún cambio, suba los tres interruptores de 600 Ω del módulo de capacitancia, realice las mediciones que pide la tabla 1.2.



- c. Sin hacer modificaciones, suba los tres interruptores de 300Ω del módulo de capacitancia, realice las mediciones que pide la tabla 1.2.

	$1\ 200 \Omega$	$1\ 200 \Omega // 600 \Omega$	$1\ 200 \Omega // 600 \Omega // 300 \Omega$
I_A (A)			
I_B (A)			
I_C (A)			
Velocidad (RPM)			
Potencia real (W)			
Potencia reactiva (VAr)			
Factor de Potencia			

Tabla 1.2 *Compensación del factor de potencia con el motor en vacío.*

- d. Retire todas las capacitancias.
- 7) Reduzca el voltaje a cero y apague la fuente de alimentación.
- 8) Calcule el factor de potencia para cada una de las reactancias capacitivas y anote sus resultados en la tabla 1.2.

5.2 EXPERIMENTO 2 – Compensación del factor de potencia con el motor con carga.

- 1) Encienda la fuente de alimentación y aumente lentamente el voltaje, el motor debe comenzar a funcionar. Verifique en los amperímetros que el motor no exceda una corriente de 1 A.

Nota: No exceda la corriente a más de 1 A, a fin de no sobrecargar el motor.

- 2) Aumente gradualmente la carga del dinamómetro, haciendo girar la perilla de control en sentido horario. Describa lo que sucede con la corriente, la potencia real y la potencia reactiva.

- 3) Realice las mediciones que pide la tabla 1.3.
- 4) Sin reducir el voltaje, apague la fuente de alimentación.
- 5) Calcule el factor de potencia y anote su resultado en la tabla 1.3.



I_A (A)	
I_B (A)	
I_C (A)	
Velocidad (RPM)	
Potencia real (W)	
Potencia reactiva (VAr)	
Factor de Potencia	

Tabla 1.3 Características con carga, sin compensar el factor de potencia.

- 6) Encienda la fuente de alimentación.
- 7) Para compensar el factor de potencia:
 - a. Suba los tres interruptores de 1200Ω del módulo de capacitancia, realice las mediciones que pide la tabla 1.4.
 - b. Sin hacer ningún cambio, suba los tres interruptores de 600Ω del módulo de capacitancia, realice las mediciones que pide la tabla 1.4.
 - c. Sin hacer modificaciones, suba los tres interruptores de 300Ω del módulo de capacitancia, realice las mediciones que pide la tabla 1.4.

	1200Ω	$1200 \Omega // 600 \Omega$	$1200 \Omega // 600 \Omega // 300 \Omega$
I_A (A)			
I_B (A)			
I_C (A)			
Velocidad (RPM)			
Potencia real (W)			
Potencia reactiva (VAr)			
Factor de Potencia			

Tabla 1.4 Compensación del factor de potencia con carga en el electrodinamómetro.

- d. Retire todas las capacitancias.
- 8) Reduzca el voltaje a cero y desconecte la fuente de alimentación.
- 9) Calcule el factor de potencia para cada una de las reactancias capacitivas y anote sus resultados en la tabla 1.4.



6. PREGUNTAS DE EVALUACIÓN.

1) ¿Por qué el factor de potencia del motor de inducción en vacío es muy bajo?

2) ¿Qué efecto se tiene en las líneas de alimentación cuando el factor de potencia en el motor es bajo?

3) ¿Por qué la potencia reactiva se incrementa al aumentar la carga del motor?

4) ¿Qué efecto tiene el exceso de compensación de potencia reactiva en un motor de inducción?



7. CONCLUSIONES.

8. REFERENCIAS.

Schneider Electric. *Compensación de energía reactiva*. [en línea].< http://www.schneider-electric.com.pe/documents/local/catalogo-de09/cap._5_compensacion_de_energia_reactiva.pdf>

Legrand Service. *Compensación de energía reactiva y monitoreo de la calidad de la potencia*. Catálogo [en línea]. Santiago, Chile. < http://www.legrand.cl/archivos/guia_catalogo_tecnico.pdf>

Chapman, Stephen J. *Máquinas Eléctricas*. 5ª ed., México, Mc Graw - Hill, 2012, pp. 40, 218.

Edutelsa, tecnología para la educación. *Power factor compensation with induction motors Part 1 & Part 2*. Festo Didactic – LabVolt Series. <<http://edutelsa.com/videos/>>

Festo Didactic (2014). Electricity and New Energy. *Power Factor Correction*. Courseware Sample 20116-F0, Quebec, Canada. <www.festo-didactic.com>

Juarez Cervantes, José Dolores. *Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica*., México, Universidad Autónoma Metropolitana (UAM), 1995, pp. 95 - 108.



U.N.A.M.	Ingeniería Eléctrica Electrónica
F.E.S. Aragón	
Laboratorio de Sistemas de Distribución	

PRÁCTICA 2

REGULACIÓN DE TENSIÓN

1. OBJETIVOS.

- a) Estudiar la regulación de tensión de una línea de transmisión con cargas inductivas y capacitivas.

2. INTRODUCCIÓN.

La regulación de tensión sigue siendo un problema para las compañías eléctricas, ya que se debe mantener la tensión en las instalaciones de los consumidores dentro de los rangos permisibles, para garantizar una alta calidad de servicio al cliente. *La estabilidad de la tensión y la calidad de la energía de los sistemas eléctricos dependen de la adecuada regulación de tensión.*

El continuo crecimiento de demanda y los requisitos para la mejora de calidad de la energía aumentan la complejidad de los sistemas de distribución. En consecuencia, la regulación de tensión de las redes de distribución también se vuelve más compleja, especialmente en líneas de distribución de larga distancia, que llegan a zonas rurales, pues suelen tener una calidad de energía menos fiable.

Nota: *Para explicar el efecto de la regulación de tensión, se utilizarán algunos conceptos de las líneas de transmisión. La regulación de tensión en las líneas de distribución no difiere con la regulación de tensión de las líneas de transmisión.*

Las líneas de transmisión son los elementos del sistema de potencia que envía la energía eléctrica desde los centros de generación hasta las cargas. Éstas deben recorrer distancias de varios kilómetros.

Conforme a las aproximaciones admitidas al operar con los parámetros de la línea, las líneas de transmisión se clasifican, según su longitud, en:



- a. *Líneas cortas.*
Las líneas cortas tienen una longitud de hasta 80 km y operan con voltajes no mayores a 40 kV.
- b. *Líneas medias.*
Las líneas medias tienen una longitud comprendida entre 80 y 240 km y pueden operar con voltajes de hasta 220 kV.
- c. *Líneas largas.*
Las líneas largas tienen una longitud superior a 240 km y operan a más de 220 kV.

Líneas de transmisión cortas.

Como ya se mencionó, son aquellas líneas con longitud menor de 80 km, y de tensión inferior a los 40 kV, la capacitancia en paralelo que presentan, generalmente, se desprecia. El modelo de la línea se resume entonces en su impedancia serie, producto de la impedancia por unidad de longitud por la longitud total.

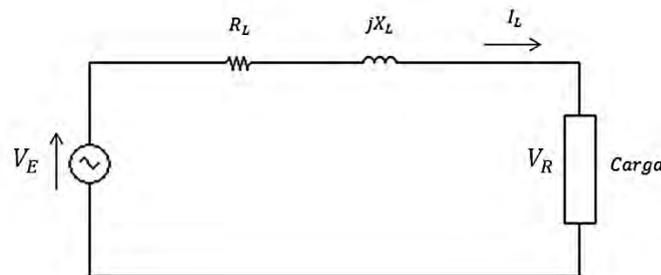


Figura 2.1 *Circuito equivalente de una línea de transmisión corta.*

Realizando el análisis: al tratarse de un circuito serie, la corriente en el extremo emisor, en el extremo receptor y en la carga, es la misma. Por lo tanto:

$$I_E = I_R$$

El voltaje en el extremo emisor:

$$V_E = V_R + Z_L I_R$$

Pero como $Z_L = R_L + jX_L$:

$$V_E = V_R + R_L I_R + jX_L I_R$$

En las líneas de transmisión cortas el efecto de la variación del factor de potencia en la carga y su relación con la regulación de tensión, puede ser entendido de forma más clara que en otro tipo de líneas.



La regulación de tensión es un concepto tan primordial que se considera como un criterio para seleccionar el calibre de un cable aislado. Dicha selección se basa, de acuerdo con la normativa vigente, en que se permita una caída de tensión inferior al 3% en el alimentador respecto a la tensión nominal y que no supere el 5% en la carga más alejada.

Regulación de tensión.

La regulación de tensión es una de las características más importantes de un conductor eléctrico. El voltaje en las líneas de transmisión y distribución debe permanecer constante tanto como sea posible, incluso si la carga es variable.

La regulación de tensión en una línea se define como el incremento en la tensión en el extremo receptor, expresado en tanto por ciento sobre la tensión a plena carga para un factor de potencia dado, cuando no existe demanda y se mantiene constante la tensión en el extremo emisor.

Matemáticamente:

$$\% Reg = \frac{V_{RSC} - V_{RPC}}{V_{RPC}} \times 100$$

Donde V_{RSC} es la tensión en el extremo receptor cuando no existe carga y V_{RPC} es la misma tensión a plena carga cuando el voltaje emisor V_E es constante. Como la tensión sin carga en el extremo emisor y receptor es la misma y además, la tensión a plena carga está representada en la figura 2.1 como V_R , podemos simplificar la expresión anterior:

$$\% Reg = \frac{V_E - V_R}{V_R} \times 100$$

En la figura 2.2 se representan los diagramas fasoriales en la línea de transmisión corta para distintos factores de potencia, manteniendo el módulo de corriente constante.

Podemos observar que cuando la corriente en el extremo receptor retrasa la tensión (factor de potencia atrasado o inductivo), es necesario mantener un mayor valor de la tensión en el extremo emisor; a diferencia del caso de factores de potencia unitarios o capacitivos. En todos los casos, la caída de tensión en la impedancia serie es la misma. Por lo tanto, la necesidad de regulación de tensión es superior cuando aumenta el factor de potencia atrasado (cargas inductivas), nula cuando el factor de potencia es la unidad (cargas resistivas) y mínima, e incluso, negativa con un factor de potencia adelantado (cargas capacitivas).

La relación entre el factor de potencia y la regulación de tensión es válida también en los otros tipos de líneas, pero es en este caso cuando puede ser visualizada con mayor facilidad.

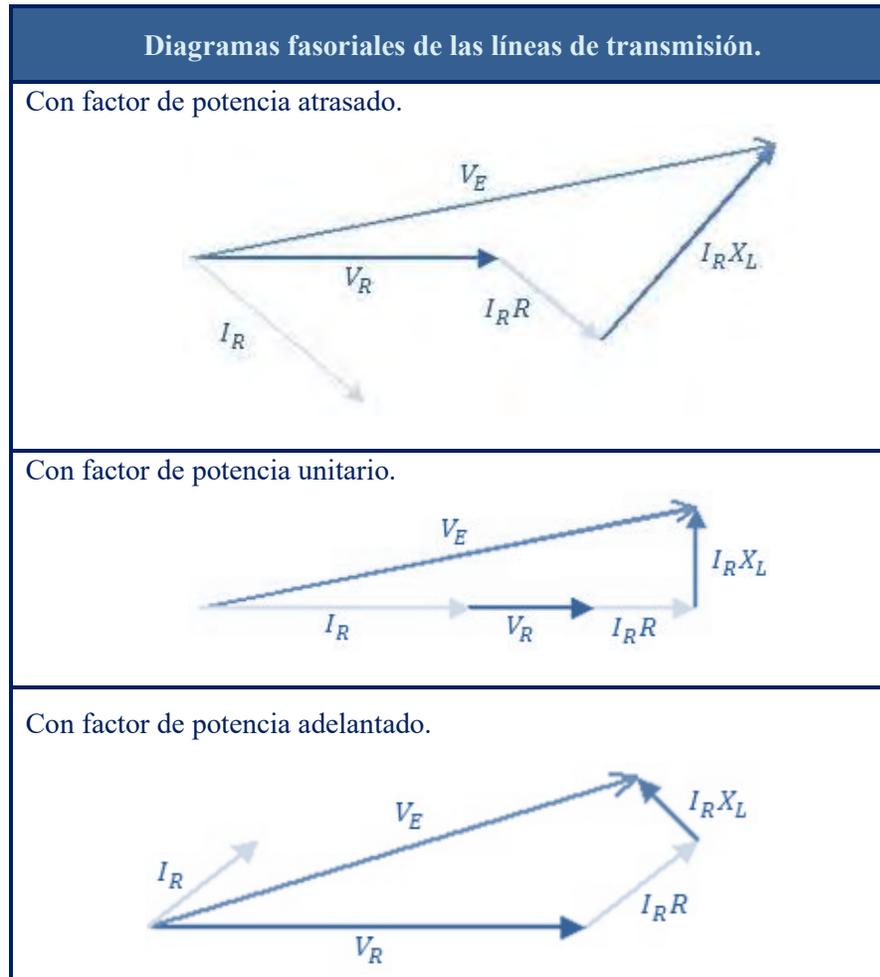
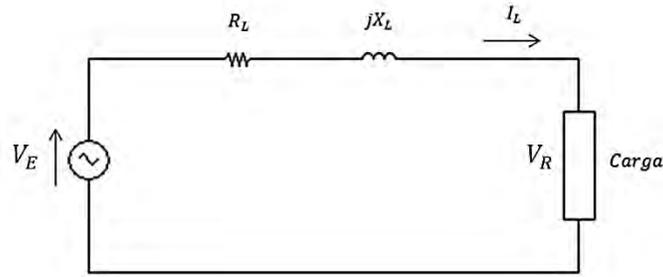


Figura 2.2 Diagramas fasoriales en la línea de transmisión corta para distintos factores de potencia

3. CUESTIONARIO PREVIO.

- 1) ¿Qué es y cómo se calcula la regulación de tensión?
- 2) Dibuje los diagramas fasoriales del siguiente circuito, considerando el tipo de carga:
 - a. Resistiva.
 - b. Inductiva.
 - c. Capacitiva.



- 3) Explique por qué la potencia reactiva de tipo inductiva se compensa con la potencia reactiva de tipo capacitiva.

4. MATERIAL.

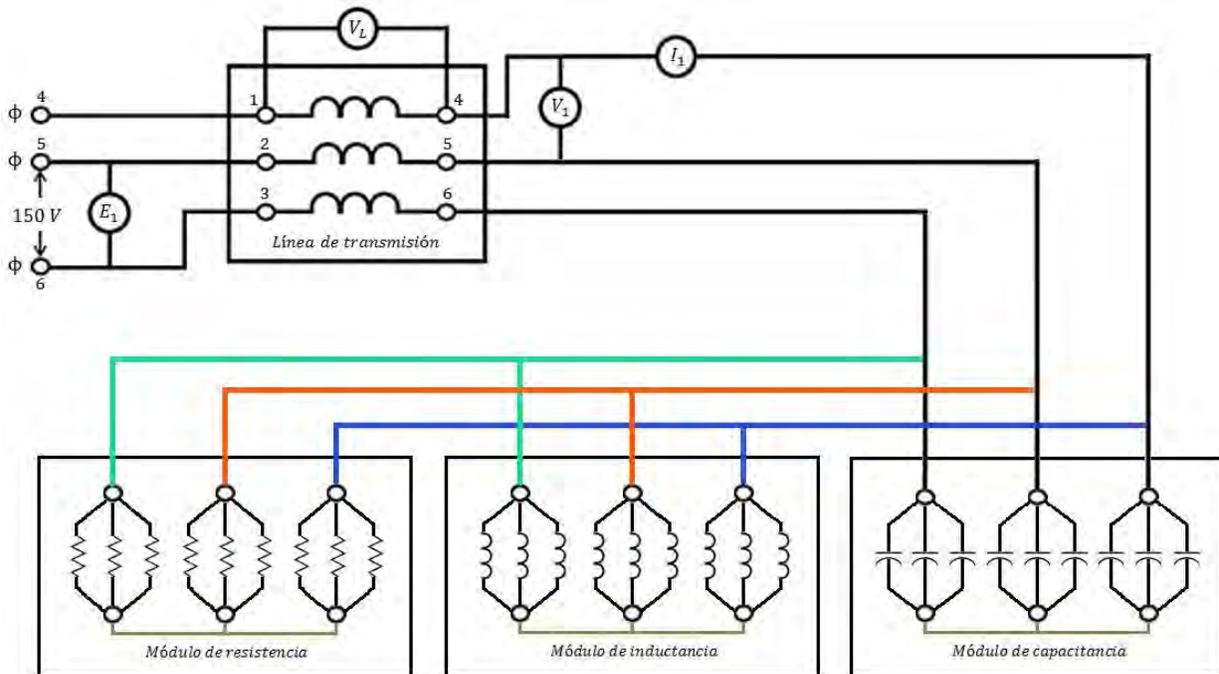
- | | |
|--|----------|
| - Módulo de fuente de alimentación.(120/208V 3 ϕ , 0-120 V_{CA}) | EMS 8821 |
| - Módulo de línea de transmisión. | EMS 8329 |
| - Módulo de resistencia. | EMS 8311 |
| - Módulo de inductancia. | EMS 8321 |
| - Módulo de capacitancia. | EMS 8331 |
| - Módulo de medición de CA. (0.5 A). | EMS 8425 |
| - Módulo de medición de CA. (250,250, 250 V). | EMS 8426 |
| - Cables de conexión. | EMS 8941 |

5. DESARROLLO.

¡ATENCIÓN! En esta práctica se manejan altos voltajes, no hacer ninguna conexión cuando la fuente este energizada y siempre des energice la fuente después de cada medición.

5.1 EXPERIMENTO 1 – Línea de transmisión a 60 Ω .

- 1) Conecte el siguiente circuito.
 - a. Conecte la fuente de alimentación en serie con la línea de transmisión (terminales 4, 5 y 6 de la fuente a las terminales 1, 2 y 3 de la línea de transmisión, respectivamente).
 - b. Para monitorear el voltaje de entrada E_1 conecte un voltímetro en paralelo a la fuente de alimentación (terminal 5 de la fuente a \pm del voltímetro y terminal 6 de la fuente a la salida de 250V del voltímetro).



- c. Conecte la terminal de salida 4 de la línea de transmisión a la terminal \pm del amperímetro I_1 y la salida de 0.5 A del amperímetro a una terminal del módulo de capacitancia, exactamente como se muestra en el circuito. Conecte las terminales 5 y 6 de la línea de transmisión a las terminales restantes del módulo de capacitancia, observe el circuito.
- d. Conecte cada una de las terminales del módulo de capacitancia a una de las terminales de los módulos de inductancia y resistencia, exactamente como se muestra en el circuito, a fin proporcionar una carga $R||L||C$ a las tres fases de la línea. Observe que las terminales inferiores de los módulos de carga (resistencia, inductancia y capacitancia) están conectadas, entre sí, en estrella.
- e. Para monitorear el voltaje en la línea de transmisión V_L , conecte un voltímetro en paralelo a ésta (terminal 1 de la línea de transmisión a la terminal \pm del voltímetro y la terminal 4 de la línea de transmisión a la salida de 250 V del voltímetro).
- f. Para examinar el voltaje de salida V_1 , conecte un voltímetro en paralelo a las terminales de salida de la línea de transmisión (terminal 4 de la línea a la terminal \pm del voltímetro y terminal 5 de la línea a 250 V del voltímetro).

2) Posteriormente:

- a. Cerciórese de que todos los interruptores estén abiertos.
- b. Ajuste la línea de transmisión a 60Ω .
- c. Encienda la fuente de alimentación y aumente gradualmente el voltaje hasta que $E_1 = 150 V$, según se muestra en el voltímetro E_1 .
- d. Realice las mediciones que pide en la tabla 2.1 y anote sus resultados.



- 3) A continuación.
 - a. Cierre todos los interruptores de 300Ω del módulo de resistencia.
 - b. Realice las mediciones que pide en la tabla 2.1 y anote sus resultados.
 - c. Abra todos los interruptores de 300Ω del módulo de resistencia, regresándolos a su posición original.
- 4) En seguida.
 - a. Cierre todos los interruptores de 300Ω del módulo de inductancia.
 - b. Realice las mediciones que pide en la tabla 2.1 y anote sus resultados.
 - c. Abra todos los interruptores de 300Ω del módulo de inductancia, regresándolos a su posición original.
- 5) Después.
 - a. Cierre todos los interruptores de 300Ω del módulo de capacitancia.
 - b. Realice las mediciones que pide en la tabla 2.1 y anote sus resultados.
 - c. Abra todos los interruptores de 300Ω del módulo de capacitancia, regresándolos a su posición original.
- 6) Para continuar.
 - a. Cierre todos los interruptores de 300Ω del módulo de resistencia.
 - b. Cierre todos los interruptores de 300Ω del módulo de inductancia.
 - c. Realice las mediciones que pide en la tabla 2.1 y anote sus resultados.
 - d. Abra todos los interruptores de 300Ω del módulo de inductancia.
- 7) Posteriormente.
 - a. Cierre todos los interruptores de 300Ω del módulo de capacitancia.
 - b. Realice las mediciones que pide en la tabla 2.1 y anote sus resultados.
 - c. Abra todos los interruptores de 300Ω del módulo de resistencia.
- 8) A continuación.
 - a. Cierre todos los interruptores de 300Ω del módulo de inductancia.
 - b. Realice las mediciones que pide en la tabla 2.1 y anote sus resultados.
- 9) En seguida.
 - a. Cierre todos los interruptores de 300Ω del módulo de resistencia.
 - b. Realice las mediciones que pide en la tabla 2.1 y anote sus resultados.
- 10) Sin reducir el voltaje, apague la fuente de alimentación.
- 11) Abra todos los interruptores de los módulos de carga.
- 12) Con los datos recabados, dibuje en la tabla 2.1 el diagrama fasorial de cada caso.
- 13) Calcule la regulación de voltaje de cada caso y anote sus resultados en la tabla 2.1



Carga	V_L	I_1	V_1	Diagrama fasorial	% Reg
∞ Procedimiento 2(d)					
$300\Omega_R$ Procedimiento 3(b)					
$300\Omega_L$ Procedimiento 4(b)					
$300\Omega_C$ Procedimiento 5(b)					
$300\Omega_{R L}$ Procedimiento 6(c)					
$300\Omega_{R C}$ Procedimiento 7(b)					
$300\Omega_{L C}$ Procedimiento 8(b)					
$300\Omega_{R L C}$ Procedimiento 9(b)					

Tabla 2.1 Línea de transmisión a 60 Ω .

5.2 EXPERIMENTO 2 – Línea de transmisión a 120 Ω .

- 1) Ajuste la línea de transmisión a 120 Ω .



- 2) Encienda la fuente de alimentación y verifique que $E_1 = 150 V$.
- 3) Repita el experimento 5.1 y anote sus resultados la tabla 2.2.

Carga	V_L	I_1	V_1	Diagrama fasorial	% Reg
∞					
300_{Ω_R}					
300_{Ω_L}					
300_{Ω_C}					
$300_{\Omega_R L}$					
$300_{\Omega_R C}$					
$300_{\Omega_L C}$					
$300_{\Omega_R L C}$					

Tabla 2.2 Línea de transmisión a 120Ω .



- 4) Reduzca el voltaje a cero y apague la fuente de alimentación.

6. PREGUNTAS DE EVALUACIÓN.

- 1) Explique por qué en los circuitos con carga $R||L||C$ la corriente que mide el amperímetro es igual o aproximada a la medida en el circuito con carga puramente resistiva.

- 2) En las instalaciones eléctricas residenciales, al arrancar un motor o alguna otra carga que consuma mucha corriente, se observa un fenómeno conocido como “*Flicker*”; un parpadeo en la iluminación. Explique la razón.

- 3) Para limitar el valor de la caída de tensión en un sistema de distribución, ¿Cuáles son los parámetros que se deben considerar de la selección del conductor de alimentación?

- 4) Investigar cuál es el nivel máximo de regulación de tensión establecido por la norma nacional de instalaciones eléctricas (NOM-001-SEDE-2012).



7. CONCLUSIONES.

8. REFERENCIAS.

Shrabani, Pal., Sudipta, Nath. *An Intelligent on Line Voltage Regulation in Power Distribution System*. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., (2010).

Coto Aladro, José. *Análisis de sistemas de energía eléctrica*. España, Universidad de Oviedo, 2002, pp. 95.

Stevenson, Wiliam. *Análisis de sistemas eléctricos de potencia*. 2ª ed., México, Mc Graw – Hill, 1985, pp. 84 -87.

Villanueva Ortega, Juan Antonio. *Cuaderno de evidencias de Sistemas eléctricos de potencia I*. México, Ingeniería Eléctrica Electrónica, Facultad de Estudios Superiores Aragón, Universidad Nacional Autónoma de México, 2016, pp. 58 - 61.

Manual de prácticas de laboratorio de Sistemas eléctricos de potencia II. México, Facultad de Estudios Superiores Aragón, Universidad Nacional Autónoma de México, pp. 38 – 49.

Manual para la instalación de cables de energía de media tensión. México, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, pp. 60 - 63.

Wildi, Theodore. *Máquinas eléctricas y sistemas de potencia*. 6ª ed., México, Pearson Educación, 2007, pp. 722.

Viakon. *Sistemas y redes de distribución*. Manual Eléctrico, pp. 365 – 367.

Quevedo, Josemar O., Giacomini, Julian C., Beltrame, Rafael C., Cazakevicius, Fabricio E., Rech, Cassiano., Schuch, Luciano., Marchesan Tiago B., De Campos, Mauricio., Sausen Paulo S., Kinas, Jonatas R. *Smart Distribution Transformer Applied To Smart Grids*. Brazil, Federal University Of Santa Maria. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., (2013).



U.N.A.M.	Ingeniería Eléctrica Electrónica
F.E.S. Aragón	
Laboratorio de Sistemas de Distribución	

PRÁCTICA 3

TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN

1. OBJETIVOS.

- a) Comprender los conceptos básicos de los transformadores de distribución.
- b) Entender cómo funciona el transformador de distribución estándar con devanado secundario de 120/240 V.
- c) Medir corrientes y voltajes de línea para observar cómo se comporta un transformador de distribución sometido a diferentes condiciones de carga.

2. INTRODUCCIÓN.

Para obtener las ventajas de un circuito de distribución de alto voltaje y además, proporcionar 120 V para la operación estándar de lámparas incandescentes y aparatos pequeños, se desarrolló el sistema trifásico de distribución. Para una cantidad fija de pérdidas en la línea, la energía puede transmitirse por medio del sistema trifásico con mucho menos cable de cobre del que se requiere con un sistema bifásico de 120 V. El sistema trifásico tiene la ventaja de permitir la disponibilidad de 120 o 240 V para la operación de equipos eléctricos.

La mayoría de los transformadores de distribución que suministran potencia a las casas particulares y comerciales tienen un devanado primario de alto voltaje. El devanado secundario proporciona 120 V_{CA} para el alumbrado y el funcionamiento de aparatos pequeños, también puede dar 240 V_{CA} para estufas, calentadores, secadoras eléctricas, etc. El secundario puede estar construido por un devanado con una derivación central o bien, por dos devanados independientes conectados en serie.

Los transformadores de distribución generalmente se conectan con el devanado secundario o devanado de bajo voltaje en dos secciones. Cuando las dos secciones de bajo voltaje se conectan en serie, el transformador puede usarse para alimentar una carga bifásica de 240 V. Este tipo de conexión se conoce como *Conexión Edison*. Las conexiones en serie también se utilizan para suministrar 120/240 V a un sistema trifásico, conectando el cable neutral a la terminal común de

ambas secciones secundarias. Con este arreglo, las lámparas y aparatos de 120 V pueden conectarse entre cualquiera de las fases y el neutro. Mientras los equipos de 240 V, tales como secadoras, calentadores eléctricos y motores, pueden conectarse entre dos fases.

Cuando las cargas de 120 V están balanceadas entre ambas fases y el neutro, el neutro no tiene corriente. Si se conecta una carga más pesada entre una de las fases y el neutro, entonces, circula corriente del transformador a la carga a través del neutro. La corriente que fluye por el cable neutro siempre tiene el valor de la diferencia de corriente entre las dos fases. Por esta razón, es deseable conservar las cargas lo más balanceadas posible, para así mantener el flujo de corriente en el neutro al mínimo.

Si la carga se conecta en una sola fase del sistema trifásico, por el neutro circula la corriente de toda la carga. Debido a esto, el cable neutro es, generalmente, del mismo calibre de los conductores de las fases. Una apertura accidental del cable neutro mientras se alimenta una carga desbalanceada resulta en voltajes desequilibrados a través de las cargas, por lo que el neutro se conecta sólidamente del transformador a las cargas y, ni fusibles, ni otros dispositivos de sobrecorriente se instalan en el neutro. Para una mayor protección contra una apertura del neutro y contra daños por descargas atmosféricas, el cable neutro se conecta a tierra.

En esta práctica se mostrará la forma en la que el transformador reacciona a diferentes valores y tipos de carga al estar o no conectado el hilo neutro.



Figura 3.1 Transformadores de distribución sumergidos en aceite.

Los transformadores de distribución sumergidos en aceite están diseñados para montaje en poste, para alimentar sistemas eléctricos de distribución aérea; para montaje pedestal de concreto o en superficie, para alimentar sistemas parcial o totalmente subterráneos; y montados en bóvedas subterráneas, para sistemas subterráneos.

- **Componentes.**

Los transformadores de distribución sumergidos en aceite consisten esencialmente de:

- 1) Un núcleo de acero magnético de circuito cerrado sobre el cual se devanan dos o más bobinas separadas.
- 2) Un tanque para contener el aceite aislante y refrigerante en el cual se sumerge el ensamble núcleo-bobina.
- 3) Las boquillas necesarias para dar entrada y salida a las guías a través del tanque o de la cubierta.
- 4) Dispositivos de protección montados de manera integral, tales como apartarrayos, fusibles y, en algunos casos, interruptores de baja tensión.

- **Construcción.**

Los transformadores de distribución sumergidos en aceite se construyen conforme a las normas NMX-J-116, IEEE C57.12.00 bajo la especificación CFE NRF-025-2002.

- 1) Transformadores de distribución monofásicos.
Consisten en un ensamble núcleo – bobina individual contenido en un tanque que puede ser cilíndrico o rectangular.
- 2) Transformadores de distribución trifásicos.
Son contruidos generalmente, empleando el uso de tres ensambles núcleo – bobina monofásicos, montados en un tanque rectangular.

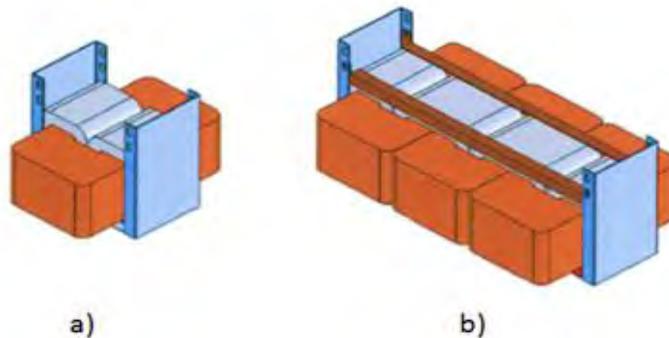


Figura 3.2 Núcleo y bobinas de los transformadores.
a) Monofásico; b) Trifásico.



• **Placa de datos.**

En la figura 3.3 se muestra una placa de datos típica de un transformador de distribución. La información en esta placa incluye el voltaje nominal, los kilovoltsamperes nominales, la frecuencia nominal y la impedancia en serie por unidad del transformador. Además, muestra el voltaje nominal para cada toma en el transformador y su diagrama de conexión. Normalmente, también incluye la designación del tipo de transformador y referencias a sus instrucciones de operación.

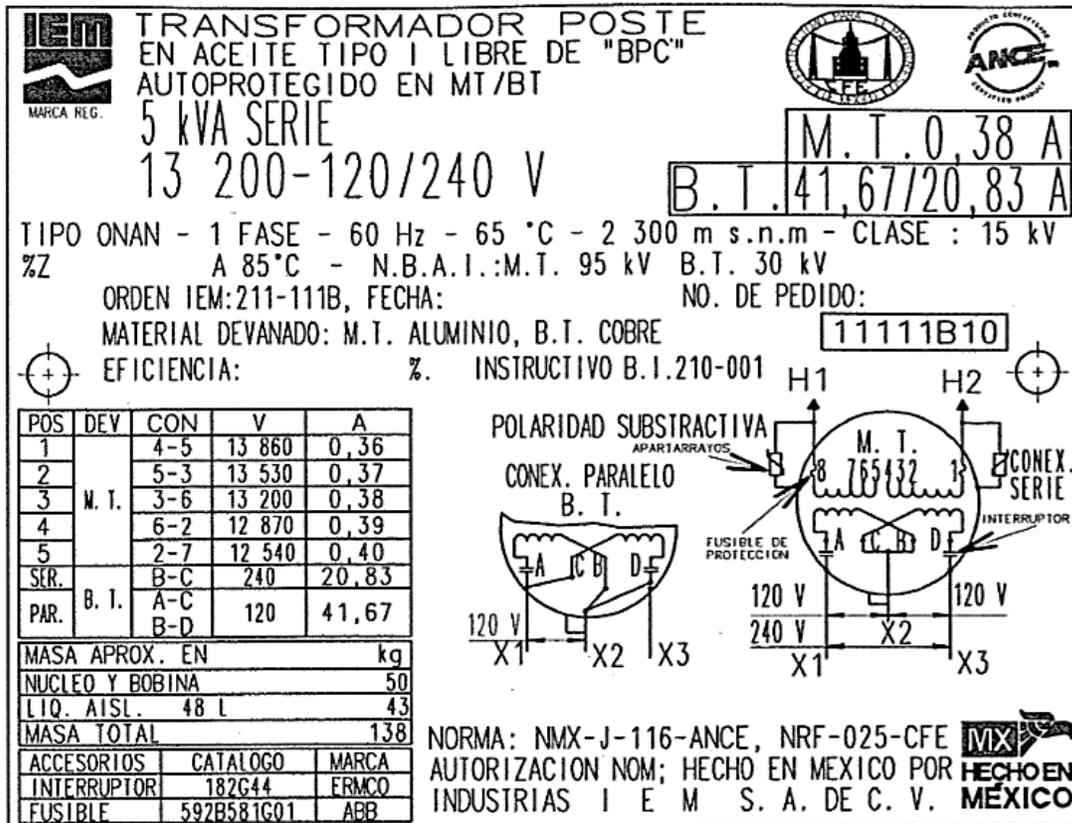


Figura 3.3 Placa de datos de un transformador de distribución tipo poste monofásico.

Nota: Para consultar más placas de datos, revise la Práctica No. 5 de este manual.

Conexión Scott – T.

La conexión Scott – T es una manera de obtener dos fases separadas de 90° a partir de un suministro de potencia trifásica. En los comienzos de la transmisión de potencia de CA los sistemas de potencia bifásicos y trifásicos eran muy comunes, pues era necesario conectar ambos sistemas entre sí. Con este propósito se desarrolló la conexión Scott – T de los transformadores de

distribución. Sin embargo, actualmente, la potencia bifásica se limita a aplicaciones de control y se utiliza la conexión Scott – T para producir la potencia necesaria para operarla.

Esta conexión consta de dos transformadores monofásicos con idéntica capacidad. Uno tiene una toma del 86.6% de su voltaje a plena carga en el devanado primario. Están conectados como se observa a continuación:

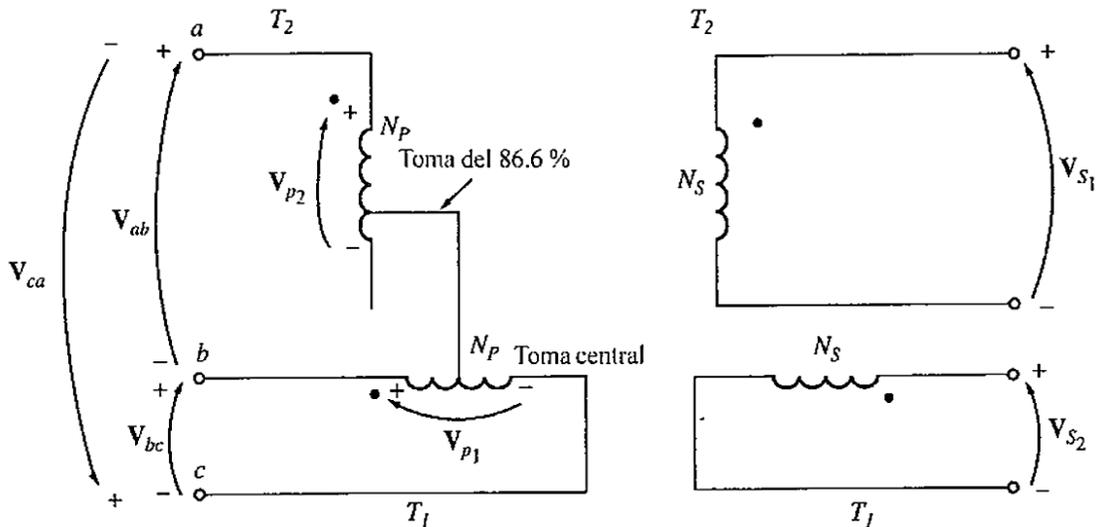


Figura 3.4 Conexión Scott – T del transformador.

La toma del 86.6% del transformador T_2 está conectada a la toma central del transformador T_1 . Los voltajes aplicados al devanado primario se muestran en la figura 3.5 a) y la figura 3.5 b) muestra los voltajes resultantes aplicados a los primarios de los dos transformadores. Como estos voltajes se encuentran defasados 90° , es posible obtener una salida bifásica; misma que se ilustra en la figura 3.5 c).

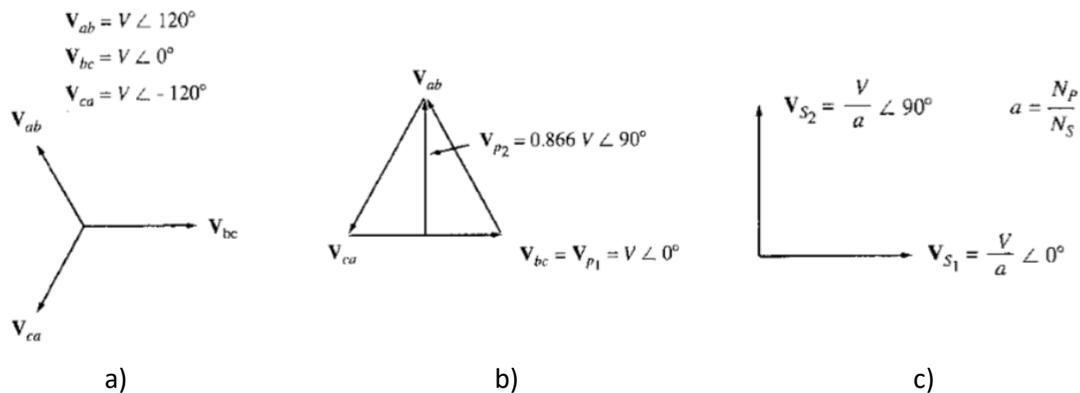


Figura 3.5 Conexión Scott – T del transformador. a) Voltajes de entrada trifásicos; b) Voltajes en los devanados primarios del transformador; c) Voltajes secundarios bifásicos.

Con esta conexión también se puede convertir potencia bifásica en potencia trifásica, sin embargo, debido a la escasez de generadores bifásicos en uso, esto generalmente no se realiza.

Subestación aérea de distribución.

A continuación, se da una explicación breve sobre la función de los componentes básicos de un poste de distribución.

Los **Aisladores** evitan que las líneas de media tensión entren en contacto entre sí.

Los **Apartarrayos** protegen a toda la subestación contra descargas atmosféricas.

El **Poste** es el soporte principal de la subestación aérea de distribución. Generalmente, el **Cable de tierra** recorre toda la longitud del poste por dentro de éste, conduciendo las descargas eléctricas a tierra.

Las **Líneas de baja tensión** distribuyen la electricidad, después de ser reducida por el transformador, hacia los consumidores.

El **Cable neutro** equilibra la cantidad de electricidad o carga sobre el sistema.



Las **Líneas de media tensión** transportan la energía eléctrica desde una subestación.

El **Portafusibles** sostiene a los **Fusibles**; los cuales, al abrirse, evitan la conducción de electricidad ante un problema en la línea o en una sección de ésta.

Las **Boquillas del transformador** son dispositivos de aislamiento que permiten el paso de la tensión a través de una superficie aterrizada: el tanque del transformador.

El **Transformador de distribución** reduce los niveles de voltaje de las líneas de media tensión al nivel de voltaje de las líneas de baja tensión para el uso de los consumidores.

El **Soporte del transformador** es la sujeción del transformador al poste de distribución.

Figura 3.6 *Ejemplo de una subestación aérea de distribución.*



3. CUESTIONARIO PREVIO.

- 1) Investigue la construcción, placa de datos y diagrama de conexión de:
 - a. Un transformador tipo poste monofásico.
 - b. Un transformador tipo pedestal.
- 2) Explique la conexión Edison de un transformador.
- 3) ¿Cuál es la función del hilo neutro en un transformador de distribución?
- 4) ¿En qué tipos de sistema se utilizan transformadores trifásicos y monofásicos?
- 5) Del transformador de su colonia, investigue:
 - a. Tipo de transformador.
 - b. Características.
 - c. Tipo de conexión.
 - d. Capacidad.
 - e. Tensión de alimentación.
- 6) Investigue la conexión Scott – T de un transformador de distribución.

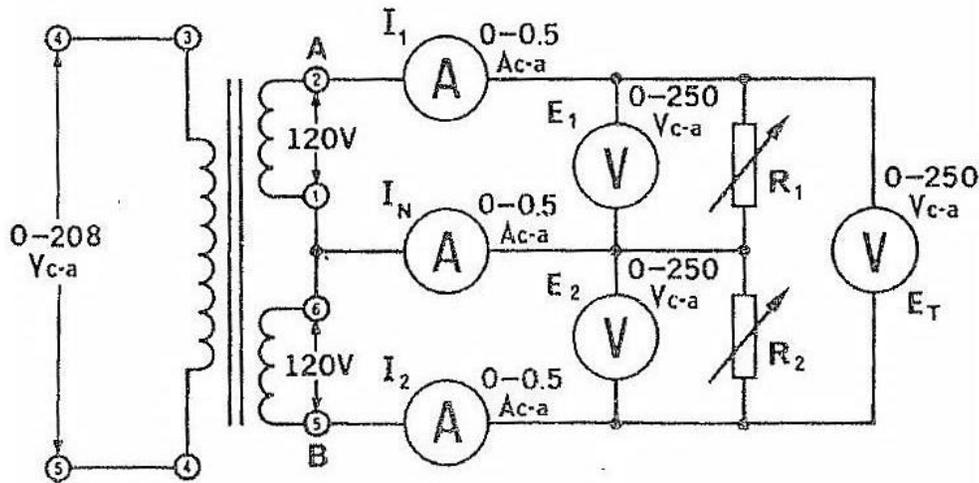
4. MATERIAL.

- | | |
|---|----------|
| - Módulo de fuente de alimentación. (0-120/208 V_{CA}) | EMS 8821 |
| - Módulo de medición de CA. (0.5/0.5/0.5 A) | EMS 8425 |
| - Módulo de medición de CA. (250/250/250V) | EMS 8426 |
| - Módulo de transformador. | EMS 8341 |
| - Módulo de resistencia. | EMS 8311 |
| - Módulo de inductancia. | EMS 8321 |
| - Cables de conexión. | EMS 8941 |

5. DESARROLLO.

¡ATENCIÓN! En esta práctica se manejan altos voltajes, no hacer ninguna conexión cuando la fuente este energizada y siempre des energice la fuente después de cada medición.

- 1) Conecte el siguiente circuito.



- a. Observe que el devanado primario del transformador (3 a 4) va conectado a la salida de 0-208 V_{CA} de la fuente de alimentación, es decir, las terminales 4 y 5. Los devanados secundarios del transformador 1 a 2 y 5 a 6, se conectan en serie para obtener 240 V_{CA} entre los puntos A y B.

No. de Procedimiento	R_1 (Ω)	R_2 (Ω)	I_1 (A)	I_2 (A)	I_N (A)	E_1 (V)	E_2 (V)	E_T (V)
2 (c)	∞	∞						
3 (b)	300	300						
4 (b)	600	300						
5 (b)	300	1200						
6 (c)	300	1200						
7 (c)	300	300						
8 (b)	600	300						
9 (f)	400	400						

Tabla 3.1 *Comportamiento de un transformador de distribución a diferentes cargas con y sin hilo neutro.*

- 2) Posteriormente.
 - a. Cerciórese de que todos los interruptores de resistencia estén abiertos.
 - b. Conecte la fuente de alimentación y ajústela a 208 V_{CA} , según lo indica el voltímetro de la fuente de alimentación.
 - c. Mida y anote en la tabla 3.1, el voltaje total de salida del transformador E_T , los voltajes en cada una de las cargas E_1 y E_2 , las corrientes de línea I_1 e I_2 , y la corriente del hilo neutro I_N .



3) A continuación.

- a. Ponga 300Ω en cada circuito de carga, cerrando los interruptores correspondientes.
- b. Mida y anote todas las cantidades que pide la tabla 3.1.
- c. ¿Por qué la corriente del hilo neutro es igual a cero?

4) Enseguida.

- a. Deje 300Ω en la carga R_2 y ajuste 600Ω en la carga R_1 .
- b. Mida y anote todas las cantidades que pide la tabla 3.1.
- c. Describa lo que sucede.

5) Después.

- a. Ponga $1\ 200 \Omega$ en la carga R_2 y ajuste 300Ω en la carga R_1 .
- b. Mida y anote todas las cantidades que pide la tabla 3.1.
- c. Reduzca el voltaje a cero y desconecte la fuente de alimentación.
- d. ¿Es igual la corriente del neutro a la diferencia entre las dos corrientes de línea?

6) Para continuar.

- a. Desconecte el hilo neutro del transformador quitando la conexión entre el transformador y el medidor de corriente del neutro I_N .
- b. Conecte la fuente de alimentación y ajústela a $208 V_{CA}$, según lo indica el voltímetro de la fuente de alimentación.
- c. Mida y anote todas las cantidades que pide la tabla 3.1.
- d. Reduzca el voltaje a cero y desconecte la fuente de alimentación.
- e. Si la carga R_1 y R_2 fueran lámparas incandescentes de una casa, ¿qué se observaría?

7) Posteriormente.

- a. Ponga 300Ω en cada circuito de carga.
- b. Encienda la fuente de alimentación y, como medida precautoria, ajuste el voltaje a $150 V_{CA}$, según lo indica el voltímetro de la fuente de alimentación.
- c. Mida y anote todas las cantidades que pide la tabla 3.1.
- d. ¿Qué es lo que observa?



8) A continuación.

- a. Deje 300Ω en la carga R_2 y ajuste 600Ω en la carga R_1 .
- b. Mida y anote todas las cantidades que pide la tabla 3.1.
- c. Describa lo que sucede.

- d. Reduzca el voltaje a cero y desconecte la fuente de alimentación.

9) Enseguida.

- a. Vuelva a conectar la línea del neutro del transformador al medidor de la corriente en el neutro I_N .
- b. Sustituya la carga R_2 con el módulo de inductancia.
- c. Ajuste R_1 a una resistencia de 400Ω .
- d. Ajuste R_2 a una reactancia inductiva X_L de 400Ω .
- e. Conecte la fuente de alimentación y ajústela a $208 V_{CA}$.
- f. Mida y anote todas las cantidades que pide la tabla 3.1.
- g. Reduzca el voltaje a cero y desconecte la fuente de alimentación.
- h. ¿Es igual la corriente del hilo neutro a la diferencia aritmética entre las corrientes de línea? Explique la razón.

6. PREGUNTAS DE EVALUACIÓN.

- 1) Describa los efectos observados durante el desarrollo de la práctica en términos de la regulación de tensión.

- 2) El sistema de potencia eléctrica instalado en una casa es de $120/240 V_{CA}$ y tiene las siguientes cargas:

Línea 1 a Neutro.

7 lámparas de $60W$ c/u.
 1 lámpara de $100 W$.
 1 motor ($5 A_{CA}$).

Línea 2 a Neutro.

1 televisión de $200 W$.
 1 tostador de $1200 W$.
 4 lámparas de $40 W$ c/u.

Línea 1 a Línea 2.

1 secadora de $2kW$.
 1 estufa de $1 kW$.



- a. Calcule las corrientes de la línea 1, la línea 2 y del hilo neutro (suponga que el factor de potencia es del 100% en todos los aparatos).

$I_1 =$ _____

Línea 1 = _____ A_{CA}

$I_2 =$ _____

Línea 2 = _____ A_{CA}

$I_N =$ _____

Neutral = _____ A_{CA}

- b. Si se abre el conductor neutro, ¿cuáles lámparas brillarán más y cuáles menos?

- 3) Un transformador de distribución de 2 400 V a 120/240 V, tiene una capacidad de 60 kVA.

- a. ¿Cuál es la corriente de línea nominal del secundario (240V)?



- b. Si la carga se coloca toda en un lado (línea a neutro, 120 V), ¿cuál es la máxima carga que el transformador puede soportar sin sobrecalentarse?

7. CONCLUSIONES.

8. REFERENCIAS.

Wildi, Theodore., De Vito, Michael J. *Experimentos con equipo eléctrico*. México, Limusa, 1991, pp. 44-1 – 44-4.

Industrias IEM, S.A. de C.V. *Instrucciones para transformadores de distribución sumergidos en aceite de 5 a 500 kVA, 34,500 Volts y menores, monofásicos y trifásicos*. Libro de instrucción, México, 2008.

Wildi, Theodore., De Vito, Michael J. *Investigations in electric power technology. Instructor's edition*. U.S.A., Limusa, 1971, pp. 241 - 244.

Chapman, Stephen J. *Máquinas Eléctricas*. 5^a ed., México, Mc Graw - Hill, 2012, pp. 101-103, 110.

American Electric Power (June 20, 2012). *What's on a Power Pole?* [en línea]. <<http://3blmedia.com/News/Whats-Power-Pole>>



U.N.A.M.	Ingeniería Eléctrica Electrónica
F.E.S. Aragón	
Laboratorio de Sistemas de Distribución	

PRÁCTICA 4

TRANSFORMADORES EN PARALELO

1. OBJETIVOS.

- Aprender a conectar transformadores en paralelo.
- Determinar la eficiencia de los transformadores conectados en paralelo.

2. INTRODUCCIÓN.

Se dice que dos transformadores operan en paralelo cuando sus primarios están conectados a una misma fuente y los secundarios a la misma carga; como se muestra en la siguiente figura, que generaliza casos de transformadores monofásicos y trifásicos.

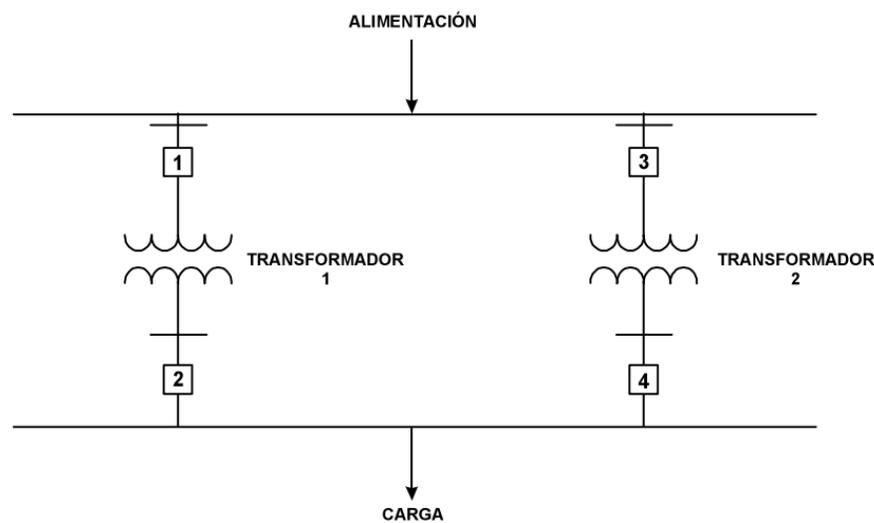


Figura 4.1 Concepto general de operación en paralelo de los transformadores.



Se realiza la conexión en paralelo cuando:

- La capacidad de generación es muy grande y no se fabrican transformadores para esa capacidad, o bien, si se requiere repartir la carga.
- Se aumenta la capacidad instalada en alguna industria o sistema, ya que resulta más conveniente conectar en paralelo otro transformador existente para satisfacer la demanda, que instalar uno nuevo que tenga la capacidad total.
- Se desea continuidad de servicio en una instalación donde la carga se divide en dos o más transformadores en paralelo, de tal manera que el servicio no quede interrumpido por falla o reparación de un transformador.

En la industria, con frecuencia, es necesario conectar bancos de transformadores en paralelo. Sin embargo, para que ninguno de los componentes del banco se sobrecargue, con su respectivo calentamiento y desgaste prematuro, es conveniente seguir ciertos lineamientos con respecto a las características de cada transformador.

Estos requisitos, además de permitir que dos o más transformadores operen correctamente en paralelo, previenen el riesgo de producir grandes corrientes de corto circuito, corrientes circulantes o divisiones de corriente indeseadas. Estas situaciones reducen la eficiencia y disminuyen la cantidad máxima de carga que los transformadores en paralelo pueden acarrear. Los transformadores, los interruptores y los circuitos asociados pueden sufrir daños severos, e incluso explotar, si las corrientes de corto circuito llegan a ser excesivas. Dichos requisitos son:

- Tener igual relación de transformación (iguales voltajes, tanto en sus devanados primarios como en sus devanados secundarios).
- Tener igual relación de resistencia a reactancia (R/X).
- Tener igual polaridad.
- Deben conectarse con la misma secuencia de fase.

Una condición deseable también para la conexión en paralelo, es que en los transformadores que tienen distinta potencia en kVA, la impedancia equivalente debe ser inversamente proporcional al valor de la capacidad individual en kVA, para así prevenir la presencia de corrientes circulantes.

Para el caso de los transformadores de distribución; cuando estos transformadores se instalan en bancos múltiples a lo largo de la línea de distribución, en diferentes postes, la caída de la línea usualmente compensará la diferencia en impedancia. Los transformadores en un mismo poste no son usualmente operados en paralelo, excepto en una emergencia, debido a que las pérdidas en las unidades excederán las pérdidas de una unidad más grande con capacidad igual a la del total de dichas unidades. Sin embargo, si los transformadores son operados así, el transformador que tenga la impedancia más baja tomará más carga de la que le corresponde.



Condiciones para conexión y consideraciones de carga.

Los transformadores conectados en paralelo tienen el mismo voltaje, tanto en el devanado primario, como en el secundario. La diferencia en el voltaje entre el primario y el secundario es la relación de vueltas o relación de transformación. Para que los voltajes en estas terminales sean los mismos, en los transformadores en paralelo, sus impedancias deben ser idénticas. Por lo tanto, bajo cualquier condición de carga, la corriente se divide de tal forma que el producto de impedancia y corriente en un transformador es igual al producto de impedancia y corriente en el otro. Además, si la relación de vueltas de los transformadores es diferente, pero los voltajes en las terminales del primario y del secundario son los mismos en ambos transformadores, entonces corrientes circulantes fluirán entre los transformadores, incluso sin carga.

Las corrientes circulantes son las corrientes que fluyen sin carga entre los devanados de alta y baja tensión. Son causadas por el flujo magnético, fluyen en el devanado, en el núcleo y en otras partes conductoras sujetas al campo magnético del transformador, causando un calentamiento adicional. Las corrientes circulantes no deben confundirse con las corrientes de excitación.

A continuación analizaremos lo que sucede cuando se conectan transformadores en paralelo al cambiar las condiciones de impedancia, relación de transformación y valores de kVA.

- **Misma impedancia y misma relación de transformación.**

El método estándar de la conexión de transformadores en paralelo es tener la misma relación de transformación, porcentaje de impedancias y valores de kVA. Conectar transformadores en paralelo con los mismos parámetros resulta en la distribución equitativa de la carga y en que no existan corrientes circulantes en los devanados de los transformadores.

A pesar de no ser común en las nuevas instalaciones, algunas veces dos transformadores con diferentes valores de kVA y mismo porcentaje de impedancia, se conectan a un bus común. En esta situación, la división de corrientes hace que cada transformador tenga su carga nominal. No habrá corrientes circulantes debido a que los voltajes (relación de transformación) son los mismos.

- **Diferente impedancia y misma relación de transformación.**

En la práctica, frecuentemente, se intentan mejorar los sistemas de energía al conectar los transformadores existentes en paralelo que tengan el mismo valor de kVA pero diferente porcentaje de impedancia. Esto es común cuando las limitaciones en el presupuesto impiden la compra de un transformador nuevo con las mismas características.

Lo que se necesita entender, es que las corrientes se dividen en proporciones inversas a las impedancias: la corriente más grande circula a través de la impedancia más pequeña. Por lo tanto, el transformador con el porcentaje de impedancia más bajo puede sobrecargarse cuando se somete a una carga pesada. Mientras que el transformador con el porcentaje de impedancia más alto será ligeramente cargado.



En instalaciones industriales y comerciales rara vez sucede que dos transformadores con diferentes kVA y distintos porcentajes de impedancia se conecten a un bus común. Sin embargo, puede darse la situación en la que dos subestaciones se conecten entre sí, mediante buses o cables, para proporcionar un mejor soporte de tensión al arrancar motores grandes. Si el porcentaje de impedancia y los valores de kVA son diferentes, se debe tener cuidado al cargar estos transformadores, pues la corriente de carga de la conexión en paralelo de los transformadores será menor que sus kVA nominales.

- **Diferente impedancia y diferente relación de transformación.**

Si la impedancia y la relación de transformación de ambos transformadores son diferentes, las corrientes circulantes debidas a las relaciones de transformación desiguales, se combinan con cada distribución de corriente de carga para obtener la corriente total real en cada transformador. Para un factor de potencia unitario, 10% de las corrientes circulantes debidas a las relaciones de transformación desiguales resultan en sólo la mitad del porcentaje total de corriente. En los factores de potencia más bajos las corrientes circulantes cambian drásticamente.

En resumen, las condiciones de carga para transformadores en paralelo son simples a menos que los valores de potencia aparente en kVA, porcentajes de impedancia o relaciones de transformación sean diferentes. Cuando las relaciones de transformación y porcentajes de impedancia son los mismos, existirá una distribución uniforme de la carga en cada transformador. Cuando los kVA sean los mismos, pero los porcentajes de impedancia sean diferentes, ocurrirá una distribución desigual de la carga. Lo mismo sucede cuando los porcentajes de impedancia y los kVA son diferentes. Las corrientes circulantes sólo existen si las relaciones de transformación no coinciden en cada transformador. La magnitud de estas corrientes circulantes depende de la relación de resistencia a reactancia de los transformadores. La tabla 4.1 es un compendio de todas las condiciones mencionadas anteriormente.

Condiciones para conexión de transformadores en paralelo		Carga equitativa	Carga no equitativa	Preocupación por sobrecarga	Corrientes circulantes	Recomendación de conexión
Misma impedancia y misma relación de transformación	Mismos kVA	Sí	No	No	No	Sí
	Diferentes kVA	No	Sí	No	No	Sí
Diferente impedancia y misma relación de transformación	Mismos kVA	No	Sí	Sí	No	No
	Diferentes kVA	No	Sí	Sí	No	No
Diferente impedancia y diferente relación de transformación	Mismos kVA	Sí	No	Sí	Sí	No
	Diferentes kVA	No	Sí	Sí	Sí	No

Tabla 4.1 Síntesis de conexión de transformadores en paralelo.



Métodos de paralelaje.

En los últimos años se han identificado numerosos procedimientos para llevar a cabo el cambio de tomas bajo carga (LTC, por sus siglas en inglés, Load Tap Charger) en transformadores en paralelo mediante control electrónico.

Los dos procedimientos de paralelaje más comunes son el “Maestro/Seguidor” y la “Minimización de corrientes circulantes”.

- ***Maestro/Seguidor.***

Este método opera en una simple premisa: Designa un control como el “Maestro”; todas las demás unidades son “Seguidores”. Sólo el Maestro necesita conocer el voltaje y la necesidad de un cambio de Tap. A partir del reconocimiento de tal necesidad, el Maestro ordena un cambio de Tap en el primer transformador. La acción de cambio de Tap en el transformador no.1 activa los contactores y relevadores que hacen que el circuito del LTC continúe la acción en todos los seguidores, bloqueando temporalmente las acciones del Maestro. A su vez, la acción del LTC de los seguidores activa los contactores y relevadores adicionales, liberando así al Maestro para poder hacer otro cambio de Tap cuando sea requerido.

Ventajas: Los transformadores en paralelo siempre operarán balanceados, lo que resulta en un mínimo de pérdidas en el sistema.

Desventajas: Implica numerosos relevadores auxiliares que pueden fallar, bloqueando el sistema.

- ***Corrientes circulantes.***

Todas las implementaciones analógicas comunes de este método proporcionan un significado electrónico (un “balanceador paralelo”) de extracción de la corriente de carga y de la corriente circulante del total de la corriente del transformador. Estas corrientes se utilizan para sus propios fines; la corriente de carga sirve como base para la compensación de caída de la línea (LDC, por sus siglas en inglés, Line - Drop Compensation), y la corriente circulante sirve como base para el control a favor de la siguiente acción del LTC que mantendrá las corrientes circulantes al mínimo.

Ventajas: En general, el funcionamiento es fiable para cualquier número razonable de transformadores en paralelo. Usa la misma corriente del transformador como la prevista por la compensación de caída de la línea pero opera de forma independiente de dicha compensación.

Desventajas: Los circuitos de control pueden ser confusos y deben ser precisos en lo referido a la polaridad de transformadores de instrumento. La operación apropiada se predice en el sistema de tal forma que ninguna diferencia significativa en las corrientes del transformador se deben únicamente a las corrientes circulantes. Los transformadores en paralelo, algunas veces, operarán desbalanceados, es decir, a diferentes Tap’s, por debajo de las condiciones nominales.



Eficiencia del transformador.

En un transformador ideal no existen pérdidas internas. Por lo tanto, la potencia en el secundario es exactamente la misma potencia que en el primario. En la práctica, se disipa potencia debido a las pérdidas en el cobre y en el hierro. La cantidad global de dichas pérdidas es, simplemente, la diferencia entre la potencia de entrada y la potencia de salida; esta potencia disipada es una parte de la potencia total suministrada por la fuente de alimentación. El grado en el que cualquier transformador se aproxima a las condiciones ideales se conoce como *Eficiencia del transformador*.

La eficiencia de cualquier máquina o dispositivo eléctrico, expresada como porcentaje, se determina usando la relación entre la potencias activas de entrada y salida. La ecuación de la eficiencia es:

$$\% \eta = \frac{P_{salida}}{P_{entrada}} \times 100$$

La potencia aparente y la potencia reactiva no se utilizan para calcular la eficiencia de los transformadores. Por lo tanto, si el transformador llegase a alimentar cargas puramente inductivas o puramente capacitivas, en la potencia de salida se tendría únicamente potencia reactiva; la ecuación de la eficiencia tendría el valor de cero en el numerador y, en consecuencia, la eficiencia también valdría 0%.

En esta práctica se conectarán dos transformadores en paralelo para suministrar más potencia de la que le sería posible suministrar a un solo transformador. Se podrá confirmar que las conexiones en los transformadores son correctas al verificar en los equipos de medición que no fluye corriente a través de los devanados secundarios antes de conectar la carga. Además, se comprobará que la potencia en la carga se distribuye de manera equitativa entre los dos transformadores.

3. CUESTIONARIO PREVIO.

- 1) ¿Para qué sirve conectar transformadores en paralelo?
- 2) Mencione las condiciones necesarias para conectar transformadores en paralelo.
- 3) ¿Cómo se puede saber que dos transformadores están correctamente conectados en paralelo?
- 4) ¿Qué sucede cuando dos transformadores con diferente impedancia se conectan en paralelo?
- 5) Investigue en qué consisten los siguientes métodos de paralelaje:
 - a. Método de Maestro/Seguidor.
 - b. Método de corrientes circulantes.



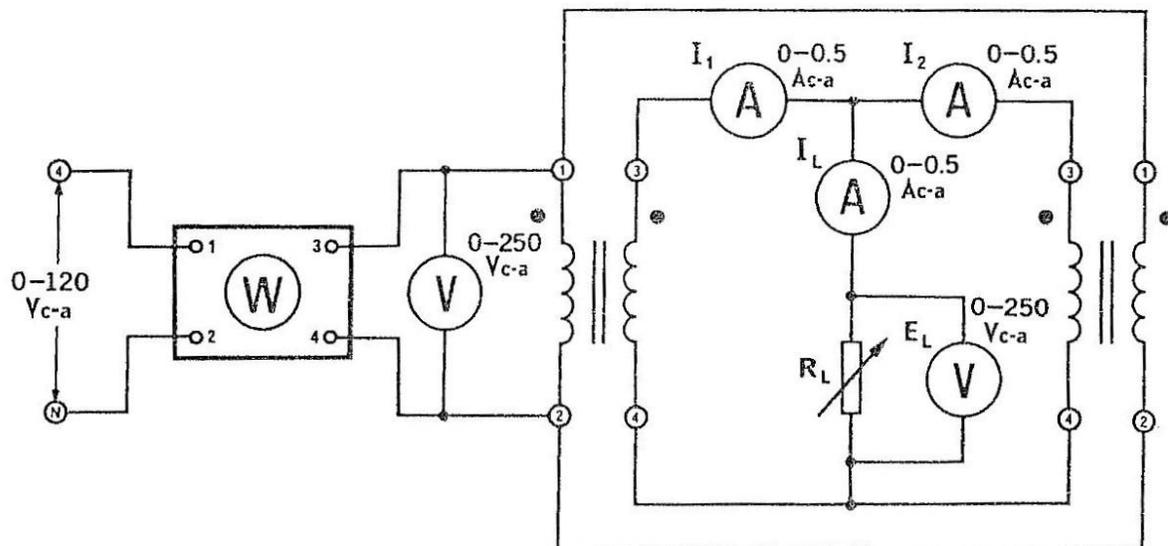
4. MATERIAL.

- | | |
|---|----------|
| - Módulo de fuente de alimentación. (0-120 V_{CA}) | EMS 8821 |
| - Módulo de transformador. (2) | EMS 8341 |
| - Módulo de wattímetro monofásico. (750 W) | EMS 8431 |
| - Módulo de medición de CA. (0.5/0.5/0.5 A) | EMS 8425 |
| - Módulo de medición de CA. (250/250 V) | EMS 8426 |
| - Módulo de resistencia. | EMS 8311 |
| - Cables de conexión. | EMS 8941 |

5. DESARROLLO.

¡ATENCIÓN! En esta práctica se manejan altos voltajes, no hacer ninguna conexión cuando la fuente este energizada y siempre des energie la fuente después de cada medición.

- 1) Conecte el siguiente circuito.



- a. Observe que los dos transformadores están conectados en paralelo. Los devanados primarios (1 a 2) se conectan a la fuente de alimentación de 120 V_{CA} . El wattímetro indicará la potencia de entrada. Cada devanado secundario (3 a 4) se conecta en paralelo con la carga R_L . Los amperímetros se conectan para medir la corriente de carga I_L y las corrientes de los secundarios de los transformadores I_1 e I_2 .



- 2) Ponga todos los interruptores de resistencia en la posición “abierto” para tener una corriente de carga igual a cero. Observe que los devanados se conectan para funcionar como transformador elevador (120 V del primario a 208 V del secundario).
- 3) Posteriormente.
 - a. Conecte la fuente de alimentación y haga girar lentamente la perilla de control del voltaje de salida, mientras que observa los medidores de corriente de los secundarios de los transformadores, I_1 e I_2 , así como el medidor de la corriente de carga R_L . Si los devanados están en la correcta secuencia de fase, no habrá ninguna corriente de carga, ni corrientes en los secundarios.

Si existe corriente en los devanados secundarios, significa que las conexiones son erróneas y es necesario verificarlas. Regrese la perilla de control de voltaje a cero, desconecte la fuente de alimentación y revise la conexión del circuito.

- b. Ajuste el voltaje de la fuente de alimentación a $120 V_{CA}$ según lo indica el voltímetro conectado a través del wattímetro.
- 4) Enseguida.
 - a. Aumente gradualmente la carga R_L , hasta que la corriente de carga I_L sea igual a $400 mA_{CA}$.
 - b. Mida y anote el voltaje de carga, la corriente de carga, las corrientes en los secundarios de los transformadores y la potencia de entrada.

$$\begin{aligned}
 E_L &= \text{_____} V_{CA} \\
 I_L &= \text{_____} A_{CA} \\
 I_1 &= \text{_____} A_{CA} \\
 I_2 &= \text{_____} A_{CA} \\
 P_{entrada} &= \text{_____} W
 \end{aligned}$$

- c. Reduzca el voltaje a cero y desconecte la fuente de alimentación.
- 5) Para continuar.
 - a. Calcule la potencia de salida, es decir, la potencia en la carga.

$$\begin{aligned}
 P_{salida} &= E_L \times I_L \\
 &= \text{_____} = \text{_____} W
 \end{aligned}$$

- b. Calcule la eficiencia del circuito.

Tome en cuenta que siempre la P_{salida} es menor que la $P_{entrada}$.



$$\% \eta = \frac{P_{salida}}{P_{entrada}} \times 100$$

$$= \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}} \%$$

c. Calcule las pérdidas del transformador.

$$P_{\text{p\u00e9rdidas}} = P_{\text{entrada}} - P_{\text{salida}}$$

$$= \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ W}$$

d. Calcule la potencia entregada por el transformador 1.

$$P_{T_1} = E_L \times I_1$$

$$= \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ W}$$

e. Calcule la potencia entregada por el transformador 2.

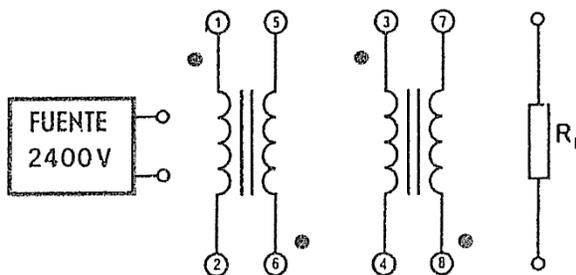
$$P_{T_2} = E_L \times I_2$$

$$= \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ W}$$

6) Entre los dos transformadores ¿la carga está distribuida, más o menos, uniformemente? Amplíe su respuesta.

6. PREGUNTAS DE EVALUACIÓN.

1) De la siguiente figura, indique cómo conectaría en paralelo los transformadores a la fuente y la carga. Los devanados 1 a 2 y 3 a 4, tienen un valor nominal de 2.4 kV_{CA} y los devanados 5 a 6 y 7 a 8, tienen un valor nominal de 400 V_{CA} .





- 2) La eficiencia de un transformador que proporciona una carga capacitiva pura, es cero. Explique esto.

- 3) Mencione todas las pérdidas que hacen que un transformador se caliente.

- 4) Realice un análisis comparativo entre la eficiencia del transformador y la eficiencia del motor.

7. CONCLUSIONES.



8. REFERENCIAS.

Jauch, E. Tom. *Advanced Transformer Paralleling*. Beckwith Electric Co., Inc. <<https://beckwithelectric.com/docs/tech-papers/advxpara.pdf>>

Rivero de la Torre, Ramón. *Conexión de transformadores trifásicos en paralelo*. Instituto Tecnológico de Ciudad Madero, Tamaulipas. México.

Enríquez Harper, Gilberto. *Curso de transformadores y motores de inducción*. 4ª ed. México, Limusa, 2005, pp. 259 -301.

Enríquez Harper, Gilberto. *El ABC de la calidad de la energía eléctrica*. México, Limusa, 2012, pp. 93.

Harlow, James H. *Electric Power Transformer Engineering*. U.S.A., The Electric Power Engineering Series, 2004, pp. 312, 348 – 353.

Viakon. *Equipo eléctrico y su aplicación*. Manual Eléctrico, pp. 185 – 196.

Wildi, Theodore., De Vito, Michael J. *Experimentos con equipo eléctrico*. México, Limusa, 1991, pp. 43-1 – 43-4.

Transformers Committee of the IEEE Power Engineering Society (March 2001). *IEEE Standard Terminal Markings and Connections for Distribution and Power Transformers*. U.S.A., The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.,

Industrias IEM, S.A. de C.V. *Instrucciones para transformadores de distribución sumergidos en aceite de 5 a 500 kVA, 34,500 Volts y menores, monofásicos y trifásicos*. Libro de instrucción, México, 2008.

Wildi, Theodore., De Vito, Michael J. *Investigations in electric power technology. Instructor's edition*. U.S.A., Limusa, 1971, pp. 237 - 240.

Zientek, Ed. *Loading considerations when paralleling transformers*. Schneider Electric USA, Inc., Document Number AT322, U.S.A., 2011.



U.N.A.M.	Ingeniería Eléctrica Electrónica
F.E.S. Aragón	
Laboratorio de Sistemas de Distribución	

PRÁCTICA 5

DESPLAZAMIENTO DE FASE EN TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

1. OBJETIVOS.

- a) Determinar la secuencia de fases de una fuente trifásica.
- b) Comprender la importancia del desplazamiento del ángulo de fase en transformadores trifásicos.
- c) Aprender a realizar las pruebas que estipulan las normas ANCE e IEEE para determinar el correcto desplazamiento del ángulo de fase en transformadores trifásicos.

2. INTRODUCCIÓN.

La norma NMX-J-285-ANCE-2013 establece los siguientes lineamientos para polaridad, desplazamiento angular, secuencia de fases y designación de terminales en los transformadores.

- *Polaridad en transformadores monofásicos.*
Todos los transformadores monofásicos deben ser de polaridad sustractiva, tal como muestra la tabla 5.1.
- *Desplazamiento angular de transformadores trifásicos.*
El desplazamiento angular entre los fasores de media tensión y los fasores de baja tensión para transformadores con conexiones delta-delta o estrella-estrella, debe ser 0° , como se muestra en la tabla 5.2.

En el desplazamiento angular entre los fasores de media tensión y los fasores de baja tensión para transformadores con conexiones estrella-delta o delta-estrella, el fasor de baja tensión debe ser 30° atrasado con respecto al fasor de media tensión, como se muestra en la tabla 5.2.



- *Secuencia de fases.*
La secuencia de fases debe ser en el orden 1,2, 3 en el sentido contrario a las manecillas del reloj, como se observa en los diagramas de la tabla 5.2.
- *Designación de terminales.*
Los devanados de un transformador deben distinguirse uno del otro, de acuerdo con lo siguiente:
 - 1) En los transformadores de dos devanados, el de media tensión se designa con la letra H y el de baja tensión con la letra X.
 - 2) Las terminales del transformador deben identificarse con una letra mayúscula y un número. Ejemplos: H1, H2, H3, X1, X2 y X3.
 - 3) La terminal del neutro en transformadores trifásicos debe marcarse con la letra propia del devanado y el número cero. Ejemplos: H0 y X0.
 - 4) Una terminal de neutro que sea común a dos o más devanados, de transformadores monofásicos o trifásicos, debe marcarse con la combinación de las letras de los devanados y con los número cero. Ejemplo: H0X0.
 - 5) Si un transformador tiene un devanado con dos terminales y una de ellas está directamente conectada a tierra, ésta que es la número 2, debe designarse con la letra correspondiente y el número cero.

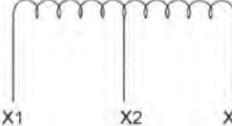
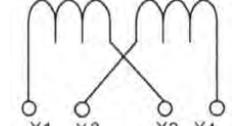
Descripción de la conexión	Polaridad sustractiva
Devanado de baja tensión en serie.	
Devanado de baja tensión en serie con derivación.	
Devanado de media tensión.	
Devanado de baja tensión apto para operación en serie, paralelo o de tres hilos.	

Tabla 5.1 *Designación de terminales y conexión para transformadores monofásicos (vistos desde baja tensión).*

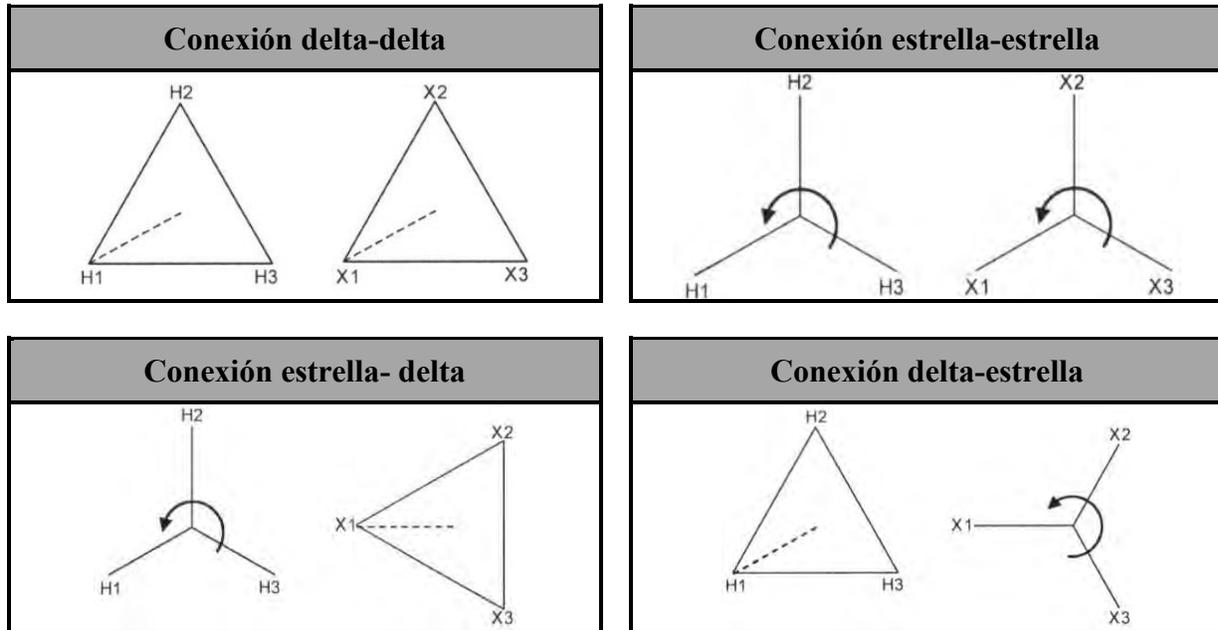


Tabla 5.2 Desplazamiento angular en diferentes tipos de conexiones de un transformador trifásico.

Polaridad de transformadores.

La polaridad de un transformador es simplemente una indicación de la dirección del flujo de corriente desde una terminal en cualquier instante. La idea es bastante similar a las marcas de polaridad en una batería.

Según se observa el lado de alta tensión del transformador en la figura 5.1, la terminal de alto voltaje de la derecha siempre se marca como H1 y la otra terminal de alto voltaje se marca como H2. Este es un estándar establecido.

Por definición, la polaridad es aditiva si al conectar dos terminales adyacentes de alto y bajo voltaje y excitar el transformador, un voltímetro entre las otras dos terminales adyacentes tomará lectura de la suma de las tensiones de los devanados de alto y bajo voltaje. En otras palabras, si la lectura del voltímetro es mayor que la tensión aplicada, la polaridad es aditiva. En este caso, la terminal de bajo voltaje de la derecha, véase figura 5.1, debe marcarse como X1 y la otra terminal de bajo voltaje como X2.

En la polaridad substractiva, el voltímetro toma lectura de la diferencia de voltaje entre los dos devanados. En otras palabras, si la lectura del voltímetro es menor que la tensión aplicada, la polaridad es substractiva. En este caso, la terminal de bajo voltaje del lado izquierdo se marca como X1. Véase figura 5.2.

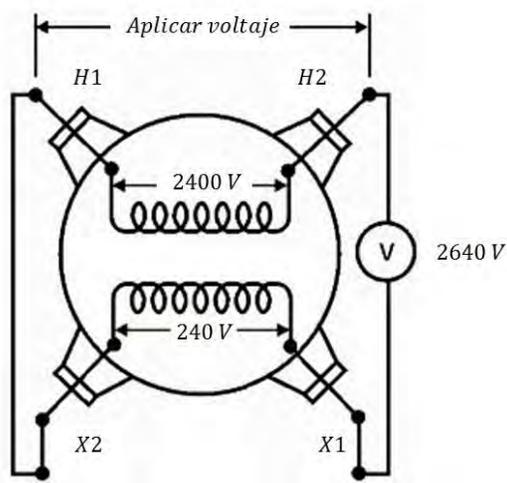


Figura 5.1 Polaridad aditiva.

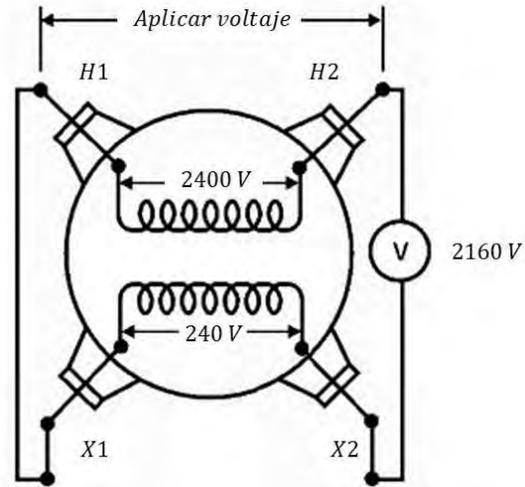


Figura 5.2 Polaridad subtractiva.

El método descrito se limita a transformadores en los cuales la relación de transformación permite apreciar la diferencia entre ambas lecturas.

La polaridad de cada fase de un transformador trifásico se determina con la misma metodología especificada para transformadores monofásicos y se aplican las mismas limitaciones.

Al realizar las conexiones del transformador, particularmente en bancos de transformadores, la polaridad de los transformadores individuales debe ser verificada. Al hacer tales conexiones es necesario recordar que todas las terminales H1 son de la misma polaridad y, así mismo, todas las terminales X1 son de la misma polaridad.

Por ejemplo, si se conectan dos transformadores monofásicos en paralelo, se deben conectar entre sí: las dos terminales H1, las dos terminales H2, las dos terminales X1 y las dos terminales X2. Siguiendo este procedimiento, y sin olvidar los demás requisitos del paralelaje, se pueden conectar satisfactoriamente dos o más transformadores en paralelo, sin importar que sean o no de la misma polaridad.

Secuencia de fases.

Un sistema trifásico de energía eléctrica es aquel en que los tres voltajes A, B y C tienen igual magnitud y están defasados entre sí 120° grados eléctricos. Sin embargo, el defasamiento no es suficiente. El orden en que los voltajes se suceden entre sí, se denomina secuencia de fase de los voltajes.



La secuencia de fases de una fuente trifásica es el orden cronológico en el que se suceden entre sí sus tres voltajes de línea; es decir, el orden en el que alcanzan sus valores positivos máximos. Es importante conocer la secuencia de fases cuando van a conectarse otras líneas trifásicas en paralelo, o cuando se debe conocer con anterioridad la dirección de rotación de los grandes motores.

Comúnmente, la secuencia de fases se indica sobre las barras colectoras, mediante ciertos colores, o bien, puede encontrarse usando un indicador de secuencia de fases. Si no se cuenta con un dispositivo de este tipo, puede hallarse la secuencia de fases conectando en estrella dos resistores iguales y un capacitor a las tres terminales de la fuente de energía, como se ve en la figura 5.3. Se encontrará que los voltajes a través de los dos resistores son desiguales y la secuencia de fases es en el orden: alto voltaje – bajo voltaje – capacitor. Por ejemplo, si los voltajes a través de los resistores son 20 V y 80 V , como se ilustra en la figura 5.3, la secuencia de fases es B-A-C. Los voltajes se suceden entre sí, en la secuencia B-A-C-B-A-C; de donde, la secuencia B-A-C es igual a la secuencia A-C-B, o la secuencia C-B-A.

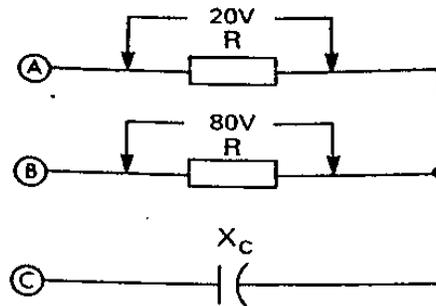


Figura 5.3 Diagrama de conexión para conocer la secuencia de fases de una fuente de alimentación trifásica.

La secuencia de fases de una línea trifásica puede cambiarse intercambiando dos conductores cualesquiera. En instalaciones de poca energía esta es una tarea fácil, pero en las líneas de transmisión y barras colectoras, un cambio de conductores de este tipo es un trabajo importante y costoso. Por esta razón, en las grandes instalaciones de energía, se piensa cuidadosamente la secuencia de fases deseada.

Desplazamiento del ángulo de fase de transformadores trifásicos.

El desplazamiento angular es el ángulo de tiempo entre voltajes primarios y voltajes secundarios de referencia de un sistema trifásico.

Las normas ANCE e IEEE establecen que en un sistema delta-estrella, el sistema de alta tensión está adelantado 30 grados con respecto al sistema de baja tensión. Lo mismo sucede en el caso de

un sistema estrella-delta. La medición de este ángulo, que es el desplazamiento angular, puede hacerse de la siguiente manera:

Se traza una recta que une la polaridad H1 con su neutro correspondiente, así mismo, se traza una recta que une la polaridad X1 con su neutro correspondiente (llamadas líneas de angularidad primaria y secundaria, respectivamente). Se unen las terminales H1 y X1 y se mide el ángulo formado por las líneas de angularidad, en el sentido contrario a las manecillas del reloj, partiendo de la línea de angularidad de baja tensión hasta la línea de angularidad de alta tensión. En la figura 5.4 se muestra el procedimiento descrito para el caso de una conexión delta-estrella.

Nota: Se recomienda marcar las líneas de angularidad como vectores, para poder indicar la dirección de éstos y así, medir el ángulo sin cometer errores.

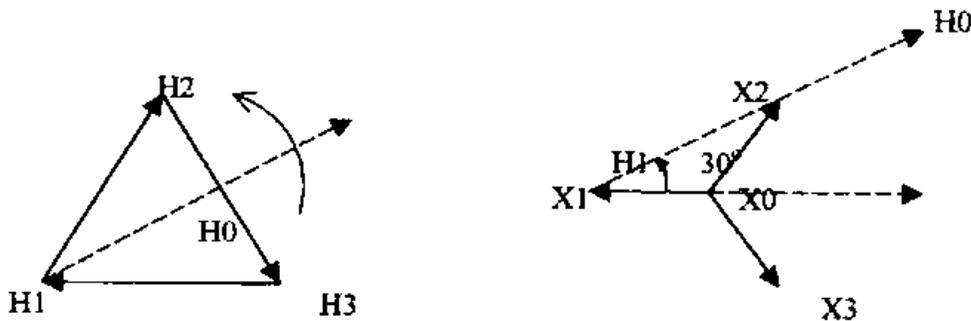


Figura 5.4 Desplazamiento angular de la conexión delta-estrella de un transformador trifásico.

El diagrama vectorial es uno de los parámetros presentes en las placas de datos de transformadores trifásicos. Las figuras 5.5 y 5.6 muestran ejemplos de transformadores con conexión delta-estrella.

Prueba para verificar el diagrama fasorial.

El diagrama fasorial de transformadores trifásicos que define el desplazamiento angular y la secuencia de fases, se verifica conectando entre sí las terminales H1 y X1, excitando el transformador, tomando lecturas de tensiones entre pares de terminales y comparándolas como se indica en la tabla 5.3.

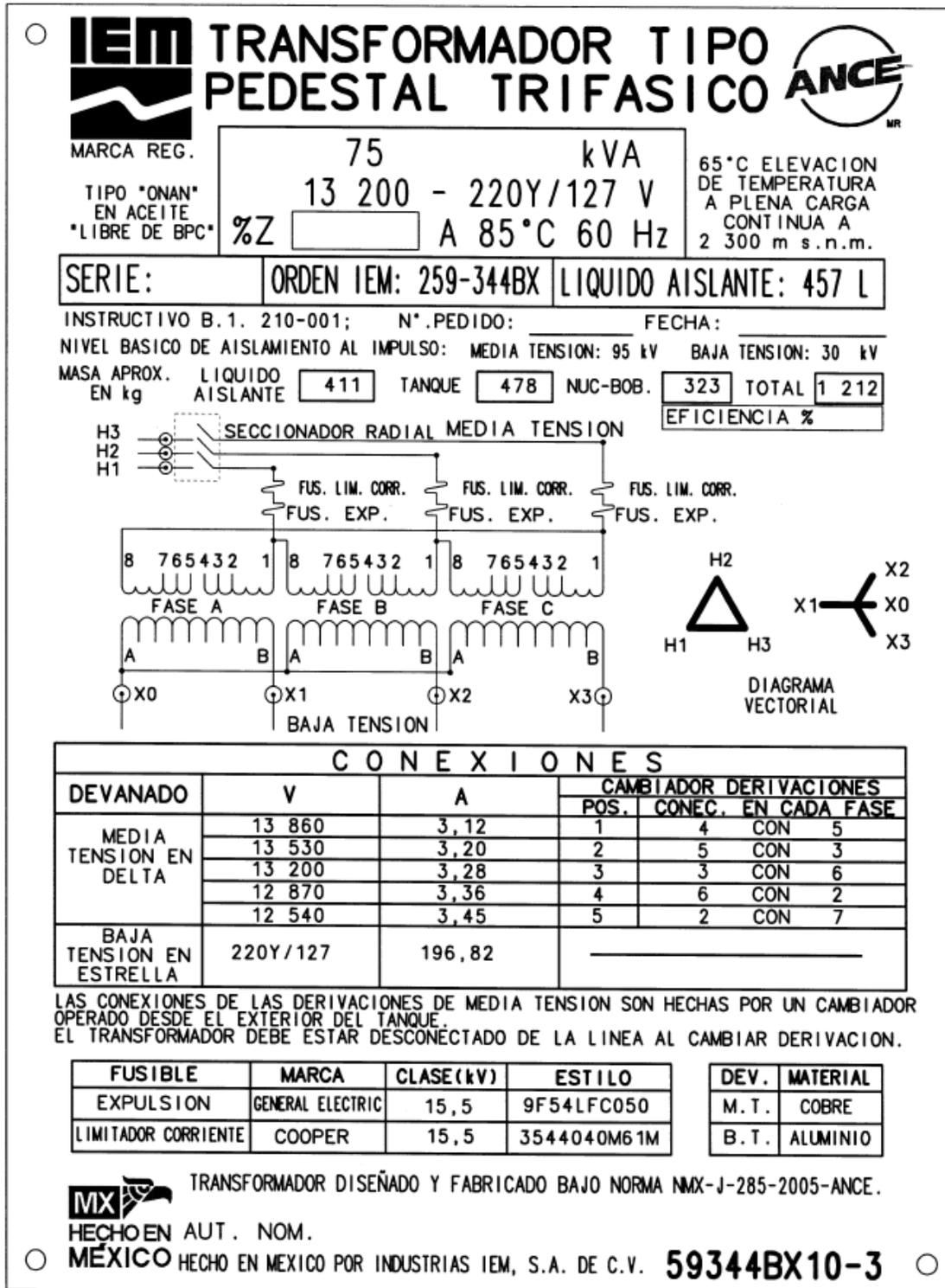


Figura 5.5 Placa de datos de un transformador trifásico tipo pedestal.

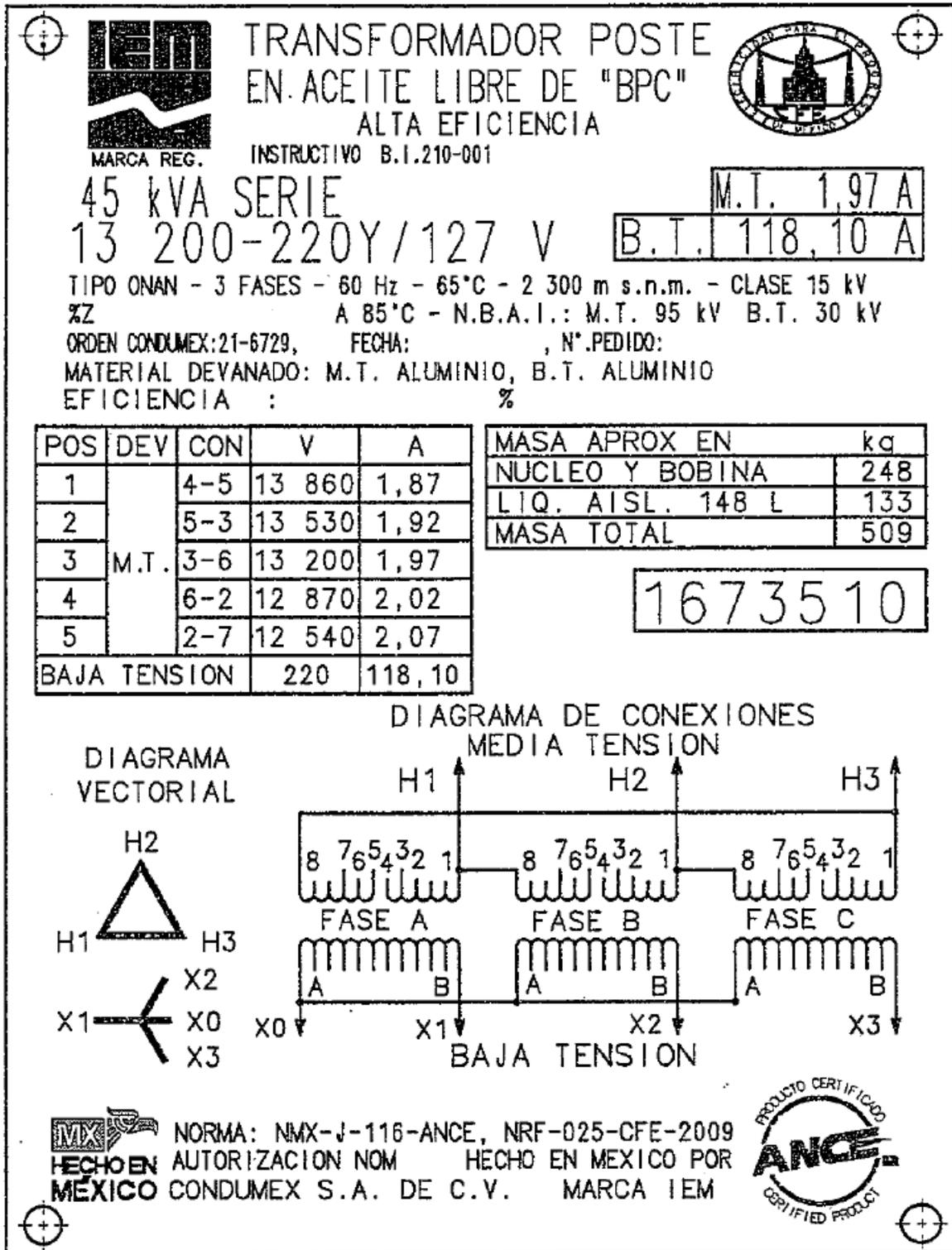


Figura 5.6 Placa de datos de un transformador trifásico tipo poste.



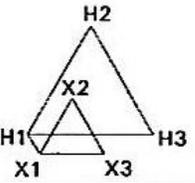
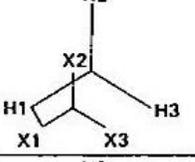
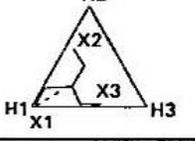
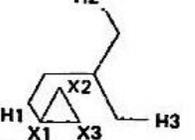
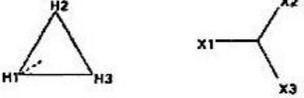
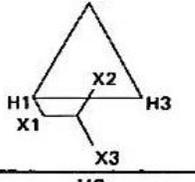
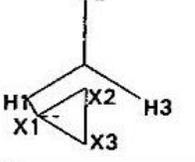
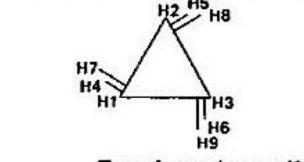
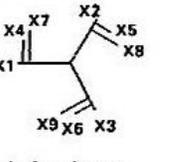
Grupo	Desplazamiento angular	Diagrama de mediciones para pruebas	Mediciones para prueba
Grupo 1 desplazamiento angular de 0 grados	 <p>Conexión delta</p>		<p>Conectar H1 A X1 Medir H2 - X2, H3 - X2, H1 - H2, H2 - X3, H3 - X3</p> <p>Relaciones de tensión (1) $H2 - X3 = H3 - X2$ (2) $H2 - X2 < H1 - H2$ (3) $H2 - X2 < H2 - X3$ (4) $H2 - X2 = H3 - X3$</p>
	 <p>Conexión Estrella - Estrella</p>		
	 <p>Conexión Delta - ZZ</p>		
	 <p>Conexión ZZ - Delta</p>		
Grupo 2 desplazamiento angular de 30 grados	 <p>Conexión Delta - Estrella</p>		<p>Conectar H1 A X1 Medir H3 - X2, H3 - X3, H1 - H3, H2 - X2, H2 - X3</p> <p>Relaciones de tensión $H3 - X2 = H3 - X3$ (1) $H3 - X2 < H1 - H3$ (2) $H2 - X2 < H2 - X3$ (3) $H2 - X2 < H1 - X3$</p>
	 <p>Conexión Estrella - Delta</p>		
	 <p>Transformadores trifásico con derivaciones</p>		

Tabla 5.3 Marcado de terminales y diagrama de secuencias de fases para conexión trifásica de transformadores, de acuerdo a la norma NMX-J-169-ANCE-2004.



3. CUESTIONARIO PREVIO.

- 1) Investigue cómo se determina la polaridad de los transformadores trifásicos.
- 2) Investigue qué es y cómo se determina la secuencia de fases de una fuente trifásica.
- 3) Investigue en la normativa vigente, una tabla de los diagramas vectoriales típicos de las diferentes conexiones de transformadores trifásicos.
- 4) Utilizando el diagrama vectorial, defina el desplazamiento del ángulo de fase para una conexión estrella – delta.

4. MATERIAL.

- | | |
|--|----------|
| - Módulo de fuente de alimentación (120/208 V_{CA} , 3 ϕ). | EMS 8821 |
| - Módulo de resistencia. | EMS 8311 |
| - Módulo de capacitancia. | EMS 8331 |
| - Módulo de medición CA (250/250 V_{CA}). | EMS 8426 |
| - Módulo de transformador trifásico. | EMS 8348 |
| - Cables de conexión. | EMS 8941 |
| - Multímetro digital. | |

5. DESARROLLO.

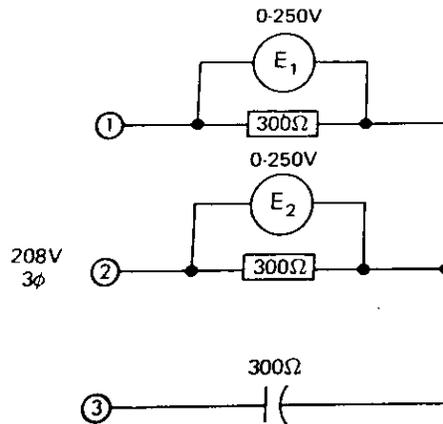
¡ATENCIÓN! En esta práctica se manejan altos voltajes, no hacer ninguna conexión cuando la fuente este energizada y siempre des energice la fuente después de cada medición.

5.1 EXPERIMENTO 1 – Secuencia de fases de la fuente trifásica fija.

- 1) Para determinar la secuencia de fases de la salida trifásica fija de la fuente de alimentación:
 - a. Conecte el siguiente circuito.
Ajuste el valor de cada resistor y de la reactancia capacitiva a 300 Ω . Observe que los tres elementos están conectados en estrella a las terminales de salida fija 1, 2 y 3 de la fuente de alimentación.
 - b. Encienda la fuente de alimentación.
 - c. Mida y anote los voltajes E_1 y E_2 .

$$E_1 = \text{_____ } V_{CA}$$

$$E_2 = \text{_____ } V_{CA}$$



- d. En relación a los voltajes E_1 y E_2 , determine la secuencia de fases (alto voltaje – bajo voltaje – capacitor).

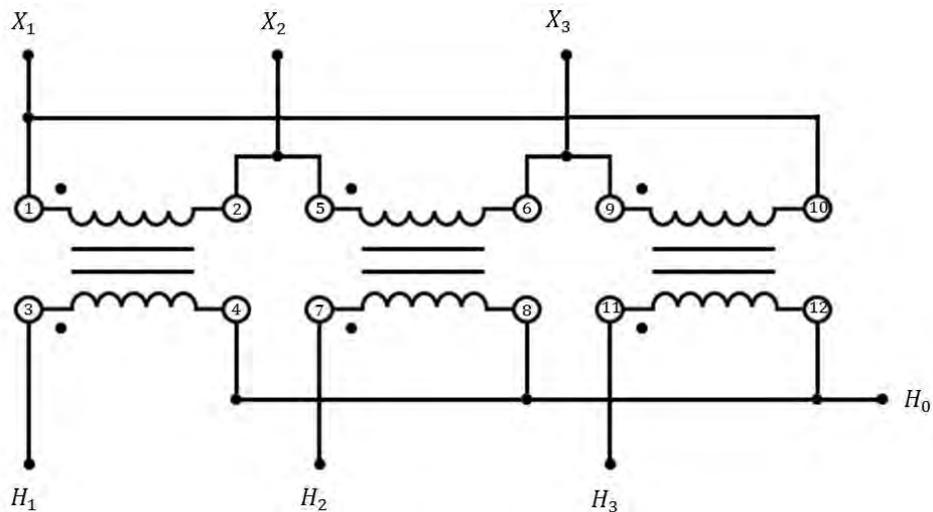
Secuencia de fases: _____

- e. Apague la fuente de alimentación y desconecte el circuito.

Alimentar al transformador con la adecuada secuencia de fases, es un requisito indispensable para realizar las pruebas que determinan si el desplazamiento angular del transformador es correcto o no.

5.2 EXPERIMENTO 2 – Desplazamiento de fases según la normas ANCE e IEEE.

- 1) Conecte el siguiente circuito.





- a. Observe que uno de los devanados está conectado en estrella: teniendo como punto común a H0, donde se conectan las terminales 4, 8 y 12 del transformador; las terminales 3, 7 y 11 del transformador son, respectivamente, las terminales de alimentación H1, H2 y H3 de este devanado. El otro devanado está conectado en delta, sus terminales están conectadas en serie: terminal 2 a 5, 6 a 9 y 10 a 1; las terminales de salida X1, X2 y X3 son, respectivamente, los puntos de unión de la conexión serie, terminales 10 a 1, 2 a 5 y 6 a 9.
- b. Siguiendo el orden de la secuencia de fases determinada en el experimento 5.1, conecte las terminales de salida fija de la fuente de alimentación a las terminales marcadas como H1, H2 y H3 del transformador. La terminal H0 del transformador se conecta a la terminal N de la fuente de alimentación.

Por ejemplo, teniendo una secuencia de fases ABC, tendría que conectarse:

La fase A a H1 del transformador.

La fase B a H2 del transformador.

La fase C a H3 del transformador.

- 2) ¿Por qué se marca como H el devanado conectado en estrella?

- 3) A continuación.

- a. Dibuje el diagrama vectorial de la conexión de cada devanado.

Diagrama vectorial	
Conexión estrella	Conexión delta

- b. Dibuje solamente los vectores H1 y X1, uniendo los vértices de cada uno en un punto. Al medir el ángulo formado por ambos vectores, podrá observar que:

El defasamiento es X1 retrasado 30° con respecto a H1.



Defasamiento angular

- 4) Para comprobar que el desplazamiento angular es correcto, de acuerdo a las normas ANCE e IEEE, se realizarán las siguientes pruebas:
- Conecte las terminales H1 y X1 (terminales 1 y 3 del transformador).
 - Encienda la fuente de alimentación.
 - Con el multímetro digital, mida el voltaje entre las terminales del transformador que pide la tabla 5.4 y anote sus lecturas.

	Voltaje entre terminales (V)
H3 – X2	
H3 – X3	
H1 – H3	
H2 – X2	
H2 – X3	

Tabla 5.4 Mediciones de tensión para prueba de defasamiento angular.

- Reduzca el voltaje a cero y desconecte la fuente de alimentación.
- Con las lecturas obtenidas, verifique que se cumplan las relaciones de tensión estipuladas en las normas ANCE e IEEE. Realice las comparaciones y anote sus resultados en la tabla 5.5.

H3 – X2	=	H3 – X3

H3 – X2	<	H1 – H3

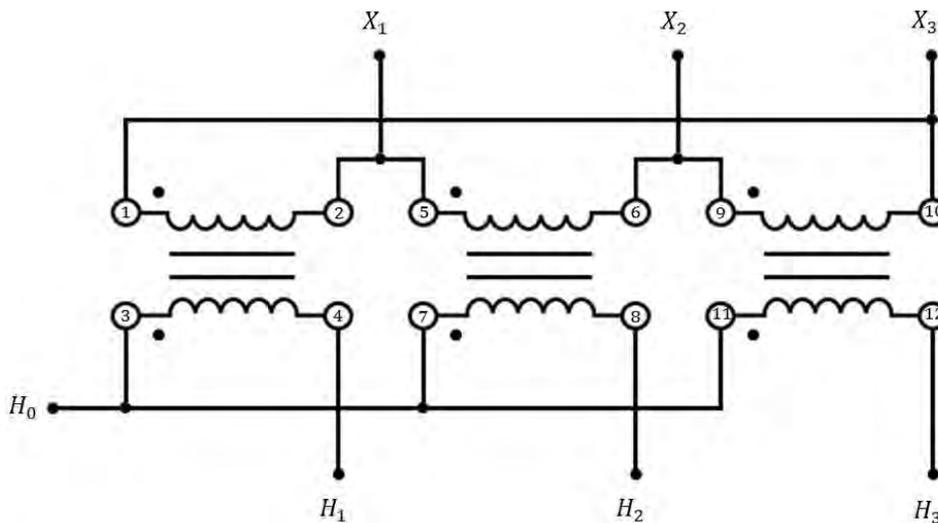


H2 – X2	<	H2 – X3

H2 – X2	<	H1 – H3

Tabla 5.5 Relaciones de tensión cuando el defasamiento angular es correcto.

- 5) Cambie la conexión del circuito según se indica a continuación y repita los pasos 3 y 4 del experimento 5.2.



- Observe que uno de los devanados está conectado en estrella: teniendo como punto común a H_0 , donde se conectan las terminales 3,7 y 11 del transformador; las terminales 4, 8 y 12 del transformador son, respectivamente, las terminales de alimentación H_1 , H_2 y H_3 de este devanado. El otro devanado está conectado en delta, sus terminales están conectadas en serie: terminal 2 a 5, 6 a 9 y 10 a 1; las terminales de salida X_1 , X_2 y X_3 son, respectivamente, los puntos de unión de la conexión serie, terminales 2 a 5, 6 a 9 y 10 a 1.
- Siguiendo el orden de la secuencia de fases determinada en el experimento 5.1, conecte las terminales de salida fija de la fuente de alimentación a las terminales marcadas como H_1 , H_2 y H_3 del transformador. La terminal H_0 del transformador se conecta a la terminal N de la fuente de alimentación.

Por ejemplo, teniendo una secuencia de fases ABC, tendría que conectarse:

La fase A a H_1 del transformador.

La fase B a H_2 del transformador.

La fase C a H_3 del transformador.



6) A continuación.

a. Dibuje el diagrama vectorial de la conexión de cada devanado.

Diagrama vectorial	
Conexión estrella	Conexión delta

b. Dibuje solamente los vectores $H1$ y $X1$, uniendo los vértices de cada uno en un punto. Al medir el ángulo formado por ambos vectores, podrá observar que:

El defasamiento es $X1$ adelantado 30° con respecto a $H1$.

Defasamiento angular

7) Para comprobar que el desplazamiento angular no es correcto, de acuerdo a las normas ANCE e IEEE, se realizarán las siguientes pruebas:

- Conecte las terminales $H1$ y $X1$ (terminales 2 y 4 del transformador).
- Encienda la fuente de alimentación.
- Con el multímetro digital, mida el voltaje entre las terminales del transformador que pide la tabla 5.6 y anote sus lecturas.
- Reduzca el voltaje a cero y desconecte la fuente de alimentación.



- e. Con las lecturas obtenidas, podrá verificar que no se cumplen las relaciones de tensión estipuladas en las normas ANCE e IEEE. Realice las comparaciones y anote sus resultados en la tabla 5.7.

	Voltaje entre terminales (V)
H3 – X2	
H3 – X3	
H1 – H3	
H2 – X2	
H2 – X3	

Tabla 5.6 Mediciones de tensión para prueba de defasamiento angular.

H3 – X2	=	H3 – X3

H3 – X2	<	H1 – H3

H2 – X2	<	H2 – X3

H2 – X2	<	H1 – H3

Tabla 5.7 Relaciones de tensión cuando el defasamiento angular no es correcto.

- f. ¿Por qué no se cumplen las relaciones de tensión?



6. PREGUNTAS DE EVALUACIÓN.

- 1) Explique la importancia de las marcas de polaridad y la designación de terminales en los transformadores de distribución y potencia.

- 2) Explique con sus propias palabras qué es y para qué sirve el diagrama vectorial en un transformador.

- 3) Dibuje el diagrama vectorial de las siguientes conexiones y mida su desplazamiento angular, en sentido antihorario, partiendo del vector de baja tensión (H1) hasta el de alta tensión.

a. Conexión delta-delta.

b. Conexión estrella-estrella.

c. Conexión delta-estrella.



- 4) ¿Por qué no se pueden conectar dos transformadores en paralelo si tienen diferente defasamiento angular?

7. CONCLUSIONES.

8. REFERENCIAS.

Rivero de la Torre, Ramón. *Conexión de transformadores trifásicos en paralelo*. Instituto Tecnológico de Ciudad Madero, Tamaulipas. México.

(March 1993) *Distribution Transformers*. Cooper Power Systems, Inc., U.S.A., Reference Data R201-90-2.

Harlow, James H. *Electric Power Transformer Engineering*. U.S.A., The Electric Power Engineering Series, 2004, pp. 56-57, 303-310.

Wildi, Theodore., De Vito, Michael J. *Experimentos con equipo eléctrico*. México, Limusa, 1991, pp. 60-1 – 60-4.

Transformers Committee of the IEEE Power Engineering Society (March 2001). *IEEE Standard Terminal Markings and Connections for Distribution and Power Transformers*. U.S.A., The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.,



Norma Mexicana *NMX-J-169-ANCE-2004*, Transformadores y autotransformadores de distribución y potencia – Métodos de prueba, pp 8-11.

Norma Mexicana *NMX-J-285-ANCE-2013*, Transformadores tipo pedestal monofásicos y trifásicos para distribución subterránea – Especificaciones, pp 12-13.

Winders, John J. *Power Transformers: Principles and Applications*. U.S.A., Marcel Dekker, Inc., 2002, pp. 36 - 40.

Wildi, Theodore. *Sistemas de transmisión de potencia eléctrica*. México, Limusa, 1991, pp. 2-1 – 2-3.



U.N.A.M.	Ingeniería Eléctrica Electrónica
F.E.S. Aragón	
Laboratorio de Sistemas de Distribución	

PRÁCTICA 6

CORRIENTE DE ARRANQUE EN TRANSFORMADORES Y MOTORES

1. OBJETIVOS.

- a) Analizar el transitorio del motor de inducción y del transformador monofásico con arranque en vacío.
- b) Comprender la importancia de considerar el valor de la corriente de arranque para la selección de protecciones eléctricas.

2. INTRODUCCIÓN.

El proceso de poner en marcha un motor se conoce como *Arranque*. Al arranque, un motor puede necesitar varias veces la corriente que consume a plena carga. Esta corriente de arranque se denomina corriente “*Inrush*”. Un transformador también es un elemento que puede, por sí solo, generar sobrecargas; al encender un transformador, se produce una corriente de *Inrush* del orden de hasta 25 veces su intensidad nominal. Ambos equipos pueden provocar una violenta sobrecorriente; debido a todo ello, existe una dificultad recurrente: el dimensionamiento de las instalaciones eléctricas, tanto a nivel de los conductores, como para las protecciones instaladas.

La selección de los dispositivos de protección contra las sobrecorrientes, tales como fusibles, relevadores e interruptores, se complica cuando se deben soportar altas corrientes *Inrush*. Esta corriente puede ocasionar la operación del relevador de protección. Sin embargo, estos casos no son condiciones de falla y los relés, así como los demás dispositivos de protección, deben discernir correctamente el fenómeno de energización de un evento de falla interna.

Las corrientes *Inrush* están asociadas al arranque del motor y a la energización de los transformadores, lo que puede causar problemas de interacción con otras cargas en una instalación o



en el sistema de potencia, particularmente caídas de tensión al disparar cargas. Los elementos de protección pueden malinterpretar dichos eventos como corrientes de falla si es que los elementos no están coordinados adecuadamente. Junto con la tendencia de otros elementos del sistema de potencia de aumentar la corriente para compensar la reducción de voltaje, las corrientes de arranque pueden causar disparos en los elementos de protección. Energizar el transformador también tiene el problema de los armónicos en la corriente de arranque, que a su vez pueden causar resonancia en el sistema y causar sobretensiones dinámicas.

Para evaluar estas necesidades se requiere equipo de medición que pueda capturar las formas de onda durante todo el tiempo que tarde el arranque del motor o la energización del transformador, lo que puede tomar algunos segundos. Este equipo de medición puede incluir sistemas que analicen grandes cantidades de datos del monitoreo de éstos y evalúen eventos o condiciones particulares. Es posible detectar condiciones anormales únicamente después de que estos sistemas capturan las formas de onda asociadas a la operación normal de la instalación y el equipo.

Características de corriente de arranque del motor.

Los motores tienen la característica indeseada de incrementar varias veces su corriente de plena carga durante el arranque. Al fluir a través de las impedancias del sistema, esta corriente puede causar que las caídas de tensión atenúen las luces, la apertura de contactores y perturbar equipos sensibles. Estas caídas también afectan el arranque mismo. Incluso pequeños y medianos motores de potencia pueden tener corrientes de arranque que sean de 6 a 10 veces los niveles de corriente de estado estable o nominal. Los motores de alta eficiencia pueden tener niveles de corriente de arranque mucho más altos.

Este alto consumo de corriente se debe a que en el momento del arranque, el campo magnético rotatorio empieza a girar a velocidad síncrona, y el rotor aún está detenido (este es el instante de mayor tensión inducida en las barras del rotor). La figura 6.1 muestra el comportamiento típico de la corriente en un motor de inducción.

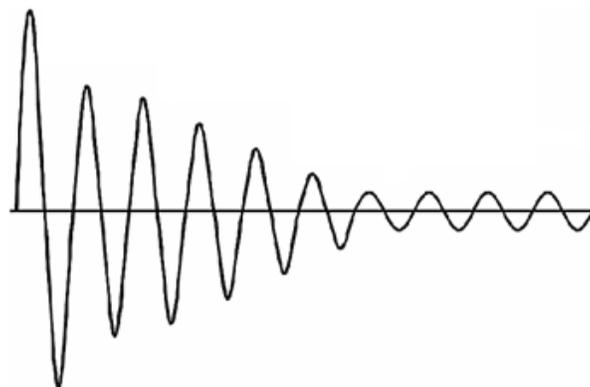


Figura 6.1 *Comportamiento de la corriente en un motor de inducción.*



Para los motores de inducción de jaula de ardilla, la corriente de arranque puede variar en forma amplia, esta variación depende, principalmente, de la potencia nominal del motor y de la efectividad de la resistencia del rotor en condiciones de arranque. Para estimar la corriente del rotor en condiciones de arranque, todos los motores de inducción de jaula de ardilla tienen una *letra código* de arranque (que no se debe confundir con la letra de *clase de diseño*) en su placa de datos. Esta letra código establece los límites de la cantidad de corriente que el motor puede aceptar en condiciones de arranque.

Dichos límites se expresan en términos de potencia aparente de arranque del motor en función de los hp nominales. La tabla 6.1 contiene los kilovoltamperes de arranque por hp de cada letra código.

Letra código nominal	Rotor bloqueado kVA/hp	Letra código nominal	Rotor bloqueado kVA/hp
A	0 – 3.15	L	9.00 – 10.00
B	3.15 – 3.55	M	10.00 – 11.00
C	3.55 – 4.00	N	11.20 – 12.50
D	4.00 – 4.50	P	12.50 – 14.00
E	4.50 – 5.00	R	14.00 – 16.00
F	5.00 – 5.60	S	16.00 – 18.00
G	5.60 – 6.30	T	18.00 – 20.00
H	6.30 – 7.10	U	20.00 – 22.40
J	7.10 – 8.00	V	22.40 y más
K	8.00 – 9.00		

Tabla 6.1 *Letras de código NEMA que indica los kVA/hp de arranque nominales de un motor. Cada letra código se extiende hasta, pero no incluye, el límite inferior de la siguiente clase superior.*

Para determinar la corriente de arranque de un motor de inducción, véase el voltaje nominal, los caballos de fuerza (hp) y la letra código de su placa de datos. Entonces, la potencia aparente de arranque del motor será:

$$S_{\text{arranque}} = (\text{hp nominales})(\text{factor máximo de letra de código})$$

y la corriente de arranque se puede calcular con la ecuación:

$$I_{\text{arranque}} = \frac{S_{\text{arranque}}}{\sqrt{3} V_{\text{nominal}}}$$



Características de corriente de arranque del transformador.

Los transformadores presentan corrientes Inrush en la excitación inicial por causa de la magnetización del núcleo de hierro. Esta corriente transitoria aparece en el devanado primario en el momento en que el transformador sin carga es energizado.

Las preocupaciones son típicamente las mismas que con el arranque del motor, excepto por una importante diferencia: la corriente de excitación del transformador contiene armónicos. Ambos componentes armónicos, pares e impares, se producen cuando se energiza el transformador y éstos pueden excitar las resonancias del sistema, lo que resulta en sobretensiones dinámicas.

Estas tensiones dinámicas pueden causar que los supresores de tensión (protecciones de sobretensión) se sobrecalienten, fallas de los capacitores o fallas en el funcionamiento de equipos electrónicos.

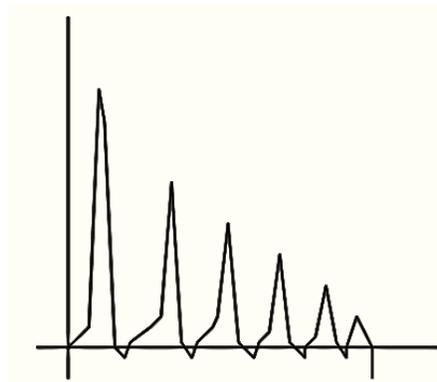


Figura 6.2 *Corriente típica de Inrush o de energización de un transformador.*

Las corrientes Inrush pueden hacer que los relevadores de protección de operación rápida actúen de modo indebido durante la energización del transformador. Para evitar que esto ocurra, los relevadores diferenciales utilizan un criterio capaz de distinguir una corriente Inrush de una corriente de cortocircuito. Una típica corriente Inrush presenta una composición de armónicas donde predomina la armónica de segundo orden, que puede representar más de 60% el valor de la componente fundamental. De este modo, cuando el transformador es energizado en condiciones normales, esas armónicas son filtradas, ejerciendo una acción de bloqueo que evita la operación del relevador. Por otro lado, las corrientes de cortocircuito típicas son normalmente compuestas por una componente fundamental, sumada de una componente continua con decremento exponencial, siendo así el contenido de armónicas insignificante en comparación con los observados en la corriente Inrush.

El flujo residual presenta mucha importancia durante la energización de los transformadores. El valor que adopta este parámetro cuando el transformador es desenergizado, determinará la magnitud



a alcanzar por la corriente Inrush en la próxima energización. Todo material ferromagnético, luego de ser sometido a una magnetización, no retorna a su estado original después de salir de la influencia del campo magnético externo.

Si un transformador es energizado en un tiempo aleatorio, puede ocurrir que aparezcan o no corrientes Inrush transitorias. Esto sucede porque las corrientes Inrush no dependen solamente del instante de energización, sino también del flujo residual establecido en el instante previo de desenergización del transformador.

El transformador de corriente (TC).

Los transformadores de medida tienen la tarea de convertir grandes valores de corriente y voltaje a valores pequeños que son fácilmente aplicables para los propósitos de medición.

Su construcción es semejante a la de cualquier tipo de transformador ya que, fundamentalmente, consiste de un devanado primario y un devanado secundario. Sin embargo, hay transformadores de corriente que operan con corrientes relativamente bajas; estos transformadores pueden construirse sin devanado primario, puesto que este devanado lo constituye la línea a la que van a conectarse.

Los transformadores de corriente pueden ser de núcleo dividido o de núcleo sólido.

- **TC de núcleo sólido.**

Los transformadores de corriente de núcleo sólido tienen forma de anillo, se colocan en las líneas de alimentación y miden la corriente eléctrica que fluye por los conductores. Los cables "secundarios" de los TC's se conectan al submedidor de electricidad, lo que facilita los cálculos de potencia y energía.

Los TC's de núcleo sólido son muy precisos (0.3% de error máximo), pequeños y económicos. Sin embargo, se debe apagar la alimentación y abrir el circuito para que el TC pueda colocarse en la línea de alimentación. Después de la instalación de este dispositivo, el cable de alimentación debe volver a conectarse para cerrar el circuito eléctrico.



Figura 6.3 Transformadores de corriente de núcleo sólido.

- **TC de núcleo dividido.**

Cuando se instalan los TC's en un circuito existente, los de núcleo dividido son vistos con mayores ventajas, ya que pueden ser abiertos y puestos alrededor de los cables de conexión sin tener que interrumpir el circuito ni apagar la alimentación.

Los TC's de núcleo dividido son esenciales. Sin embargo, estos son más costosos y no son tan precisos como los de núcleo sólido.



Figura 6.4 Transformadores de corriente de núcleo dividido.

3. CUESTIONARIO PREVIO.

- 1) Defina la corriente de arranque.
- 2) ¿Por qué aparece una corriente transitoria al energizar un transformador?
- 3) Explique qué significa y para qué sirve la letra código de un motor de inducción.
- 4) ¿En qué orden (cuántas veces la corriente nominal) se encuentran las corrientes de arranque de un motor de inducción y de un transformador?
- 5) Describa la influencia de la corriente Inrush en los sistemas de protección.
- 6) Explique el funcionamiento del transformador de corriente (TC).

4. MATERIAL.

- Módulo de fuente de alimentación. (0-120/208 V_{CA} , 3 ϕ) EMS 8821
- Módulo de motor de inducción de jaula de ardilla. EMS 8221
- Módulo de transformador. EMS 8341
- Módulo de medición de CA. (250 V) EMS 8426
- Cables de conexión. EMS 8941
- Osciloscopio digital TEKTRONIX. TBS1072B – EDU
- Cables BNC – Caimán (2).
- Transformador de corriente (TC) de núcleo dividido (2).

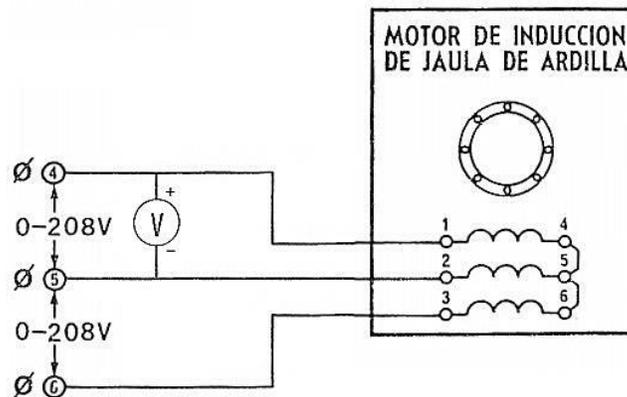


5. DESARROLLO.

¡ATENCIÓN! En esta práctica se manejan altos voltajes, no hacer ninguna conexión cuando la fuente este energizada y siempre desenergice la fuente después de cada medición.

5.1 EXPERIMENTO 1 – Corriente de arranque del motor de inducción.

- 1) Conecte el siguiente circuito.
 - a. Conecte los devanados del motor de inducción de jaula de ardilla en estrella. Para ésto, necesitamos alimentar el motor con la fuente trifásica variable (terminales 4, 5 y 6 de la fuente de alimentación a las terminales 1, 2 y 3 del motor de inducción, respectivamente). El punto común de la conexión estrella se realiza al conectar las terminales 4 con 5 y 5 con 6 del motor de inducción.
 - b. Conecte un voltímetro entre las terminales 4 y 5 de la fuente de alimentación, a fin de ajustar el voltaje de alimentación.



- 2) Encienda la fuente de alimentación y aumente gradualmente el voltaje hasta $208 V_{CA}$, según lo indica el voltímetro conectado a las terminales de la fuente de alimentación. El motor debe empezar a funcionar.
- 3) Sin modificar el voltaje, apague la fuente de alimentación.
- 4) Posteriormente:
 - a. Conecte un cable BNC – Caimán a la terminal del Canal 1 del osciloscopio.
Si el cable BNC – Caimán está dañado, es posible que introduzca ruido a las mediciones que realizará el osciloscopio. Cambie el cable en caso de que esto ocurra.

- b. Coloque el transformador de corriente en una de las terminales de alimentación del motor de inducción. Véase figura 6.5.

Este transformador de medida nos hace posible determinar el valor de la corriente de arranque del motor de inducción sin riesgo de dañar el osciloscopio ante un error en la conexión.

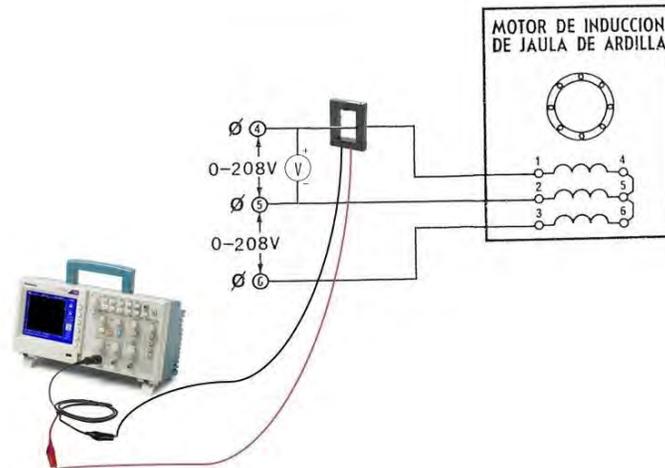
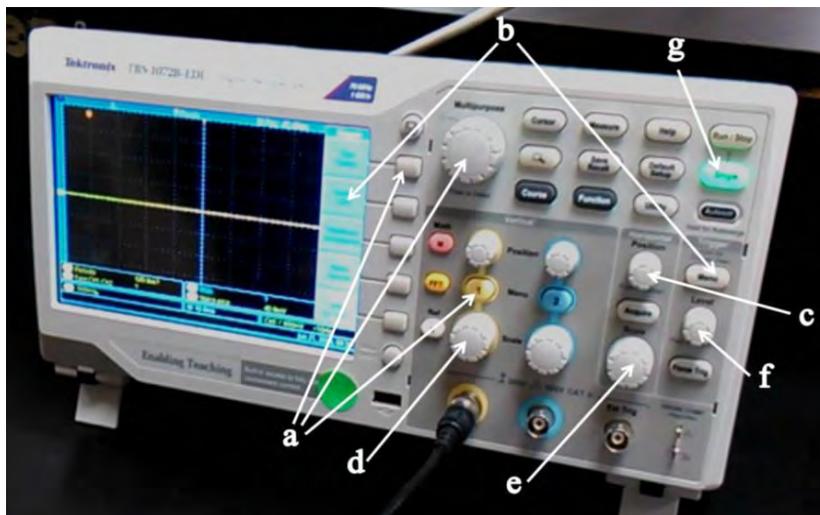


Figura 6.5 Conexión del motor para medir la corriente de arranque en una de las fases.

- c. Las terminales del TC se conectan a las terminales del cable BNC - Caimán conectado en el osciloscopio. El circuito debe quedar tal como se ilustra en la figura 6.5.
- 5) Conecte el osciloscopio en una toma de corriente externa al módulo de fuente de alimentación. Una vez encendido, para su configuración, utilice la metodología descrita a continuación:





- a. Oprima el botón “Menu” del canal 1 en la sección “Vertical” y, con la perilla “Multipurpose”, seleccione el modo de acoplamiento C.C.
- b. Oprima el botón “Menu” de la sección “Trigger” y asegúrese de que el display esté seleccionado en el canal 1.
- c. Para posicionar el inicio de la captura de la señal, con la perilla “Position” de la sección “Horizontal”, desplace el cursor hasta el segundo cuadro de izquierda a derecha a fin de observar mejor la señal.
- d. Con la perilla “Scale” de la sección “Vertical”, ajuste como valor inicial 100 mV/div.

En caso de que la señal no se aprecie adecuadamente en la pantalla, deberá ajustar el valor según sea necesario para visualizar el transitorio.

- e. Con la perilla “Scale” de la sección “Horizontal”, ajuste como valor inicial 100 ms/div.

En caso de que la señal no se aprecie adecuadamente en la pantalla, deberá ajustar el valor según sea necesario para visualizar el transitorio.

- f. Para establecer el límite en el que se va a capturar la señal, con la perilla “Level” de la sección “Trigger” lleve el nivel de disparo a un valor aproximado de 220 mV.
- g. Seleccione la función de disparo único oprimiendo el botón “Single”.

El modo de disparo único del osciloscopio digital permite capturar los transitorios de un circuito o equipo eléctrico que se producen una sola vez; tal es el caso del transitorio de la corriente de arranque.

Nota: Si el sistema tiene un alto nivel de ruido, es probable que se dispare el trigger. Asegúrese de que esto no suceda antes de encender la fuente, pues no sería posible tomar lectura de la corriente de arranque.

- 6) Encienda la fuente de alimentación. La onda que aparece en el osciloscopio, así como los valores establecidos de amplitud, tiempo y disparo, deben verse como se muestra en la figura 6.6. De no ser así, puede apagar y encender la fuente de alimentación las veces que sea necesario para poder apreciar el transitorio.

Una vez que el osciloscopio ha capturado una señal será necesario volver a seleccionar el modo de disparo único, oprimiendo la tecla “Single” del osciloscopio, para poder observar una nueva forma de onda cada que se encienda la fuente de alimentación.

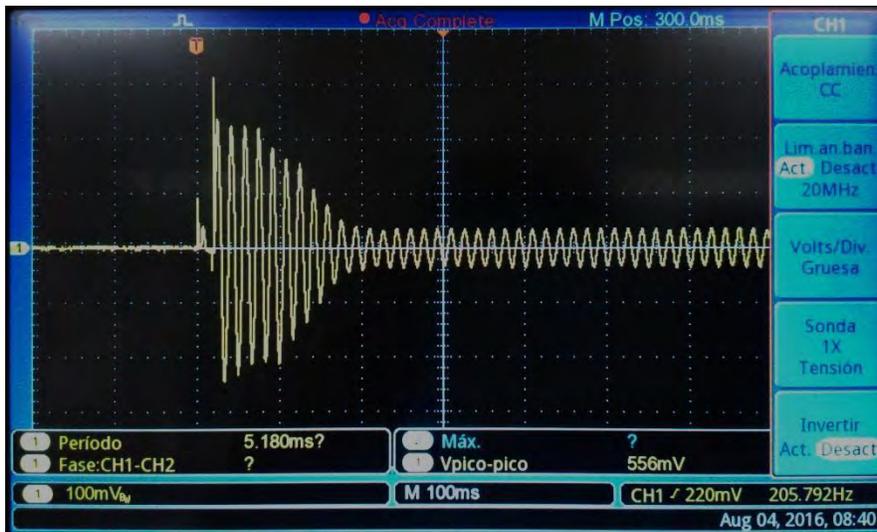


Figura 6.6 Corriente de arranque en una fase del motor de inducción.

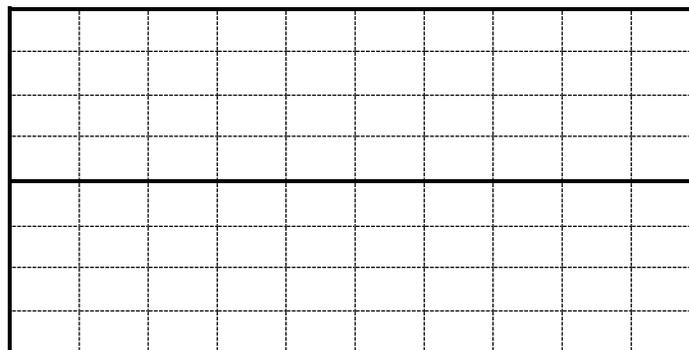
Si la onda no se aprecia en la pantalla adecuadamente, varíe los valores de tiempo (horizontal) y amplitud (vertical) del osciloscopio.

- 7) Si modificó las escalas horizontal y vertical del osciloscopio, anote los nuevos valores en la tabla 6.2. En caso contrario, omita este procedimiento.

Escala vertical (mV/div)	Escala horizontal (ms/div)

Tabla 6.2 Nuevas escalas del osciloscopio para el motor de inducción en una fase.

- 8) Dibuje la forma de onda obtenida.





- 9) Anote el valor de la corriente nominal del motor, así como el valor de la relación de transformación del transformador de corriente (TC) en la tabla 6.3.
- 10) Realice las mediciones que pide la tabla 6.3.

$I_{nominal}$ (A)	
Relación de transformación	
$V_{pico-pico}$ (mV)	
Amplitud (mV)	
V_{max} (mV)	

Tabla 6.3 Valores medidos para una fase del motor de inducción.

- 11) Sin modificar el voltaje, apague la fuente de alimentación.
- 12) A continuación, se analizará la corriente de arranque en dos de las fases del motor de inducción, para esto, siga los siguientes incisos y observe la figura 6.7.
- Conecte un cable BNC – Caimán a la terminal del Canal 2 del osciloscopio.
 - Coloque otro transformador de corriente en otra de las terminales de alimentación del motor de inducción.
 - Conecte las terminales del TC a las terminales del cable BNC – Caimán conectado en el canal 2 del osciloscopio.
- 13) En el osciloscopio:
- Active el canal 2 oprimiendo el botón “Menu” del canal 2 en la sección “Vertical”.
 - Con la perilla “Scale” de la sección “Vertical”, ajuste como valor inicial 200 mV/div para ambos canales.
En caso de que las señales no se aprecien adecuadamente en la pantalla, deberá ajustar el valor según sea necesario para visualizar los transitorios.
 - Deje la escala de tiempo tal como está, en 100ms/div.
En caso de que las señales no se aprecien adecuadamente en la pantalla, deberá ajustar el valor según sea necesario para visualizar los transitorios.
 - Con la perilla “Level” de la sección “Trigger” lleve el nivel de disparo a 200 mV.
 - Seleccione la función de disparo único oprimiendo el botón “Single”.

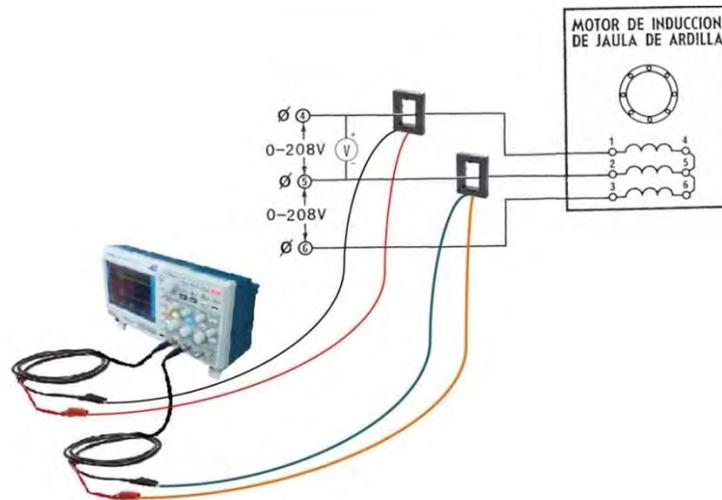


Figura 6.7 Conexión del motor para medir las corrientes de arranque en dos de las fases.

- 14) Encienda la fuente de alimentación. Las ondas que aparecen en el osciloscopio, así como los valores establecidos de amplitud, tiempo y disparo, deben verse como se muestra en la figura 6.8. De no ser así, puede apagar y encender la fuente de alimentación las veces que sea necesario para poder apreciar el transitorio.

Una vez que el osciloscopio ha capturado una señal será necesario volver a seleccionar el modo de disparo único, oprimiendo la tecla “Single” del osciloscopio, para poder observar una nueva forma de onda cada que se encienda la fuente de alimentación.

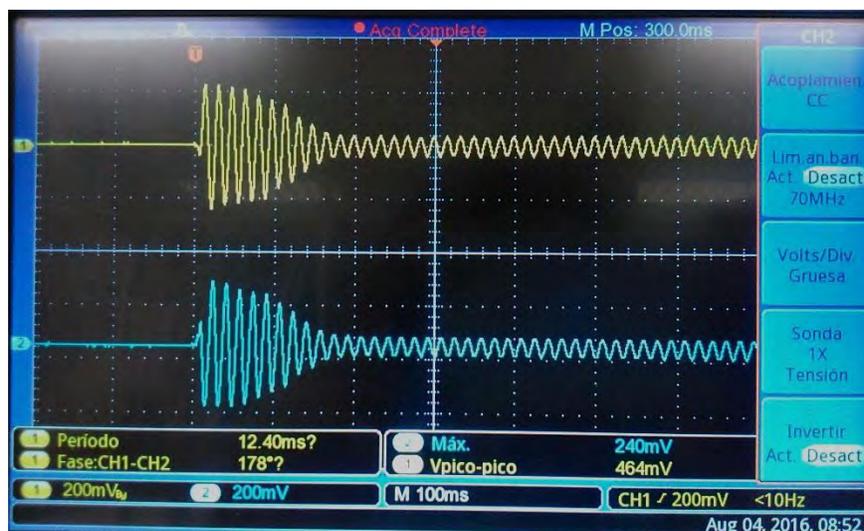


Figura 6.8 Corrientes de arranque en dos fases del motor de inducción.



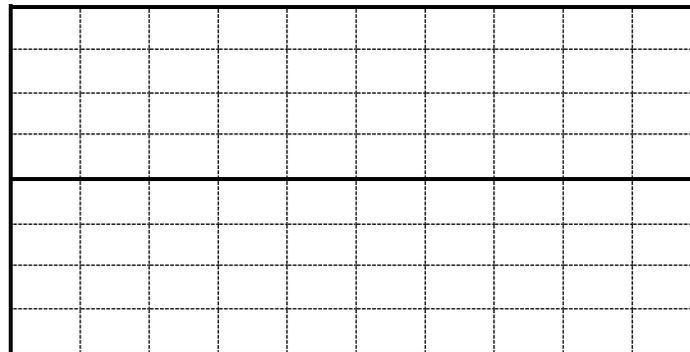
Si las ondas no se aprecian en la pantalla adecuadamente, varíe los valores de tiempo (horizontal) y amplitud (vertical) del osciloscopio.

15) Si modificó las escalas horizontal y vertical del osciloscopio, anote los nuevos valores en la tabla 6.4. En caso contrario, omita este procedimiento.

Escala vertical (mV/div)	Escala horizontal (ms/div)

Tabla 6.4 *Nuevas escalas del osciloscopio para el motor de inducción en dos fases.*

16) Dibuje las formas de onda obtenidas.



17) Realice las mediciones que pide la tabla 6.5.

$I_{nominal}$ (A)	
Relación de transformación	
$V_{pico-pico}$ (mV)	
Amplitud (mV)	
V_{max} (mV)	

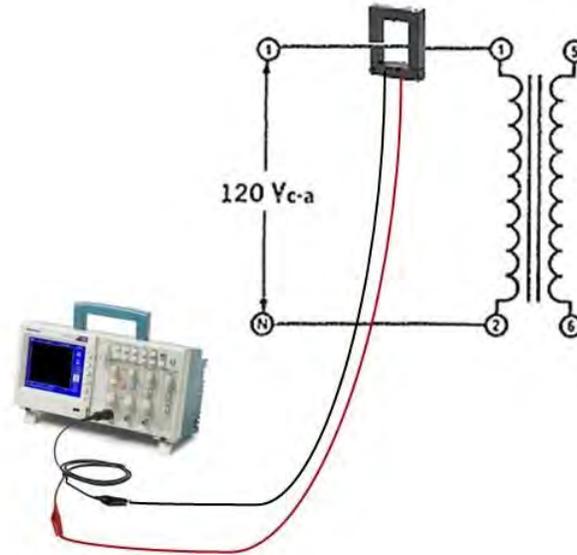
Tabla 6.5 *Valores medidos para dos fases del motor de inducción.*

18) Anote sus observaciones.

19) Reduzca el voltaje a cero, apague la fuente de alimentación y desconecte el circuito.

5.2 EXPERIMENTO 2 – Corriente de arranque del transformador monofásico.

1) Conecte el siguiente circuito.



- a. Conecte el devanado primario del transformador a la fuente trifásica fija (terminales 1 y N de la fuente de alimentación a las terminales 1 y 2 del transformador, respectivamente).
 - b. Coloque un TC en una de las terminales de alimentación del transformador.
 - c. Conecte las terminales del TC a las terminales del cable BNC – Caimán del Canal 1 del osciloscopio.
- 2) En el osciloscopio:
- a. Deshabilite el canal 2 del osciloscopio oprimiendo el botón “Menu” del canal 2 en la sección “Vertical” y desconecte el cable BNC – Caimán de esta terminal.
 - b. Con la perilla “Scale” de la sección “Vertical”, ajuste como valor inicial 5 mV/div.
En caso de que la señal no se aprecie adecuadamente en la pantalla, deberá ajustar el valor según sea necesario para visualizar el transitorio.
 - c. Con la perilla “Scale” de la sección “Horizontal”, ajuste como valor inicial 50 ms/div.
En caso de que la señal no se aprecie adecuadamente en la pantalla, deberá ajustar el valor según sea necesario para visualizar el transitorio.
 - d. Para establecer el límite en el que se va a capturar la señal, con la perilla “Level” de la sección “Trigger” lleve el nivel de disparo a 13 mV.
 - e. Seleccione la función de disparo único oprimiendo el botón “Single”.

Nota: Si el sistema tiene un alto nivel de ruido, es probable que se dispare el trigger. Asegúrese de que esto no suceda antes de encender la fuente, pues no sería posible tomar lectura de la corriente de arranque.

- 3) Encienda la fuente de alimentación. Los valores establecidos de amplitud, tiempo y disparo, deben verse como se muestra en la figura 6.9. En este caso, podrá observar que el transitorio de corriente de arranque del transformador varía cada que apaga y enciende la fuente de alimentación.

Una vez que el osciloscopio ha capturado una señal será necesario volver a seleccionar el modo de disparo único, oprimiendo la tecla “Single” del osciloscopio, para poder observar la nueva forma de onda cada que se encienda la fuente de alimentación.

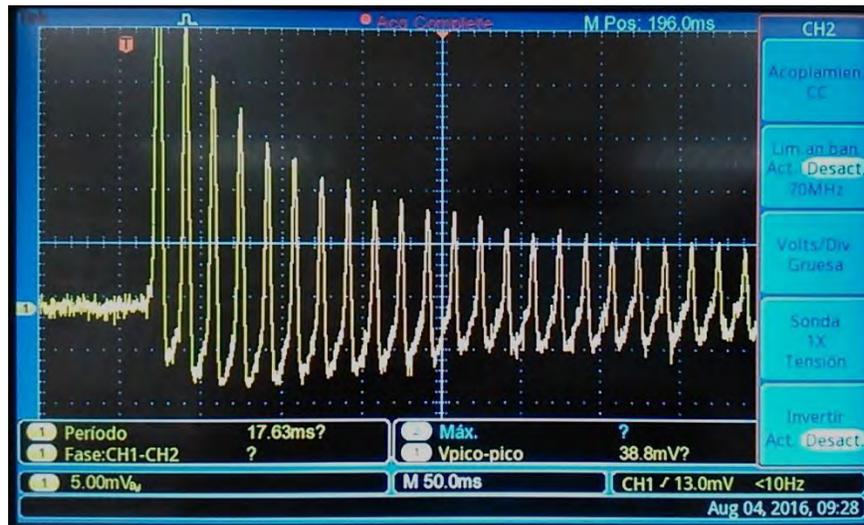
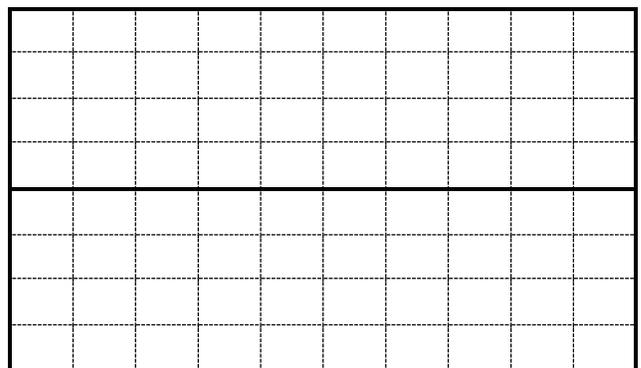
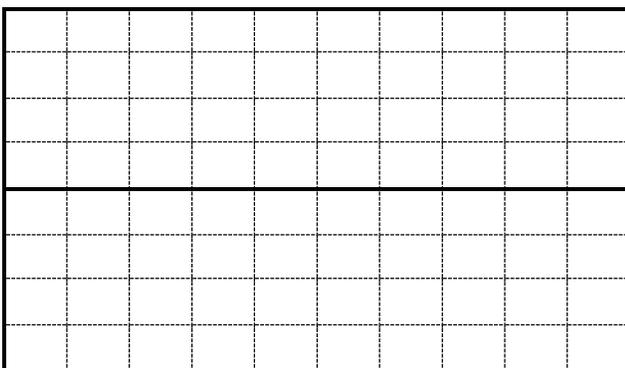
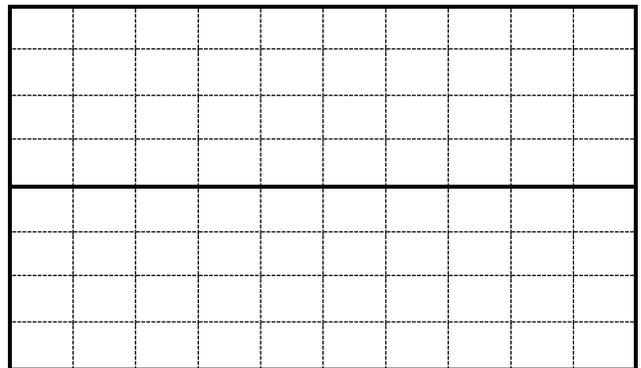
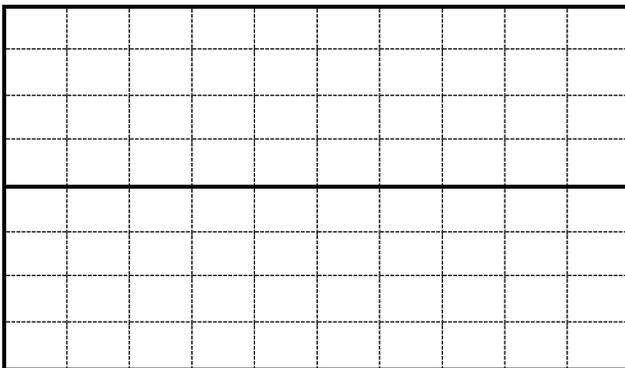
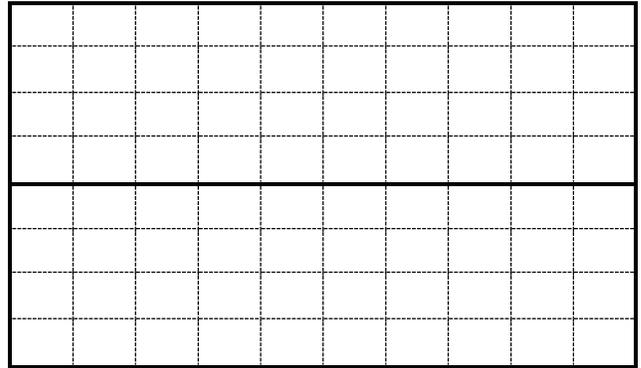
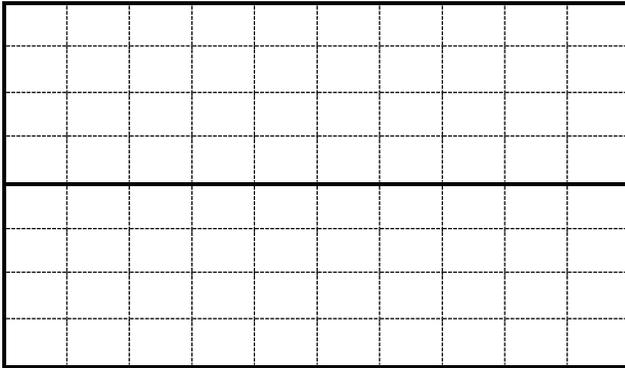


Figura 6.9 Corriente de arranque del transformador monofásico.

Si la onda no se aprecia en la pantalla adecuadamente, varíe los valores horizontal y vertical del osciloscopio.

- 4) Tome 5 diferentes capturas de la corriente de arranque del transformador apagando y encendiendo la fuente de alimentación. Dibuje las formas de onda obtenidas en cada caso.

Si una de las ondas resulta similar a la de la figura 6.9, realice los procedimientos 6 a 8 de este experimento antes de efectuar el resto de las capturas. En caso contrario, apague y encienda la fuente de alimentación hasta tener la forma de onda deseada.



5) Explique por qué en cada caso la corriente de arranque tiene diferente forma y amplitud.

6) Considerando la forma de onda que resulte similar a la de la figura 6.9: si modificó las escalas horizontal y vertical del osciloscopio, anote los nuevos valores en la tabla 6.6. En caso contrario, omita este procedimiento.



Escala vertical (mV/div)	Escala horizontal (ms/div)

Tabla 6.6 Nuevas escalas del osciloscopio para el transformador.

- 7) Anote el valor de la corriente nominal del transformador, así como el valor de la relación de transformación del transformador de corriente (TC) en la tabla 6.7.
- 8) Realice las mediciones que pide la tabla 6.7 utilizando los datos que proporcione el osciloscopio en la forma de onda obtenida que resulte similar a la mostrada en la figura 6.9.

$I_{nominal}$ (A)	
Relación de transformación	
$V_{pico-pico}$ (mV)	
Amplitud (mV)	
V_{max} (mV)	

Tabla 6.7 Valores medidos para el transformador monofásico.

- 9) Apague la fuente de alimentación.
- 10) Apague el osciloscopio.

6. PREGUNTAS DE EVALUACIÓN.

- 1) Con los valores obtenidos del motor de inducción (procedimientos 1 a 11 del experimento 5.1):
 - a. ¿Cuál es el valor máximo que alcanza la corriente de arranque?



b. Calcule la duración del transitorio de la corriente de arranque.

c. ¿Cuántas veces es más grande la corriente de arranque que la corriente nominal del motor?

2) Con los valores obtenidos del transformador:

a. ¿Cuál es el valor máximo que alcanza la corriente de arranque?

b. Calcule la duración del transitorio de la corriente de arranque.

c. ¿Cuántas veces es más grande la corriente de arranque que la corriente nominal del transformador?



7. CONCLUSIONES.

8. REFERENCIAS.

Enríquez Harper, Gilberto. *Fundamentos de instalaciones eléctricas de mediana y alta tensión*. 2ª ed., México, Limusa, 2005, pp. 113- 114.

Chapman, Stephen J. *Máquinas Eléctricas*. 5ª ed., México, Mc Graw - Hill, 2012, pp. 268 – 269.

Kosow, Irving L. *Máquinas Eléctricas y Transformadores*. 2ª ed., México, Prentice - Hall, 1993, pp. 355 - 356.

(noviembre 2013). *Corriente de arranque en Motores Eléctricos* [en línea]. Costa Rica. <<http://www.motortico.com/biblioteca/MotorTico/2013%20NOV%20-%20Corriente%20de%20Arranque%20en%20Motores%20Electricos.pdf>>

McGranaghan, Mark. *Evaluating Motor and Transformer Inrush Currents*. Electrical Construction and Maintenance [en línea]. United States (December 1, 2006). <<http://ecmweb.com/content/evaluating-motor-and-transformer-inrush-currents>>

M. O. Oliveira., A. S. Bretas., O. E. Perrone., J. H. Reversat., H. E. Muñoz., R. S. Orellana Paucar. *Principales Características de la Corriente Inrush en Transformadores*. Argentina, Centro de Estudios de Energía para el Desarrollo (CEED) de la Facultad de Ingeniería de Oberá, Universidad Nacional de Misiones (2012). <http://www.ceed.org.ar/wp-content/uploads/2012/12/Oliveira_et_al_Paper_1.pdf>

National Instruments (octubre 2012). *Cómo medir corriente y hacer mediciones de potencia* [en línea]. <<http://www.ni.com/white-paper/8198/es/>>

Tektronix. *TBS1000B and TBS1000B-EDU Series Digital Storage Oscilloscopes*. User Manual.



U.N.A.M.	Ingeniería Eléctrica Electrónica
F.E.S. Aragón	
Laboratorio de Sistemas de Distribución	

PRÁCTICA 7

MEDICIÓN Y FACTURACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

1. OBJETIVOS.

- a) Conocer el funcionamiento del wathorímetro.
- b) Entender cómo calcula la CFE el consumo de electricidad.

2. INTRODUCCIÓN.

El sector energético sufre una cuantiosa pérdida de energía en los sistemas de distribución. Propiamente, las pérdidas de energía se describen como aquella energía eléctrica generada y transportada, que finalmente no corresponde a la energía que los consumidores remuneran. Esto sucede por la energía que se pierde entre los procesos de transmisión y comercialización, o debido a que se ha suministrado ilegalmente; estas dos causas clasifican a las pérdidas de energía en *técnicas* y *no técnicas*.

Las pérdidas técnicas se refieren a la pérdida de energía en forma de calor, corrientes parásitas o por fenómenos de histéresis, propia de los componentes del sistema eléctrico, que aunque pueden reducirse, no es posible evitarlas.

Por su parte, las pérdidas no técnicas es aquella energía suministrada cuyo costo no se solventa, ya sea por fallas en los equipos de medición, deficiencias administrativas de los proveedores de electricidad, o bien, por el robo de energía al manipular los equipos que registran el consumo de electricidad o por las interferencias intencionales en la red de distribución.

Según datos del Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN 2016 - 2030), en el 2015 las pérdidas técnicas fueron de 16 509 GWh, lo que equivale al 6% del total de la energía recibida. El valor económico de las pérdidas técnicas asciende a 14.7 millones de pesos. En ese mismo año, las pérdidas no técnicas fueron de 19 865 GWh, que representa el 7.2% de la energía recibida. El valor económico de las pérdidas no técnicas asciende a 27.5 millones de pesos.



Además de la pérdida de ingresos, las pérdidas de energía provocan sobrecargas en el sistema de energía, con el consecuente deterioro prematuro y el peligro progresivo de la seguridad pública. Además, compromete la vida útil de los aparatos electrodomésticos.

La medición es un proceso clave de los sistemas de energía eléctrica que permite, a las empresas prestadoras del servicio, cuantificar la cantidad de energía que se genera, transmite, distribuye y se factura. El proceso tradicional de medición es periódico y genera valores acumulados (mensuales o bimestrales) que únicamente muestran la cantidad de energía consumida, pero que no proporcionan información de la forma de uso de la misma, ni de los niveles de carga en tiempo real de los consumidores, tampoco permite tener el control de los consumos o acciones de reacción inmediata en presencia de eventos que perturban la operación de la red.

El medidor de energía.

El waththorímetro es el dispositivo que mide y registra la integral de la potencia activa con respecto al tiempo de operación del circuito al cual está conectado. La unidad de medida es el kilowatt-hora.

Waththorímetro electromecánico.

Estos dispositivos utilizan bobinas de corriente y de tensión para crear corrientes parásitas en un disco que, bajo influencia de campos magnéticos, produce un giro que mueve las agujas de medición. Por lo tanto, el waththorímetro electromecánico es, básicamente, un motor eléctrico cuya velocidad del rotor es directamente proporcional a la energía eléctrica suministrada a través de sus devanados.

La bobina de potencial produce un campo magnético representando al voltaje del circuito (conectada en paralelo). Por su parte, la bobina de corriente (conectada en serie), produce un campo magnético representando a la corriente de carga, tal como se observa en la figura 7.1

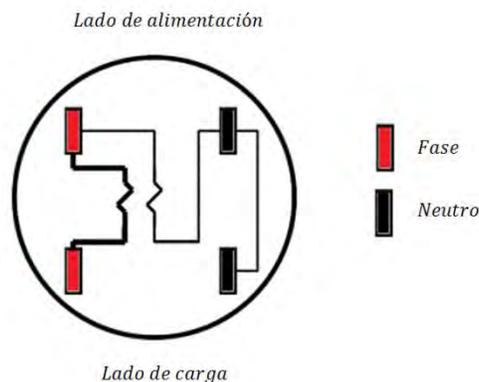


Figura 7.1 *Conexión de las bobinas de un waththorímetro electromecánico.*

El campo magnético de las bobinas produce el par de giro del disco, que es proporcional a la potencia de carga suministrada por el circuito.

El disco está soportado por campos magnéticos, mediante *Suspensión magnética*, para reducir la fricción al mínimo. Por medio de engranes, el desplazamiento del disco produce el movimiento de las agujas del medidor.

Las dos bobinas (que funcionan como electroimanes) abrazan al disco. La bobina de potencial conectada a la red origina un flujo magnético proporcional al voltaje de suministro, a su vez, la bobina de corriente, por donde fluye la corriente del consumidor, origina el flujo magnético proporcional a dicha corriente. Ambos flujos inducen en el disco corrientes de Foucault (o corrientes parásitas) que, junto con los flujos, producen un par motriz.

Cuando el usuario deja de consumir energía, el disco del medidor continuará girando debido a su propia inercia. Para evitar esta situación, es necesario utilizar *imanes permanentes* con una disposición tal que incluyan un *par de frenado* directamente proporcional a la velocidad del disco. Esto se logra colocando, de forma opuesta al estator, imanes permanentes en forma de “C”. La fuerza magnética de estos imanes regula la velocidad del disco para cualquier carga dada, de tal manera que cada vuelta del disco siempre mide la misma cantidad de energía o Wh.

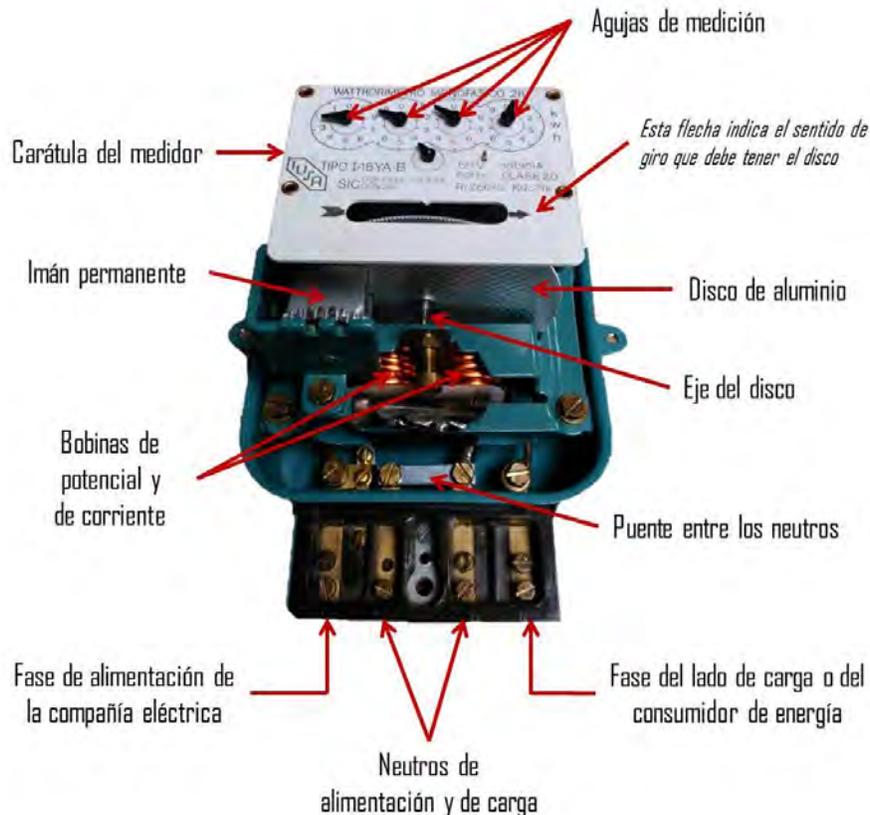


Figura 7.2 Mecanismo de un wathhorímetro electromecánico.



Entre las medidas que se han tomado para minimizar las pérdidas no técnicas, se han adoptado wathhorímetros digitales o inteligentes. Estos dispositivos buscan reducir el robo de energía eléctrica.

Sistemas AMI.

El PRODESEN, además realizar otras acciones para disminuir las pérdidas de energía, pretende instalar, durante 2017 y 2018, cerca de 843 433 medidores inteligentes AMI (Advanced Metering Infrastructure) para automatizar el proceso de facturación de energía eléctrica.

Los sistemas con infraestructura de medición avanzada tienen la capacidad de medir, registrar, recolectar y transferir remotamente, la información asociada al consumo, la demanda, los parámetros eléctricos y la forma de uso de la energía eléctrica, para su posterior presentación, análisis, gestión y toma de decisiones.

Uno de los elementos clave de estos sistemas es el *medidor inteligente*, que tiene integradas capacidades avanzadas de medición, registro de datos, análisis de uso de los servicios, comunicación bidireccional, registro de eventos asociados a fallas y a calidad de la energía, detección de ilícitos, control remoto del consumo de electrodomésticos y capacidad para desconexión y reconexión remota del servicio eléctrico, para transferir la información a sistemas de procesamiento de datos, para fines de monitoreo y facturación.



Figura 7.3 Wathhorímetro inteligente bidireccional.



Tarifas de la CFE para el suministro y venta de energía eléctrica.

Las tarifas establecidas por la CFE se clasifican en:

- a. Tarifas generales.
 - En baja tensión.
 - En media tensión.
 - En alta tensión.
 - Nivel subtransmisión.
 - Nivel transmisión.
 - Servicio de respaldo.
 - Servicio interrumpible.

- b. Tarifas específicas.
 - Servicios públicos.
 - Agrícolas.
 - Temporal.
 - Acuícola.

En la siguiente figura se muestran algunos ejemplos de estas tarifas:

Tarifa de baja tensión	
Cargo por energía (\$/kWh)	
Rango	Costo
1-50	2.307
51-100	2.782
Adicional	3.066
Cargo fijo (\$)	
Mensual	61.06

Tarifa de servicio público	
Cargos por energía (\$/kWh)	
Tensión	Costo
Media	3.101
Baja	3.688

Tarifa de media tensión	
Cargos	
Demanda (\$/kW)	191.24
Energía (\$/kWh)	1.258

Tarifa agrícola	
Cargo por energía (\$/kWh)	
Rango	Costo
1-5000	7.690
5001-15000	8.559
15001-35000	9.342
Adicional	10.254

Figura 7.4 Ejemplos de tarifas de suministro de energía eléctrica establecidas por la CFE.



Nota: Las tarifas expuestas corresponden a la región central del Sistema Eléctrico Nacional del mes de septiembre del 2016. Para conocer las tarifas actuales y del resto de las regiones, visite la página de internet: http://app.cfe.gob.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/Tarifas/tarifas_negocio.asp

El motor de arranque por capacitor.

El motor de inducción de arranque por capacitor cuenta con dos devanados: un *devanado principal* y un *devanado auxiliar* o *devanado de arranque*. En este motor, un capacitor está conectado en serie con el devanado auxiliar y produce un par de torsión de arranque del 250% o más, comparado con el de carga total. Además, también se conecta, en serie al devanado auxiliar y al capacitor, un interruptor centrífugo que desconecta el devanado de arranque con su capacitor una vez que el motor está acelerado.

Debido al alto momento de torsión de arranque, el motor de arranque por capacitor es muy adecuado para aplicaciones que implican periodos de arranque frecuentes o prolongados, como los transportadores de cargas pesadas, equipos de aire acondicionado, compresores de refrigeración, ventiladores industriales y, bombas y agitadores para líquidos densos.

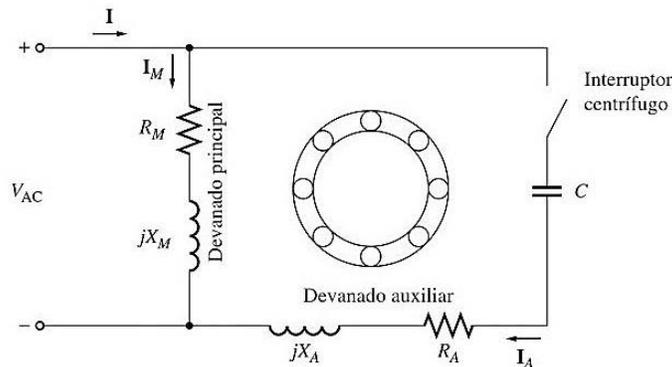


Figura 7.5 Circuito del motor de arranque por capacitor.



Figura 7.6 Motor de arranque por capacitor de uso general.



3. CUESTIONARIO PREVIO.

- 1) Defina los siguientes conceptos:
 - a. Pérdidas técnicas.
 - b. Pérdidas no técnicas.
- 2) Investigue el principio del funcionamiento de un wathorímetro electromecánico y el de un wathorímetro digital.
- 3) Investigue los tipos de tarifa actuales que maneja CFE a nivel industrial, comercial y residencial.
- 4) Investigue la conexión básica de un motor monofásico de inducción con capacitor de arranque.

4. MATERIAL.

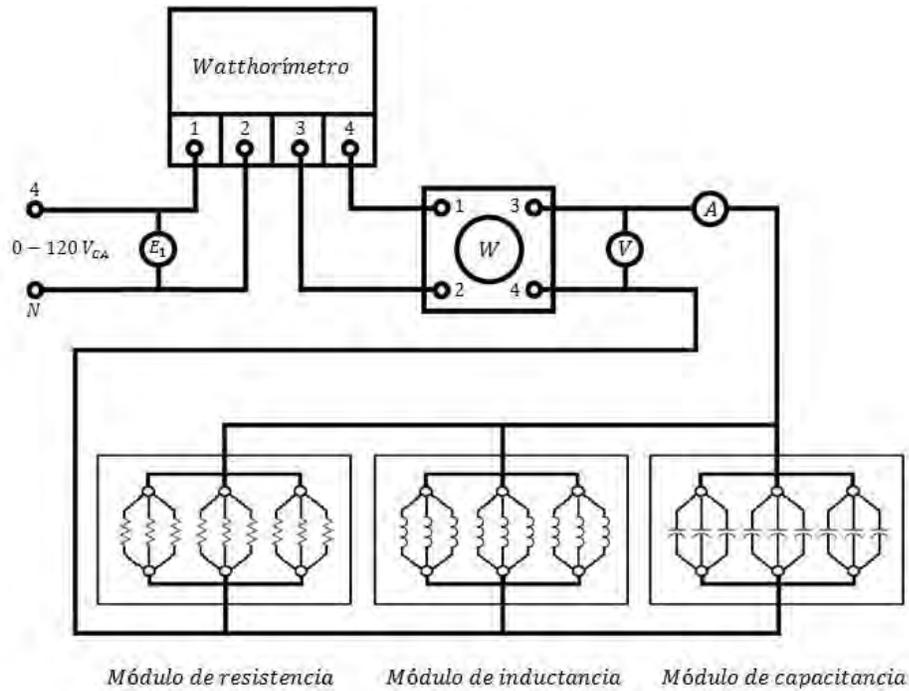
- | | |
|---|----------|
| - Módulo de fuente de alimentación. (0-120 V_{CA}) | EMS 8821 |
| - Módulo de wathorímetro monofásico. | |
| - Módulo de wattmetro monofásico. | EMS 8431 |
| - Módulo de medición de CA. (2.5 A) | EMS 8425 |
| - Módulos de medición de CA. (120/120 V) | EMS 8426 |
| - Módulo de resistencia. | EMS 8311 |
| - Módulo de inductancia. | EMS 8321 |
| - Módulo de capacitancia. | EMS 8331 |
| - Módulo de motor capacitor de arranque. | EMS 8251 |
| - Cables de conexión. | EMS 8941 |

5. DESARROLLO.

¡ATENCIÓN! En esta práctica se manejan altos voltajes, no hacer ninguna conexión cuando la fuente este energizada y siempre des energice la fuente después de cada medición.

5.1 EXPERIMENTO 1 – Consumo de energía eléctrica con carga RLC.

- 1) Conecte el siguiente circuito.



- Conecte la fuente de alimentación trifásica variable a las terminales de entrada del wathorímetro monofásico (terminales 4 y N de la fuente a las terminales 1 y 2 del wathorímetro, respectivamente).
 - Conecte un voltímetro en paralelo a las terminales 4 y N de la fuente, a fin de monitorear el voltaje de alimentación (terminal 4 de la fuente a la salida de 250 V del voltímetro y terminal N de la fuente a la terminal \pm del voltímetro).
 - Conecte las terminales 3 y 4 del wathorímetro a las terminales 2 y 1 del wattmetro monofásico, respectivamente.
 - Conecte un voltímetro en paralelo a las terminales 3 y 4 del wattmetro monofásico (terminal 3 del wattmetro a la salida de 250 V del voltímetro y terminal 4 del wattmetro a la terminal \pm del voltímetro).
 - Conecte todas las terminales del módulo de resistencia en estrella, exactamente como se muestra en el circuito. Haga lo mismo con los módulos de inductancia y capacitancia.
 - Conecte los tres módulos (resistencia, inductancia y capacitancia) en estrella, a fin de proporcionar una carga RLC al sistema. Observe el circuito.
 - Conecte la terminal 3 del wattmetro monofásico en serie con un amperímetro y con la conexión en estrella del lado superior de la carga (terminal 3 del wattmetro a \pm del amperímetro, la salida de 2.5 A del amperímetro a la conexión en estrella).
 - Conecte la terminal 4 del wattmetro monofásico a la conexión en estrella del lado inferior de las cargas.
- 2) Encienda la fuente de alimentación y aumente gradualmente el voltaje hasta $120 V_{CA}$, según lo indica el voltímetro E_1 .



3) ¿En qué sentido gira el dial del wathorímetro?

4) Posteriormente.

- a. Ajustando los interruptores correspondientes, proporcione una carga RLC de 171 Ω .
- b. Mida el voltaje, la corriente y la potencia del circuito. Anote sus resultados en la tabla 7.1.

5) A continuación.

- a. Ajustando los interruptores correspondientes, proporcione una carga RLC de 85 Ω .
- b. Mida el voltaje, la corriente y la potencia del circuito. Anote sus resultados en la tabla 7.1.

6) En seguida.

- a. Ajustando los interruptores correspondientes, proporcione una carga RLC de 57 Ω .
- b. Mida el voltaje, la corriente y la potencia del circuito. Anote sus resultados en la tabla 7.1.

Carga	Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
171 Ω			
85 Ω			
57 Ω			

Tabla 7.1 Valores medidos para carga RLC.

7) Reduzca el voltaje a cero y apague la fuente de alimentación.

8) Con los datos proporcionados por el wattmetro en cada una de cargas, calcule el consumo de energía por 30 minutos de operación del circuito, según la tarifa residencial actual por kWh investigada en el cuestionario previo.

9) Posteriormente.

- a. Invierta las terminales 1 y 4 del wathorímetro.

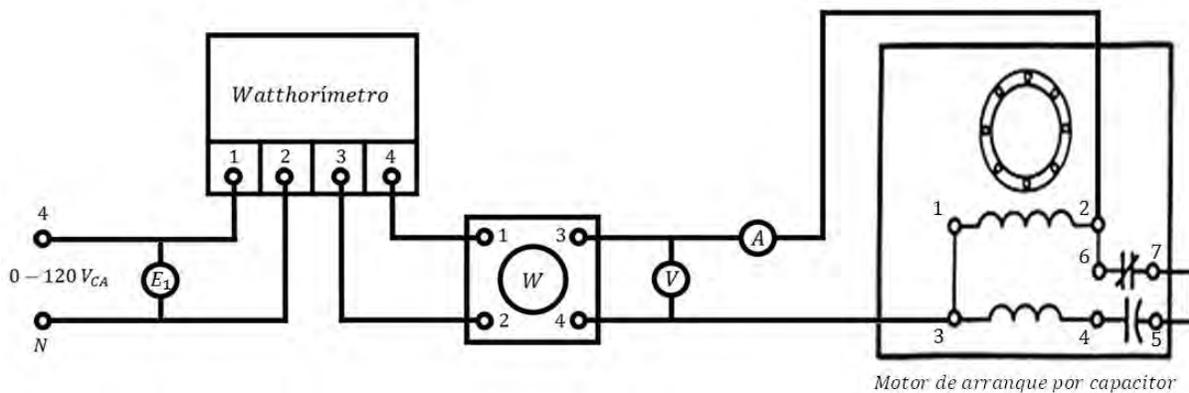


- b. Encienda la fuente de alimentación y aumente gradualmente el voltaje hasta $120 V_{CA}$, según lo indica el voltímetro E_1 .
- c. ¿Por qué cambia el sentido de giro del dial?

- d. Reduzca el voltaje a cero y desconecte la fuente de alimentación.

5.2 EXPERIMENTO 2 – Consumo de energía eléctrica con carga de motor de inducción.

1) Conecte el siguiente circuito.



- a. Conecte la fuente de alimentación trifásica variable a las terminales de entrada del wathorímetro monofásico (terminales 4 y N de la fuente a las terminales 1 y 2 del wathorímetro, respectivamente).
- b. Conecte un voltímetro en paralelo a las terminales 4 y N de la fuente, a fin de monitorear el voltaje de alimentación (terminal 4 de la fuente a la salida de 120 V del voltímetro y terminal N de la fuente a la terminal \pm del voltímetro).
- c. Conecte las terminales 3 y 4 del wathorímetro a las terminales 2 y 1 del wattmetro monofásico, respectivamente.
- d. Conecte un voltímetro en paralelo a las terminales 3 y 4 del wattmetro monofásico (terminal 3 del wattmetro a la salida de 120 V del voltímetro y terminal 4 del wattmetro a la terminal \pm del voltímetro).
- e. Conecte el devanado principal del motor de arranque por capacitor en serie con el interruptor, el capacitor y el devanado auxiliar del motor (terminal 2 a 6, 7 a 5 y 3 a 1 del motor), tal como se muestra en el circuito.



- f. Conecte la terminal 3 del wattmetro monofásico en serie con un amperímetro y con el devanado principal del motor de arranque por capacitor (terminal 3 del wattmetro a \pm del amperímetro, la salida de 8 A del amperímetro a la terminal 2 del motor).
 - g. Conecte la terminal 4 del wattmetro monofásico a la terminal 3 del motor.
- 2) Encienda la fuente de alimentación y aumente gradualmente el voltaje hasta $120 V_{CA}$, según lo indica el voltímetro E_1 . El motor debe comenzar a funcionar.

3) ¿En qué sentido gira el dial del wathhorímetro?

4) Posteriormente.

- a. Mida el voltaje, la corriente y la potencia del circuito. Anote sus resultados en la tabla 7.2.
- b. Reduzca el voltaje a cero y apague la fuente de alimentación.
- c. Con la siguiente fórmula y utilizando los datos de voltaje, corriente y potencia del inciso a., calcule el factor de potencia del motor. Anote su resultado en la tabla 7.2.

$$P = VI \cos \theta$$

Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia (W)	Factor de potencia

Tabla 7.2. Valores medidos para carga de motor de inducción.

5) Con los datos proporcionados por el wattmetro, calcule el consumo de energía por 2 horas de operación del circuito, según la tarifa industrial actual por kWh investigada en el cuestionario previo.



6. PREGUNTAS DE EVALUACIÓN.

- 1) Defina el concepto del medidor de energía eléctrica bidireccional.

- 2) Investigue o proponga algunas soluciones para evitar el robo de energía en un sistema de distribución.

- 3) Investigue el monto actual de la multa establecida por CFE por un bajo factor de potencia en una carga industrial.

- 4) Suponga que el wattmetro tomó lecturas en kW, es decir, 1000 veces los valores obtenidos en las mediciones y realice los cálculos pedidos en:

- a. El procedimiento no.8 del experimento 1.

- b. El procedimiento no.5 del experimento 2.



7. CONCLUSIONES.

8. REFERENCIAS.

Mendoza Tavera, Martín Alfonso., Orozco Valdez, Dazaet. *Aplicación de medidores inteligentes. Proyecto WalMart México (Operadora Vips S. de R.L de C.V.)*. Tesis (Ingeniero Mecánico Electricista), México, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Aragón, 2015, pp.107.

Gómez López, José M., Castán Luna, Roberto., Montero Cervantes, Julio C., Meneses Ruiz, Javier., García Hernández, Joaquín. *Aplicación de tecnologías de medición avanzada (AMI) como instrumento para reducción de pérdidas*. México, Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias, Boletín octubre – diciembre, 2015.

Mott, Robert L. *Diseño de elementos de máquinas*. 4ª ed., México, Pearson Educación, 2006, pp.807 – 808.

Las pérdidas de energía y su impacto en el déficit eléctrico. República Dominicana. EGE Haina. [en línea]. <<http://egehaina.com/las-perdidas-de-energia-y-su-impacto-en-el-deficit-electrico-2/>>

Chapman, Stephen J. *Máquinas eléctricas*. 5ª ed., México, Mc Graw – Hill, 2012, pp. 425 – 426.

Wildi, Theodore. *Máquinas eléctricas y sistemas de potencia*. 6ª ed., México, Pearson Educación, 2007, pp. 406 – 408.

Medidores multifunción para sistemas eléctricos. México, Comisión Federal de Electricidad, Especificación G0000-48, 2010. [en línea].

<http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4957978&fecha=08/12/1999>



Memoria de cálculo usada para determinar la tarifa que aplicará la Comisión Federal de Electricidad por el servicio público de Distribución de energía eléctrica durante el periodo tarifario inicial que comprende del 1 de Enero de 2016 y hasta el 31 de diciembre de 2018. México, Comisión Reguladora de Energía, Unidad de análisis económico, 2016. [en línea]. <<http://www.cre.gob.mx/documento/5846.pdf>>

Métodos de verificación del equipo de medición en laboratorio. México, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, Repositorio digital. [en línea]. <<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/856/A7.pdf?sequence=7>>

Hernández Pérez, María Y., Arroyo Figueroa, Gustavo., Santos Domínguez, Martín., Rodríguez Ortiz, Guillermo., Escobedo Hernández, Hilda. *Modelo para detectar y prevenir pérdidas no técnicas en sistemas de distribución eléctrica con base en técnicas de minería de datos y redes bayesianas.* México, Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias, Boletín octubre – diciembre, 2015.

Pérdidas eléctricas. República del Ecuador, ELEPCO S.A., [en línea]. <<http://repositorio.utc.edu.ec/bitstream/27000/1031/1/T-UTC-1264.pdf>>

Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2016 – 2030. México, Secretaría de Energía.

Tarifas para el suministro y venta de energía eléctrica (2015 - 2016). México, Comisión Federal de Electricidad, 2016. [en línea]. <http://app.cfe.gob.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/Tarifas/tarifas_negocio.asp>

Hollister, V.L., *The Induction Watt-Hour Meter.* U.S.A., The American Institute of Electrical Engineers.

Wattorímetros monofásicos y polifásicos electrónicos, clase de exactitud 0,5. México, Comisión Federal de Electricidad, Especificación GWH00-78, 2006. [en línea]. <<http://lapem.cfe.gob.mx/normas/pdfs/o/GWH00-78.pdf>>

CAPÍTULO IV
CONCLUSIONES



El incesante progreso tecnológico exige a las universidades permanecer en constante evolución, a fin de que los egresados puedan lograr competitividad laboral. Esto se consigue mediante la adaptación de los programas de estudio.

Como se ha mencionado en la introducción de este proyecto de investigación, las prácticas de laboratorio constituyen un recurso importante en la formación académica de los alumnos de áreas experimentales, pues resultan una valiosa herramienta para esclarecer, reforzar y profundizar la enseñanza. Esta es la premisa que ha dado fundamento a la elaboración del presente trabajo.

En definitiva, desarrollar un manual de prácticas de laboratorio no es tarea sencilla; lograr el balance entre calidad y cantidad es el asunto primordial que se debe considerar y también es el más difícil de conseguir.

Este proyecto permite enriquecer el programa de la asignatura de Sistemas de Distribución, una materia vasta y cautivante, donde se ha tenido la oportunidad de aprender conceptos desconocidos y esclarecer muchos más, de vincular temas vistos en otras asignaturas y finalmente, aterrizarlos en un manual de prácticas de laboratorio en beneficio de las generaciones futuras, ya que, con este manual, se hace posible cursar las clases prácticas que no se imparten actualmente.

Este manual favorece a los alumnos, a los instructores y a la facultad:

- A los alumnos debido a que se proporcionan procedimientos simples y extremadamente detallados que facilitan el desarrollo de las prácticas y la comprensión de los temas examinados. Los procedimientos complicados y las conexiones que requieren demasiado tiempo confunden a los estudiantes y desvían el enfoque de las prácticas; puesto que, en lugar de dedicarse a asimilar los fenómenos que se presentan, la mayor preocupación es realizar las múltiples conexiones de manera apropiada, en consecuencia, se ocupa un considerable tiempo de clase y un mínimo de éste para tomar mediciones, el comportamiento de los circuitos queda en segundo plano y existe lugar a numerosas dudas.
- En el anexo se incluye la solución a los desarrollos de las prácticas; es un apoyo a los instructores. En dicha sección, se exponen los resultados obtenidos en cada experimento; con lo cual, los instructores pueden impartir las clases con previo conocimiento de los valores esperados en cada prueba.
- A la facultad porque todas las prácticas fueron diseñadas considerando equipo disponible en el laboratorio de Ingeniería Eléctrica Electrónica, como son los módulos didácticos de LabVolt, osciloscopios digitales, etc., eludiendo así la necesidad de adquirir instrumental para la implementación de este laboratorio, con lo que se obtienen grandes ventajas al mínimo costo. Además, que en ciertas prácticas de esta asignatura se considere equipo que no se ocupa en otros laboratorios del área, impulsa la utilización y el aprovechamiento del equipo citado, pues no tiene ningún caso contar con equipo funcional en desuso.



Como trabajo derivado de este manual de prácticas, bien podría surgir el desarrollo del material digital; una serie de videos y/o presentaciones donde se muestren y sean explicados paso a paso los procedimientos de cada una de las prácticas, adoptando la misma estrategia de enseñanza - aprendizaje que se ha establecido en los laboratorios de Dispositivos Electrónicos y Sistemas de Control, donde los alumnos se presentan a clases con el precedente de lo que van a realizar, reduciendo así, casi en un 50% la duración de las clases. Además, se brinda a los estudiantes una herramienta extra de trabajo; ya que, en adición a los formatos de práctica, un video - tutorial de los procedimientos es el método preciso para que, antes de entrar a clase, los alumnos tengan completa certeza de lo que van a realizar, ya no es necesario dedicar demasiado tiempo explicando conexiones, y la atención principal se centra en el comportamiento de los circuitos.

Al cursar la asignatura de Sistemas de Distribución en el primer semestre que se impartió, se tuvo la falta de clases prácticas; no obstante, este inconveniente permitió valorar la importancia de cursar laboratorios. Resolver este problema fue la tarea más destacada durante el cumplimiento de Servicio Social y, de forma consecuente, se convirtió en tema del presente estudio.

Este laborioso proyecto ofrece una significativa aportación a la formación académica de los alumnos de la carrera de Ingeniería Eléctrica Electrónica, particularmente a los del área eléctrica. Queda como deseo que sea extraído el mayor provecho a todos los meses dedicados a la elaboración de este proyecto.

ANEXO

SOLUCIONARIO DE PRÁCTICAS



U.N.A.M.	Ingeniería Eléctrica Electrónica
F.E.S. Aragón	
Laboratorio de Sistemas de Distribución	

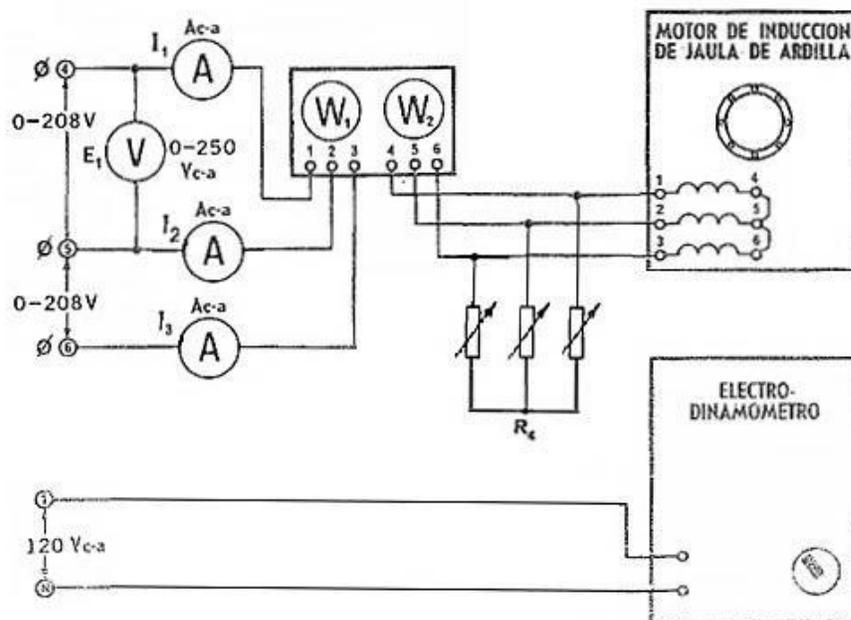
PRÁCTICA 1

CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA CON CAPACITORES

¡ATENCIÓN! En esta práctica se manejan altos voltajes, no hacer ninguna conexión cuando la fuente este energizada y siempre des energice la fuente después de cada medición.

EXPERIMENTO 1 – Compensación del factor de potencia con el motor en vacío.

- 1) Conecte el siguiente circuito.





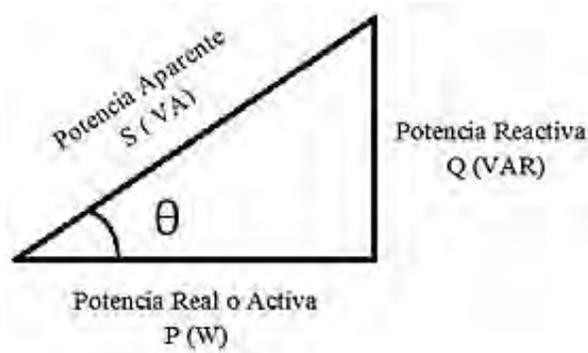
- a. Acople el electrodinamómetro con el motor de inducción de jaula de ardilla por medio de la banda de acoplamiento.
 - b. Conecte la fuente de alimentación trifásica variable (terminales 4, 5 y 6) en serie con los amperímetros de CA (a las terminales \pm), las salidas de 2.5 A de cada uno de los amperímetros deben conectarse a las terminales 1, 2 y 3 del wattímetro trifásico. Así mismo, las terminales 4, 5 y 6 del wattímetro trifásico deben conectarse a las terminales 1, 2 y 3, respectivamente, del motor de inducción de jaula de ardilla.
 - c. Conecte un voltímetro a la fuente de alimentación (terminales 4 y 5), a fin de ajustar el voltaje a 208 V).
 - d. Conecte los devanados del motor de inducción jaula de ardilla en estrella (terminales 4 con 5 y 5 con 6).
 - e. Conecte las terminales del electrodinamómetro a las salidas de voltaje fijo de 120 V_{CA} de la fuente de alimentación (terminales 1 y N).
 - f. Ajuste la perilla de control del dinamómetro en su posición extrema, haciéndola girar en sentido antihorario (a fin de proporcionarle al motor una carga de arranque de 0 lbf·plg.)
 - g. Conecte el módulo de capacitancia en paralelo con el motor de inducción de jaula de ardilla (terminales 1, 2 y 3). Las terminales restantes del módulo de capacitancia deben conectarse en estrella. Verifique que todos los interruptores del módulo estén abajo.
- 2) Encienda la fuente de alimentación y aumente lentamente el voltaje, el motor debe comenzar a funcionar.
- a. ¿Qué sucede con la potencia reactiva?
Al arranque, el motor de inducción demanda una alta potencia reactiva; por lo tanto, la fuente de alimentación debe suministrar una gran corriente con un factor de potencia bajo.
 - b. Realice las mediciones indicadas en la tabla 1.1

I_A (A)	0.7
I_B (A)	0.7
I_C (A)	0.7
Velocidad (RPM)	1786
Potencia real (W)	60
Potencia reactiva (VAr)	250
Factor de Potencia	0.2334

Tabla 1.1 Características sin compensar el factor de potencia con el motor en vacío.



- 3) Sin reducir el voltaje, apague la fuente de alimentación.
- 4) Considerando el triángulo de potencias, calcule el factor de potencia y anote su resultado en la tabla 1.1.



$$f.p. = \cos \theta$$

$$\tan \theta = \left(\frac{Q}{P} \right)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{Q}{P} \right)$$

$$f.p. = \cos \left[\tan^{-1} \left(\frac{Q}{P} \right) \right]$$

$$f.p. = \cos \left[\tan^{-1} \left(\frac{Q}{P} \right) \right] = \cos \left[\tan^{-1} \left(\frac{250}{60} \right) \right] \Rightarrow f.p. = 0.2334$$

- 5) Encienda la fuente de alimentación.
- 6) Ahora, para compensar el factor de potencia con reactancia capacitiva:
 - a. Suba los tres interruptores de 1200 Ω del módulo de capacitancia, realice las mediciones que pide la tabla 1.2.
 - b. Sin hacer ningún cambio, suba los tres interruptores de 600 Ω del módulo de capacitancia, realice las mediciones que pide la tabla 1.2.
 - c. Sin hacer modificaciones, suba los tres interruptores de 300 Ω del módulo de capacitancia, realice las mediciones que pide la tabla 1.2.

	1 200 Ω	1 200 Ω / / 600 Ω	1 200 Ω / / 600 Ω / / 300 Ω
I_A (A)	0.6	0.4	0.1
I_B (A)	0.6	0.4	0.1
I_C (A)	0.6	0.4	0.1
Velocidad (RPM)	1786	1786	1786
Potencia real (W)	60	60	60
Potencia reactiva (VAr)	200	120	40
Factor de Potencia	0.2873	0.4472	0.8321

Tabla 1.2 Compensación del factor de potencia con el motor en vacío.

- d. Retire todas las capacitancias.



- 7) Reduzca el voltaje a cero y apague la fuente de alimentación.
- 8) Calcule el factor de potencia para cada una de las reactancias capacitivas y anote sus resultados en la tabla 1.2.

$$f.p. = \cos \left[\tan^{-1} \left(\frac{Q}{P} \right) \right] = \cos \left[\tan^{-1} \left(\frac{200}{60} \right) \right] \Rightarrow f.p. = 0.2873$$

$$f.p. = \cos \left[\tan^{-1} \left(\frac{Q}{P} \right) \right] = \cos \left[\tan^{-1} \left(\frac{120}{60} \right) \right] \Rightarrow f.p. = 0.4472$$

$$f.p. = \cos \left[\tan^{-1} \left(\frac{Q}{P} \right) \right] = \cos \left[\tan^{-1} \left(\frac{40}{60} \right) \right] \Rightarrow f.p. = 0.8321$$

EXPERIMENTO 2 – Compensación del factor de potencia con el motor con carga.

- 1) Encienda la fuente de alimentación y aumente lentamente el voltaje, el motor debe comenzar a funcionar. Verifique en los amperímetros que el motor no exceda una corriente de 1 A.

Nota: No exceda la corriente a más de 1 A, a fin de no sobrecargar el motor.

- 2) Aumente gradualmente la carga del dinamómetro, haciendo girar la perilla de control en sentido horario. Describa lo que sucede con la corriente, la potencia real y la potencia reactiva.

Conforme se eleva la carga en el dinamómetro es posible apreciar una disminución de la velocidad del motor, un incremento de corriente, una reducción de potencia reactiva y un aumento de potencia real. Las últimas dos condiciones resultan en la mejora del factor de potencia.

- 3) Realice las mediciones que pide la tabla 1.3.
- 4) Sin reducir el voltaje, apague la fuente de alimentación.
- 5) Calcule el factor de potencia y anote su resultado en la tabla 1.3.

$$f.p. = \cos \left[\tan^{-1} \left(\frac{Q}{P} \right) \right] = \cos \left[\tan^{-1} \left(\frac{240}{292} \right) \right] \Rightarrow f.p. = 0.7725$$



I_A (A)	1
I_B (A)	1
I_C (A)	1
Velocidad (RPM)	1710
Potencia real (W)	292
Potencia reactiva (VAr)	240
Factor de Potencia	0.7725

Tabla 1.3 Características con carga, sin compensar el factor de potencia.

- 6) Encienda la fuente de alimentación.
- 7) Para compensar el factor de potencia:
 - a. Suba los tres interruptores de 1200Ω del módulo de capacitancia, realice las mediciones que pide la tabla 1.4.
 - b. Sin hacer ningún cambio, suba los tres interruptores de 600Ω del módulo de capacitancia, realice las mediciones que pide la tabla 1.4.
 - c. Sin hacer modificaciones, suba los tres interruptores de 300Ω del módulo de capacitancia, realice las mediciones que pide la tabla 1.4.

	1200Ω	$1200 \Omega // 600 \Omega$	$1200 \Omega // 600 \Omega // 300 \Omega$
I_A (A)	0.95	0.8	0.6
I_B (A)	0.95	0.8	0.6
I_C (A)	0.95	0.8	0.6
Velocidad (RPM)	1710	1710	1710
Potencia real (W)	292	292	292
Potencia reactiva (VAr)	200	110	45
Factor de Potencia	0.8250	0.9358	0.9883

Tabla 1.4 Compensación del factor de potencia con carga en el electrodinamómetro.

- d. Retire todas las capacitancias.
- 8) Reduzca el voltaje a cero y desconecte la fuente de alimentación.
- 9) Calcule el factor de potencia para cada una de las reactancias capacitivas y anote sus resultados en la tabla 1.4.



$$f.p. = \cos \left[\tan^{-1} \left(\frac{Q}{P} \right) \right] = \cos \left[\tan^{-1} \left(\frac{200}{292} \right) \right] \Rightarrow f.p. = 0.8250$$

$$f.p. = \cos \left[\tan^{-1} \left(\frac{Q}{P} \right) \right] = \cos \left[\tan^{-1} \left(\frac{110}{292} \right) \right] \Rightarrow f.p. = 0.9358$$

$$f.p. = \cos \left[\tan^{-1} \left(\frac{Q}{P} \right) \right] = \cos \left[\tan^{-1} \left(\frac{45}{292} \right) \right] \Rightarrow f.p. = 0.9883$$



U.N.A.M.	Ingeniería Eléctrica Electrónica
F.E.S. Aragón	
Laboratorio de Sistemas de Distribución	

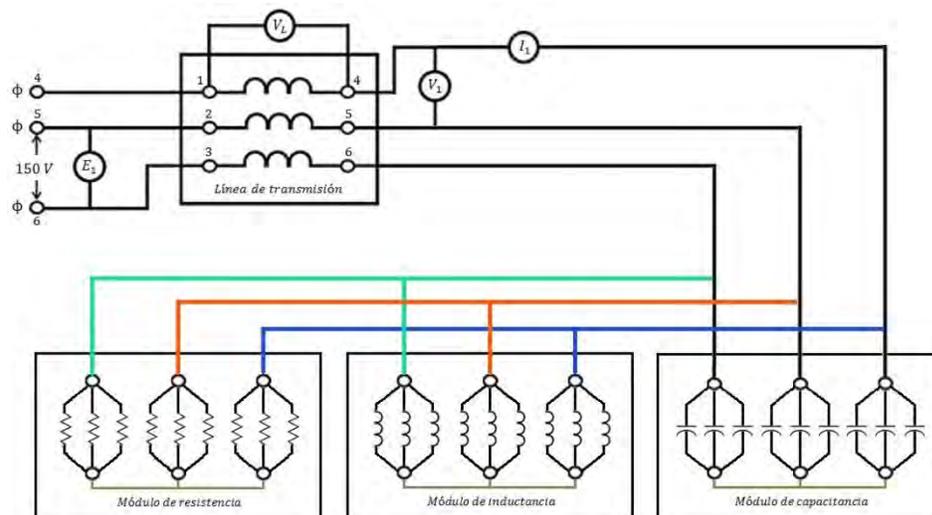
PRÁCTICA 2

REGULACIÓN DE TENSIÓN

¡ATENCIÓN! En esta práctica se manejan altos voltajes, no hacer ninguna conexión cuando la fuente este energizada y siempre des energice la fuente después de cada medición.

EXPERIMENTO 1 – Línea de transmisión a 60Ω .

- 1) Conecte el siguiente circuito.
 - a. Conecte la fuente de alimentación en serie con la línea de transmisión (terminales 4, 5 y 6 de la fuente a las terminales 1, 2 y 3 de la línea de transmisión, respectivamente).
 - b. Para monitorear el voltaje de entrada E_1 conecte un voltímetro en paralelo a la fuente de alimentación (terminal 5 de la fuente a \pm del voltímetro y terminal 6 de la fuente a la salida de 250V del voltímetro).





- c. Conecte la terminal de salida 4 de la línea de transmisión a la terminal \pm del amperímetro I_1 y la salida de 0.5 A del amperímetro a una terminal del módulo de capacitancia, exactamente como se muestra en el circuito. Conecte las terminales 5 y 6 de la línea de transmisión a las terminales restantes del módulo de capacitancia, observe el circuito.
 - d. Conecte cada una de las terminales del módulo de capacitancia a una de las terminales de los módulos de inductancia y resistencia, exactamente como se muestra en el circuito, a fin proporcionar una carga $R||L||C$ a las tres fases de la línea. Observe que las terminales inferiores de los módulos de carga (resistencia, inductancia y capacitancia) están conectadas, entre sí, en estrella.
 - e. Para monitorear el voltaje en la línea de transmisión V_L , conecte un voltímetro en paralelo a ésta (terminal 1 de la línea de transmisión a la terminal \pm del voltímetro y la terminal 4 de la línea de transmisión a la salida de 250 V del voltímetro).
 - f. Para examinar el voltaje de salida V_1 , conecte un voltímetro en paralelo a las terminales de salida de la línea de transmisión (terminal 4 de la línea a la terminal \pm del voltímetro y terminal 5 de la línea a 250 V del voltímetro).
- 2) Posteriormente:
- a. Cerciórese de que todos los interruptores estén abiertos.
 - b. Ajuste la línea de transmisión a 60 Ω .
 - c. Encienda la fuente de alimentación y aumente gradualmente el voltaje hasta que $E_1 = 150 V$, según se muestra en el voltímetro E_1 .
 - d. Realice las mediciones que pide en la tabla 2.1 y anote sus resultados.
- 3) A continuación.
- a. Cierre todos los interruptores de 300 Ω del módulo de resistencia.
 - b. Realice las mediciones que pide en la tabla 2.1 y anote sus resultados.
 - c. Abra todos los interruptores de 300 Ω del módulo de resistencia, regresándolos a su posición original.
- 4) En seguida.
- a. Cierre todos los interruptores de 300 Ω del módulo de inductancia.
 - b. Realice las mediciones que pide en la tabla 2.1 y anote sus resultados.
 - c. Abra todos los interruptores de 300 Ω del módulo de inductancia, regresándolos a su posición original.
- 5) Después.
- a. Cierre todos los interruptores de 300 Ω del módulo de capacitancia.
 - b. Realice las mediciones que pide en la tabla 2.1 y anote sus resultados.
 - c. Abra todos los interruptores de 300 Ω del módulo de capacitancia, regresándolos a su posición original.



- 6) Para continuar.
 - a. Cierre todos los interruptores de 300Ω del módulo de resistencia.
 - b. Cierre todos los interruptores de 300Ω del módulo de inductancia
 - c. Realice las mediciones que pide en la tabla 2.1 y anote sus resultados.
 - d. Abra todos los interruptores de 300Ω del módulo de inductancia.

- 7) Posteriormente.
 - a. Cierre todos los interruptores de 300Ω del módulo de capacitancia.
 - b. Realice las mediciones que pide en la tabla 2.1 y anote sus resultados.
 - c. Abra todos los interruptores de 300Ω del módulo de resistencia.

- 8) A continuación.
 - a. Cierre todos los interruptores de 300Ω del módulo de inductancia.
 - b. Realice las mediciones que pide en la tabla 2.1 y anote sus resultados.

- 9) En seguida.
 - a. Cierre todos los interruptores de 300Ω del módulo de resistencia.
 - b. Realice las mediciones que pide en la tabla 2.1 y anote sus resultados.

- 10) Sin reducir el voltaje, apague la fuente de alimentación.

- 11) Abra todos los interruptores de los módulos de carga.

- 12) Con los datos recabados, dibuje en la tabla 2.1 el diagrama fasorial de cada caso.

- 13) Calcule la regulación de voltaje de cada caso y anote sus resultados en la tabla 2.1.

EXPERIMENTO 2 – Línea de transmisión a 120Ω .

- 1) Ajuste la línea de transmisión a 120Ω .
- 2) Encienda la fuente de alimentación y verifique que $E_1 = 150 V$.
- 3) Repita el experimento 5.1 y anote sus resultados la tabla 2.2.
- 4) Reduzca el voltaje a cero y apague la fuente de alimentación.



Carga	V_L	I_1	V_1	Diagrama fasorial	% Reg
∞ Procedimiento 2(d)	0	0	150		$\% Reg = \frac{150 - 150}{150} \times 100$ $\% Reg = 0 \%$
$300\Omega_R$ Procedimiento 3(b)	20	0.27	148		$\% Reg = \frac{150 - 148}{148} \times 100$ $\% Reg = 1.35 \%$
$300\Omega_L$ Procedimiento 4(b)	20	0.24	140		$\% Reg = \frac{150 - 140}{140} \times 100$ $\% Reg = 7.14 \%$
$300\Omega_C$ Procedimiento 5(b)	30	0.36	208		$\% Reg = \frac{150 - 208}{208} \times 100$ $\% Reg = -27.88 \%$
$300\Omega_R L$ Procedimiento 6(c)	25	0.32	132		$\% Reg = \frac{150 - 132}{132} \times 100$ $\% Reg = 13.64 \%$
$300\Omega_R C$ Procedimiento 7(b)	35	0.40	190		$\% Reg = \frac{150 - 190}{190} \times 100$ $\% Reg = -21.05 \%$
$300\Omega_L C$ Procedimiento 8(b)	0	0.02	170		$\% Reg = \frac{150 - 170}{170} \times 100$ $\% Reg = -11.76 \%$
$300\Omega_R L C$ Procedimiento 9(b)	20	0.30	160		$\% Reg = \frac{150 - 160}{160} \times 100$ $\% Reg = -6.25 \%$

Tabla 2.1 Línea de transmisión a 60Ω .



Carga	V_L	I_1	V_1	Diagrama fasorial	% Reg
∞	0	0	150		$\% Reg = \frac{150 - 150}{150} \times 100$ $\% Reg = 0 \%$
300_{Ω_R}	30	0.26	145		$\% Reg = \frac{150 - 145}{145} \times 100$ $\% Reg = 3.45 \%$
300_{Ω_L}	25	0.22	120		$\% Reg = \frac{150 - 120}{120} \times 100$ $\% Reg = 25 \%$
300_{Ω_C}	65	0.44	> 250		$\% Reg = \frac{150 - 250}{250} \times 100$ $\% Reg = -40 \%$
$300_{\Omega_R L}$	35	0.30	100		$\% Reg = \frac{150 - 100}{100} \times 100$ $\% Reg = 50 \%$
$300_{\Omega_R C}$	65	0.44	210		$\% Reg = \frac{150 - 210}{210} \times 100$ $\% Reg = -28.57 \%$
$300_{\Omega_L C}$	0	0	160		$\% Reg = \frac{150 - 160}{160} \times 100$ $\% Reg = -6.25 \%$
$300_{\Omega_R L C}$	30	0.28	140		$\% Reg = \frac{150 - 140}{140} \times 100$ $\% Reg = 7.14 \%$

Tabla 2.2 Línea de transmisión a 120 Ω .



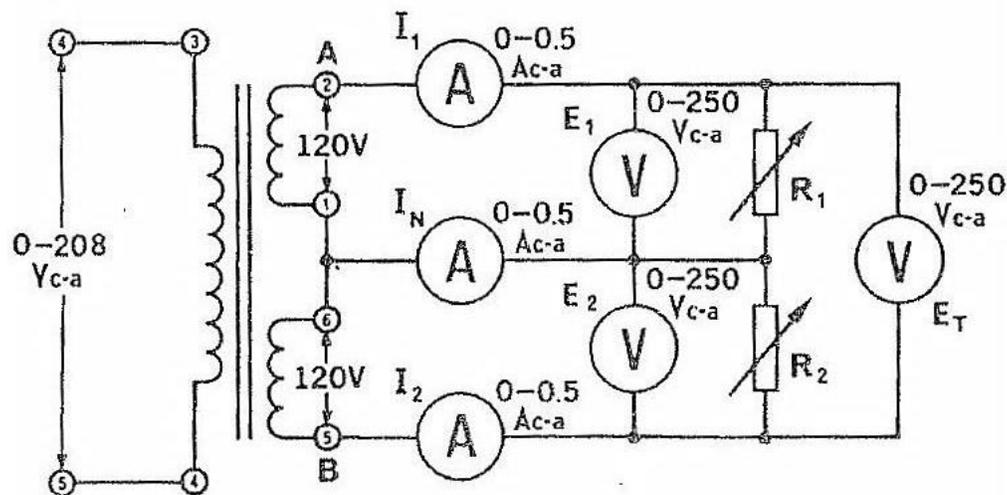
U.N.A.M.	Ingeniería Eléctrica Electrónica
F.E.S. Aragón	
Laboratorio de Sistemas de Distribución	

PRÁCTICA 3

TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN

¡ATENCIÓN! En esta práctica se manejan altos voltajes, no hacer ninguna conexión cuando la fuente este energizada y siempre des energice la fuente después de cada medición.

1) Conecte el siguiente circuito.



- Observe que el devanado primario del transformador (3 a 4) va conectado a la salida de 0-208 V_{CA} de la fuente de alimentación, es decir, las terminales 4 y 5. Los devanados secundarios del transformador 1 a 2 y 5 a 6, se conectan en serie para obtener 240 V_{CA} entre los puntos A y B.



No. de Procedimiento	R_1 (Ω)	R_2 (Ω)	I_1 (A)	I_2 (A)	I_N (A)	E_1 (V)	E_2 (V)	E_T (V)
2 (c)	∞	∞	0	0	0	120	120	240
3 (b)	300	300	0.38	0.39	0	110	110	220
4 (b)	600	300	0.18	0.38	0.17	110	110	225
5 (b)	300	1200	0.34	0.12	0.24	110	115	230
6 (c)	300	1200	0.16	0.16	0	50	180	240
7 (c)	300	300	0.29	0.29	0	85	80	170
8 (b)	600	300	0.18	0.20	0	115	60	175
9 (f)	400	400	0.29	0.31	0.38	120	120	240

Tabla 3.1 Comportamiento de un transformador de distribución a diferentes cargas con y sin hilo neutro.

2) Posteriormente.

- Cerchiórese de que todos los interruptores de resistencia estén abiertos.
- Conecte la fuente de alimentación y ajústela a $208 V_{CA}$, según lo indica el voltímetro de la fuente de alimentación.
- Mida y anote en la tabla 3.1, el voltaje total de salida del transformador E_T , los voltajes en cada una de las cargas E_1 y E_2 , las corrientes de línea I_1 e I_2 , y la corriente del hilo neutro I_N .

3) A continuación.

- Ponga 300Ω en cada circuito de carga, cerrando los interruptores correspondientes.
- Mida y anote todas las cantidades que pide la tabla 3.1.
- ¿Por qué la corriente del hilo neutro es igual a cero?

Porque el valor de la corriente en el hilo neutro se determina según la diferencia entre las dos corrientes de línea y, debido a que la carga está balanceada, ambas corrientes son iguales.

4) Enseguida.

- Deje 300Ω en la carga R_2 y ajuste 600Ω en la carga R_1 .
- Mida y anote todas las cantidades que pide la tabla 3.1.
- Describe lo que sucede.

El desbalance de carga conectada en los devanados del transformador resulta en un flujo de corriente a través del hilo neutro.



5) Después.

- Ponga 1 200 Ω en la carga R_2 y ajuste 300 Ω en la carga R_1 .
- Mida y anote todas las cantidades que pide la tabla 3.1.
- Reduzca el voltaje a cero y desconecte la fuente de alimentación.
- ¿Es igual la corriente del neutro a la diferencia entre las dos corrientes de línea?

Sí.

$$\begin{aligned}I_1 - I_2 &= I_N \\0.34 A - 0.12 A &= 0.24 A \\0.22 A &\approx 0.24 A\end{aligned}$$

6) Para continuar.

- Desconecte el hilo neutro del transformador quitando la conexión entre el transformador y el medidor de corriente del neutro I_N .
- Conecte la fuente de alimentación y ajústela a 208 V_{CA} , según lo indica el voltímetro de la fuente de alimentación.
- Mida y anote todas las cantidades que pide la tabla 3.1.
- Reduzca el voltaje a cero y desconecte la fuente de alimentación.
- Si la carga R_1 y R_2 fueran lámparas incandescentes de una casa, ¿qué se observaría?

R_2 brillaría más que R_1 , incluso podría explotar, debido a que la potencia disipada por R_2 es más de tres veces la potencia disipada por R_1 .

7) Posteriormente.

- Ponga 300 Ω en cada circuito de carga.
- Encienda la fuente de alimentación y, como medida precautoria, ajuste el voltaje a 150 V_{CA} , según lo indica el voltímetro de la fuente de alimentación.
- Mida y anote todas las cantidades que pide la tabla 3.1.
- ¿Qué es lo que observa?

La carga balanceada permite que las corrientes de línea tengan el mismo valor; si el hilo neutro estuviera conectado la corriente I_N sería igual a cero.

8) A continuación.

- Deje 300 Ω en la carga R_2 y ajuste 600 Ω en la carga R_1 .
- Mida y anote todas las cantidades que pide la tabla 3.1.
- Describe lo que sucede.

A pesar de conectar la misma carga que en el procedimiento no. 4, la ausencia de hilo neutro ocasiona la disparidad de las mediciones obtenidas en ambos casos.

- Reduzca el voltaje a cero y desconecte la fuente de alimentación.



9) Enseguida.

- Vuelva a conectar la línea del neutro del transformador al medidor de la corriente en el neutro I_N .
- Sustituya la carga R_2 con el módulo de inductancia.
- Ajuste R_1 a una resistencia de 400Ω .
- Ajuste R_2 a una reactancia inductiva X_L de 400Ω .

Para obtener 400Ω de resistencia y reactancia inductiva, es necesario cerrar los interruptores de 600Ω y 1200Ω de cada módulo de carga.

- Conecte la fuente de alimentación y ajústela a $208 V_{CA}$.
- Mida y anote todas las cantidades que pide la tabla 3.1.
- Reduzca el voltaje a cero y desconecte la fuente de alimentación.
- ¿Es igual la corriente del hilo neutro a la diferencia aritmética entre las corrientes de línea? Explique la razón.

No. Estas dos corrientes están defasadas 90° entre sí; la corriente del hilo neutro se calcula al realizar la suma fasorial de las corrientes de línea.

$$\begin{aligned} I_N &= \sqrt{I_1^2 + I_2^2} \\ 0.38 &= \sqrt{0.29^2 + 0.31^2} \\ 0.38 &= \sqrt{0.1802} \\ 0.38 &\approx 0.4244 \end{aligned}$$



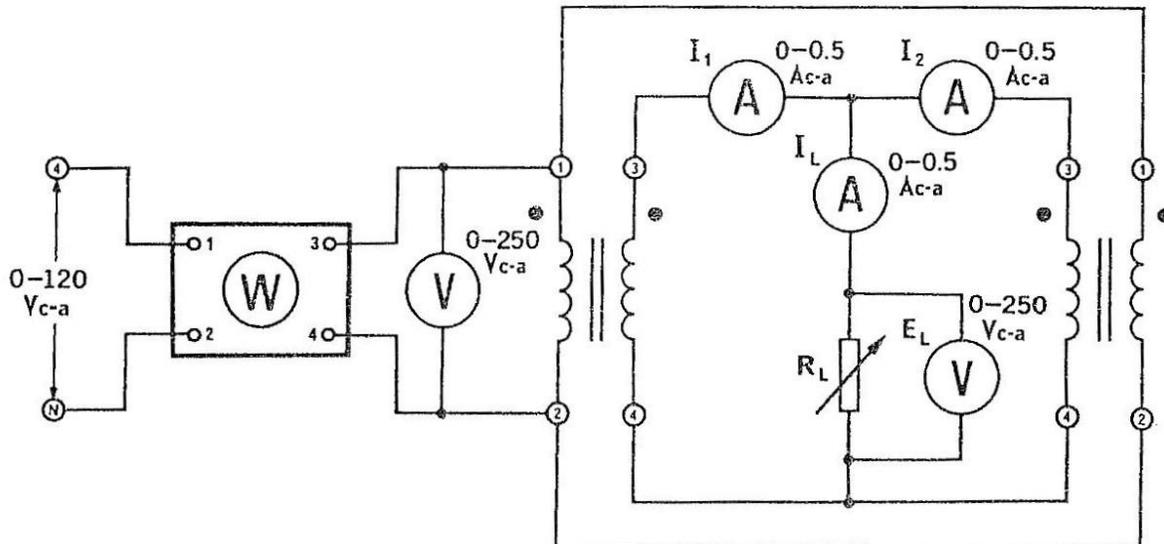
U.N.A.M.	Ingeniería Eléctrica Electrónica
F.E.S. Aragón	
Laboratorio de Sistemas de Distribución	

PRÁCTICA 4

TRANSFORMADORES EN PARALELO

¡ATENCIÓN! En esta práctica se manejan altos voltajes, no hacer ninguna conexión cuando la fuente este energizada y siempre des energice la fuente después de cada medición.

1) Conecte el siguiente circuito.



- Observe que los dos transformadores están conectados en paralelo. Los devanados primarios (1 a 2) se conectan a la fuente de alimentación de $120 V_{CA}$. El wattímetro indicará la potencia de entrada. Cada devanado secundario (3 a 4) se conecta en paralelo con la carga R_L . Los amperímetros se conectan para medir la corriente de carga I_L y las corrientes de los secundarios de los transformadores I_1 e I_2 .



- 2) Ponga todos los interruptores de resistencia en la posición “abierto” para tener una corriente de carga igual a cero. Observe que los devanados se conectan para funcionar como transformador elevador (120 V del primario a 208 V del secundario).
- 3) Posteriormente.
 - a. Conecte la fuente de alimentación y haga girar lentamente la perilla de control del voltaje de salida, mientras que observa los medidores de corriente de los secundarios de los transformadores, I_1 e I_2 , así como el medidor de la corriente de carga R_L . Si los devanados están en la correcta secuencia de fase, no habrá ninguna corriente de carga, ni corrientes en los secundarios.

Si existe corriente en los devanados secundarios, significa que las conexiones son erróneas y es necesario verificarlas. Regrese la perilla de control de voltaje a cero, desconecte la fuente de alimentación y revise la conexión del circuito.

- b. Ajuste el voltaje de la fuente de alimentación a $120 V_{CA}$ según lo indica el voltímetro conectado a través del wattímetro.
- 4) Enseguida.
 - a. Aumente gradualmente la carga R_L , hasta que la corriente de carga I_L sea igual a $400 mA_{CA}$.
 - b. Mida y anote el voltaje de carga, la corriente de carga, las corrientes en los secundarios de los transformadores y la potencia de entrada.

$$\begin{aligned}E_L &= 150 V_{CA} \\I_L &= 0.4 A_{CA} \\I_1 &= 0.2 A_{CA} \\I_2 &= 0.2 A_{CA} \\P_{entrada} &= 65 W\end{aligned}$$

- c. Reduzca el voltaje a cero y desconecte la fuente de alimentación.
- 5) Para continuar.
 - a. Calcule la potencia de salida, es decir, la potencia en la carga.

$$P_{salida} = E_L \times I_L = (150)(0.4) = 60 W$$

- b. Calcule la eficiencia del circuito.

Tome en cuenta que siempre la P_{salida} es menor que la $P_{entrada}$.



$$\% \eta = \frac{P_{salida}}{P_{entrada}} \times 100 = \left(\frac{60}{65} \right) (100) = 92.3077 \%$$

- c. Calcule las pérdidas del transformador.

$$Pérdidas = P_{entrada} - P_{salida} = 65 W - 60 W = 5 W$$

- d. Calcule la potencia entregada por el transformador 1.

$$P_{T_1} = E_L \times I_1 = (150)(0.2) = 30$$

- e. Calcule la potencia entregada por el transformador 2.

$$P_{T_2} = E_L \times I_2 = (150)(0.2) = 30$$

- 6) Entre los dos transformadores ¿la carga está distribuida, más o menos, uniformemente? Amplíe su respuesta.

Sí. De acuerdo con los requisitos de paralelaje y debido a que ambos transformadores tienen devanados idénticos, deben compartir la carga equitativamente.



U.N.A.M.	Ingeniería Eléctrica Electrónica
F.E.S. Aragón	
Laboratorio de Sistemas de Distribución	

PRÁCTICA 5

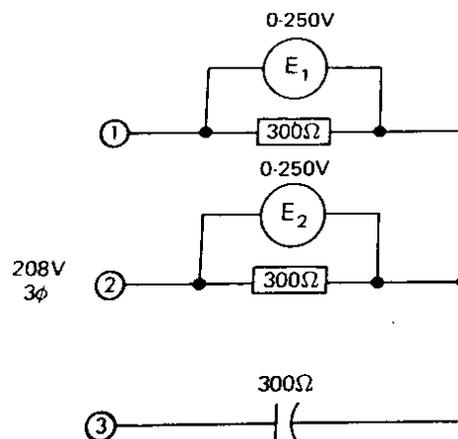
DESPLAZAMIENTO DE FASE EN TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

¡ATENCIÓN! En esta práctica se manejan altos voltajes, no hacer ninguna conexión cuando la fuente este energizada y siempre des energice la fuente después de cada medición.

EXPERIMENTO 1 – Secuencia de fases de la fuente trifásica fija.

- 1) Para determinar la secuencia de fases de la salida trifásica fija de la fuente de alimentación:
 - a. Conecte el siguiente circuito.

Ajuste el valor de cada resistor y de la reactancia capacitiva a 300Ω . Observe que los tres elementos están conectados en estrella a las terminales de salida fija 1, 2 y 3 de la fuente de alimentación.





- b. Encienda la fuente de alimentación.
- c. Mida y anote los voltajes E_1 y E_2 .

$$E_1 = 107.80 V_{CA}$$

$$E_2 = 107.34 V_{CA}$$

- d. En relación a los voltajes E_1 y E_2 , determine la secuencia de fases (alto voltaje – bajo voltaje – capacitor).

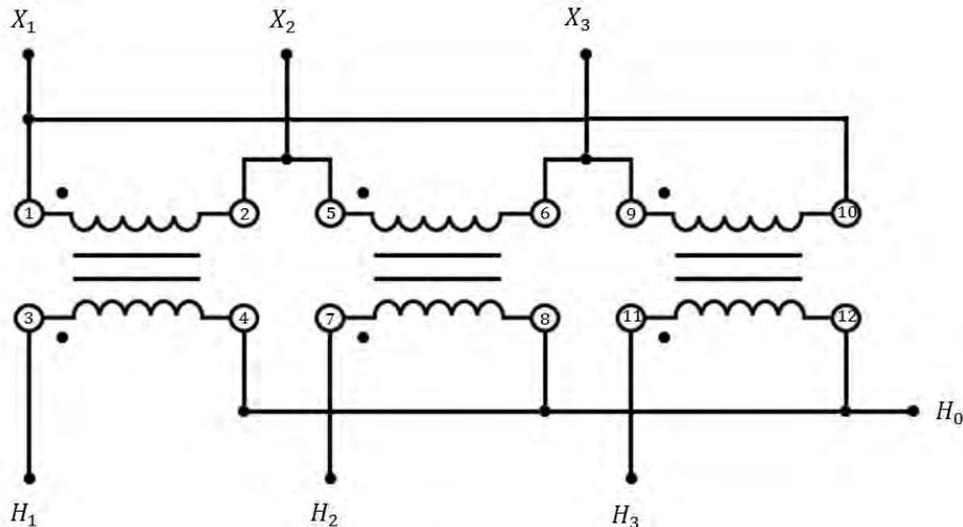
Secuencia de fases: 1 – 2 – 3

- e. Apague la fuente de alimentación y desconecte el circuito.

Alimentar al transformador con la adecuada secuencia de fases, es un requisito indispensable para realizar las pruebas que determinan si el desplazamiento angular del transformador es correcto o no.

EXPERIMENTO 2 – Desplazamiento de fases según la normas ANCE e IEEE.

- 1) Conecte el siguiente circuito.



- a. Observe que uno de los devanados está conectado en estrella: teniendo como punto común a H_0 , donde se conectan las terminales 4, 8 y 12 del transformador; las terminales 3, 7 y 11 del transformador son, respectivamente, las terminales de alimentación H_1 , H_2 y H_3 de este devanado. El otro devanado está conectado en delta, sus terminales están conectadas en serie: terminal 2 a 5, 6 a 9 y 10 a 1; las



terminales de salida X1, X2 y X3 son, respectivamente, los puntos de unión de la conexión serie, terminales 10 a 1, 2 a 5 y 6 a 9.

- b. Siguiendo el orden de la secuencia de fases determinada en el experimento 5.1, conecte las terminales de salida fija de la fuente de alimentación a las terminales marcadas como H1, H2 y H3 del transformador. La terminal H0 del transformador se conecta a la terminal N de la fuente de alimentación.

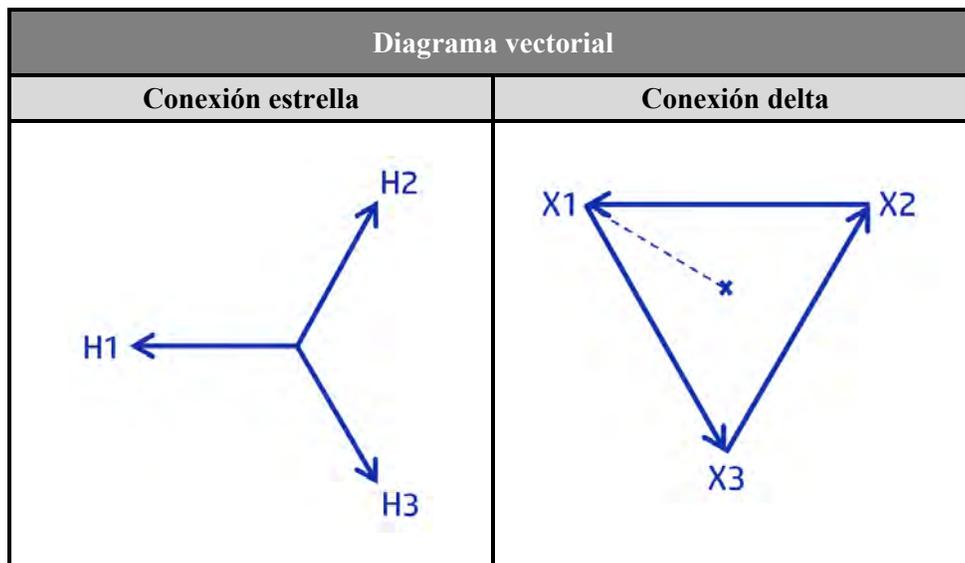
Por ejemplo, teniendo una secuencia de fases ABC, tendría que conectarse:

La fase A a H1 del transformador.

La fase B a H2 del transformador.

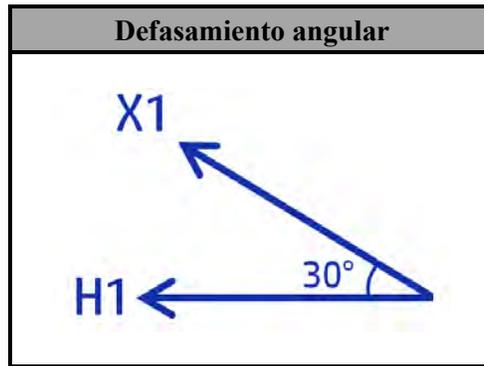
La fase C a H3 del transformador.

- 2) ¿Por qué se marca como H el devanado conectado en estrella?
Porque, de acuerdo con la normativa vigente, el devanado de mayor tensión debe señalarse como H.
- 3) A continuación.
 a. Dibuje el diagrama vectorial de la conexión de cada devanado.



- b. Dibuje solamente los vectores H1 y X1, uniendo los vértices de cada uno en un punto. Al medir el ángulo formado por ambos vectores, podrá observar que:

El defasamiento es X1 retrasado 30° con respecto a H1.



- 4) Para comprobar que el desplazamiento angular es correcto, de acuerdo a las normas ANCE e IEEE, se realizarán las siguientes pruebas:
- Conecte las terminales H1 y X1 (terminales 1 y 3 del transformador).
 - Encienda la fuente de alimentación.
 - Con el multímetro digital, mida el voltaje entre las terminales del transformador que pide la tabla 5.4 y anote sus lecturas.

	Voltaje entre terminales (V)
H3 – X2	127
H3 – X3	127
H1 – H3	220
H2 – X2	127
H2 – X3	254

Tabla 5.4 Mediciones de tensión para prueba de defasamiento angular.

- Reduzca el voltaje a cero y desconecte la fuente de alimentación.
- Con las lecturas obtenidas, verifique que se cumplan las relaciones de tensión estipuladas en las normas ANCE e IEEE. Realice las comparaciones y anote sus resultados en la tabla 5.5.

H3 – X2	=	H3 – X3
127	=	127

H3 – X2	<	H1 – H3
127	<	220

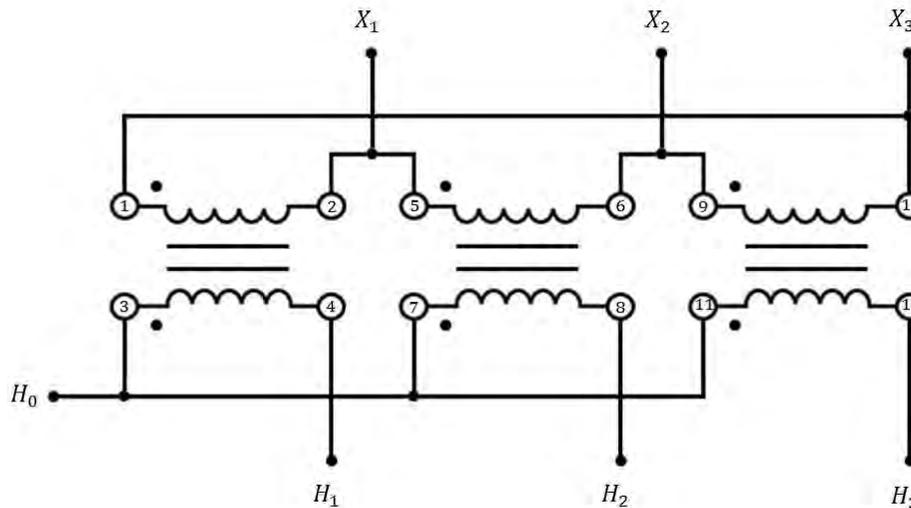


H2 – X2	<	H2 – X3
127	<	254

H2 – X2	<	H1 – H3
127	<	220

Tabla 5.5 Relaciones de tensión cuando el defasamiento angular es correcto.

- 5) Cambie la conexión del circuito según se indica a continuación y repita los pasos 3 y 4 del experimento 5.2.



- Observe que uno de los devanados está conectado en estrella: teniendo como punto común a H_0 , donde se conectan las terminales 3,7 y 11 del transformador; las terminales 4, 8 y 12 del transformador son, respectivamente, las terminales de alimentación H_1 , H_2 y H_3 de este devanado. El otro devanado está conectado en delta, sus terminales están conectadas en serie: terminal 2 a 5, 6 a 9 y 10 a 1; las terminales de salida X_1 , X_2 y X_3 son, respectivamente, los puntos de unión de la conexión serie, terminales 2 a 5, 6 a 9 y 10 a 1.
- Siguiendo el orden de la secuencia de fases determinada en el experimento 5.1, conecte las terminales de salida fija de la fuente de alimentación a las terminales marcadas como H_1 , H_2 y H_3 del transformador. La terminal H_0 del transformador se conecta a la terminal N de la fuente de alimentación.

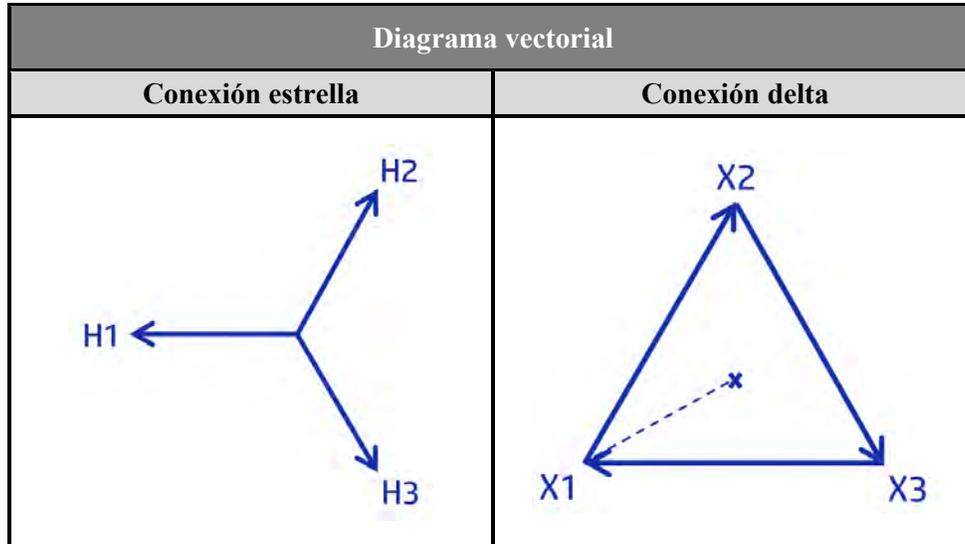
Por ejemplo, teniendo una secuencia de fases ABC, tendría que conectarse:

La fase A a H_1 del transformador.

La fase B a H_2 del transformador.

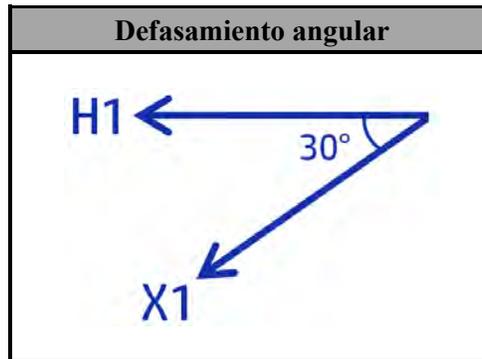
La fase C a H_3 del transformador.

- 6) A continuación.
- Dibuje el diagrama vectorial de la conexión de cada devanado.



- Dibuje solamente los vectores H1 y X1, uniendo los vértices de cada uno en un punto. Al medir el ángulo formado por ambos vectores, podrá observar que:

El defasamiento es X1 adelantado 30° con respecto a H1.



- 7) Para comprobar que el desplazamiento angular no es correcto, de acuerdo a las normas ANCE e IEEE, se realizarán las siguientes pruebas:
- Conecte las terminales H1 y X1 (terminales 2 y 4 del transformador).
 - Encienda la fuente de alimentación.
 - Con el multímetro digital, mida el voltaje entre las terminales del transformador que pide la tabla 5.6 y anote sus lecturas.
 - Reduzca el voltaje a cero y desconecte la fuente de alimentación.



- e. Con las lecturas obtenidas, podrá verificar que no se cumplen las relaciones de tensión estipuladas en las normas ANCE e IEEE. Realice las comparaciones y anote sus resultados en la tabla 5.7.

	Voltaje entre terminales (V)
H3 – X2	254
H3 – X3	127
H1 – H3	220
H2 – X2	127
H2 – X3	127

Tabla 5.6 Mediciones de tensión para prueba de defasamiento angular.

H3 – X2	=	H3 – X3
254	>	127

H3 – X2	<	H1 – H3
254	>	220

H2 – X2	<	H2 – X3
127	=	127

H2 – X2	<	H1 – H3
127	<	220

Tabla 5.7 Relaciones de tensión cuando el defasamiento angular no es correcto.

- f. ¿Por qué no se cumplen las relaciones de tensión?
Porque a pesar de mantener la secuencia de fases de la fuente, se cambiaron las terminales de alimentación del transformador. No es la conexión requerida por las normas ANCE e IEEE; en consecuencia, las relaciones de tensión no se cumplen.



U.N.A.M.	Ingeniería Eléctrica Electrónica
F.E.S. Aragón	
Laboratorio de Sistemas de Distribución	

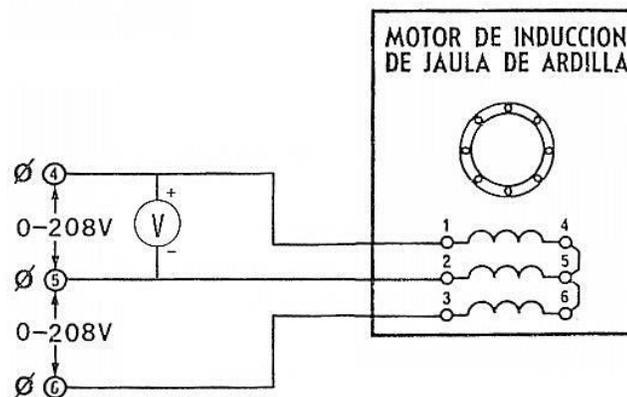
PRÁCTICA 6

CORRIENTE DE ARRANQUE EN TRANSFORMADORES Y MOTORES

¡ATENCIÓN! En esta práctica se manejan altos voltajes, no hacer ninguna conexión cuando la fuente este energizada y siempre des energice la fuente después de cada medición.

EXPERIMENTO 1 – Corriente de arranque del motor de inducción.

- 1) Conecte el siguiente circuito.
 - a. Conecte los devanados del motor de inducción de jaula de ardilla en estrella. Para ésto, necesitamos alimentar el motor con la fuente trifásica variable (terminales 4, 5 y 6 de la fuente de alimentación a las terminales 1, 2 y 3 del motor de inducción, respectivamente). El punto común de la conexión estrella se realiza al conectar las terminales 4 con 5 y 5 con 6 del motor de inducción.
 - b. Conecte un voltímetro entre las terminales 4 y 5 de la fuente de alimentación, a fin de ajustar el voltaje de alimentación.



- 2) Encienda la fuente de alimentación y aumente gradualmente el voltaje hasta $208 V_{CA}$, según lo indica el voltímetro conectado a las terminales de la fuente de alimentación. El motor debe empezar a funcionar.
- 3) Sin modificar el voltaje, apague la fuente de alimentación.
- 4) Posteriormente:
 - a. Conecte un cable BNC – Caimán a la terminal del Canal 1 del osciloscopio.
Si el cable BNC – Caimán está dañado, es posible que introduzca ruido a las mediciones que realizará el osciloscopio. Cambie el cable en caso de que esto ocurra.
 - b. Coloque el transformador de corriente en una de las terminales de alimentación del motor de inducción. Véase figura 6.5.
Este transformador de medida nos hace posible determinar el valor de la corriente de arranque del motor de inducción sin riesgo de dañar el osciloscopio ante un error en la conexión.

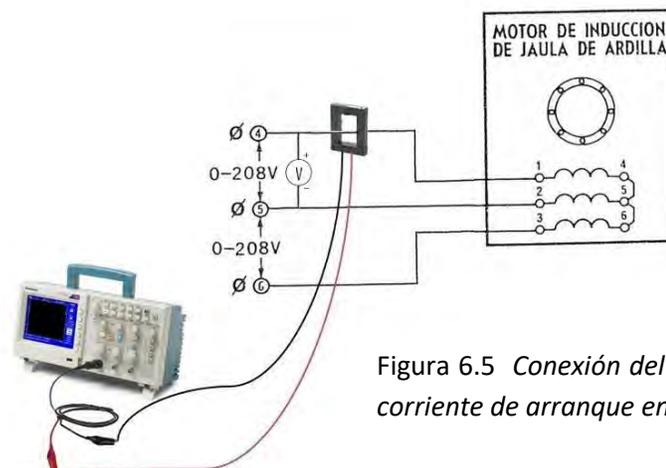
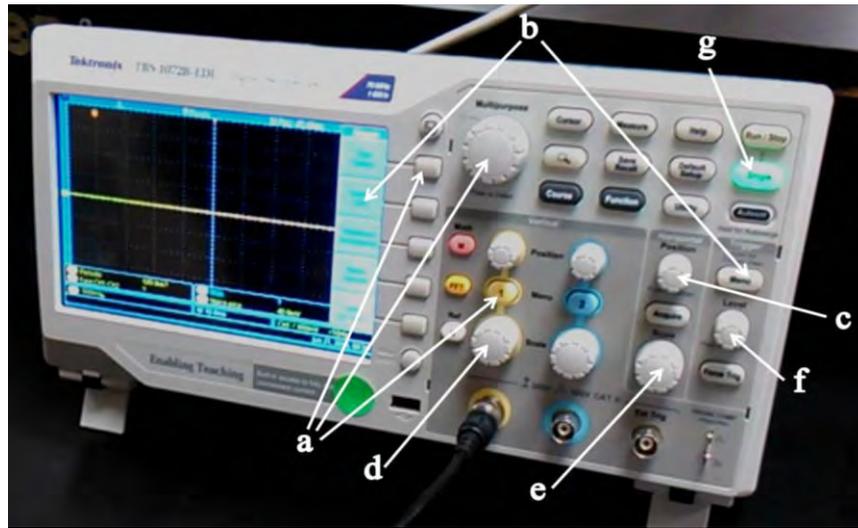


Figura 6.5 Conexión del motor para medir la corriente de arranque en una de las fases.

- c. Las terminales del TC se conectan a las terminales del cable BNC - Caimán conectado en el osciloscopio. El circuito debe quedar tal como se ilustra en la figura 6.5.
- 5) Conecte el osciloscopio en una toma de corriente externa al módulo de fuente de alimentación. Una vez encendido, para su configuración, utilice la metodología descrita a continuación:



- a. Oprima el botón “Menu” del canal 1 en la sección “Vertical” y, con la perilla “Multipurpose”, seleccione el modo de acoplamiento C.C.
- b. Oprima el botón “Menu” de la sección “Trigger” y asegúrese de que el display esté seleccionado en el canal 1.
- c. Para posicionar el inicio de la captura de la señal, con la perilla “Position” de la sección “Horizontal”, desplace el cursor hasta el segundo cuadro de izquierda a derecha a fin de observar mejor la señal.
- d. Con la perilla “Scale” de la sección “Vertical”, ajuste como valor inicial 100 mV/div.
En caso de que la señal no se aprecie adecuadamente en la pantalla, deberá ajustar el valor según sea necesario para visualizar el transitorio.
- e. Con la perilla “Scale” de la sección “Horizontal”, ajuste como valor inicial 100 ms/div.
En caso de que la señal no se aprecie adecuadamente en la pantalla, deberá ajustar el valor según sea necesario para visualizar el transitorio.
- f. Para establecer el límite en el que se va a capturar la señal, con la perilla “Level” de la sección “Trigger” lleve el nivel de disparo a un valor aproximado de 220 mV.
- g. Seleccione la función de disparo único oprimiendo el botón “Single”.
El modo de disparo único del osciloscopio digital permite capturar los transitorios de un circuito o equipo eléctrico que se producen una sola vez; tal es el caso del transitorio de la corriente de arranque.

Nota: Si el sistema tiene un alto nivel de ruido, es probable que se dispare el trigger. Asegúrese de que esto no suceda antes de encender la fuente, pues no sería posible tomar lectura de la corriente de arranque.

- 6) Encienda la fuente de alimentación. La onda que aparece en el osciloscopio, así como los valores establecidos de amplitud, tiempo y disparo, deben verse como se muestra en la figura 6.6. De no ser así, puede apagar y encender la fuente de alimentación las veces que sea necesario para poder apreciar el transitorio.

Una vez que el osciloscopio ha capturado una señal será necesario volver a seleccionar el modo de disparo único, oprimiendo la tecla “Single” del osciloscopio, para poder observar una nueva forma de onda cada que se encienda la fuente de alimentación.

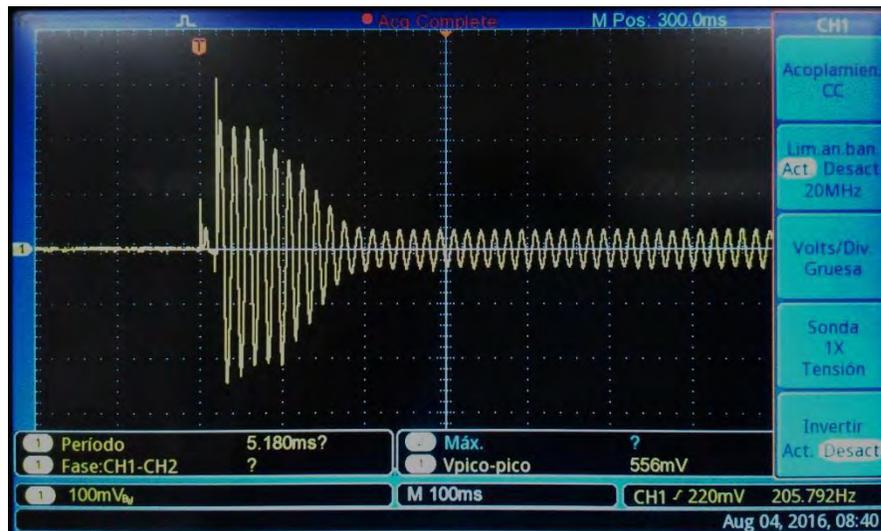


Figura 6.6 Corriente de arranque en una fase del motor de inducción.

Si la onda no se aprecia en la pantalla adecuadamente, varíe los valores de tiempo (horizontal) y amplitud (vertical) del osciloscopio.

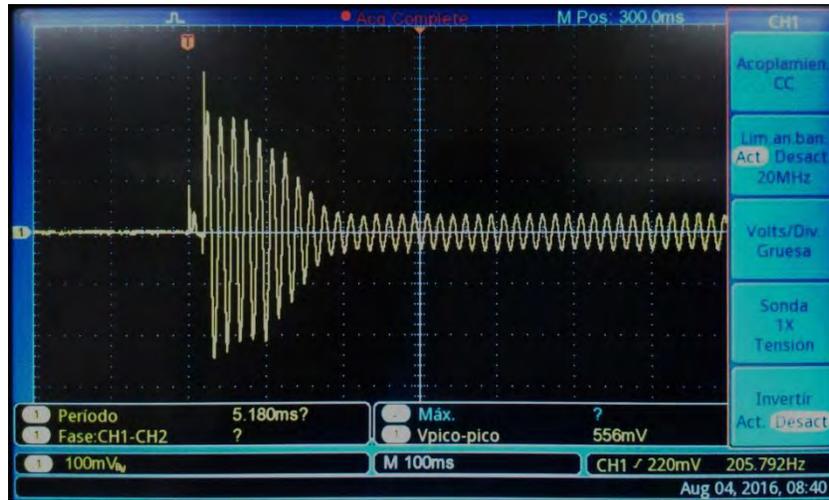
- 7) Si modificó las escalas horizontal y vertical del osciloscopio, anote los nuevos valores en la tabla 6.2. En caso contrario, omita este procedimiento.

Escala vertical (mV/div)	Escala horizontal (ms/div)
-----	-----

Tabla 6.2 Nuevas escalas del osciloscopio para el motor de inducción en una fase.



8) Dibuje la forma de onda obtenida.



9) Anote el valor de la corriente nominal del motor, así como el valor de la relación de transformación del transformador de corriente (TC) en la tabla 6.3.

10) Realice las mediciones que pide la tabla 6.3.

$I_{nominal}$ (A)	1.2
Relación de transformación	0.333V / 10A
$V_{pico-pico}$ (mV)	556
Amplitud (mV)	100
V_{max} (mV)	-----

Tabla 6.3 Valores medidos para una fase del motor de inducción.

11) Sin modificar el voltaje, apague la fuente de alimentación.

12) A continuación, se analizará la corriente de arranque en dos de las fases del motor de inducción, para esto, siga los siguientes incisos y observe la figura 6.7.

- Conecte un cable BNC – Caimán a la terminal del Canal 2 del osciloscopio.
- Coloque otro transformador de corriente en otra de las terminales de alimentación del motor de inducción.
- Conecte las terminales del TC a las terminales del cable BNC – Caimán conectado en el canal 2 del osciloscopio.

13) En el osciloscopio:

- Active el canal 2 oprimiendo el botón “Menu” del canal 2 en la sección “Vertical”.
- Con la perilla “Scale” de la sección “Vertical”, ajuste como valor inicial 200 mV/div para ambos canales.

En caso de que las señales no se aprecien adecuadamente en la pantalla, deberá ajustar el valor según sea necesario para visualizar los transitorios.

- Deje la escala de tiempo tal como está, en 100ms/div.

En caso de que las señales no se aprecien adecuadamente en la pantalla, deberá ajustar el valor según sea necesario para visualizar los transitorios.

- Con la perilla “Level” de la sección “Trigger” lleve el nivel de disparo a 200 mV.
- Seleccione la función de disparo único oprimiendo el botón “Single”.

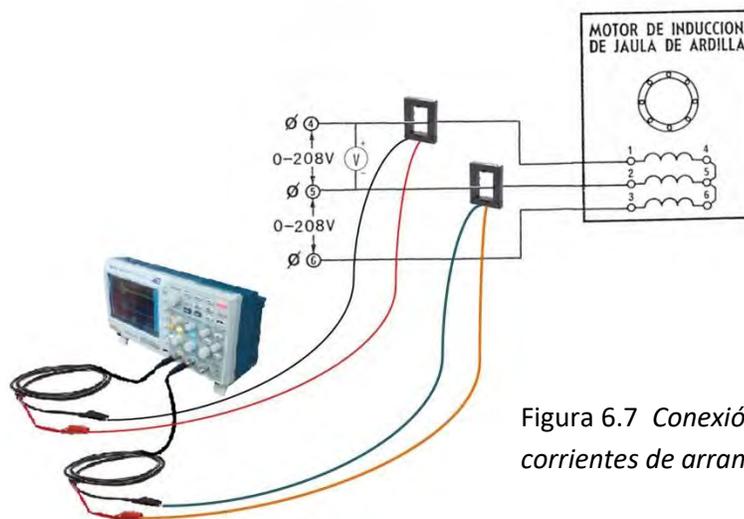


Figura 6.7 Conexión del motor para medir las corrientes de arranque en dos de las fases.

14) Encienda la fuente de alimentación. Las ondas que aparecen en el osciloscopio, así como los valores establecidos de amplitud, tiempo y disparo, deben verse como se muestra en la figura 6.8. De no ser así, puede apagar y encender la fuente de alimentación las veces que sea necesario para poder apreciar el transitorio.

Una vez que el osciloscopio ha capturado una señal será necesario volver a seleccionar el modo de disparo único, oprimiendo la tecla “Single” del osciloscopio, para poder observar una nueva forma de onda cada que se encienda la fuente de alimentación.

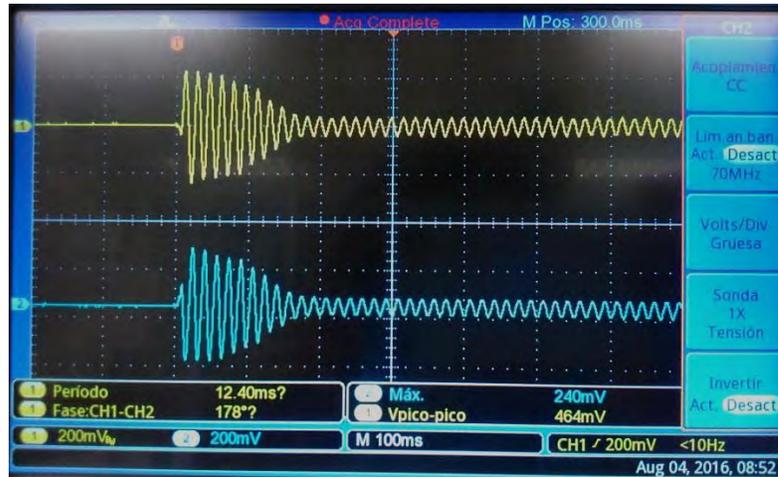


Figura 6.8 Corrientes de arranque en dos fases del motor de inducción.

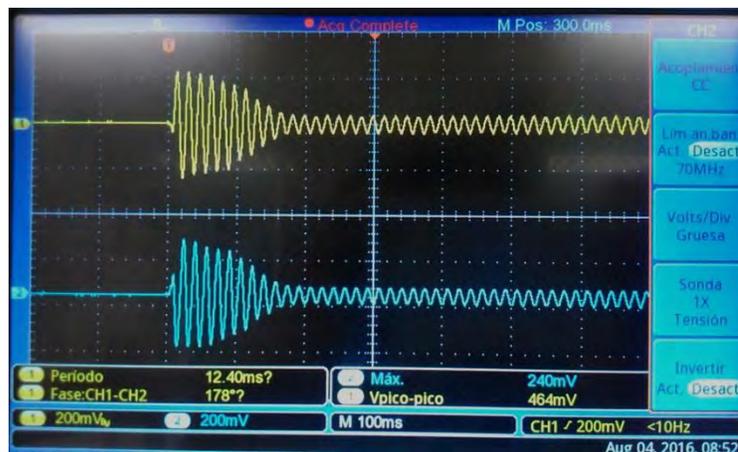
Si las ondas no se aprecian en la pantalla adecuadamente, varíe los valores de tiempo (horizontal) y amplitud (vertical) del osciloscopio.

- 15) Si modificó las escalas horizontal y vertical del osciloscopio, anote los nuevos valores en la tabla 6.4. En caso contrario, omita este procedimiento.

Escala vertical (mV/div)	Escala horizontal (ms/div)
-----	-----

Tabla 6.4 Nuevas escalas del osciloscopio para el motor de inducción en dos fases.

- 16) Dibuje las formas de onda obtenidas.



17) Realice las mediciones que pide la tabla 6.5.

$I_{nominal}$ (A)	1.2
Relación de transformación	0.333V / 10A
$V_{pico-pico}$ (mV)	464
Amplitud (mV)	200
V_{max} (mV)	240

Tabla 6.5 Valores medidos para dos fases del motor de inducción.

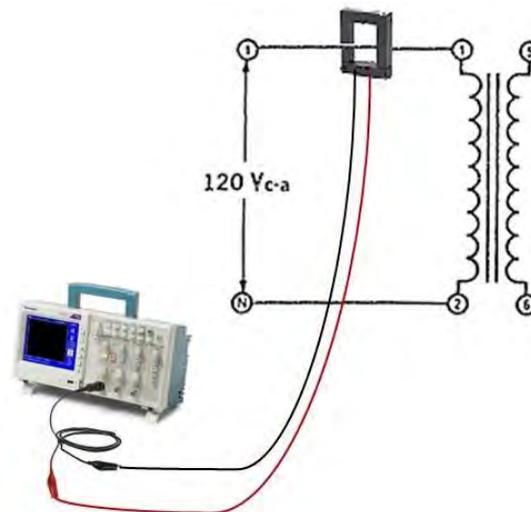
18) Anote sus observaciones.

Las formas de onda de la corriente de arranque en ambas fases del motor son idénticas.

19) Reduzca el voltaje a cero, apague la fuente de alimentación y desconecte el circuito.

EXPERIMENTO 2 – Corriente de arranque del transformador monofásico.

1) Conecte el siguiente circuito.



- Conecte el devanado primario del transformador a la fuente trifásica fija (terminales 1 y N de la fuente de alimentación a las terminales 1 y 2 del transformador, respectivamente).
- Coloque un TC en una de las terminales de alimentación del transformador.
- Conecte las terminales del TC a las terminales del cable BNC – Caimán del Canal 1 del osciloscopio.



- 4) En el osciloscopio:
- Deshabilite el canal 2 del osciloscopio oprimiendo el botón “Menu” del canal 2 en la sección “Vertical” y desconecte el cable BNC – Caimán de esta terminal.
 - Con la perilla “Scale” de la sección “Vertical”, ajuste como valor inicial 5 mV/div.
En caso de que la señal no se aprecie adecuadamente en la pantalla, deberá ajustar el valor según sea necesario para visualizar el transitorio.
 - Con la perilla “Scale” de la sección “Horizontal”, ajuste como valor inicial 50 ms/div.
En caso de que la señal no se aprecie adecuadamente en la pantalla, deberá ajustar el valor según sea necesario para visualizar el transitorio.
 - Para establecer el límite en el que se va a capturar la señal, con la perilla “Level” de la sección “Trigger” lleve el nivel de disparo a 13 mV.
 - Seleccione la función de disparo único oprimiendo el botón “Single”.

Nota: Si el sistema tiene un alto nivel de ruido, es probable que se dispare el trigger. Asegúrese de que esto no suceda antes de encender la fuente, pues no sería posible tomar lectura de la corriente de arranque.

- 5) Encienda la fuente de alimentación. Los valores establecidos de amplitud, tiempo y disparo, deben verse como se muestra en la figura 6.9. En este caso, podrá observar que el transitorio de corriente de arranque del transformador varía cada que apaga y enciende la fuente de alimentación.

Una vez que el osciloscopio ha capturado una señal será necesario volver a seleccionar el modo de disparo único, oprimiendo la tecla “Single” del osciloscopio, para poder observar la nueva forma de onda cada que se encienda la fuente de alimentación.

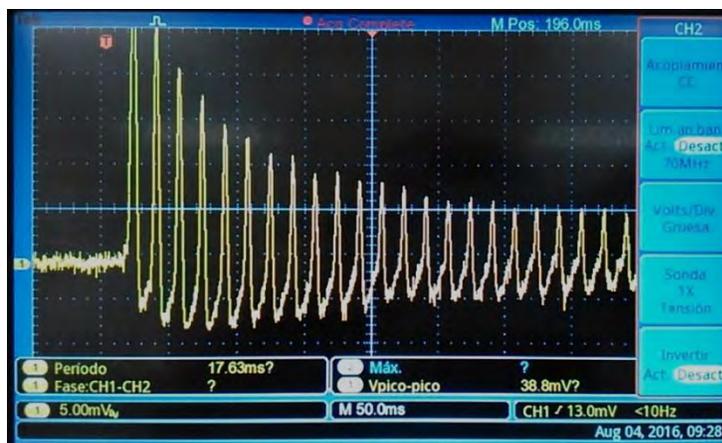


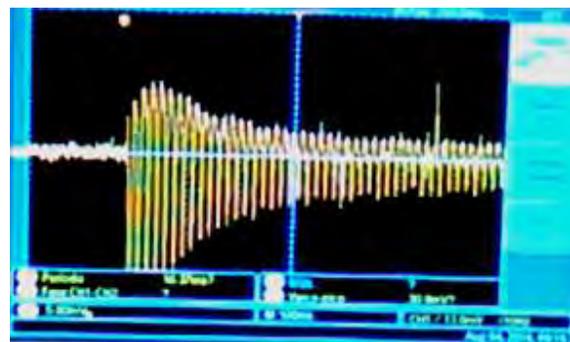
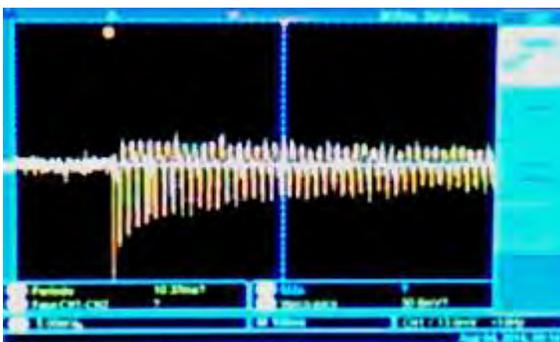
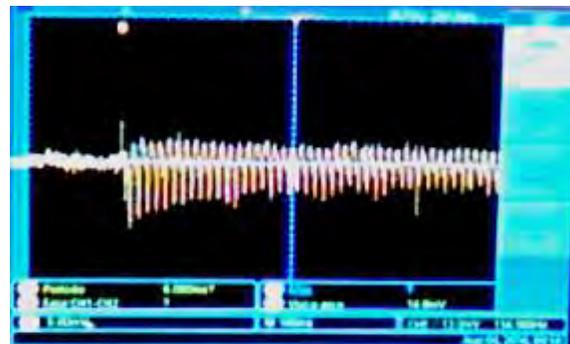
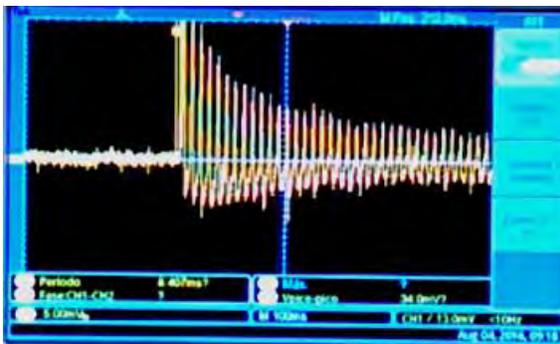
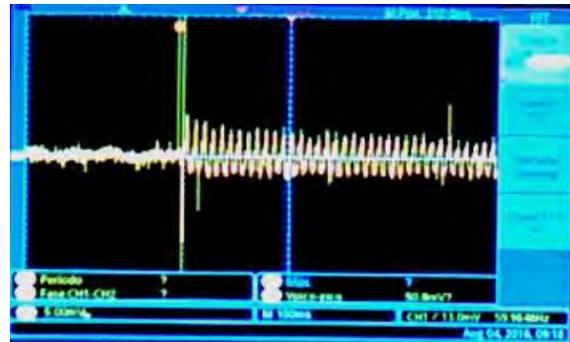
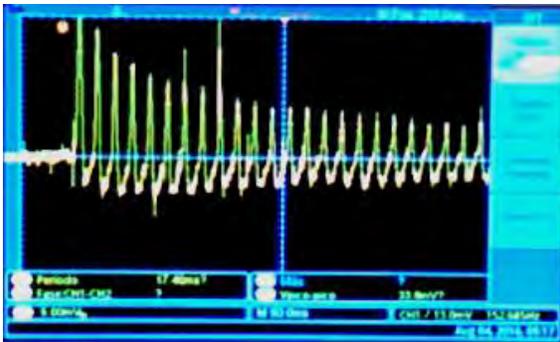
Figura 6.9 Corriente de arranque del transformador monofásico.



Si la onda no se aprecia en la pantalla adecuadamente, varíe los valores horizontal y vertical del osciloscopio.

- 11) Tome 5 diferentes capturas de la corriente de arranque del transformador apagando y encendiendo la fuente de alimentación. Dibuje las formas de onda obtenidas en cada caso.

Si una de las ondas resulta similar a la de la figura 6.9, realice los procedimientos 6 a 8 de este experimento antes de efectuar el resto de las capturas. En caso contrario, apague y encienda la fuente de alimentación hasta tener la forma de onda deseada.





- 12) Explique por qué en cada caso la corriente de arranque tiene diferente forma y amplitud.
El cambio en la forma de onda es debido a que la corriente de arranque en un transformador depende del ángulo de fase. El flujo residual de una energización previa determina la magnitud de la corriente de arranque en la próxima energización.
- 13) Considerando la forma de onda que resulte similar a la de la figura 6.9: si modificó las escalas horizontal y vertical del osciloscopio, anote los nuevos valores en la tabla 6.6. En caso contrario, omite este procedimiento.

Escala vertical (mV/div)	Escala horizontal (ms/div)
-----	-----

Tabla 6.6 Nuevas escalas del osciloscopio para el transformador.

- 14) Anote el valor de la corriente nominal del transformador, así como el valor de la relación de transformación del transformador de corriente (TC) en la tabla 6.7.
- 15) Realice las mediciones que pide la tabla 6.7 utilizando los datos que proporcione el osciloscopio en la forma de onda obtenida que resulte similar a la mostrada en la figura 6.9.

$I_{nominal}$ (A)	0.5
Relación de transformación	0.333V / 10A
$V_{pico-pico}$ (mV)	38.8
Amplitud (mV)	5
V_{max} (mV)	-----

Tabla 6.7 Valores medidos para el transformador monofásico.

- 16) Apague la fuente de alimentación.
- 17) Apague el osciloscopio.



U.N.A.M.	Ingeniería Eléctrica Electrónica
F.E.S. Aragón	
Laboratorio de Sistemas de Distribución	

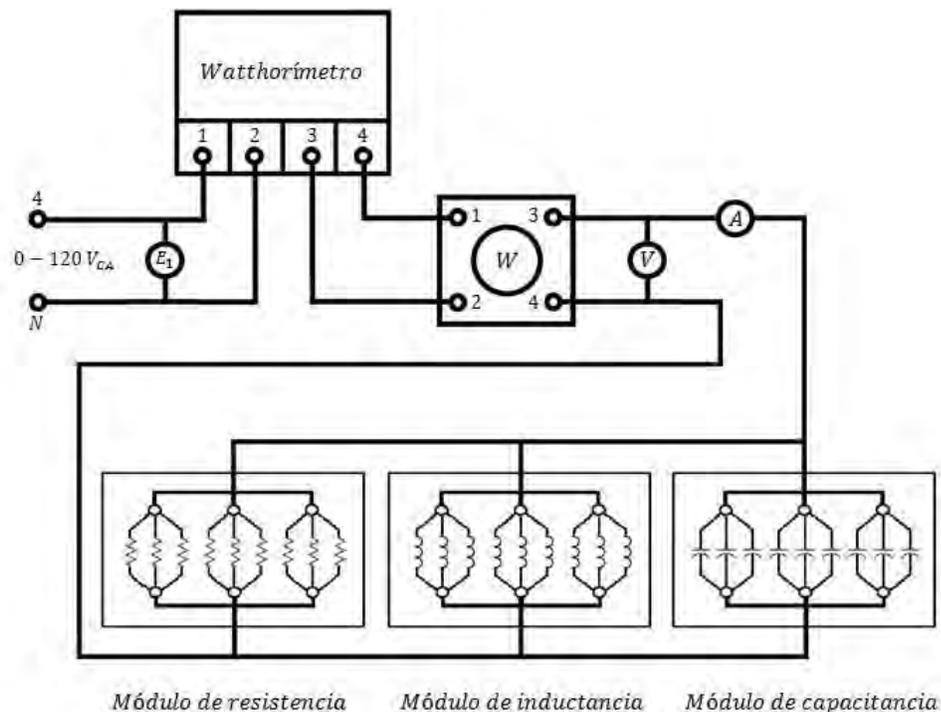
PRÁCTICA 7

MEDICIÓN Y FACTURACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

¡ATENCIÓN! En esta práctica se manejan altos voltajes, no hacer ninguna conexión cuando la fuente este energizada y siempre des energice la fuente después de cada medición.

EXPERIMENTO 1 – Consumo de energía eléctrica con carga RLC.

- 1) Conecte el siguiente circuito.





- a. Conecte la fuente de alimentación trifásica variable a las terminales de entrada del wathorímetro monofásico (terminales 4 y N de la fuente a las terminales 1 y 2 del wathorímetro, respectivamente).
 - b. Conecte un voltímetro en paralelo a las terminales 4 y N de la fuente, a fin de monitorear el voltaje de alimentación (terminal 4 de la fuente a la salida de 250 V del voltímetro y terminal N de la fuente a la terminal \pm del voltímetro).
 - c. Conecte las terminales 3 y 4 del wathorímetro a las terminales 2 y 1 del wattmetro monofásico, respectivamente.
 - d. Conecte un voltímetro en paralelo a las terminales 3 y 4 del wattmetro monofásico (terminal 3 del wattmetro a la salida de 250 V del voltímetro y terminal 4 del wattmetro a la terminal \pm del voltímetro).
 - e. Conecte todas las terminales del módulo de resistencia en estrella, exactamente como se muestra en el circuito. Haga lo mismo con los módulos de inductancia y capacitancia.
 - f. Conecte los tres módulos (resistencia, inductancia y capacitancia) en estrella, a fin de proporcionar una carga RLC al sistema. Observe el circuito.
 - g. Conecte la terminal 3 del wattmetro monofásico en serie con un amperímetro y con la conexión en estrella del lado superior de la carga (terminal 3 del wattmetro a \pm del amperímetro, la salida de 2.5 A del amperímetro a la conexión en estrella).
 - h. Conecte la terminal 4 del wattmetro monofásico a la conexión en estrella del lado inferior de las cargas.
- 2) Encienda la fuente de alimentación y aumente gradualmente el voltaje hasta $120 V_{CA}$, según lo indica el voltímetro E_1 .
- 3) ¿En qué sentido gira el dial del wathorímetro?
El dial del wathorímetro gira hacia la derecha.
- 4) Posteriormente.
- a. Ajustando los interruptores correspondientes, proporcione una carga RLC de 171Ω .
Para conseguir 171Ω de carga RLC debe cerrar un interruptor de 1200Ω , 600Ω y 300Ω de cada una de las cargas.
 - b. Mida el voltaje, la corriente y la potencia del circuito. Anote sus resultados en la tabla 7.1.
- 5) A continuación.
- a. Ajustando los interruptores correspondientes, proporcione una carga RLC de 85Ω .
Para conseguir 85Ω de carga RLC debe cerrar otro interruptor de 1200Ω , 600Ω y 300Ω de cada una de las cargas, sin modificar los interruptores cerrados en el procedimiento 4) a.
 - b. Mida el voltaje, la corriente y la potencia del circuito. Anote sus resultados en la tabla 7.1.



- 6) En seguida.
- Ajustando los interruptores correspondientes, proporcione una carga RLC de 57Ω . *Para conseguir 57Ω de carga RLC debe cerrar otro interruptor de 1200Ω , 600Ω y 300Ω de cada una de las cargas, sin modificar los interruptores cerrados en los procedimientos 4) a y 5) a.*
 - Mida el voltaje, la corriente y la potencia del circuito. Anote sus resultados en la tabla 7.1.

Carga	Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
171Ω	120	0.7	70
85Ω	120	1.6	162
57Ω	120	2.4	245

Tabla 7.1 Valores medidos para carga RLC.

- Reduzca el voltaje a cero y apague la fuente de alimentación.
- Con los datos proporcionados por el wattmetro en cada una de cargas, calcule el consumo de energía por 30 minutos de operación del circuito, según la tarifa residencial actual por kWh investigada en el cuestionario previo.

Tarifa residencial	
Cargo por energía (\$/kWh)	
Rango	Costo
1-50	2.307
51-100	2.782
Adicional	3.066

El resultado se obtendría al dividir el valor total de los kWh consumidos, según los rangos establecidos por la CFE, y multiplicarlos tanto por el tiempo de operación como por la tarifa de los kWh de cada grupo; posteriormente, se sumarían los resultados individuales del costo de cada rango. Sin embargo, como el circuito en cuestión tiene un bajo consumo de energía, no es necesario dividir la potencia en rangos y el costo de consumo se calcula de forma simple; este procedimiento se mostrará detalladamente en el primer caso.



Para 171 Ω :

Potencia (W)	Horas (h)	Tarifa (\$/kWh)	Costo (\$)
70	0.5	2.307	\$ 0.0807

La tarifa residencial de la CFE establece tres tipos de rango, según el consumo de kilowatts por cada hora que se demanda potencia del suministro de energía eléctrica.

Como se puede observar en las lecturas tomadas en la tabla 7.1, en la carga de 171 Ω se obtuvo una potencia de 70 W; no es necesario dividir este valor en rangos y el cálculo del costo se realiza al multiplicar la potencia por el tiempo de operación del circuito y por la tarifa del rango de 1-50kWh establecida por la CFE:

Matemáticamente:

$$(70 \cancel{W})(0.5 \cancel{h}) \left(\frac{\$2.307}{\cancel{kWh}} \right) = \frac{(70)(0.5)(\$2.307)}{1000} = \$0.0807$$

Nota: Considerar las unidades del cálculo es primordial para obtener el costo de operación.

Para 85 Ω :

Potencia (W)	Horas (h)	Tarifa (\$/kWh)	Costo por rango (\$)
162	0.5	2.307	\$ 0.1869

Para 57 Ω :

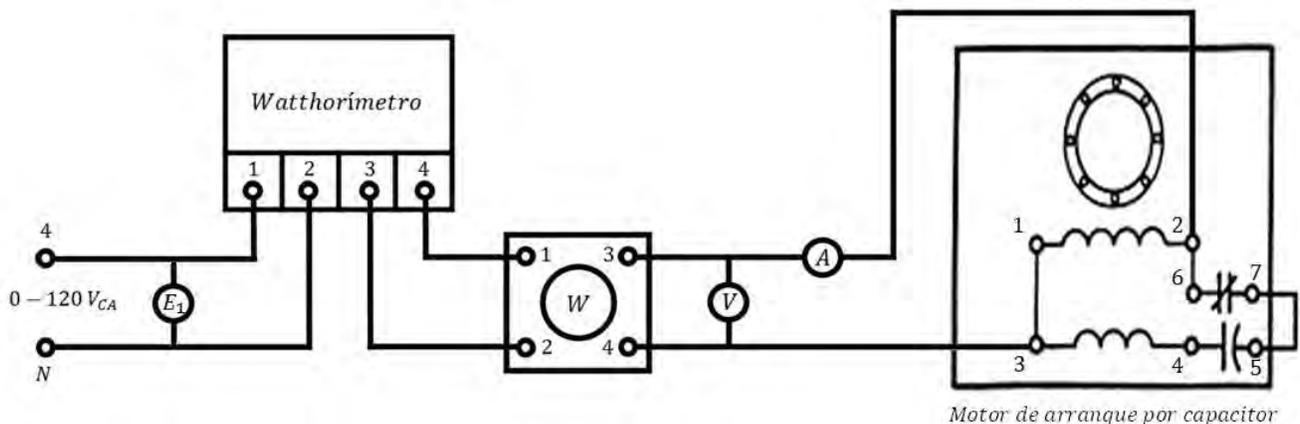
Potencia (W)	Horas (h)	Tarifa (\$/kWh)	Costo por rango (\$)
245	0.5	2.307	\$ 0.2826

9) Posteriormente.

- Invierta las terminales 1 y 4 del wathorímetro.
- Encienda la fuente de alimentación y aumente gradualmente el voltaje hasta $120 V_{CA}$, según lo indica el voltímetro E_1 .
- ¿Por qué cambia el sentido de giro del dial?
Porque cambió el sentido de la corriente de alimentación del circuito interno del wathorímetro.
- Reduzca el voltaje a cero y desconecte la fuente de alimentación.

EXPERIMENTO 2 – Consumo de energía eléctrica con carga de motor de inducción.

1) Conecte el siguiente circuito.



- Conecte la fuente de alimentación trifásica variable a las terminales de entrada del wathorímetro monofásico (terminales 4 y N de la fuente a las terminales 1 y 2 del wathorímetro, respectivamente).
- Conecte un voltímetro en paralelo a las terminales 4 y N de la fuente, a fin de monitorear el voltaje de alimentación (terminal 4 de la fuente a la salida de 120 V del voltímetro y terminal N de la fuente a la terminal \pm del voltímetro).
- Conecte las terminales 3 y 4 del wathorímetro a las terminales 2 y 1 del wattmetro monofásico, respectivamente.
- Conecte un voltímetro en paralelo a las terminales 3 y 4 del wattmetro monofásico (terminal 3 del wattmetro a la salida de 120 V del voltímetro y terminal 4 del wattmetro a la terminal \pm del voltímetro).
- Conecte el devanado principal del motor de arranque por capacitor en serie con el interruptor, el capacitor y el devanado auxiliar del motor (terminal 2 a 6, 7 a 5 y 3 a 1 del motor), tal como se muestra en el circuito.



- f. Conecte la terminal 3 del wattmetro monofásico en serie con un amperímetro y con el devanado principal del motor de arranque por capacitor (terminal 3 del wattmetro a \pm del amperímetro, la salida de 8 A del amperímetro a la terminal 2 del motor).
 - g. Conecte la terminal 4 del wattmetro monofásico a la terminal 3 del motor.
- 2) Encienda la fuente de alimentación y aumente gradualmente el voltaje hasta $120 V_{CA}$, según lo indica el voltímetro E_1 . El motor debe comenzar a funcionar.
 - 3) ¿En qué sentido gira el dial del wathhorímetro?
El dial del wathhorímetro gira hacia la derecha.
 - 4) Posteriormente.
 - a. Mida el voltaje, la corriente y la potencia del circuito. Anote sus resultados en la tabla 7.2.
 - b. Reduzca el voltaje a cero y apague la fuente de alimentación.
 - c. Con la siguiente fórmula y utilizando los datos de voltaje, corriente y potencia del inciso a., calcule el factor de potencia del motor. Anote su resultado en la tabla 7.2.

$$P = VI \cos \theta$$

$$\cos \theta = \frac{P}{VI} = \frac{70 W}{(120 V)(1.2 A)} \Rightarrow f.p. = 0.4861$$

Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia (W)	Factor de potencia
120	1.2	70	0.4861

Tabla 7.2 Valores medidos para carga de motor de inducción.

- 5) Con los datos proporcionados por el wattmetro, calcule el consumo de energía por 2 horas de operación del circuito, según la tarifa industrial actual por kWh investigada en el cuestionario previo.

Tarifa industrial	
Cargos	
Demanda (\$/kW)	191.24
Energía (\$/kWh)	1.258



A diferencia de la tarifa doméstica, la tarifa industrial tiene un costo fijo por consumo de energía; por lo tanto, no es necesario distribuir los watts; el costo total del consumo de energía se obtiene al multiplicar los watts consumidos por el tiempo de operación del circuito y por la tarifa \$/kWh establecida por la CFE:

Potencia (w)	Horas (h)	Tarifa (\$/kWh)	Costo total del consumo de energía (\$)
70	2	1.258	\$ 0.1761

$$(70 \cancel{W})(2 \cancel{h}) \left(\frac{\$1.258}{\cancel{kWh}} \right) = \frac{(70)(2)(\$1.258)}{1000} = \$0.1761$$

REFERENCIAS



- [1] Jauch, E. Tom. *Advanced Transformer Paralleling*. Beckwith Electric Co., Inc. <<https://beckwithelectric.com/docs/tech-papers/advxpara.pdf>>
- [2] Shrabani, Pal., Sudipta, Nath. *An Intelligent on Line Voltage Regulation in Power Distribution System*. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., (2010).
- [3] Coto Aladro, José. *Análisis de sistemas de energía eléctrica*. España, Universidad de Oviedo, 2002, pp. 95.
- [4] Stevenson, Wiliam. *Análisis de sistemas eléctricos de potencia*. 2ª ed., México, Mc Graw – Hill, 1985, pp. 84 -87.
- [5] Barragán Tolentino, Alejandro. *Análisis de una torre de transmisión eléctrica ante efectos de viento atmosférico y de tromba: relación del costo de la torre en función de la velocidad del viento*. Tesis (Ingeniero Civil), México, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, 2013, pp.73.
- [6] Mendoza Tavera, Martín Alfonso., Orozco Valdez, Dazaet. *Aplicación de medidores inteligentes. Proyecto WalMart México (Operadora Vips S. de R.L de C.V.)*. Tesis (Ingeniero Mecánico Electricista), México, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Aragón, 2015, pp.107.
- [7] Gómez López, José M., Castán Luna, Roberto., Montero Cervantes, Julio C., Meneses Ruiz, Javier., García Hernández, Joaquín. *Aplicación de tecnologías de medición avanzada (AMI) como instrumento para reducción de pérdidas*. México, Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias, Boletín octubre – diciembre, 2015.
- [8] *Apuntes de la asignatura de Protección de sistemas eléctricos*. México, Facultad de Estudios Superiores Aragón, Universidad Nacional Autónoma de México, Ingeniería Eléctrica Electrónica, 2016.
- [9] *Apuntes de la asignatura de Sistemas de distribución*. México, Facultad de Estudios Superiores Aragón, Universidad Nacional Autónoma de México, Ingeniería Eléctrica Electrónica, 2016.
- [10] Comisión Federal de Electricidad. *Bases de diseño para redes de distribución aéreas urbanas*.
- [11] National Instruments (octubre 2012). *Cómo medir corriente y hacer mediciones de potencia [en línea]*. <<http://www.ni.com/white-paper/8198/es/>>



- [12] Schneider Electric. *Compensación de energía reactiva*. [en línea].< http://www.schneider-electric.com.pe/documents/local/catalogo-de09/cap._5_compensacion_de_energia_reactiva.pdf>
- [13] Legrand Service. *Compensación de energía reactiva y monitoreo de la calidad de la potencia*. Catálogo [en línea]. Santiago, Chile.
< http://www.legrand.cl/archivos/guia_catalogo_tecnico.pdf>
- [14] Yebra Morón, Juan Antonio. *Compensación de potencia reactiva en sistemas eléctricos*. México, Mc Graw Hill, 1987, pp. 252.
- [15] Rivero de la Torre, Ramón. *Conexión de transformadores trifásicos en paralelo*. Instituto Tecnológico de Ciudad Madero, Tamaulipas. México.
- [16] (noviembre 2013). *Corriente de arranque en Motores Eléctricos* [en línea]. Costa Rica.
<<http://www.motortico.com/biblioteca/MotorTico/2013%20NOV%20-%20Corriente%20de%20Arranque%20en%20Motores%20Electricos.pdf>>
- [17] Villanueva Ortega, Juan Antonio. *Cuaderno de evidencias de Sistemas eléctricos de potencia I*. México, Ingeniería Eléctrica Electrónica, Facultad de Estudios Superiores Aragón, Universidad Nacional Autónoma de México, 2016, pp. 58 - 61.
- [18] Enríquez Harper, Gilberto. *Curso de transformadores y motores de inducción*. 4ª ed. México, Limusa, 2005, pp. 259 -301.
- [19] Mott, Robert L. *Diseño de elementos de máquinas*. 4ª ed., México, Pearson Educación, 2006, pp.807 – 808.
- [20] Comisión Federal de Electricidad. *Disposiciones complementarias: Factor de Potencia* [en línea].<http://www.cfe.gob.mx/negocio/2_Conocetutarifa/_layouts/mobile/dispform.aspx?List=c291cd00-2cc4-4c49-adf8-60f8e25d6695&View=ab9370d5-cad9-44ad-a203-b428b0f01bb7&ID=3> 2012.
- [21] (March 1993) *Distribution Transformers*. Cooper Power Systems, Inc., U.S.A., Reference Data R201-90-2.
- [22] Enríquez Harper, Gilberto. *El ABC de la calidad de la energía eléctrica*. México, Limusa, 2012, pp. 93.
- [23] Piedras Delgado, Gabriel. *El modelo de información común para un sistema de distribución inteligente*. Tesis (Ingeniero Eléctrico Electrónico), México, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, 2015, pp. 28.



- [24] Harlow, James H. *Electric Power Transformer Engineering*. U.S.A., The Electric Power Engineering Series, 2004, pp. 56-57, 303-310, 312, 348 – 353.
- [25] *Electrical transmission and distribution reference book*. 4ª ed., U.S.A., Central Station Engineers of the Westinghouse Electric Corporation, pp. 832.
- [26] Gonzáles Longatt, Francisco M. *Elementos de líneas de transmisión aéreas*, 2007, pp. 53
- [27] Viakon. *Equipo eléctrico y su aplicación*. Manual Eléctrico, pp. 185 – 196.
- [28] McGranaghan, Mark. *Evaluating Motor and Transformer Inrush Currents*. Electrical Construction and Maintenance [en línea]. United States (December 1, 2006). <<http://ecmweb.com/content/evaluating-motor-and-transformer-inrush-currents>>
- [29] Wildi, Theodore., De Vito, Michael J. *Experimentos con equipo eléctrico*. México, Limusa, 1991, pp. 43-1 – 43-4, 44-1 – 44-4, 60-1 – 60-4.
- [30] Enríquez Harper, Gilberto. *Fundamentos de instalaciones eléctricas de mediana y alta tensión*. 2ª ed., México, Limusa, 2005, pp. 113- 114.
- [31] Transformers Committee of the IEEE Power Engineering Society (March 2001). *IEEE Standard Terminal Markings and Connections for Distribution and Power Transformers*. U.S.A., The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.
- [32] *Informe anual 2015*. México, Comisión Federal de Electricidad.
- [33] Industrias IEM, S.A. de C.V. *Instrucciones para transformadores de distribución sumergidos en aceite de 5 a 500 kVA, 34,500 Volts y menores, monofásicos y trifásicos*. Libro de instrucción, México, 2008.
- [34] Wildi, Theodore., De Vito, Michael J. *Investigations in electric power technology. Instructor's edition*. U.S.A., Limusa, 1991, pp. 237 - 244.
- [35] *Las pérdidas de energía y su impacto en el déficit eléctrico*. República Dominicana. EGE Haina. [en línea]. <<http://egehaina.com/las-perdidas-de-energia-y-su-impacto-en-el-deficit-electrico-2/>>
- [36] Enríquez Harper, Gilberto. *Líneas de transmisión y redes de distribución de potencia eléctrica. Volumen II*. México, Limusa, 1983. pp. 827.



- [37] Zientek, Ed. *Loading considerations when paralleling transformers*. Schneider Electric USA, Inc., Document Number AT322, U.S.A., 2011.
- [38] *Manual de prácticas de laboratorio de Sistemas eléctricos de potencia II*. México, Facultad de Estudios Superiores Aragón, Universidad Nacional Autónoma de México, pp. 38 – 49.
- [39] Wildi, Theodore. *Manual para la instalación de cables de energía de media tensión*. México, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, pp. 60 - 63.
- [40] Wildi, Theodore. *Máquinas eléctricas y sistemas de potencia*. 6ª ed., México, Pearson Educación, 2007, pp. 406 – 408, 722, 740 – 749, 936.
- [41] Kosow, Irving L. *Máquinas Eléctricas y Transformadores*. 2ª ed., México, Prentice - Hall, 1993, pp. 355 - 356.
- [42] Chapman, Stephen J. *Máquinas eléctricas*. 5ª ed., México, Mc Graw - Hill, 2012, pp. 40, 50 - 51, 101-103, 110, 218, 268 – 269, 425 – 426.
- [43] *Medidores multifunción para sistemas eléctricos*. México, Comisión Federal de Electricidad, Especificación G0000-48, 2010. [en línea].
<http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4957978&fecha=08/12/1999>
- [44] *Memoria de cálculo usada para determinar la tarifa que aplicará la Comisión Federal de Electricidad por el servicio público de Distribución de energía eléctrica durante el periodo tarifario inicial que comprende del 1 de Enero de 2016 y hasta el 31 de diciembre de 2018*. México, Comisión Reguladora de Energía, Unidad de análisis económico, 2016. [en línea].
<<http://www.cre.gob.mx/documento/5846.pdf>>
- [45] *Métodos de verificación del equipo de medición en laboratorio*. México, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, Repositorio digital. [en línea].
<<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/856/A7.pdf?sequence=7>>
- [46] Hernández Pérez, María Y., Arroyo Figueroa, Gustavo., Santos Domínguez, Martín., Rodríguez Ortiz, Guillermo., Escobedo Hernández, Hilda. *Modelo para detectar y prevenir pérdidas no técnicas en sistemas de distribución eléctrica con base en técnicas de minería de datos y redes bayesianas*. México, Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias, Boletín octubre – diciembre, 2015.
- [47] Norma Mexicana *NMX-J-169-ANCE-2004*, Transformadores y autotransformadores de distribución y potencia – Métodos de prueba, pp 8-11.



- [48] Norma Mexicana *NMX-J-285-ANCE-2013*, Transformadores tipo pedestal monofásicos y trifásicos para distribución subterránea – Especificaciones, pp 12-13.
- [49] *Normas y especificaciones para estudios, proyectos, construcción e instalaciones*. Instituto Nacional de la Infraestructura Física Educativa, México, 2011.
- [50] *Pérdidas eléctricas*. República del Ecuador, ELEPCO S.A., [en línea]. <<http://repositorio.utc.edu.ec/bitstream/27000/1031/1/T-UTC-1264.pdf>>
- [51] Edutelsa, tecnología para la educación. *Power factor compensation with induction motors Part 1 & Part 2*. Festo Didactic – LabVolt Series. <<http://edutelsa.com/videos/>>
- [52] Festo Didactic (2014). Electricity and New Energy. *Power Factor Correction*. Courseware Sample 20116-F0, Quebec, Canada. <www.festo-didactic.com>
- [53] Winders, John J. *Power Transformers: Principles and Applications*. U.S.A., Marcel Dekker, Inc., 2002, pp. 36 - 40.
- [54] M. O. Oliveira., A. S. Bretas., O. E. Perrone., J. H. Reversat., H. E. Muñoz., R. S. Orellana Paucar. *Principales Características de la Corriente Inrush en Transformadores*. Argentina, Centro de Estudios de Energía para el Desarrollo (CEED) de la Facultad de Ingeniería de Oberá, Universidad Nacional de Misiones (2012). <http://www.ceed.org.ar/wp-content/uploads/2012/12/Oliveira_et_al_Paper_1.pdf>
- [55] *Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2016 – 2030*. México, Secretaría de Energía.
- [56] *Prospectiva del Sector Eléctrico 2016 – 2030*. México, Secretaría de Energía.
- [57] Zhangang, Yang., Hongbing, Li., Huaxing, Yu., Liang, Yu., Jixiang, Wu., Jiamin, Wu., Xianjun, Cui., Bin, Wu., Jing, Zhang. *Simulation of Electric Field Around Insulators in High Voltage Line*. At International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (5th, November 2015, Changsha China). Changsha China, Chongqing University & State Grid Chongqing Electric Power Company, 2016, p. 5.
- [58] *Sistema eléctrico de potencia*. Repositorio digital de la Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, pp.18.
- [59] Juárez Cervantes, José Dolores. *Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica.*, México, Universidad Autónoma Metropolitana (UAM), 1995, pp. 95 - 108.



- [60] Wildi, Theodore. *Sistemas de transmisión de potencia eléctrica*. México, Limusa, 1991, pp. 2-1 – 2-3.
- [61] Yebra Morón, Juan Antonio. *Sistemas eléctricos de distribución*. España, Reverté, 2009, pp. 323.
- [62] Viakon. *Sistemas y redes de distribución*. Manual Eléctrico, pp. 365 – 367.
- [63] Quevedo, Josemar O., Giacomini, Julian C., Beltrame, Rafael C., Cazakevicius, Fabricio E., Rech, Cassiano., Schuch, Luciano., Marchesan Tiago B., De Campos, Mauricio., Sausen Paulo S., Kinas, Jonatas R. *Smart Distribution Transformer Applied To Smart Grids*. Brazil, Federal University Of Santa Maria. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., (2013).
- [64] *Tarifas para el suministro y venta de energía eléctrica (2015 - 2016)*. México, Comisión Federal de Electricidad, 2016. [en línea].
<http://app.cfe.gob.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/Tarifas/tarifas_negocio.asp>
- [65] Tektronix. *TBS1000B and TBS1000B-EDU Series Digital Storage Oscilloscopes*. User Manual.
- [66] Hollister, V.L., *The Induction Watt-Hour Meter*. U.S.A., The American Institute of Electrical Engineers.
- [67] *Wattorímetros monofásicos y polifásicos electrónicos, clase de exactitud 0,5*. México, Comisión Federal de Electricidad, Especificación GWH00-78, 2006. [en línea].
<<http://lapem.cfe.gob.mx/normas/pdfs/o/GWH00-78.pdf>>
- [68] American Electric Power (June 20, 2012). *What's on a Power Pole?* [en línea].
<<http://3blmedia.com/News/Whats-Power-Pole>>