

MINISTERIO DE EDUCACION SUPERIOR



UNIVERSIDAD DE GRANMA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS BÁSICAS



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

Unidad Académica de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas
Sede Latacunga

TRABAJO DE DIPLOMA

EN OPCION AL TÍTULO DE INGENIERO ELÉCTRICO

**TÍTULO: ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA CORRIENTE
ALTERNA Y LAS OSCILACIONES ELECTROMAGNÉTICAS
EN CIRCUITOS EXPERIMENTALES.**

AUTOR: WILSON MORENO AREQUIPA

TUTOR: Lic. Angel De Souza Torres.

BAYAMO, M. N.

2010-2011

“Año 53 de la Revolución”

Latacunga – Ecuador

2010-2011

“Por la Vinculación de la Universidad con el Pueblo”

AUTORIA

Yo, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido presentado previamente para ningún grado o calificación personal; y que se a consultado en dichas bibliografías que se incluye en este documento.

A través de la presente concedo los derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Universidad Técnica de Cotopaxi, según establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la Normativa Institucional Vigente.

Moreno Arequipa Wilson Marcelo



Universidad de Granma
Facultad de Ingeniería

Informe de opinión del tutor sobre trabajo de diploma

Título: ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA CORRIENTE ALTERNA Y LAS OSCILACIONES ELECTROMAGNÉTICAS EN LOS CIRCUITOS EXPERIMENTALES” presentado en opción al título de Ingeniero Eléctrico.

Diplomante: Wilson Marcelo Moreno Arequipa
Centro: Universidad Técnica de Cotopaxi, Latacunga, Ecuador.

El trabajo de diploma presentado por Wilson Marcelo Moreno Arequipa muestra un estudio teórico y experimental sobre el comportamiento de la corriente alterna en circuitos RC con rectificadores de media onda y onda completa, filtros de condensadores y circuitos de cambio de fase y sobre las oscilaciones electromagnéticas en circuitos LC en serie y paralelo.

El estudio del comportamiento de la corriente eléctrica en circuitos es importante para determinar la cantidad de energía que se utiliza, permite determinar las dimensiones de los conductores en redes de distribución y las pérdidas que existen en circuitos eléctricos, así como localizar las causas del mal funcionamiento de equipos eléctricos, que no es posible apreciar de forma visual, reduciendo los costos asociados con el consumo de energía eléctrica. Por otro lado, los circuitos eléctricos oscilantes (LC) tienen gran importancia en la Ingeniería Eléctrica y Electrónica debido a que muchos problemas en esta rama, se solucionan con este tipo de circuitos, acoplándoles una fuente de alimentación externa, que se emplean en la industria y la tecnología moderna. Los resultados de este trabajo le han permitido al diplomante alcanzar habilidades experimentales para solucionar problemas prácticos del funcionamiento de una red de distribución de corriente.

En el trabajo existe plena correspondencia entre los objetivos propuestos y los resultados alcanzados en el trabajo. Los materiales y métodos están elaborados de forma correcta acorde a lo establecido para este tipo de estudio. Los resultados se describen de forma clara y precisa, apoyados por gráficos y fotos. Las conclusiones y recomendaciones guardan estrecha correspondencia con los objetivos del trabajo. Además, el diplomante hizo un amplio y adecuado uso de la bibliografía actualizada debido a que el 70% de las referencias bibliográficas son de los últimos 10 años. Se recomienda la extensión de este trabajo en líneas de conducción de corriente a nivel local.

Durante los 5 meses de trabajo, el diplomante demostró independencia en el desarrollo de los tópicos de este estudio, así como en el cumplimiento de las tareas experimentales planteadas y el trabajo se realizó con un rigor científico adecuado.

CONCLUSIONES

Por el acto de defensa realizado y la tesis presentada, considero que el diplomante Wilson Marcelo Moreno Arequipa cumple los requisitos establecidos, por lo tanto propongo al tribunal que se le otorgue el título de Ingeniero eléctrico y la máxima calificación.

Dado en la Ciudad de Bayamo, a los 6 días del mes de julio de 2011.



Lic. Angel Rafael De Souza Torres,
Tutor





Universidad de Granma
Facultad de Ingeniería

Informe de la oponencia al trabajo de diploma **“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA CORRIENTE ALTERNA Y LAS OSCILACIONES ELECTROMAGNÉTICAS EN CIRCUITOS EXPERIMENTALES”** presentado en opción al título de Ingeniero Eléctrico.

Diplomante: Wilson Moreno Arequipa

Centro: Universidad Técnica de Cotopaxi, Ecuador

1. Sobre la estructura del documento

El documento presentado consta de 3 capítulos con 58 páginas más 2 páginas que incluyen 31 referencias bibliográficas más 4 páginas de anexos. En particular, la literatura consultada está concentrada en textos de Física General, Electrónica y Análisis Matemático que se utiliza tanto en el pregrado como en el postgrado, lo cual le da un componente teórico importante al documento. Como señalamientos fundamentales se destacan:

a) no se da la referencia al manual de usuario de la interfase **HPCI-1** que fue el equipamiento fundamental utilizado y **b)** consideramos que un anexo mostrando un glosario de los símbolos utilizados y su significado sería de mucha ayuda a las personas que consulten el trabajo.

2. Sobre la redacción del documento

El documento está bien escrito con un uso correcto de la gramática del idioma español.

3. Sobre el contenido del documento

El problema planteado por el diplomante refleja las condiciones actuales con la enseñanza de las ciencias básicas en las Universidades orientadas hacia las Ingenierías en una gran parte de los países Latinoamericanos. Es decir, el trabajo en el campo experimental es muy débil. En este punto, el oponente solicita lo siguiente al diplomante:

- Haga una valoración objetiva de las habilidades experimentales que obtuvo en su trabajo sobre circuitos oscilantes y cómo esas habilidades pudieran ser transferidas a su vida profesional.

Página 10. Desde nuestro punto de vista personal, se pudo agregar explícitamente un acápite sobre la generación, distribución y uso de la energía eléctrica en el Ecuador.

Página 15 (ecuación 1). La simbología de la frecuencia y el tiempo no coinciden, la ecuación tiene letras griegas minúsculas y en el significado se dan con mayúsculas.

Página 17. Se dice velocidad angular cuando debe ser **frecuencia angular**.

Página 50, epígrafe 2.6. Debe decir Análisis de datos e información gráfica **-En regiones como Europa y África la generación eléctrica se hace a 50 Hz, la justificación técnica es que se reducen las pérdidas debido a las reactancias de los componentes inductivos y capacitivos. Desde el punto de vista del estudio experimental realizado, ¿existe alguna justificación física?. Base su respuesta en un análisis de la impedancia de un circuito RLC serie.**

En la última conclusión debe decir se amortiguan.

Consideraciones finales

A pesar de algunos señalamientos, los cuales consideramos lógicos, el trabajo reúne la calidad suficiente para que a su autor, Wilson Moreno Arequipa, se le otorgue el título de Ingeniero Eléctrico



Dr. C. Humberto Enrique Millán Vega

Oponente



Análisis del comportamiento de la corriente alterna y las oscilaciones electromagnéticas en circuitos experimentales

Respuesta:

El trabajo de tesis consistió en un estudio tanto matemático como práctico de los fenómenos electromagnéticos producidos por el flujo de la corriente eléctrica en redes eléctricas como en circuitos electrónicos que mediante la medición en un programa computarizado se a llegado a determinar dichos fenómenos y entender mejor la importancia de medir la corriente eléctrica

El trabajo con circuitos oscilantes me ha permitido adquirir las habilidades experimentales para conocer y determinar las características básicas y el funcionamiento de dicho circuito para varios valores de L y C, que involucra un intercambio de energía entre el capacitor en forma de un campo eléctrico y el inductor en forma de un campo magnético, así como las causas que provocan las oscilaciones amortiguadas y los factores que afectan la estabilidad de frecuencias de este circuito.

La solución analítica de este proyecto también se determinó que el hecho de que en regiones como Europa y África la generación eléctrica se hace a 50 Hz se debe a que disminuye la impedancia de los circuitos y los efectos de las variaciones de la corriente alterna producidos por la reactancia inductiva como resultado del incremento de la reactancia capacitiva.

DEDICATORIA

Este trabajo lo dedico a Dios por darme la salud y encaminarme por el camino de la superación, luego a toda mi familia en especial a mis padres ya que con sus consejos, esfuerzos y sacrificios me dieron siempre el apoyo incondicional, que todo hijo quisiera tener para ser alguien en la vida.

Luego a mis tíos, que me han sabido comprender y emprenderme para alcanzar mis metas ya que con su apoyo moral me ayudaron a ser un hombre de bien y útil para la sociedad.

A ellos dedico este trabajo que es fruto mi sacrificio y esfuerzo

Wilson.

AGRADECIMIENTO

En primer lugar un sincero agradecimiento a nuestro Dios por cuidar a nuestras familias y a todos quienes de una u otra manera contribuyeron en la elaboración del presente proyecto.

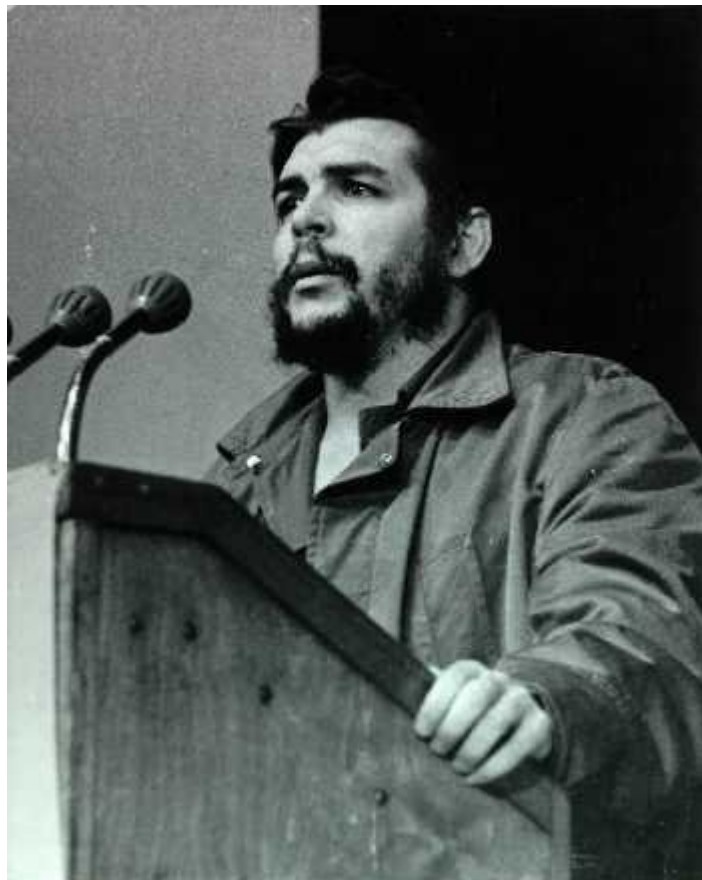
Gracias a mi tutor de tesis el Lic. en Física Angel De Souza Torres por su apoyo incondicional, colaborando en todo momento con su orientación, confianza, calidad como docente y su aporte realizado a este proyecto.

Finalmente, un agradecimiento especial a la Universidad de Granma de la República de Cuba juntamente con nuestra Alma Mater la Universidad Técnica de Cotopaxi por su afán en acogernos y construir profesionales competitivos.

Wilson...

PENSAMIENTO

**“No solo por el deber, sí no por el
orgullo de poder hacerlo”**



RESUMEN

En este trabajo se estudiaron el comportamiento de la corriente eléctrica alterna en circuitos RC con rectificadores de media onda y onda completa, filtros de condensadores y circuitos de cambio de fase y las oscilaciones electromagnéticas en circuitos LC en serie y paralelo. Estos circuitos pueden describirse con una ecuación diferencial de segundo orden cuya solución general incluye varios modos de oscilación y las respuestas de estos circuitos varían según sus componentes L y C. Los resultados mostraron que la forma de onda de corriente alterna de 60 Hz en un circuito RC en serie y paralelo es senoidal, sin embargo, la parte negativa de la corriente se convierte en corriente directa al pasar por un circuito RC con rectificador de media onda, mientras que dicha parte de corriente se transforma en corriente continua pulsante en el mismo circuito, pero con un rectificador de onda completa. La forma de onda de la corriente alterna de 60 Hz al atravesar un circuito RC en serie conectados en cambio de fase produce un cambio de fase de 180° en la señal de salida con relación a la señal de entrada. Las oscilaciones electromagnéticas en los circuitos LC en serie y en paralelo se amortiguan y se desvanecen para un período de tiempo largo por la resistencia interna del circuito.

ABSTRACT

The alternating electric current had been studied in circuits RC with half-wave rectifier and full-wave rectifier, filters of condensers and shift –phase circuits and electromagnetic oscillations in circuits LC in series and parallel. These circuits can be described with a second order differential equation, whose general solution includes several oscillation ways and the responses of these circuits vary according to their component L and C. The results showed that the wave form of 60 Hz alternating current in series and parallel RC circuits is senoidal, however, the negative part of current becomes direct current when is going by a circuit RC with half-wave rectifier, while this current part becomes pulsating continuous current in the same circuit, but with a full-wave rectifier. The wave form of alternating current of 60 Hz in a series RC circuit connected in shift-phase produces a phase of 180 grades in the output signal with relationship to the entrance signal. The electromagnetic oscillations in series and parallel LC circuits are dampened and vanished for a long time period due to internal resistance of the circuit.

CERTIFICADO

Por el presente tengo a bien certificar, que la traducción del idioma ingles del resumen de tesis “ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA CORRIENTE ALTERNA Y LAS OSCILACIONES ELECTROMAGNÉTICAS EN CIRCUITOS EXPERIMENTALES”. Del señor egresado: Moreno Arequipa Wilson Marcelo, lo realizo bajo mi supervisión y se encuentra correctamente traducido de acuerdo a la estructura del idioma inglés.

Es todo cuanto puedo decir en honor a la verdad. El interesado pueden hacer uso de este certificado como mejor convenga a su interés.

Atentamente;

Mgs. Martha Cueva

C.C. 1705022448

DOCENTE DE INGLES DE LA UNIVERCIDAD TECNICA DE COTOPAXI

Latacunga, 30 de Diciembre del 2012

INDICE GENERAL

CONTENIDO	PAG
PORTADA	i
AUTORIA	ii
INFORME DEL TUTOR	iii
INFORME DE Oponencia	v
REPUESTA	vii
AGRADECIMIENTO	viii
DEDICATORIA	ix
PENSAMIENTO	x
RESUMEN	xi
ABSTRACT	xii
CERTIFICADO	xiii
ÍNDICE	xiv

ÍNDICE

CONTENIDO	PÁG.
I. INTRODUCCIÓN	1
II. DESARROLLO	6
CAPITULO I. Fundamentación actual del tema.	6
1.1 Panorama internacional del uso de la corriente eléctrica.	6
1.1.1 Panorama del empleo de la corriente eléctrica en Cuba.	12
1.2 Corriente eléctrica.	17
1.2.1 Corriente continua o constante.	18
1.2.2 Corriente eléctrica alterna.	18
1.2.3 Representación fasorial de la corriente alterna.	21
1.2.4 Métodos de medición de la corriente eléctrica.	22
	xiv

1.2.5 Circuitos de corriente alterna.	23
1.2.5.1 Circuito con resistencia.	23
1.2.5.2 Circuito con inductancia pura.	24
1.2.5.3 Circuito con condensador ideal.	25
1.2.5.4 Circuito R-C en serie.	26
1.2.5.5 Circuito R-C en paralelo.	28
1.2.5.6 Circuito L-C en paralelo (circuito oscilante).	29
1.3. Rectificación de la corriente eléctrica alterna.	30
1.3.1 Diodo.	31
1.3.2. Rectificación de media onda.	33
1.3.3 Rectificación de onda completa.	34
1.4 Filtración de la corriente alterna.	37
1.4.1 Tipos de filtros.	37
1.4.2 Rizado de la corriente alterna.	38
1.4.3 Filtro de condensador.	39
1.4.3.1 Filtro de condensador de media onda.	40
1.4.3.2 Filtro de condensador de onda completa.	43
1.5 Circuito de cambio de fase.	44
1.6 Oscilaciones electromagnéticas en un circuito LC.	46
1.6.1 Circuito L-C en serie.	47
1.6.1.1 Respuesta natural del circuito LC.	48
1.6.1.2 Respuesta forzada del circuito LC.	49
1.6.2 Circuito L-C en paralelo	51
1.6.2.1 Respuesta natural del circuito LC.	51
1.6.2.2 Respuesta Forzada del circuito LC.	52
CAPITULO II. MATERIALES Y METODOS	54
2.1 Componentes del sistema y parámetros Técnicos.	54
2.1.1 Interfase experimental.	55
2.2 Caracterización de la corriente eléctrica alterna de un circuito RC en serie, RC en paralelo con rectificador de media onda y onda completa.	56
2.3 Determinación del comportamiento de la corriente alterna filtrada con filtros de condensadores de media onda y onda completa.	57

2.4 Determinación de los cambios de fase en un circuito RC en serie.	57
2.5 Estudio de las oscilaciones electromagnéticas en un circuito LC.	58
2.6 Análisis de datos y información gráfica.	59
CAPITULO III. ANALISIS Y DISCUSION DE LOS RESULTADOS	60
3.1 Corriente eléctrica alterna de un circuito RC en serie.	60
3.2 Corriente eléctrica alterna de un circuito RC en paralelo con rectificador de media onda.	60
3.3 Corriente eléctrica alterna de un circuito RC en paralelo con rectificador de onda completa.	61
3.4 Corriente alterna filtrada con filtros de condensador de media onda.	62
3.5 Corriente alterna filtrada con filtros de condensador de onda completa.	63
3.6 Cambios de fase en un circuito RC en serie.	63
3.7 Oscilaciones electromagnéticas en un circuito LC en serie.	65
3.8 Oscilaciones electromagnéticas en un circuito LC en paralelo.	65
III. CONCLUSIONES	67
IV. RECOMENDACIONES	68
V. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	69
ANEXOS	

I. INTRODUCCIÓN

Corriente eléctrica es el flujo de electrones que atraviesa cualquier conductor eléctrico debido a la diferencia de potencial creada por un generador de corriente. Existen dos tipos de corriente eléctricas: continua o directa y alterna. La corriente continua o corriente directa (DC) es el flujo continuo de electrones a través de un conductor entre dos puntos de distinto potencial, donde las cargas eléctricas circulan siempre en la misma dirección, es decir, los terminales de mayor y de menor potencial son siempre los mismos. Aunque comúnmente se identifica la corriente continúa con la corriente constante debido a que se mantiene siempre la misma polaridad. Se denomina corriente alterna (CA) al flujo variable de electrones a través de un conductor entre dos puntos de distinto potencial, donde las cargas eléctricas circulan primero en una dirección y luego en sentido alternando la polaridad del voltaje del generador o de otra fuente (Sears et al., 2008).

La aplicación principal de la corriente eléctrica, ya sea CD o CA, es la transmisión de energía en forma flexible y conveniente de un lugar a otro. La popularidad de la corriente alterna proviene del hecho de que la energía eléctrica en forma de CA se puede transmitir a grandes distancias por medio de fáciles elevaciones de voltaje que reducen las pérdidas de calor en los cables. La corriente alterna se refiere a la forma en la cual la electricidad llega a nuestros hogares y a las empresas. Sin embargo, las señales de audio y de radio transmitidas por los cables eléctricos, son también ejemplos de corriente alterna. En estos usos, el fin más importante suele ser la transmisión y recuperación de la información codificada (o modulada) sobre la señal de la CA (Rodríguez Arias y Ruiz Hernández, 2006).

El consumo de electricidad y la vida moderna son prácticamente sinónimos en el mundo industrializado. Nuestras comunicaciones, el transporte, el abastecimiento de alimentos, y la mayor parte de los agrados y servicios de los hogares, oficinas y fábricas de nuestros días dependen de un suministro fiable de energía eléctrica. A medida que más países se industrializan se consumen cantidades de energía cada

vez mayores. El consumo mundial de energía se ha multiplicado por 25 desde el siglo pasado. El promedio del consumo de electricidad per cápita es alrededor de diez veces mayor en los países industrializados que en el mundo en desarrollo. Pero como en la actualidad las economías de muchas naciones en desarrollo se expanden rápidamente, para los próximos 15 años se prevé un crecimiento de más del 5% anual de la demanda de electricidad en el Sur. Para satisfacer esta demanda se necesitará un aumento espectacular de la producción de electricidad.

El uso de la corriente eléctrica en la vida moderna es imprescindible debido a que es difícil el desarrollo de la sociedad sin el uso de la electricidad. La industria eléctrica, a través de la tecnología, ha puesto a la disposición de la sociedad el uso de artefactos eléctricos que facilitan las labores del hogar, haciendo la vida más placentera. Las máquinas o artefactos eléctricos denominados electrodomésticos nos proporcionan comodidad en el hogar, ahorro de tiempo y disminución en la cantidad de quehaceres. Entre los electrodomésticos más utilizados en el hogar citaremos: cocina eléctrica, refrigerador, tostadora, microonda, licuadora, lavaplatos, secador de pelo, etc.

Existe también otro tipo de artefactos que nos proporcionan entretenimiento, diversión, y que son también herramientas de trabajo y fuentes de información como: el televisor, el equipo de sonido, el video juegos, las computadoras, etc.

La electricidad en la comunidad se manifiesta mediante el alumbrado público en plazas, parques, autopistas, túneles, carreteras, etc., con el fin de proporcionar seguridad y visibilidad a los peatones y mejor desenvolvimiento del tráfico automotor en horas nocturnas; los semáforos en la vía pública permiten regular y controlar el flujo de vehículos. También en los medios de comunicación apreciamos la importancia de la electricidad, debido a que el funcionamiento de la radio, televisión, cine, la emisión de la prensa, etc. depende en gran parte de este tipo de energía.

Desde que la electricidad se descubrió, siempre estuvo al servicio de la medicina a través de los distintos instrumentos y máquinas usadas en esta área tales como: equipos para radiaciones de nucleares (cobalto 60), equipos de rayos X, equipos para tomografías, equipos para electrocardiogramas y ha contribuido a numerosos avances en la ciencia e investigación. Asimismo, diversas herramientas y maquinarias que funcionan con electricidad son empleadas en nuestra comunidad para reparar o acondicionar nuestras urbanizaciones (Rodríguez Arias y Ruiz Hernández, 2006).

Por otro lado, la necesidad de aumentar la producción de bienes a un mínimo costo obligó a remplazar la mano de obra por maquinarias eficientes, que condujo al desarrollo de los motores eléctricos. En una empresa de bebidas gaseosas podemos observar como las correas transportadoras llevan las botellas a las máquinas llenadoras tapadoras para ser llenadas y luego son transportadas para ser empacadas, estas máquinas necesitan energía eléctrica para su operación.

También, es importante medir la corriente eléctrica desde varios puntos de vista para saber que cantidad de energía que utilizamos, para el dimensionamiento de conductores en redes de distribución, además sirve para determinar las pérdidas que existen en las redes o circuitos eléctricos. La corriente alterna medida varia con el tiempo en forma de una onda senoidal y nos permite diagnosticar fácilmente algún problema de funcionamiento (Rodríguez Arias, P., J. L. Ruiz Hernández, 2006). Además, las mediciones permiten localizar las causas de un funcionamiento defectuoso en un equipo eléctrico que no es posible apreciar su funcionamiento en una forma visual, como en el caso de un aparato mecánico (Harper, 1994).

La reducción de los costos asociados con el consumo de energía eléctrica y con las inversiones capitales en los equipos eléctricos utilizados en las instalaciones industriales y de servicios, resulta imprescindible en la situación actual de la economía de nuestro país. Esta necesidad resulta potenciada por el impacto medioambiental de las tecnologías energéticas.

SITUACIÓN PROBLEMICA

Las universidades ecuatorianas tienen muchas instalaciones eléctricas y equipamientos necesarios para prestar el servicio de educación con calidad, pero en contraposición en muchas ocasiones se le presta poca atención a la cantidad de energía que utilizamos, a la dimensión de conductores de las redes de distribución y las pérdidas que existen en las redes o circuitos eléctricos. Además, los recién graduados de ingeniería eléctrica no tienen las habilidades para determinar el comportamiento de la corriente alterna y las oscilaciones electromagnéticas en las líneas de conducción de corriente que presentan resistencia, condensadores e inductores.

PROBLEMA

Los estudiantes no tienen habilidades para determinar el comportamiento de la corriente alterna y las oscilaciones electromagnéticas en las líneas de conducción de corriente que presentan resistencias, condensadores e inductores.

HIPÓTESIS

Un estudio del comportamiento de la corriente y las oscilaciones electromagnéticas en circuitos experimentales permitirá que los estudiantes adquieran las habilidades para diagnosticar el funcionamiento de las líneas de conducción de corriente que presentan resistencia, condensadores e inductores.

OBJETIVO GENERAL

Evaluar el comportamiento de la corriente alterna y oscilaciones electromagnéticas en circuitos experimentales.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudiar la forma de onda de la corriente alterna de 60 Hz en un circuito RC normal, con rectificador de media onda y onda completa.
- Analizar la forma de onda de corriente alterna al pasar por filtros de condensadores de media onda y de onda completa.
- Analizar el circuito RC de cambio de fase y evaluar la diferencia de fase de la corriente de entrada y de salida.
- Analizar las oscilaciones electromagnéticas en un circuito LC en serie y en paralelo sin y con fuente de energía externa.

VARIABLES

Independiente: Elementos del circuito (Resistencia, Inductancia, Capacitancia, Fuente de energía, Voltaje y Corriente).

Dependiente: La amplitud de la oscilación de la corriente y el voltaje en los circuitos RC y LC.

MÉTODOS

Los métodos para estudiar el problema serán cuantitativos y cualitativos.

Método empírico

Observación y experimentación

II. DESARROLLO

CAPITULO I

FUNDAMENTACIÓN ACTUAL DEL TEMA

1.1 Panorama internacional del uso de la corriente eléctrica.

El consumo mundial de electricidad es de 16.830.000.000 Kilovatio-hora/Año en 2005, con una energía promedio per cápita de 297 Vatios. Estados Unidos encabeza la lista de los países que consume más electricidad (3.816.000.000 Kilovatio-hora/Año) en el mundo, que genera y consume alrededor de la cuarta parte de toda la electricidad del mundo. China es el segundo, consumiendo alrededor de una décima parte de la electricidad (2.859.000.000 Kilovatio-hora/Año) del mundo, seguido por Rusia, Japón, Alemania, India y Canadá, en ese orden (EIA, 2005).

Durante el período 1994-2003, el consumo mundial de energía eléctrica creció a una tasa promedio de 3.0% anual, la cual en 2003, significó un consumo de 14,768 TWh. La tendencia del consumo de energía eléctrica en los países industrializados indica crecimientos moderados debido a que sus mercados cuentan con una mejor utilización de la energía respecto al resto de las regiones.

Adicionalmente, los crecimientos en el consumo de energía eléctrica registrados en Norteamérica y Europa Occidental han sido del orden del 2.0% y 2.3% respectivamente, los cuales se ubican por debajo de la tasa mundial. En el caso particular de Norteamérica, los consumos de Canadá y Estados Unidos de América (EUA) en 1994-2003 se ubicaron en 1.4% y 1.9%, mientras que México

presenta la mayor tasa de consumo de energía eléctrica (ventas internas y autoabastecimiento) con 5.7% durante dicho periodo (EIA, 2005).

La capacidad mundial de generación de energía eléctrica mundial en 2003 ascendió a 3,626 GW, lo cual significó un incremento de 3.3% respecto al año anterior. En general, las centrales termoeléctricas convencionales mantienen la mayor participación en la capacidad, a excepción de algunos países como son Francia, donde la energía nuclear predomina, o Canadá donde la mayor participación es de centrales hidroeléctricas.

La región de Norteamérica representó el 30% de capacidad instalada mundial de energía eléctrica en 2003, seguida por Asia y Europa Occidental, las cuales contribuyeron con el 20% y 19%, respectivamente. En contraste, la región de Medio Oriente participó con el 3%, ubicándose como una de las de menor capacidad respecto al resto de las regiones (Montaño Fernández, 2006).

En 2009, el consumo mundial de electricidad se redujo en un 1,5%, por primera vez desde la Segunda Guerra Mundial. En ese año, el consumo de electricidad se redujo en todas las regiones del mundo excepto en Asia y Medio Oriente. China y la India, que comprenden del 22% del consumo mundial, su consumo de electricidad sigue aumentando dado al tremendo crecimiento económico que experimentan (EIA, 2009).

La principal tecnología utilizada para generar energía eléctrica es la termoeléctrica convencional, misma que está presente en todo el mundo. Por otro lado, la energía nuclear predomina en Europa Occidental y Asia industrializada en 19% y 16%, respectivamente (EIA, 2005).

La demanda mundial de energía eléctrica se estima que crezca a una tasa anual de 2.9% durante 2002-2015 (Tabla 1). El crecimiento estimado mundial es impulsado principalmente por los países en transición y en desarrollo.

Tabla 1. Consumo mundial de energía eléctrica desde 2002 a 2015.

Consumo de energía eléctrica (TWh)				
	2002	2010	2015	tmca 2002-2015
Mundial	14,275	18,875	21,400	2.9
Países industrializados	8,086	9,079	9,837	1.4
Norteamérica	4,328	5,193	5,693	2.0
Europa Occidental	2,556	2,613	2,786	0.6
Asia industrializada	1,202	1,273	1,358	0.9
Economías en transición	1,544	2,334	2,654	3.9
Ex-Unión Soviética	1,154	1,794	2,048	4.2
Europa Oriental	390	540	606	3.2
Países en desarrollo	4,645	7,462	8,909	4.8
Asia	2,914	4,909	5,843	5.1
Medio Oriente	574	861	997	4.0
África	422	622	755	4.2
Centro y Sudamérica	735	1,070	1,314	4.2

Fuente: (EIA, 2009).

En lo que respecta a la demanda de energía eléctrica en los países industrializados, su crecimiento estimado es de 1.4% debido principalmente a los consumos esperados en Europa Occidental y Asia industrializada donde se esperan crecimientos de 0.6% y 0.9% respectivamente. Cabe agregar que en estos países los sectores eléctricos son maduros, con equipos de eficiencias altas, por lo que sus crecimientos esperados son moderados. En especial, en el caso de Europa Occidental, su demanda esperada de electricidad estará en función del desarrollo en la liberalización de sus mercados eléctricos, además sus esfuerzos para ampliar el mercado eléctrico en Europa Occidental incidirán en los costos de la energía eléctrica al depender en mayor medida del gas natural y fuentes renovables.

Particularmente, en los países en transición se estima el mayor crecimiento en la demanda de energía eléctrica de 3.9%. Esto responde al incremento en las estimaciones del producto interno bruto para esa zona y a las políticas de la región para liberar sus sectores eléctricos, ya sea por la necesidad de inversión extranjera para expandir el sector o para cumplir con las reglas de la comunidad europea.

Los países en desarrollo mostraron un incremento en su demanda estimada de electricidad, y están siendo impulsados fuertemente por los supuestos de crecimiento económico y poblacional. En la prospectiva anterior se mostraba un crecimiento económico de 4.5% hasta 2015, sin embargo, las estimaciones pronostican un crecimiento de 5.1% para 2002-2015. De acuerdo a estos supuestos, los países en desarrollo esperarán un mayor crecimiento en la demanda de energía eléctrica por lo que han iniciado programas de reestructuración, promoción de inversiones y de electrificación rural. En Asia, su tasa estimada de crecimiento de demanda eléctrica asciende a 5.1% debido al gran dinamismo de esta zona. Debido a los altos aumentos en la demanda eléctrica en China y a que el 75% del consumo de energía eléctrica lo lleva a cabo el sector manufacturero e industria pesada, este país estima alcanzar los 570 GW para el 2010 (EIA, 2009).

Otro indicador que refleja el comportamiento estimado de la demanda de energía eléctrica a nivel mundial es el consumo de energía eléctrica por habitante, el cual considera el consumo de electricidad de cada país en relación con el crecimiento de su población.

Debido a los factores anteriormente mencionados para cada región, como la liberalización de mercados y supuestos de tasas económicas más altas, se estima que el consumo de electricidad por habitante crecerá en 1.9% durante 2002-2015, de tal manera, que en 2015, se consumirán mundialmente 2,976 kWh/habitante (EIA, 2009).

El consumo por habitante en Norteamérica es más alto con respecto al resto de las regiones. En 2015 se estima que su consumo por habitante aumente en 1,703

kWh/habitante, representando el mayor aumento entre los países industrializados. Durante el horizonte analizado se espera que la diferencia en consumo por habitante entre Europa Occidental y Asia industrializada se incremente debido al mayor consumo estimado en esta última región. El grupo de países con mayor crecimiento siguen siendo los de economías en transición, en los que se espera un aumento en el consumo de energía de 4.1%; se estima que estos incrementarán de 2002 a 2015 su consumo por habitante en 2,884 kWh/habitante (EIA, 2009).

El elevado crecimiento de la electricidad en los últimos años y los requerimientos energéticos que se desprendan de ella acarrearán una respuesta desde el lado de la oferta, que si no tiene en consideración la protección del medio ambiente y de los recursos naturales nacionales, podría comprometer el crecimiento futuro del mundo. Por eso, el uso eficiente de la energía constituye una de las más importantes opciones tecnológicas para enfrentar los problemas señalados. De hecho, esta verificación no es nueva; a principios de los setenta la gran mayoría de los países industrializados adoptaron agresivas políticas de racionalización de la energía para enfrentar los severos aumentos en los precios del crudo y los elevados grados de incertidumbre que se instalaban en los mercados de la energía (Viera de Carvalho et al., 1996). Lo que ha cambiado, es el contexto en el cual debe darse la expansión del sistema energético y los desafíos que éste enfrenta, en los cuales aquellos ligados al medio ambiente, son cada vez mayores y más complejos.

Sin embargo, se afirma que el uso eficiente de la energía no es una opción válida para los países en desarrollo, los que antes de pensar en “economías” de energía, deberían aumentar su consumo para mecanizar su actividad productiva y mejorar las condiciones de vida de la población. Esta argumentación contiene una falacia, ya que el uso eficiente de la energía no consiste en racionar o reducir los servicios que ésta presta sino en utilizarla mejor. Incluso existen evidencias de que los aumentos de productividad y la reducción de los consumos energéticos por unidad de producto constituyen facetas del mismo proceso.

El uso eficiente de la energía bajo esta óptica consiste en: satisfacer los requerimientos energéticos de la sociedad al menor costo económico y energético posible, energizar actividades de baja productividad o que requieren de energía para realizarse, sustituir fuentes energéticas en función de sus costos sociales relativos y concebir políticas de largo aliento en oposición a programas de emergencia y coyunturales (Viera de Carvalho et al., 1996). En consecuencia, el problema no es la cantidad de energía empleada sino la forma más económica de asegurar la calidad térmica y ambiental de los hogares, iluminar adecuadamente las áreas productivas, de esparcimiento y domésticas, transportar personas y mercancías, proporcionar fuerza motriz a equipos y máquinas herramientas, etc.

La eficiencia energética sólo tiene sentido en la medida que permite reducir los costos globales de producción. Ello implica considerar, no sólo el costo total de los equipos nuevos, en los casos de reemplazo de equipos existentes en uso, o la inversión incremental al seleccionar equipos nuevos, los equipos eficientes cuestan, en general, más que los equipos estándares, sino que además los costos diferenciales de funcionamiento y mantención de los equipos eficientes respecto de los estándares, las diferencias de productividad entre ambas opciones, etc.

En términos generales puede afirmarse que en la mayoría de las instalaciones eléctricas se derrocha del orden de un 10% o más de la electricidad que se adquiere a las empresas eléctricas debido a una selección y funcionamiento inadecuado de los equipos y sistemas de distribución de la electricidad. Las principales pérdidas eléctricas provienen del uso de motores, transformadores y líneas de distribución. Al respecto debe mencionarse que en los sectores industrial y minero del orden de un 70% del total de consumo eléctrico es realizado por los motores eléctricos, equipo que constituye uno de los objetivos principales de cualquier programa de eficiencia energética, no sólo en el caso de los proyectos nuevos sino que además en situaciones de remplazo de equipos existentes.

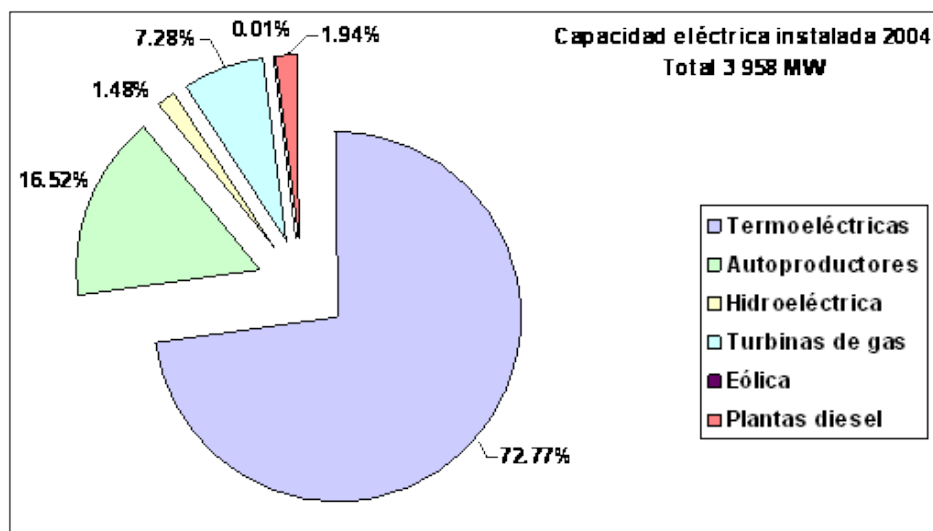
En cuanto a la generación de electricidad se espera que se duplique entre 2002 y 2025, pasando de 14.275 billones de kW/h a 26.018 billones, donde el crecimiento

más rápido lo experimentarán las economías emergentes, con un promedio de crecimiento de 4.0 % por año, en los países consolidados se prevé un aumento promedio de consumo eléctrico de 1.5 % por año. En este aspecto se debe añadir que algunos países han optado por la generación distribuida (GD), que se basa como necesidad de generación o el almacenamiento de energía eléctrica a pequeña escala, lo más cercana al centro de carga, con la red eléctrica, y donde la capacidad de los sistemas GD varía de cientos de kW/h hasta 10 000 kW/h. (CEPAL, 2004).

1.1.1 Panorama del empleo de la corriente eléctrica en Cuba.

Cuba no esta exento de la crisis energética internacional, y en torno a esto arrastró una de las peores crisis electroenergética de su historia, ya que se contaba con 10 plantas termoeléctricas con una capacidad instalada de 3 958 MW; donde el 72,77 % le correspondía a las termoeléctricas, los autoprodutores de Níquel y MINAZ con el 16,52 MW, la hidroeléctrica con el 1,48 %, las turbinas de gas con el 7,28 %, plantas diesel 1,94 % y el resto pertenecía a la eólica (Fig. 1).

Figura 1. Capacidad instalada de energía eléctrica en Cuba.



Estas plantas tienen 46 unidades de generación, sin embargo, debido a varias causas como por ejemplo: averías, la falta de mantenimiento en el tiempo planificado y el uso de combustible no idóneo para su operación, provocaron que la capacidad real de generación llegara a ser de 1 200 MW.

Por su parte la demanda de energía eléctrica en Cuba, se redujo de 2 500 MW en el año 1989 a 950 MW en el 2005, debido al gran número de industrias paralizadas, así como a una baja en el consumo agrícola y doméstico (Cereijo,2006).

Con el derrumbe del campo socialista y la desaparición de la URSS, unido al brutal bloqueo norteamericano, se establece en el país el período especial. Bajo estas condiciones las importaciones del combustible para la generación de electricidad llegaron a valores muy bajos y la caída de generación de electricidad fue abrupta, decidiéndose iniciar el proceso de asimilación paulatina del crudo nacional en las plantas, a pesar de que sus características (alto contenido de azufre, alta viscosidad y otros componentes) no eran las especificadas en el diseño. Al agudizarse aún más las condiciones del bloqueo y considerando el requerimiento de satisfacer las necesidades de la economía y de la población, se acelera más el empleo del crudo nacional y del gas acompañante que se perdía con la extracción del hidrocarburo, llegando al cierre del año 2003 al consumo de 2 300 000 t de combustibles nacionales.

La explotación del crudo nacional, unida al gas acompañante que se expulsaba a la atmósfera con la correspondiente contaminación ambiental y que fue aprovechado para la generación de energía eléctrica, permitió la autosuficiencia energética del país. En esta etapa tuvo una particular importancia la modernización de las centrales termoeléctricas para el uso eficiente del crudo nacional cuyo alcance estuvo por la adaptación y asimilación paulatina de las instalaciones para la utilización del petróleo crudo nacional como combustible, mantenimiento general y mejoramiento técnico de las instalaciones y el restablecimiento de los Sistemas de Control Automático de las Centrales Eléctricas, obsoletos y con ausencia de repuestos en el mercado mundial.

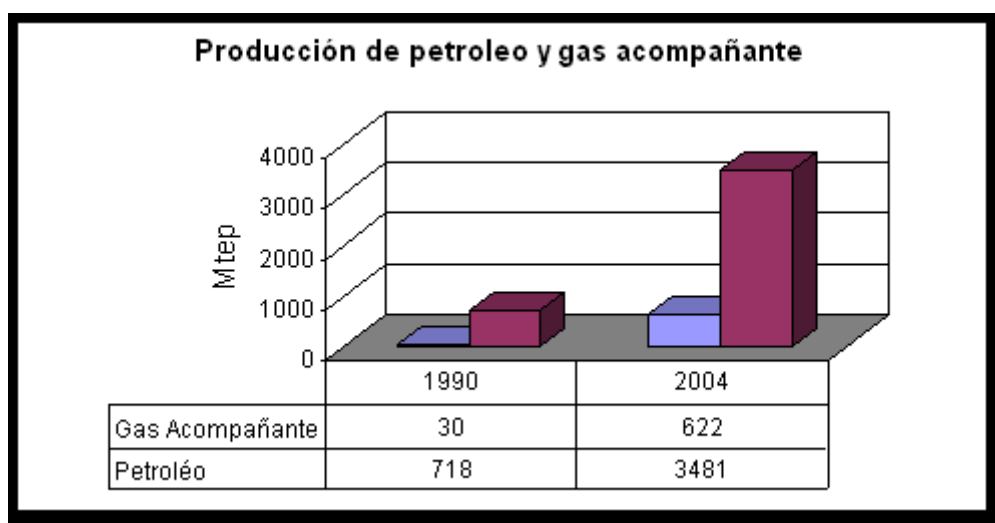
La política energética está orientada a alcanzar la independencia energética. Para ello se encuentra fomentando la exploración petrolera a través de contratos de riesgo compartido entre la empresa estatal Cubapetro y las empresas privadas, principalmente costa afuera.

Por otro lado y como parte de la estrategia de alcanzar la independencia energética, se apoya en el desarrollo de energías renovables, siendo Cuba el mayor país productor del Caribe de estos tipos de energías, en este sentido, se pretende continuar apoyando la utilización de la biomasa como principal recurso energético alternativo. En medio de esta situación se logran algunos convenios con la República Bolivariana de Venezuela y otras entidades exportadoras de combustibles. Entre los acuerdos realizados con Venezuela, se encuentra la venta a Cuba de 53 000 barriles diarios de petróleo (2,5 millones de toneladas anuales), el 80% de los suministros, Cuba lo pagará a precios del mercado mundial y en los 90 días posteriores a la entrega. El plazo de pago para el 20 % restante podrá estar entre los 5 y 20 años, en dependencia del precio promedio anual que alcance el petróleo (OLADE, 2000).

Fue así que entre los convenios establecidos y sumado a esto el descubrimiento de un yacimiento de petróleo de calidad, a escasos kilómetros de Santa Cruz del Norte, con reservas probadas de 14 millones de toneladas de crudo, promete restaurar e incrementar los niveles de extracción y dar un alivio importante al apetito energético de Cuba. Según expertos, los pozos que se perforen en ese yacimiento podrían llegar a producir, de conjunto, hasta un millón de toneladas al año, alrededor de la cuarta parte de la producción actual del país (Bohemia, 2007).

De aquí que se mantuvo la política de impulsar la extracción del crudo nacional y del gas acompañante, se produce un amplio crecimiento de ambos en el periodo de 1 990 al 2004, donde para el gas fue de un 25 % con un incremento de 21 veces y el petróleo de un 31 % con un incremento de 5 veces (Fig. 2).

Figura. 2. Producción nacional de crudo y gas acompañante en miles de toneladas equivalentes de petróleo (Mtep).



Fuente: www.OLADE.org.ec/documentos/ONE.doc

La eficiencia energética, uso racional de la energía, uso eficiente de la energía, son frases muy frecuentes encontradas dentro de las políticas que aplican casi todos los países, muy especialmente impulsadas cuando se presentan etapas o períodos de crisis, ya sea por efecto de precios elevados o por falta de oferta.

La escalada en los precios del petróleo en los últimos tres años alrededor de más de \$ 70,00 y llegando por encima del nivel de los \$84.00 el barril, ha hecho que muchos países se preocupen nuevamente por hacer un uso racional de la energía. Varios de estos países de Latinoamérica y el Caribe están diseñando o reactivando políticas de ahorro y eficiencia para tratar de paliar los efectos que en la economía causan los elevados precios del petróleo y sus derivados.

Así, la realidad muestra que no se trata solo de diversificar la matriz energética, sino de preocuparse por dar un uso racional y eficiente a la energía. Dos condiciones deben ser consideradas a este efecto: primero, mediante buenas costumbres de uso se debe evitar el desperdicio, hábitos que solo se logran a través de una profunda educación, segundo, promoviendo la utilización de artefactos y equipos modernos, altamente eficientes, es decir, que tengan un

menor consumo de energía, sin necesidad de disminuir la capacidad deseada. La Revolución Energética de Cuba no es una campaña transitoria ni demagogia política. Se está en presencia de, probablemente, uno de los esfuerzos más planificados y consientes que haya hecho nación alguna para elevar el nivel de vida de su población consumiendo el combustible de manera racional y económica.

Hasta el momento Cuba ha tenido un sistema electroenergético apoyado en las grandes termoeléctricas que en muchos casos debían llevar la electricidad al extremo opuesto del país a través de redes deterioradas.

La integralidad de la Revolución Energética cubana es evidente cuando se conoce que los planes gubernamentales también comprenden la reparación de la cablería que llega a cada uno de los hogares reduciendo todavía más las interrupciones, las oscilaciones del voltaje y las pérdidas de energía por la mala calidad de las redes eléctricas. También se emprenden programas de desarrollo de energía limpia como la eólica y la solar, incluso se busca sustituir el consumo de petróleo mediante la utilización del gas acompañante. Según ha expuesto el Jefe de la Revolución, Comandante Fidel Castro Ruz, el mundo de hoy necesita utilizar de forma racional los recursos que están al alcance del hombre (Castro, 2006). De ahí que en los hogares del país, por ejemplo, se emplee de una manera óptima la energía eléctrica.

En Cuba se ha plasmando una serie de transformaciones muy de fondo, que se ha denominado “Año de la Revolución Energética en Cuba”, donde en primer lugar, se determina realizar una generación distribuida con motores altamente eficientes, que dejan de lado un sistema de generación centralizada, con equipos antiguos y altamente ineficientes. No sólo se logra un ahorro por el uso con equipos más eficientes en la hora base y pico, sino que se tiene energía continua, en caso de que se presenten más desastres naturales en el futuro. En segundo lugar, está la proyección de lograr mayor cantidad de electricidad sobre la base de gas natural, que es definitivamente mucho más económico que generar con productos

derivados del petróleo. Para esto se ha acelerando la perforación de pozos exploratorios y de desarrollo en la zona productora. Las plantas de ciclo abierto y ciclo combinado, que se han instalado y que se tienen previstas, son sin duda una acertada decisión para tener energía más segura y a mucho menor costo.

Tercero, dentro del plan que se aplica, se trabaja en una concientización ciudadana que llega a todas las clases sociales. En el ámbito escolar, a manera de ejemplo, existe un plan educativo profundo para no mantener artefactos encendidos sin necesidad en la hora pico, y, en cuarto lugar -donde está centrado el plan de ahorro en Cuba- está la sustitución inmediata y masiva de una serie de artefactos y equipos bastante antiguos e ineficientes y muchos otros que están disminuyendo tremendamente el consumo por domicilio, comercio e industria. El plan es autosustentable y con el mismo ahorro se paga la inversión muy rápidamente.

Todas estas acciones sumadas constituyen una verdadera revolución energética, que en la medida de las posibilidades, y dadas las características de cada país, deberían tomar como ejemplo en Latinoamérica y el Caribe, principalmente para imitar una voluntad política tendiente al uso racional y eficiente de la energía. Lo anterior no sólo supone beneficios para la economía, sino para la vida sustentable del planeta.

1.2 Corriente eléctrica.

La corriente eléctrica es el flujo de electrones que atraviesa cualquier conductor eléctrico debido a la diferencia de potencial creada por un generador de corriente en la unidad de tiempo. La corriente se expresa por su intensidad

$$I = \int_s \vec{J} * \overrightarrow{dS} = \int_s \vec{J} * \vec{n} dS \quad (1)$$

donde \vec{J} es la densidad de corriente de conducción, \overrightarrow{dS} es el vector perpendicular al diferencial de superficie, \vec{n} es el vector unitario normal a la superficie, y dS es el diferencial de superficie (Purcell, 1969; Sears et al. 2008).

La integral anterior se puede interpretar como el flujo del vector densidad de corriente de conducción \vec{J} y equivale al flujo de electrones que atraviesa la superficie S del conductor en la unidad de tiempo.

1.2.1 Corriente continua o constante.

Si el flujo del vector densidad de corriente permanece constante en el volumen limitado por la superficie S, entonces

$$I = \int_S \vec{J} * \overrightarrow{dS} = \textit{constante} \quad (2)$$

Entonces, el flujo de electrones permanece constante en el tiempo y se denomina **corriente continua o constante**.

La corriente continua es aquella que mantiene su valor de voltaje constante y sin cambio de polaridad. Un ejemplo puede ser una batería de las que se utilizan en los automóviles o las pilas con las que alimentamos nuestras calculadoras electrónicas.

1.2.2 Corriente eléctrica alterna.

Si el flujo del vector densidad de corriente varía con el tiempo en el volumen limitado por la superficie S, entonces

$$I = \int_S \vec{J} * \overrightarrow{dS} \neq \textit{constante} \quad (3)$$

Entonces, el flujo de electrones varía con el tiempo y se denomina corriente alterna. La corriente alterna también mantiene una diferencia de potencial constante, pero su polaridad varía con el tiempo.

Una señal senoidal, I(t), se puede expresar matemáticamente según sus parámetros característicos (Fig. 3), como una función del tiempo por medio de la siguiente ecuación:

$$I(t) = I_o \text{ sen } (\omega t + \beta) \quad (4)$$

donde:

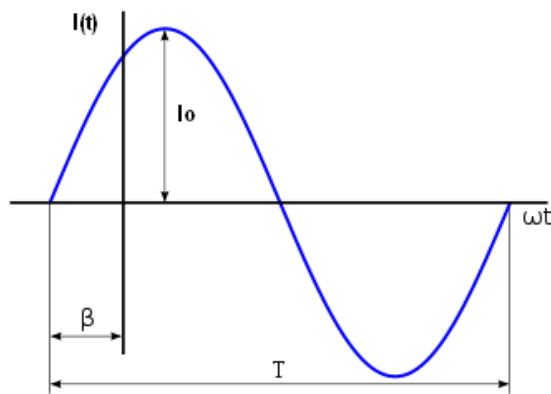
I_o : es la amplitud en amperios (también llamado valor máximo o de pico),

ω : la frecuencia angular en radianes/segundo,

T : el tiempo en segundos,

β : el ángulo de fase inicial en radianes (es la fracción de ciclo transcurrido desde el inicio del mismo).

Figura 3. Parámetros característicos de una onda senoidal de corriente alterna.



Dado que la frecuencia angular es más interesante para matemáticos que para ingenieros eléctricos, la fórmula anterior se suele expresar como:

$$I(t) = I_o \text{ sen}(2\pi f t + \beta) \quad (5)$$

donde f es la frecuencia en hercios (Hz), es número de ciclos completos de corriente alterna en la unidad de tiempo o es el número de veces que una corriente alterna cambia de polaridad en 1 segundo, y equivale a la inversa del periodo $f = \frac{1}{T}$. El período es el tiempo que tarda en producirse un ciclo completo de corriente alterna y se denomina con la letra T . Los valores más empleados en la distribución de corriente eléctrica son 50 Hz y 60 Hz.

Las otras variables significativas de una señal senoidal de corriente eléctrica son:

Valor instantáneo, $I(t)$: Es valor que toma la corriente (ordenada) o en un instante de tiempo, t , determinado.

Valor pico a pico (I_{pp}): Diferencia entre su pico o máximo positivo y su pico negativo. Dado que el valor máximo de $\text{sen}(x)$ es $+1$ y el valor mínimo es -1 , una señal senoidal que oscila entre $+I_0$ y $-I_0$. El valor de pico a pico, escrito como I_{p-p} , es por lo tanto $(+I_0)-(-I_0) = 2 \times I_0$.

Valor medio (I_{med}): Media aritmética de todos los valores instantáneos de la señal en un período dado, es decir es el valor del área que forma con el eje de abscisas partido por su período. El valor medio se puede interpretar como la componente de continua de la onda senoidal. El área se considera positiva si está por encima del eje de abscisas y negativa si está por debajo. Como en una señal sinusoidal el semiciclo positivo es idéntico al negativo, su valor medio es nulo. Por eso el valor medio de una onda sinusoidal se refiere a un semiciclo y se determina por la siguiente expresión:

$$I_{med} = \frac{2I_0}{\pi} \quad (6)$$

Valor máximo: Valor del voltaje en cada "cresta" o "valle" de la señal, de signo positivo (+), que toma la onda senoidal del espectro electromagnético, cada medio ciclo, a partir del punto "0". Ese valor aumenta o disminuye a medida que la amplitud " I_0 " de la propia onda crece o decrece positivamente por encima del valor "0".

Valor eficaz (I_{ef}): Valor que produce el mismo efecto que la señal de corriente continua equivalente y su importancia se debe a que este valor es el que produce el mismo efecto calorífico que su equivalente en corriente continúa. Matemáticamente, el valor eficaz de una magnitud variable con el tiempo, se define como la raíz cuadrada de la media de los cuadrados de los valores instantáneos alcanzados durante un período:

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I^2(t) dt} \quad (7)$$

En la literatura inglesa este valor se conoce como R.M.S. (*root mean square*, valor cuadrático medio), y de hecho en matemáticas a veces es llamado valor cuadrático medio de una función. En el campo industrial, el valor eficaz es de gran importancia ya que casi todas las operaciones con magnitudes energéticas se hacen con dicho valor. Matemáticamente se demuestra que para una corriente alterna senoidal el valor eficaz viene dado por la expresión:

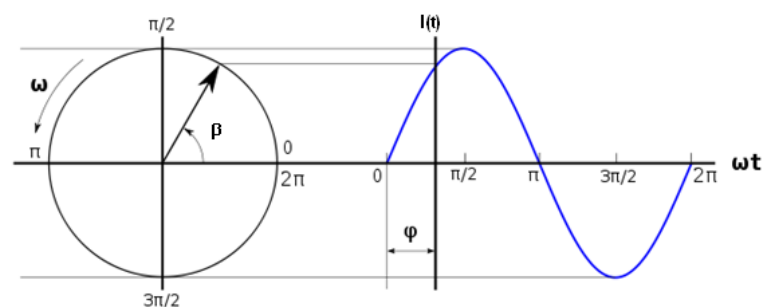
$$I = \frac{I_o}{\sqrt{2}} \quad (8)$$

El valor I, intensidad, es útil para calcular la potencia consumida por una carga. Así, si un voltaje de corriente continuo (CC), V_{CC} , desarrolla una cierta potencia P en una carga resistiva dada, una tensión de CA de V_{rms} desarrollará la misma potencia P en la misma carga si $V_{rms} = V_{CC}$.

1.2.3 Representación fasorial de la corriente alterna.

Una función senoidal puede ser representada por un vector giratorio (Fig. 4), al que se denomina fasor o vector de Fresnel, que tiene las siguientes características: girará con una frecuencia angular ω y su módulo será el valor máximo o el eficaz, según convenga.

Figura 4. Representación fasorial de una onda senoidal de corriente alterna.



La razón de utilizar la representación fasorial es para simplificar su representación. Matemáticamente, un fasor puede ser definido fácilmente por un número complejo, por lo que puede emplearse la teoría de cálculo de estos números para el análisis de sistemas de corriente alterna.

1.2.4 Métodos de medición de la corriente eléctrica.

Las mediciones de la corriente eléctrica puede efectuarse mediante la utilización de galvanómetros, aparatos digitales, osciloscopios, programas informáticos de medición de corriente, donde se miden magnitudes eléctricas como corriente, carga, potencial y energía, o las características eléctricas de los circuitos, como la resistencia, la capacidad, la capacitancia y la inductancia. Además, permiten localizar las causas del funcionamiento defectuoso de aparatos eléctricos donde no es posible apreciar su funcionamiento en una forma visual, como en el caso de un aparato mecánico (Rodríguez Arias y Ruiz Hernández, 2006).

Las unidades de medidas eléctricas empleadas para medir cuantitativamente toda clase de fenómenos electrostáticos y electromagnéticos, así como las características electromagnéticas de los componentes de un circuito eléctrico. Las unidades eléctricas empleadas en técnica y ciencia se definen en el Sistema Internacional de unidades. Sin embargo, se siguen utilizando algunas unidades más antiguas. La información que suministran los instrumentos de medición eléctrica se expresan normalmente en una unidad eléctrica estándar: ohmios, voltios, amperios, culombios, henrios, faradios, vatios o julios.

La unidad de intensidad de corriente en el Sistema Internacional de unidades es el amperio. La unidad de carga eléctrica es el culombio, que es la cantidad de electricidad que pasa en un segundo por cualquier punto de un circuito por el que fluye una corriente de 1 amperio. El voltio es la unidad SI de diferencia de potencial y se define como la diferencia de potencial que existe entre dos puntos cuando es necesario realizar un trabajo de 1 julio para mover una carga de 1 culombio de un punto a otro. La unidad de potencia eléctrica es el vatio, y representa la generación o consumo de 1 julio de energía eléctrica por segundo.

Un kilovatio es igual a 1.000 vatios. La medición de estos valores eléctricos también podemos efectuarlos mediante el calculo manual obtenidos algunos valores o datos de referencia.

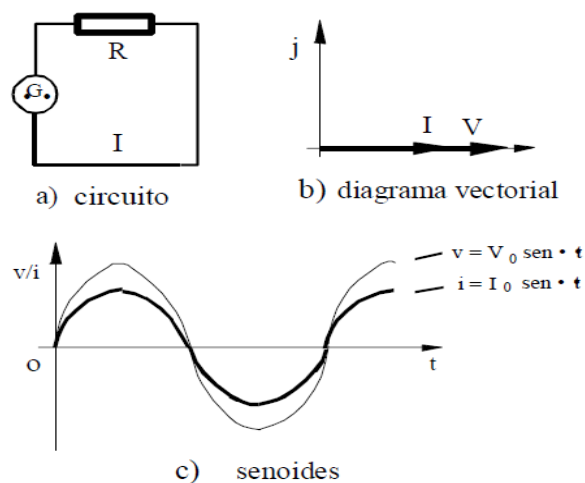
1.2.5 Circuitos de corriente alterna.

Los circuitos de corriente alterna están compuestos de resistores, condensadores e inductores con una fuente de corriente alterna. En estos circuitos, las ondas electromagnéticas se caracterizan como fasores según su módulo y fase, permitiendo un análisis más sencillo (Nilsson y Riedel, 2005).

1.2.5.1 Circuito con resistencia.

Supongamos un circuito con resistencia óhmica pura a la que se aplica un voltaje alterno senoidal (Fig. 5a). Este voltaje originará en el circuito una corriente senoidal, totalmente en fase con el voltaje aplicado y con la misma frecuencia (Fig. 5c). En la figura 3b se muestra el diagrama fasorial formado por el voltaje y la corriente, donde se observa que ambos están en fase.

Figura 5. Circuito con resistencia. ω : frecuencia angular, β : fase de la oscilación.

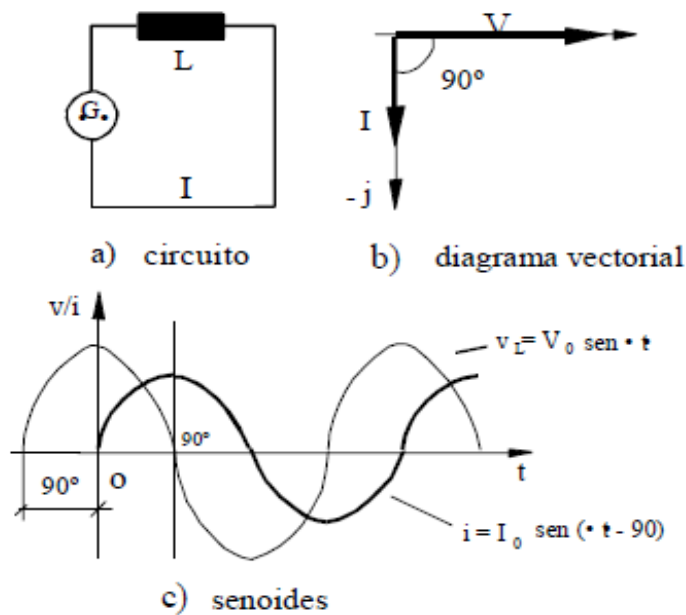


Al alimentar con un voltaje de corriente continua o con un voltaje alterno senoidal con valor eficaz (valor cuadrático medio) idéntico al corriente continua, la resistencia puramente óhmica manifestará los mismos efectos.

1.2.5.2 Circuito con inductancia pura.

Un circuito con una bobina ideal (sin resistencia) a la que se aplica una tensión alterna senoidal, está tratando de evitar los cambios bruscos de corriente (Fig 6a). La bobina retrasa 90° la corriente respecto al voltaje aplicado en el circuito (Figura 6b y 6c).

Figura 6. Circuito con bobina. ω : frecuencia angular, β : fase de la oscilación.



En este circuito, la única resistencia que aparece es la reactancia inductiva, por lo que la corriente eficaz que circula por el circuito será:

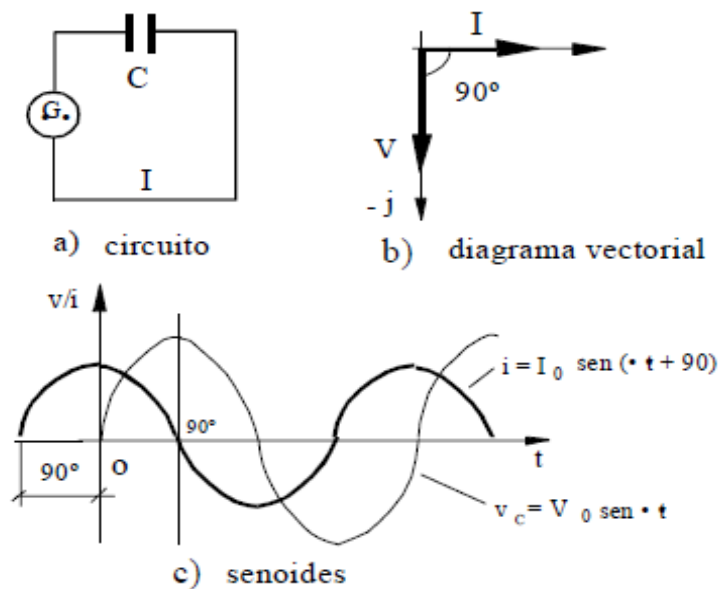
$$I = \frac{V}{X_{L(90^\circ)}} = \frac{V}{2\pi fLj} = \frac{V}{-2\pi fLj} = -\frac{V}{j\omega L} \quad (9)$$

La corriente instantánea que circula por el circuito es $I = I_0 \text{ sen } (\omega t - 90^\circ)$.

1.2.5.3 Circuito con condensador ideal.

Al conectar un condensador ideal (sin resistencia) a una fuente de voltaje alterno (Fig. 7a), a medida que el voltaje va aumentando, el condensador se va cargando y el voltaje va disminuyendo, el condensador se va descargando. Todo esto ocurre con la misma rapidez con que cambia el sentido del voltaje aplicado. Como consecuencia, se establece en el circuito una corriente alterna de la misma frecuencia que la del voltaje de alimentación (Nilsson y Riedel, 2005).

Figura 7. Circuito con capacitor. ω : frecuencia angular, β : fase de la oscilación.



El valor máximo del voltaje tiene lugar al cuarto de periodo (90°) de la onda (Fig. 7c) y que la carga del capacitor es Q (c), la capacitancia (microfaradios, μF) y voltaje (voltios) en cada armadura del condensador esta dado por $Q = C V$, tendremos que al cabo de los 90° la cantidad de carga acumulada será: $Q_0 = C V_0$. Por tanto, el valor medio de la intensidad será:

$$I_{med} = \frac{Q_0}{t} = \frac{CV_0}{\frac{T}{4}} = \frac{4CV_0}{T} \quad (10)$$

Pero como $1/T = f$, tendremos que: $I_{med} = 4fCV_0$

Expresando el valor eficaz de la corriente y el voltaje tendremos que:

$$I = \frac{V}{X_{c(90^\circ)}} = \frac{V\omega C}{(-j)} = -j V \omega C = 2\pi f C V j \quad (11)$$

$$V = X_{c(90^\circ)} I = \frac{(-j)}{\omega C} I = \frac{-jI}{\omega C} = -\frac{jI}{2\pi f C} \quad (12)$$

La corriente se adelanta 90° con respecto al voltaje, es decir, el voltaje se retrasa 90° con respecto de la corriente (Fig. 7b). Esto demuestra que los condensadores tienen un comportamiento diferente a las bobinas.

1.2.5.4 Circuito R-C en serie.

Sea el circuito formado por la resistencia pura R y el condensador C (Fig. 8a). Al aplicar al circuito un voltaje alterno senoidal se generará una corriente alterna senoidal de la misma frecuencia que la del voltaje de alimentación. Esta corriente producirá dos caídas de voltajes diferentes: una V_R , debida a la resistencia R, en fase con la corriente cuyo valor es RI y otra V_c , de valor IX_C que se retrasa 90° respecto de la corriente (Fig. 8b y 8c). En todo momento, la suma fasorial de ambos voltajes debe ser igual al voltaje aplicado (Nilsson y Riedel, 2005).

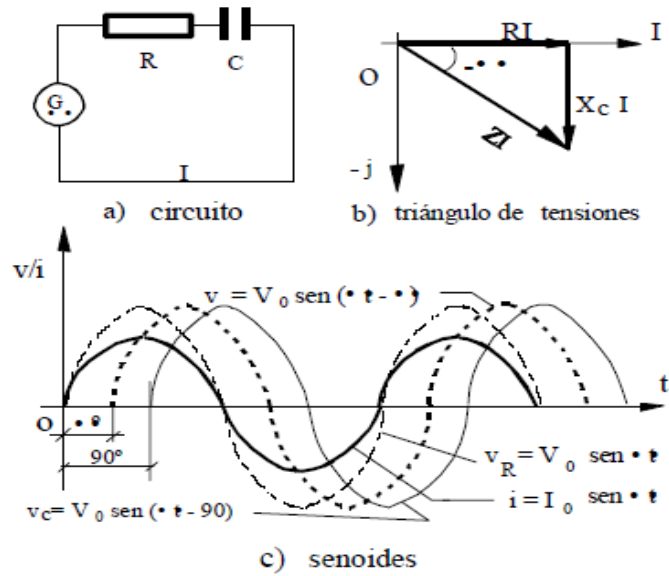
La caída de voltaje en la resistencia esta dada por $\mathbf{V_R} = \mathbf{R}_{(0^\circ)} I$ (en fase con la corriente)

La caída de voltaje en el condensador $\mathbf{V_c} = \mathbf{X_{c(-90^\circ)}} I$ (90° en retraso respecto de la corriente). El voltaje total $V = I Z(-\phi^\circ)$ (en retraso ϕ grados sobre la corriente) esta dado por

$$V^2 = V_R^2 + V_c^2 \quad (13)$$

conocida como triángulo de voltajes (Fig. 8b).

Figura 8. Circuito RC en serie. ω : frecuencia angular, β : fase de la oscilación.



La impedancia del circuito RC tiene la forma

$$\vec{Z} = \vec{R} - j\vec{X}_c \quad (14)$$

donde R es la resistencia óhmica y X_c es la resistencia o reactancia inductiva y j es un número imaginario puro ($j = \sqrt{-1}$).

El módulo de la impedancia es:

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X_c^2} \quad (15)$$

El argumento o ángulo de desfase es:

$$\beta = \arctan \frac{R}{Z} = \arctan \frac{X_c}{R} \quad (16)$$

El factor de potencia es: $\cos \beta = \frac{R}{Z}$

La corriente por el circuito esta dado por $I = \frac{V_{(0^0)}}{Z_{(-\beta)}} = I_{(\beta)}$, $V = V_o \text{ sen } (wt - \varphi)$

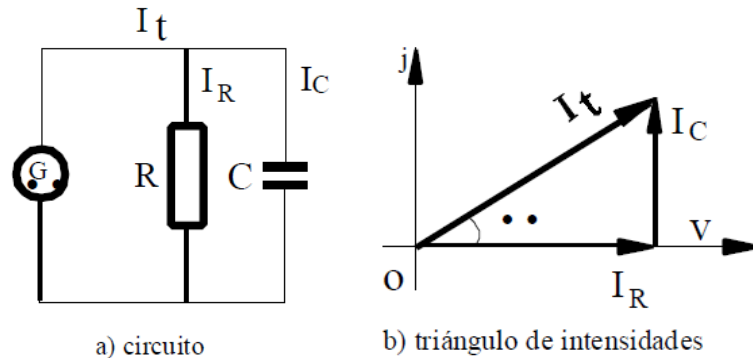
y

$$I = I_o \text{ sen } (wt).$$

1.2.5.5 Circuito R-C en paralelo.

Sea el circuito formado por la resistencia pura R y el condensador C (Fig. 9a).

Figura 9. Circuito RC en paralelo. ω : frecuencia angular, β : fase de la oscilación.



Al aplicar al circuito un voltaje alterno senoidal, la resistencia y el condensador estarán sometidos al mismo voltaje, pero la corriente que circula por cada componente será diferente: por la resistencia circulará una corriente I_R que estará en fase con el voltaje aplicado y por el capacitor circulará una corriente I_C que estará adelantada 90° con respecto al voltaje (Fig. 9b) (Conejo et al., 2004). Aplicando la ley de Kirchhoff para los nodos, se obtiene la corriente total que circulará por el circuito, que estará retrasada un ángulo β .

La admitancia (inverso de la impedancia) compleja equivalente tiene la expresión siguiente:

$$\vec{Y} = \vec{Y}_R + \vec{Y}_C = \frac{\vec{1}}{R} + j \frac{\vec{1}}{X_C} = \vec{G} + j \vec{B} \quad (17)$$

El módulo de la admitancia es: $|Y| = \sqrt{G^2 + B^2}$ y el argumento o ángulo

$$\beta = \arctan \frac{B}{G}.$$

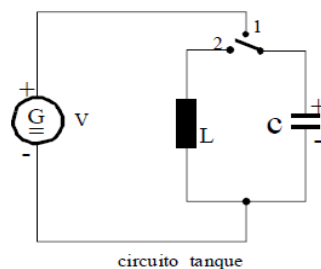
Las expresiones del voltaje y de la corriente eficaz en el circuito esta dado por:

$$V = V_o \text{ sen } (\omega t) \text{ y } I = I_o \text{ sen } (\omega t + \varphi).$$

1.2.5.6 Circuito L-C en paralelo (circuito oscilante).

En general toda combinación L-C recibe el nombre de circuito oscilante o tanque por su facultad de almacenar energía, especialmente cuando ambas reactancias aparecen solas, sin resistencia ni fuente de alimentación (Fig. 10). En circuito LC hay una frecuencia para la cual se produce un fenómeno de resonancia eléctrica, a la cual se llama frecuencia de resonancia, para la cual la reactancia inductiva es igual a la reactancia capacitiva ($X_C = X_L$). Por lo tanto, la impedancia será mínima e igual a la resistencia óhmica. Esto también equivale a decir, que el circuito estará en fase (Faleski, 2006).

Figura 10. Circuito LC en serie y en paralelo.



En un circuito resonante, la impedancia total vendrá dada por:

$Z = \sqrt{(X_L - X_C)^2}$ siendo, $X_L = X_C$, entonces $Z = 0$. En el estado de resonancia eléctrica, al ser la impedancia mínima, la intensidad eficaz de la corriente será máxima. Simultáneamente, la diferencia de potencial o voltaje eléctrico correspondiente a X_C y X_L , tiene valores máximos iguales.

Otra característica de los circuitos resonantes es que la energía liberada por un elemento reactivo (inductor o condensador) es exactamente igual a la absorbida por el otro. Es decir, durante la primera mitad de un ciclo de entrada el inductor absorbe toda la energía liberada por el capacitor, y durante la segunda mitad del ciclo el capacitor vuelve a capturar la energía proveniente del inductor. Es precisamente esta condición "oscilatoria" que se conoce como resonancia, y la frecuencia en la que esta condición se da es llamada frecuencia resonante.

Los circuitos resonantes son especialmente útiles cuando se desea hacer "sintonizadores" o "tuners", en los cuales se quiere dar suficiente potencia a sólo una frecuencia dentro de un espectro. Por ejemplo cuando sintonizamos una emisora de radio en nuestro receptor lo que se ha producido es una condición de resonancia para la frecuencia central de esa radio-emisora. En el caso de los receptores de radio comerciales tienen un circuito resonante "ajustable" para poder seleccionar la frecuencia resonante adecuada. En las emisoras de FM los rangos de frecuencia varían entre 88 y 108 MHz.

La admitancia (inversa de la impedancia) compleja equivalente tiene la expresión siguiente:

$$\vec{Y} = \vec{Y}_L + \vec{Y}_c = \frac{\vec{1}}{X_L} + \frac{\vec{1}}{X_c} = \vec{G} + j\vec{B} \quad (18)$$

El módulo de la admitancia es: $|Y| = \sqrt{G^2 + B^2}$

El argumento o ángulo $\beta = \arctan \frac{B}{G}$.

Las expresiones del voltaje y de la corriente eficaz en el circuito esta dado por

$$V = V_o \text{ sen } (wt) \text{ y } I = I_o \text{ sen } (wt + \varphi).$$

1.3. Rectificación de la corriente eléctrica alterna.

Muchos aparatos necesitan corriente continua para funcionar, sobre todos los que llevan electrónica (equipos audiovisuales, ordenadores, etc) para ellos se utilizan fuentes de alimentación que rectifican y convierten el voltaje a uno adecuado.

La rectificación es un proceso que convierte una corriente eléctrica alterna, que circula alternativamente en un sentido u otro de un circuito, en una corriente continua, que sólo fluye en un sentido. Para ello se inserta en el circuito un dispositivo conocido como rectificador, que sólo permite que pase corriente en un sentido, bloqueando la corriente en el otro (Harper, 1994-, Hermosa, 1999).

La rectificación se lleva a cabo en todos los rangos de potencia eléctrica, desde milésimas de vatio en la detección de señales de radio de amplitud modulada hasta miles de kilovatios en el funcionamiento de maquinaria pesada eléctrica. Los primeros rectificadores comerciales convertían corriente alterna en continua para alimentar motores eléctricos y se llamaban conmutadores mecánicos. En la actualidad, la mayor parte de la rectificación se lleva a cabo mediante dispositivos electrónicos, como combinaciones de diodos, tubo de vacío y rectificadores de arco de mercurio (Hermosa, 1999).

En la mayoría de aplicaciones de la electrónica de potencia, la entrada de potencia que está en forma de voltaje alterno de 50 o 60 Hz proporcionada por el sistema de distribución, debe ser transformada en voltaje continuo no regulado. Para tal efecto se utilizan los rectificadores.

Los rectificadores o convertidores de corriente se caracterizan por transformar la corriente alterna en continua. De esta manera permiten la conversión directa desde un circuito alimentado con voltaje alterno, poder alimentar a la carga con corriente continua. Los rectificadores no controlados están formados exclusivamente por diodos, no necesitando circuitos de mando, por lo que los diodos conmutan de manera natural forzados por la fuente de alimentación.

Para entender como funciona un rectificador bastan con fijarnos en dos aspectos:

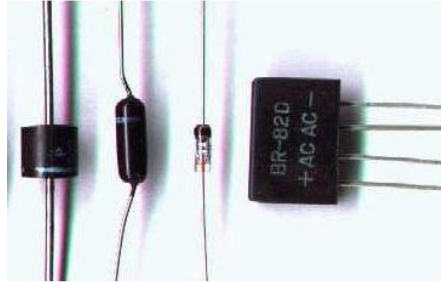
- 1) Los conjuntos de diodos o conmutadores.
- 2) La forma como están conectados los devanados que suministran los voltajes alternos a rectificar: el tipo de montaje.

1.3.1 Diodo.

Un diodo es un componente electrónico de dos terminales que permite la circulación de la corriente eléctrica a través de él en un sentido. Este término generalmente se usa para referirse al diodo semiconductor, el más común en la

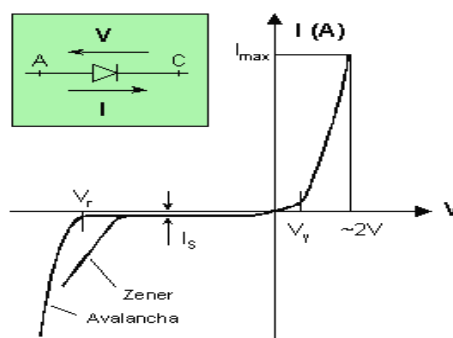
actualidad; consta de una pieza de cristal semiconductor conectada a dos terminales eléctricos (Fig. 11).

Figura 11. Diodos semiconductores.



De forma simplificada, la curva característica de un diodo (I-V) consta de dos regiones: por debajo de cierta diferencia de potencial, se comporta como un circuito abierto (no conduce), y por encima de ella como un circuito cerrado con una resistencia eléctrica muy pequeña (Fig. 12). Debido a este comportamiento, a los diodos se les denomina rectificadores, debido a que son dispositivos capaces de suprimir la parte negativa de cualquier señal, como paso inicial para convertir una corriente alterna en corriente continua (Hermosa, 1999).

Figura 12. Curva característica del diodo semiconductor.

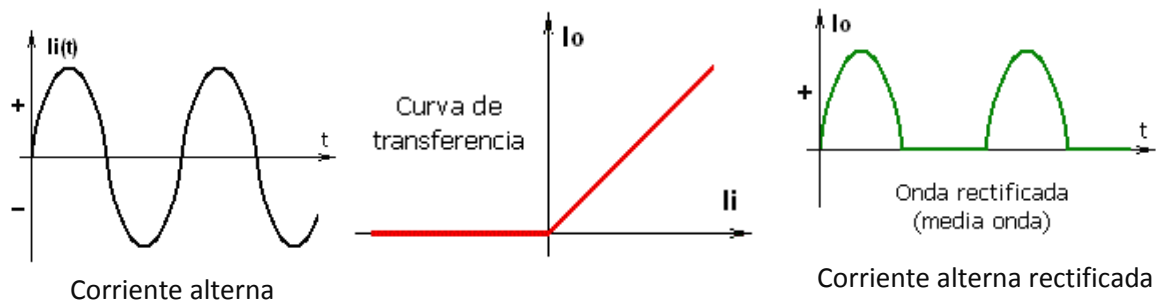


Para que un diodo esté polarizado directamente, se debe conectar el polo positivo de la batería al ánodo del diodo y el polo negativo al cátodo. Para que un diodo esté polarizado inversamente, se debe conectar el polo positivo de la batería al cátodo del diodo y el polo negativo al ánodo (Hermosa, 1999).

1.3.2. Rectificación de media onda.

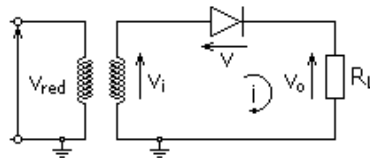
El rectificador de media onda es un circuito empleado para eliminar la parte negativa o positiva de una señal de corriente alterna de entrada (I_i) convirtiéndola en corriente directa de salida (I_o) (Fig. 13).

Figura 13. Corriente alterna rectificada en un rectificador de media onda.



El circuito más sencillo de un rectificador de media onda puede construirse con un diodo (Fig. 14).

Figura 14. Rectificador de media onda.



Los diodos permiten el paso de toda la corriente en una única dirección, la correspondiente a la polarización directa, y no conducen cuando se polarizan inversamente. Además, su voltaje es positivo.

Polarización directa ($V_i > 0$)

En este caso, el diodo permite el paso de la corriente sin restricción, provocando una caída de potencial que suele ser de 0,7 V. Este voltaje de 0,7 V se debe a que usualmente se utilizan diodos de silicio. En el caso del germanio, que es el segundo más usado, la caída de potencial es de 0,3 V.

$$V_o = V_i - V_D \rightarrow V_o = V_i - 0,7 \quad (19)$$

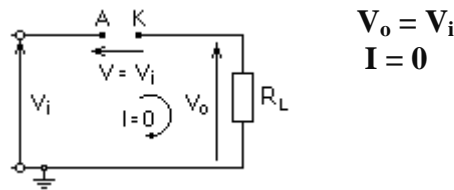
y la intensidad de la corriente puede fácilmente calcularse mediante la ley de Ohm:

$$I = \frac{V_o}{R_L} \quad (20)$$

Polarización inversa ($V_i < 0$)

En este caso, el diodo no conduce, quedando el circuito abierto. El voltaje de salida es igual a la tensión de entrada, y la intensidad de la corriente es nula (Fig. 15):

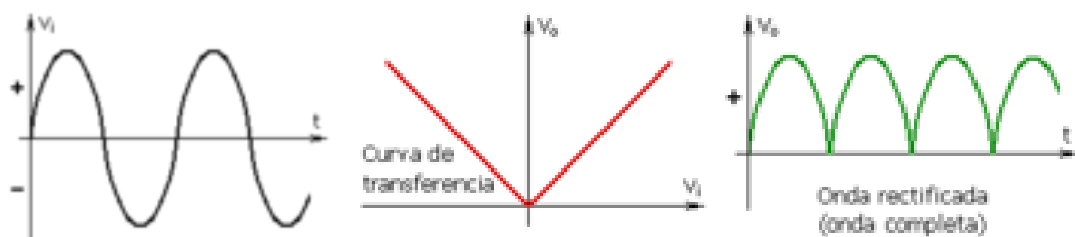
Figura 15. Polarización inversa de rectificador de media onda.



1.3.3 Rectificación de onda completa.

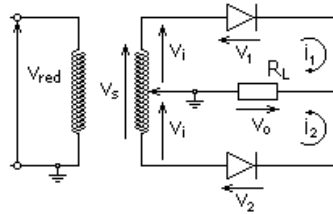
Un rectificador de onda completa es un circuito empleado para convertir una señal de corriente alterna de entrada (I_i) en corriente continua de salida pulsante (I_o) (Fig. 16). A diferencia del rectificador de media onda, en este caso, la parte negativa de la señal se convierte en positiva o bien la parte positiva de la señal se convertirá en negativa, según se necesite una señal positiva o negativa de corriente continua (Hermosa, 1999).

Figura 16. Corriente alterna rectificada en un rectificador de onda completa.



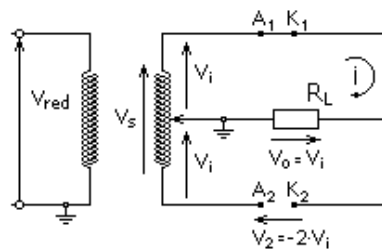
Existen dos variantes de rectificador de onda completa con dos diodos (Fig. 15) o empleando cuatro diodos (puente de Graetz) (Fig. 17).

Figura 17. Rectificador con dos diodos.



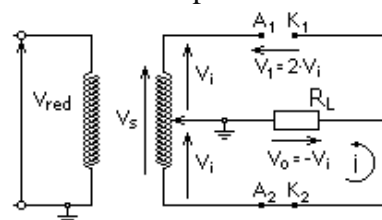
En el circuito de la figura 17, ambos diodos no pueden encontrarse simultáneamente en directa o en inversa, debido a que las diferencias de potencial a las que están sometidos son de signo contrario; por tanto uno se encontrará polarizado inversamente y el otro directamente. El voltaje de entrada (V_i) es, en este caso, la mitad de la tensión del secundario del transformador (Fig. 18).

Figura 18. Voltaje de entrada positivo en diodos en rectificador de onda completa.



El diodo 1 se encuentra en polarizado directamente (conduce), mientras que el 2 se encuentra en inversa (no conduce). El voltaje de salida es igual a la de entrada. El diodo 2 ha de soportar en inversa el voltaje máximo del secundario (Fig. 19).

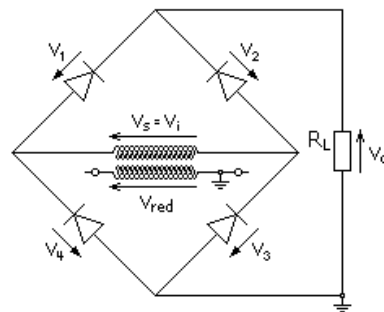
Figura 19. Voltaje de entrada negativo en diodos en rectificador de onda completa.



El diodo 2 se encuentra en directa (conduce), mientras que el diodo 1 se encuentra en inversa (no conduce). La tensión de salida es igual a la de entrada pero de signo contrario. El diodo 1 ha de soportar en inversa la tensión máxima del secundario (Fig. 19).

En el que se emplean cuatro diodos puente rectificador de Graetz (Fig. 20). Al igual que antes, sólo son posibles dos estados de conducción, o bien los diodos 1 y 3 están en directa y conducen (voltaje positivo) o por el contrario son los diodos 2 y 4 los que se encuentran en inversa y conducen (voltaje negativo).

Figura 20. Puente rectificador de Graetz o rectificador de doble onda.



A diferencia del caso anterior, ahora el voltaje máximo de salida es la del secundario del transformador (el doble de la del caso anterior), la misma que han de soportar los diodos en inversa, al igual que en el rectificador con dos diodos. Esta es la configuración usualmente empleada para la obtención de onda continua.

Voltaje rectificado

$V_o = V_i = V_s/2$ en el rectificador con dos diodos.

$V_o = V_i = V_s$ en el rectificador con puente de Graetz.

Si consideramos la caída de voltaje típica en los diodos en conducción, aproximadamente 0,6V; tendremos que para el caso del rectificador de doble onda la $V_o = V_i - 1,2V$.

1.4 Filtración de la corriente alterna.

Un filtro eléctrico o filtro electrónico es un elemento que discrimina una determinada frecuencia o gama de frecuencias de una señal eléctrica que pasa a través de él, modificando tanto su amplitud como su fase (Tufillaro et al., 1989).

La función de los filtros es impedir el paso del ruido eléctrico, por ejemplo; cuando estamos viendo la televisión u oyendo el radio, enciendes la licuadora y la imagen del televisor o el audio se distorsionan, pero con el arreglo los filtros y bobinas suprimen este ruido eléctrico.

1.4.1 Tipos de filtros.

Atendiendo a sus componentes constitutivos y la naturaleza de las señales que tratan, los filtros se clasifican en **filtros pasivos** y **activos**.

Filtro pasivo: Es el constituido únicamente por combinaciones en serie o paralelo de los componentes pasivos como condensadores, bobinas y resistencias.

Filtro activo: Es aquel que puede presentar ganancia en toda o parte de la señal de salida respecto a la de entrada. En su implementación se combinan elementos activos (transistores o amplificadores) y pasivos (condensadores, bobinas y resistencias). Siendo frecuente el uso de amplificadores operacionales, que permite obtener resonancia y un elevado factor de calidad Q sin el empleo de bobinas.

En los sistemas de comunicaciones se emplean filtros para dejar pasar solo las frecuencias que contengan la información deseada y eliminar las restantes. Los filtros son usados para dejar pasar solamente las frecuencias que pudieran resultar ser de alguna utilidad y eliminar cualquier tipo de interferencia o ruido ajeno a ellas.

1.4.2 Rizado de la corriente alterna.

El rizado, algunas veces llamado fluctuación o *ripple* (del inglés), es la pequeña componente de corriente alterna que permanece tras rectificarse una señal a corriente continua. El rizado puede reducirse notablemente mediante un filtro de condensador, este proceso es llamado a veces "filtrar", y debe entenderse como la reducción a un valor mucho más pequeño de la componente alterna remanente tras la rectificación, pues, de no ser así, la señal resultante incluye un zumbido a 60 ó 50 Hz es muy molesto, por ejemplo, en los equipos de audio (Tufillaro et al., 1989).

Factor de rizado

El rizado usualmente se cuantifica mediante el factor de rizado y se calcula como el valor eficaz del voltaje de rizado sobre el voltaje en continuo medio por 100. El factor de rizado suele establecerse sobre el 10% o menos, siempre dependiendo de la aplicación.

$$F_r = \frac{(V_r)_{ef}}{V_o} 100 \quad (21)$$

La fórmula para calcular el voltaje de rizado de una fuente rectificadora y filtrada es la siguiente:

$$(V_r)_{pp} = \frac{I_L}{fC} 100 \quad (22)$$

donde,

$(V_r)_{pp}$ es el voltaje de rizado de pico a pico. Recordar que $(V_r)_{PP} = 2\sqrt{2}(V_r)_{ef}$
 I_L es la corriente continua que demanda la carga.

f es la frecuencia del rizado. Esta frecuencia es igual a f_{red} en un rectificador de media onda e igual a $2f_{red}$ en un rectificador de onda completa.

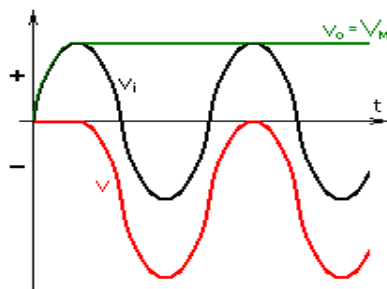
C es la capacidad del condensador.

1.4.3 Filtro de condensador.

Un filtro de condensador es un circuito eléctrico formado por la asociación de diodo y condensador destinado a filtrar o suavizar el rizado de la corriente eléctrica, dando como resultado una señal eléctrica de corriente continua cuya tensión no varía prácticamente en el tiempo. El circuito es el mismo que el empleado en la rectificación añadiendo un condensador, por lo que al igual que existen rectificadores de media onda y de onda completa existen filtros de condensador de media y onda completa.

Supongamos un diodo ideal, es decir, conduce polarizado en directa y no conduce polarizado en inversa e inicialmente el condensador está descargado. También, supongamos que el voltaje de entrada es senoidal. Al principio, por ser éste positivo polariza el diodo en directa y éste conduce, de modo que el voltaje en el condensador v_o es igual a la de entrada ($v_o = v_i$). Cuando se alcanza el máximo de voltaje (V_M) el condensador ha completado su carga y a partir de entonces la señal de entrada comienza a disminuir (Figura 21). Al ocurrir esto el condensador intenta descargarse a través del diodo pero como la polarización es inversa no conduce; el condensador no puede entonces descargarse quedando entre sus bornes una diferencia de potencial $v_o = V_M$ que se mantendrá permanentemente cualquiera que sea el voltaje de entrada. En definitiva, el voltaje senoidal de entrada, la corriente alterna, se ha convertido en corriente continua. Si por cualquier circunstancia la señal de entrada alcanzara un nuevo máximo $V'_M > V_M$, el condensador simplemente se cargaría hasta ese voltaje, obteniéndose luego una corriente continua de valor V'_M .

Figura 21. Esquema del funcionamiento del filtro por condensador.

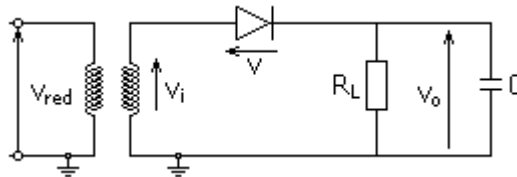


1.4.3.1 Filtro de condensador de media onda.

Un circuito RC sirve como filtro para hacer que el voltaje alterno se vuelva directo casi como el de una batería, debido a las pequeñas oscilaciones que tiene la salida del voltaje, las cuales son prácticamente nulas. La primera parte del circuito consta de una fuente de voltaje alterna, seguido de un diodo que en esta ocasión será ideal (simplemente para facilitar la comprensión del funcionamiento) y finalmente el filtro RC (Fig. 22).

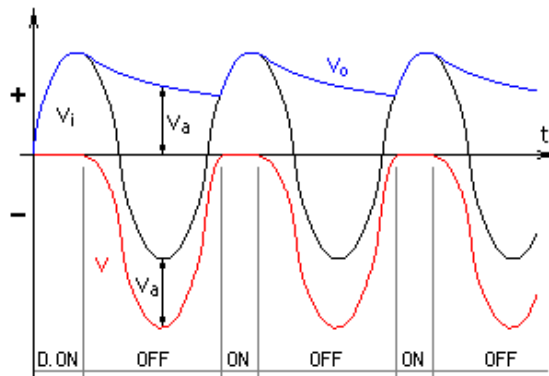
En un circuito real, el propósito de la conversión es alimentar algún dispositivo de corriente continua, por lo que en paralelo con el condensador existirá una carga representada por la resistencia R_L (Fig. 22).

Figura 22. Filtro por condensador de media onda.



En este caso el condensador puede, a partir del máximo del voltaje de entrada y con el diodo en inversa, descargarse a través de la carga.

Figura 23. Comportamiento del voltaje en un filtro por condensador de media onda.



A medida que el condensador se va descargando el voltaje de entrada va disminuyendo hasta alcanzar el mínimo para posteriormente aumentar; evidentemente siendo la entrada creciente y el voltaje en el condensador decreciente llega un punto en el que ambos valores coinciden, momento en el que el diodo se polariza en directa y el condensador comienza a recargarse hasta el siguiente máximo de voltaje de entrada (Fig. 23).

El voltaje en la carga no es ahora uniforme o constante, como sucedía en el caso anterior, sino aproximadamente triangular. En la práctica interesa que el voltaje sea lo más uniforme posible para lo cual el producto $R_L C$ deberá ser grande (condensadores de alta capacidad); situación en la que los tramos ascendente y descendente del voltaje de salida pueden, con suficiente aproximación, sustituirse por líneas rectas (Fig. 23).

Según las leyes de Kirchoff, la intensidad de la corriente que atraviesa el diodo (i_D) cuando conduce se distribuye luego entre la resistencia (i_L) y condensador (i_C), es decir:

$$i_D = i_L + i_C \quad (23)$$

Siendo $v_i = V_M \text{sen}(\omega t)$ el voltaje de entrada, $\omega = 2\pi f$, f : frecuencia de la corriente alterna y que es coincidente con la de la carga y el condensador (v_o) cuando el diodo conduce, las intensidades que atraviesan resistencia y condensador serán respectivamente:

$$i_L = \frac{V_o}{R_L} = \frac{V_M}{R_L} \text{sen}(wt) \quad (24)$$

$$i_C = C \frac{dV_o}{dt} = C w V_M \cos(wt) \quad (25)$$

Y por tanto:

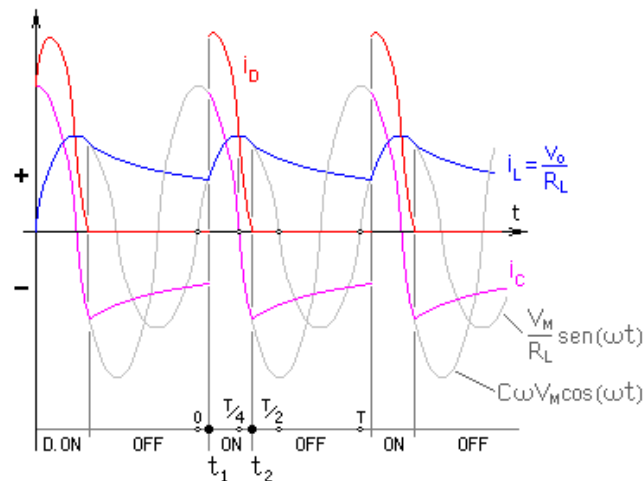
$$i_D = \frac{V_M}{R_L} \text{sen}(wt) + C w V_M \cos(wt) \quad (26)$$

Cuando la intensidad i_D se hace cero, el diodo deja de conducir. Esta condición se manifiesta en el instante t_2 tal que:

$$\text{Tg}(\omega t_2) = -C\omega R_L \quad (27)$$

donde el signo negativo expresa que tal condición, que aparece una vez superado el máximo de la tensión de entrada ($T/4$) (Fig. 24). En la práctica la diferencia es tan pequeña que se puede despreciar y admitir que el diodo comienza a conducir alcanzado el máximo del voltaje de entrada.

Figura 24. Comportamiento de la corriente que pasa por el diodo en un filtro por condensador de media onda.



El circuito funciona de la siguiente manera:

- 1) Entra la señal alterna al circuito, la cual se rectifica con el diodo. (Solo permite pasar un semi-ciclo de la señal, que en este caso es el semi-ciclo positivo)
- 2) En el momento que el voltaje sale del diodo el condensador se empieza a cargar y la caída de voltaje se recibe en la resistencia.
- 3) En el semi-ciclo negativo no hay voltaje por que el diodo no permite que fluya nada, entonces el condensador se empieza a descargar (la velocidad con la que se descarga depende de la capacitancia).
- 4) El condensador no se descarga por completo, entonces en el momento que otra vez empieza el semi-ciclo positivo el condensador se vuelve a cargar. A esta

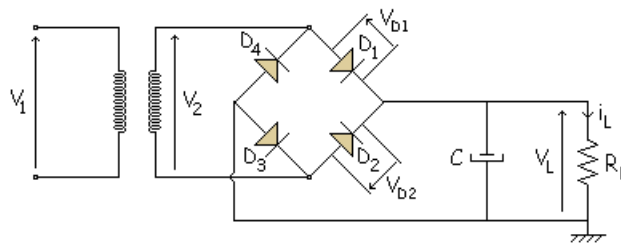
diferencia que existe se le conoce como voltaje de rizo (V_r) y la idea es que sea muy pequeña.

Este circuito puede usarse, en fuentes de alimentación para lograr transformar el voltaje alterno de la entrada en continua a la salida. Normalmente forma parte de circuitos de potencia más complicados como son los convertidores de potencia. En estos casos el valor del condensador debe ser alto. Ajustando el valor del condensador para que tenga un mayor margen de variación puede utilizarse este circuito para la demodulación de señales amplitud modulada (AM), el resultado es una señal parecida a la envolvente de la señal modulada. Para esta aplicación el valor del condensador es mucho menor que en la anterior y dependiente del índice de modulación.

1.4.3.2 Filtro de condensador de onda completa.

En un filtro de condensador de onda completa, el condensador siempre se pone en paralelo con la R_L (Fig. 25).

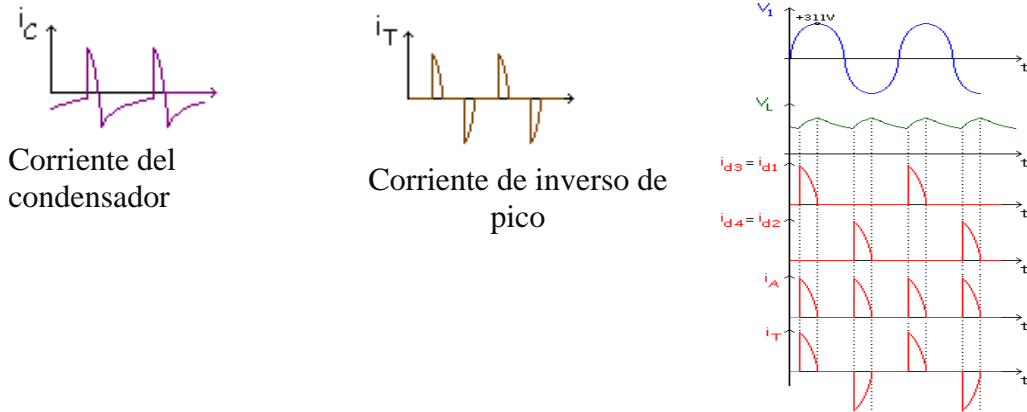
Figura 25. Circuito de filtro de onda completa.



Es parecido al anterior, cambia el valor de i_T . Conducen D_1 y D_3 en positivo y conducen D_2 y D_4 en el semiciclo negativo. En el transformador, el mismo bobinado sufre la intensidad, entonces tiene que soportar toda la intensidad, pero a veces hacia arriba y otras hacia abajo. Hay que diseñar el arrollamiento del hilo del secundario para que aguanten esos picos positivos y negativos.

Para el condensador sigue sirviendo lo visto anteriormente:

Figura 26. Comportamiento del voltaje y la corriente en un circuito de filtro de condensador de de onda completa.



La única diferencia está en la i_T y la VIP (voltaje inverso de pico). El voltaje inverso de pico (VIP) solo tiene que aguantar V_{P2} y no el doble de este valor como en el caso anterior (Fig. 26).

1.5 Circuito de cambio de fase.

Un circuito de cambio de fase es un dispositivo cuya función principal es cambiar la fase de propagación de una señal de entrada, es decir, producirá un cambio de fase de 180° entre las señales de entrada y de salida. Cualquier reactancia colocada en serie o en derivación con una línea de transmisión introduce cambios de fase y, por consiguiente hay un número ilimitado de posibles configuraciones de circuitos cambiadores de fase (Rehmark, 2000). Sin embargo, considerando dispositivos con mínimas pérdidas de inserción y reflexión, se reduce el número de circuitos prácticos. Cada uno ofrece ventajas con respecto al tamaño, ancho de banda, fase obtenida por elemento, etc.

Para un oscilador sostener las oscilaciones indefinidamente, la retroalimentación suficiente de la fase correcta, es decir la "retroalimentación positiva" debe proporcionarse con el amplificador que se emplea cuando se invierte una fase para

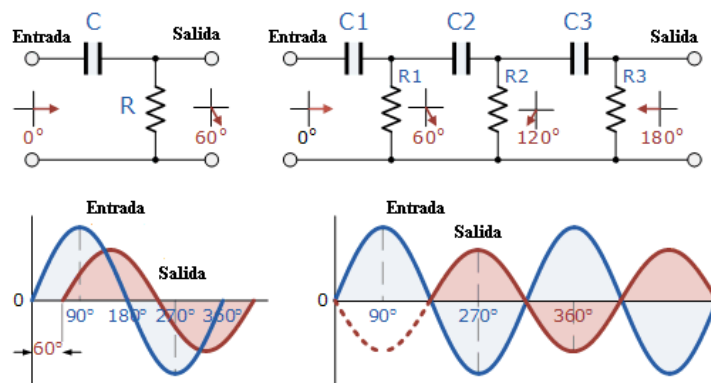
lograr esto. En un oscilador de RC la entrada se cambia 180° a través de la fase del amplificador y 180° de nuevo a través de una segunda fase de inversión dándonos " $180^{\circ} + 180^{\circ} = 360^{\circ}$ " de cambio de la fase, que es igual que 0° , de este modo nos da la retroalimentación positiva requerida. En otros términos, el cambio de la fase de la vuelta de la retroalimentación debe ser "0."

Un oscilador de cambio de fase consiste en un amplificador de ganancia negativa con una realimentación constituida por una sección RC de tercer orden en escalera. Esta red de realimentación introduce un desfase de 180° para ser compatible con la ganancia negativa del amplificador que introduce a su vez otro desfase de 180° . La condición de oscilación exige que la red de realimentación introduzca un desfase de 180° para ser compatible con la ganancia negativa del amplificador que introduce a su vez otro desfase de 180° (Rehmark, 2000).

En un oscilador de Resistencia-Condensador (Oscilador RC), el cambio de la fase aparece entre la entrada a una red de RC y la salida de la misma red usando los elementos de RC en la rama de retroalimentación.

Red de cambio de fase

Figura 27. Red de circuito de cambio de fase.



El circuito a la izquierda muestra una sola red de resistencia-condensador y cuyo voltaje de salida "cambia" al voltaje de entrada en algún ángulo menos de 90°

(Fig. 27). Un circuito de RC ideal produciría un cambio de la fase de exactamente 90^0 . El valor del cambio de fase real en el circuito depende en los valores de la resistencia y el condensador y la frecuencia escogida de las oscilaciones con el ángulo de la fase (β) dándose como **ángulo de fase**.

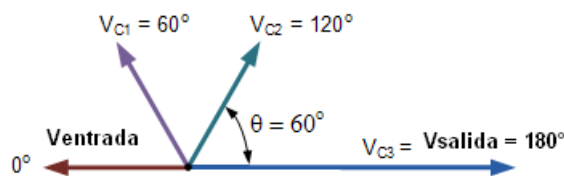
Angulo de fase

$$X_c = \frac{1}{2\pi fC} \quad R = R, \quad Z = \sqrt{R^2 + (X_c)^2}, \quad \beta = \arctang \frac{X_c}{R} \quad (28)$$

donde f : es la frecuencia de salida en Hz, R: resistencia en Ohm y C: es la capacitancia en Faradays.

En nuestro ejemplo anterior, los valores de R y C han sido escogidos de modo que la frecuencia requerida del voltaje de salida cambie el voltaje de la entrada por un ángulo de aproximadamente 60^0 (Fig. 28). Entonces el ángulo de fase entre cada sección de RC sucesiva aumenta por otro 60^0 dando una diferencia de fase entre la entrada y la salida de 180^0 (3×60^0) como se muestra en el diagrama del vector siguiente.

Figura 28. Voltaje en entrada y salida en un circuito de cambio de fase.



Entonces, conectando tres redes RC juntos en serie, podemos producir un cambio de fase total en el circuito de 180^0 a la frecuencia seleccionada y esto forma las bases de un “oscilador de cambio de fase” conocido como circuito **oscilador RC**.

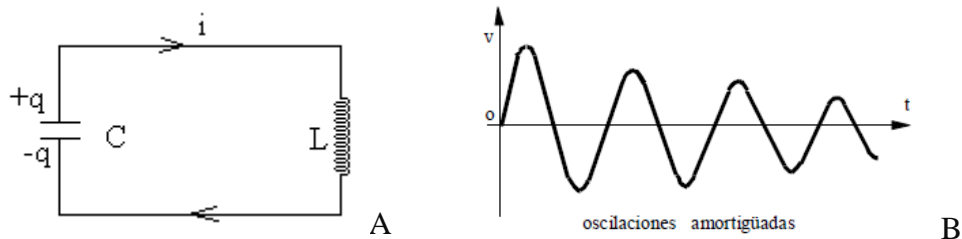
1.6. Oscilaciones electromagnéticas en un circuito LC.

Un circuito LC o circuito resonante es un circuito formado por una bobina L y un condensador C.

1.6.1 Circuito L-C en serie.

Sea el circuito LC en serie, supongamos que cargamos el condensador a una diferencia de potencia V_0 y una carga $q = CV_0$ y después cerramos el interruptor (Fig. 29a).

Figura. 29. a) Circuito LC en serie. b) Señal de descarga del condensador.



Una vez cargado, el condensador empieza a descargarse a través del inductor, debido a la fem (voltaje) inducida en el inductor, la corriente no puede cambiar de manera instantánea; empieza en cero y finalmente crece hasta llegar a un valor máximo I_0 (Fig. 29b). Durante este crecimiento, el condensador se está cargando. En cada instante, el potencial del condensador es igual a la fem inducida, de modo que a medida que el condensador se descarga, la razón de cambio de la corriente disminuye. Cuando el potencial en el condensador se hace cero, la fem inducida también es cero y la corriente ha llegado a su valor máximo I_0 . Durante la descarga del condensador, la corriente creciente en el inductor ha producido un campo magnético en el espacio que lo rodea y la energía que estaba almacenada en el campo eléctrico del condensador ahora está en el campo magnético del inductor (Purcell, 1969; Alonso y Finn, 1970; Sears et al., 2008).

Una vez descargado el condensador (y almacenada toda su energía en la bobina), éste comienza de nuevo a cargarse a expensas de la bobina, originándose una corriente en el circuito en sentido contrario al de la descarga. Una vez cedida toda la energía de la bobina al condensador, éste vuelve nuevamente a descargarse sobre la bobina y así sucesivamente.

El resultado es la circulación, por el circuito, de una corriente oscilante o alterna. Si no hubiera pérdidas, sobre todo en la resistencia asociada de la bobina, en el circuito, las oscilaciones mantendrían su amplitud indefinidamente. Pero debido a las pérdidas, dicha corriente se va amortiguando poco a poco hasta desaparecer totalmente (Fig. 29b). La frecuencia de oscilación se denomina frecuencia propia y toma la expresión siguiente: $f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$

Desde el punto de vista energético, las oscilaciones de un circuito eléctrico transfieren energía del campo eléctrico del condensador al campo magnético del inductor y viceversa. La energía total asociada con el circuito es constante.

1.6.1.1 Respuesta natural del circuito LC.

Para estudiar el flujo de carga, analizaremos cuantitativamente el circuito. Supongamos que el condensador inicialmente está cargado a un voltaje V_0 (Nocettiy y Blenkman, 2002). Aplicando la ley de las mallas de Kirchoff al circuito LC, obtenemos

$$V_C + V_L = 0 \quad (29)$$

Donde V_C es el voltaje en el condensador, que es igual a q/C y V_L es el voltaje en el inductor, que es igual a Ldi/dt . Sustituyendo dichas expresiones en la ecuación (26), obtenemos la ecuación diferencial siguiente:

$$L \frac{di}{dt} + \frac{q}{C} = 0 \quad (30)$$

donde la carga del condensador en el instante t es $q(t)$ y la intensidad de la corriente que circula es $i(t)=dq/dt$; de aquí se obtiene la siguiente ecuación diferencial lineal ordinaria de segundo orden homogénea:

$$\frac{d^2q}{dt^2} + \frac{1}{LC} q = 0$$

$$\frac{d^2q}{dt^2} + w^2 q = 0 \quad (31)$$

donde $\omega = \sqrt{\frac{1}{LC}}$ es la frecuencia angular de oscilación. La ecuación diferencial anterior puede resolverse proponiendo soluciones del tipo (Borrelli y Courtney, 2002):

$$q = q_m \text{sen}(\omega t + \beta) \quad (32)$$

donde q_m : es la carga máxima del condensador, ω : es la frecuencia angular de oscilación y β fase inicial. Ahora, la corriente instantánea $i = dq/dt$ esta dada por

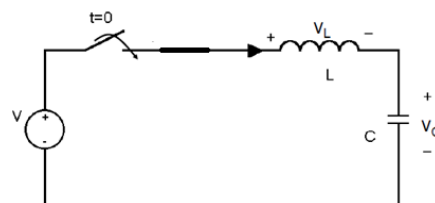
$$i(t) = q_m \omega \cos(\omega t + \beta) \quad (33)$$

Por tanto, la carga y la corriente en un circuito LC en serie sin alimentación externa oscilan de manera senoidal y cosenoidal con el tiempo, con una frecuencia angular determinada por los valores de L y C. La frecuencia ordinaria f es igual a $\omega/2\pi$ y las constantes q_m y β están determinadas por las condiciones iniciales. Si en el instante $t = 0$ el condensador tiene su carga máxima q_m y la corriente i son cero, entonces $\beta = 0$. Si $q = 0$ en el instante $t = 0$, entonces $\beta = \pm\pi/2$ rad.

1.6.1.2 Respuesta forzada del circuito LC.

En este caso el circuito está sometido a una fuente de voltaje externo periódico, $V(t)$ (Fig. 30).

Figura 30. Circuito LC en serie con fuente de voltaje externo periódico.



Aplicando la ley de las mallas de Kirchhoff, obtenemos que,

$$V_C + V_L = V_o \text{ sen}(wt) \quad (34)$$

Donde V_C es el voltaje en el condensador, que es igual a q/C y V_L es el voltaje en el inductor, que es igual a $L di/dt$ (Josebachuili y Zurita, 2005). Sustituyendo dichas expresiones en la ecuación (31), obtenemos la ecuación diferencial siguiente:

$$L \frac{di(t)}{dt} + V_C = V_o \text{ sen}(wt) \quad (35)$$

como $i(t) = c \frac{dV(t)}{dt}$, $\frac{di(t)}{dt} = c \frac{d^2V(t)}{dt^2}$, sustituyéndolos en la ecuación (32), obtenemos

$$\begin{aligned} \frac{d^2V}{dt^2} + \frac{1}{LC} V &= \frac{1}{LC} V_o \text{ sen}(wt) \quad (36) \\ \frac{d^2V}{dt^2} + w^2 V &= w^2 V_o \text{ sen}(wt) \end{aligned}$$

donde $w = \sqrt{\frac{1}{LC}}$ es la frecuencia angular de oscilación. La expresión (33) es una ecuación diferencial ordinaria de segundo orden no homogéneo. La solución de dicha ecuación diferencial esta dada por una solución general de la ecuación homogénea y la solución particular de la no homogénea (Kiseliov, 1988), que tiene la forma siguiente:

$$V(t) = V_m \cos(w t + \beta) + \frac{V_o \text{ sen}(wt)}{w^2} \quad (37)$$

donde V_m : es la carga máxima del condensador, w : es la frecuencia angular de oscilación y β fase inicial. Ahora, la corriente instantánea en el condensador esta dada por $i(t) = c \frac{dV(t)}{dt}$, entonces la corriente se determina por la expresión:

$$i(t) = -V_m c w \text{ sen}(w t + \beta) + \frac{V_o \cos(wt)}{w} \quad (38)$$

mientras que la carga $q(t) = \int_0^t i(t)dt$ toma la forma siguiente:

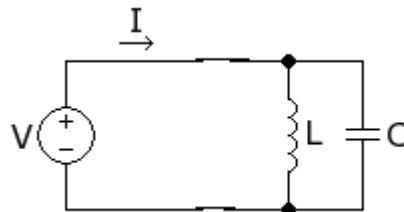
$$q(t) = V_m c w \cos (w t + \beta) + \frac{V_0 \text{sen}(wt)}{w} \quad (39)$$

Por tanto, la carga, el voltaje y la corriente en un circuito LC en serie con alimentación externa periódica oscilan de manera senoidal y cosenoidal con el tiempo, con una frecuencia angular determinada por los valores de L y C. La frecuencia ordinaria f es igual a $w/2\pi$ y las constantes V_m y β están determinadas por las condiciones iniciales.

1.6.2 Circuito L-C en paralelo

Sea el circuito LC en paralelo, supongamos que cargamos el condensador a una diferencia de potencia V_0 y una carga $q = CV_0$ y después cerramos el interruptor (Fig. 31).

Figura 31. Circuito LC en paralelo.



1.6.2.1 Respuesta natural del circuito LC.

Ahora el voltaje es el mismo en cada componente, pero la corriente es diferente, donde I_L es la corriente que circula por el inductor, que es igual a $\frac{1}{L} \int V dt$, mientras que I_C es la corriente que circula por el condensador, que es igual a $c \frac{dV}{dt}$. Aplicando la ley de Kirchoff de los nodos, obtenemos que:

$$I_L + I_C = 0 \quad (40)$$

Sustituyendo las expresiones mencionadas de la corriente en el inductor y condensador, obtenemos la ecuación diferencial siguiente:

$$\frac{1}{L} \int V dt + c \frac{dV}{dt} = 0 \quad (41)$$

$$\frac{d^2V}{dt^2} + w^2 V = 0$$

La ecuación diferencial ordinaria anterior, admite soluciones del tipo:

$$V(t) = V_m \text{sen}(wt + \beta) \quad (42)$$

donde V_m : es el voltaje máximo, w : es la frecuencia angular de oscilación y β fase inicial. Ahora, la corriente instantánea en el condensador $i_c(t) = c \frac{dV}{dt}$ esta dada por

$$i_c(t) = V_m c w \cos(wt + \beta) \quad (43)$$

Mientras que la corriente en inductor $i_L(t) = \frac{1}{L} \int V dt$ toma la forma siguiente:

$$i_L(t) = -V_m L \cos(wt + \beta) \quad (44)$$

1.6.2.2 Respuesta Forzada del circuito LC.

En este caso el circuito está sometido a una fuente de corriente externa periódica $I(t)$:

$$I_L + I_c = I_o \text{sen}(wt) \quad (45)$$

Sustituyendo las expresiones mencionadas de la corriente en el inductor y condensador, obtenemos la ecuación diferencial siguiente:

$$\frac{1}{L} \int V dt + c \frac{dV}{dt} = I_o \text{sen}(wt)$$

$$\frac{d^2V}{dt^2} + w^2 V = I_o \text{sen}(wt) \quad (46)$$

La ecuación (34) es diferencial ordinaria de segundo orden no homogéneo. La solución de dicha ecuación esta dada por una solución general de la ecuación homogénea y la solución particular de la no homogénea ((Josebachuili y Zurita, 2005), que toma la expresión siguiente:

$$V(t) = V_m \text{sen}(wt + \beta) + \frac{V_0 \text{sen}(wt)}{w^2} \quad (47)$$

donde V_m : es el voltaje máximo, w : es la frecuencia angular de oscilación y β fase inicial. ahora, la corriente instantánea en el condensador $i_c(t) = C \frac{dV}{dt}$ esta dada por

$$i_c(t) = V_m c w \cos(wt + \beta) + \frac{V_0 \text{sen}(wt)}{w} \quad (48)$$

Mientras que la corriente en inductor $i_L(t) = \frac{1}{L} \int V dt$ toma la forma siguiente:

$$i_L(t) = -V_m L \cos(wt + \beta) - \frac{V_0 \cos(wt)}{w^2} \quad (49)$$

CAPITULO II

MATERIALES Y METODOS

El trabajo experimental se desarrollo en el laboratorio de Física I del departamento de Ciencias Básicas, Facultad de Ciencias Técnicas, Universidad de Granma, donde se empleo una instalación experimental automatizada compuesta por una microcomputadora modelo “LG”, una interfase modelo “HPCI-1” (Physics Laboratory V4.0, U-Star Sensor Technology, Beijing, China), cable en serie de la conexión de la interface hacia la computadora, circuitos experimentales de corriente alterna modelo “HPCI06” y circuito RLC modelo “HPCI04”, alambres de conexión para circuito RLC y los sensores de voltaje B modelo “HPCI-1-B14”, D modelo “HPCI-1-B16” y E modelo “HPCI-1-B17” (Fig. 32 y 33). Se empleo un automatizado por computadoras que consistió en conectar los circuitos de corriente alterna y RLC a la interface HPCI-1 y sus correspondientes sensores de corriente y de voltaje.

2.1 Componentes del sistema y parámetros Técnicos.

El siguiente esquema muestra la conexión de los elementos utilizados en la instalación experimental.

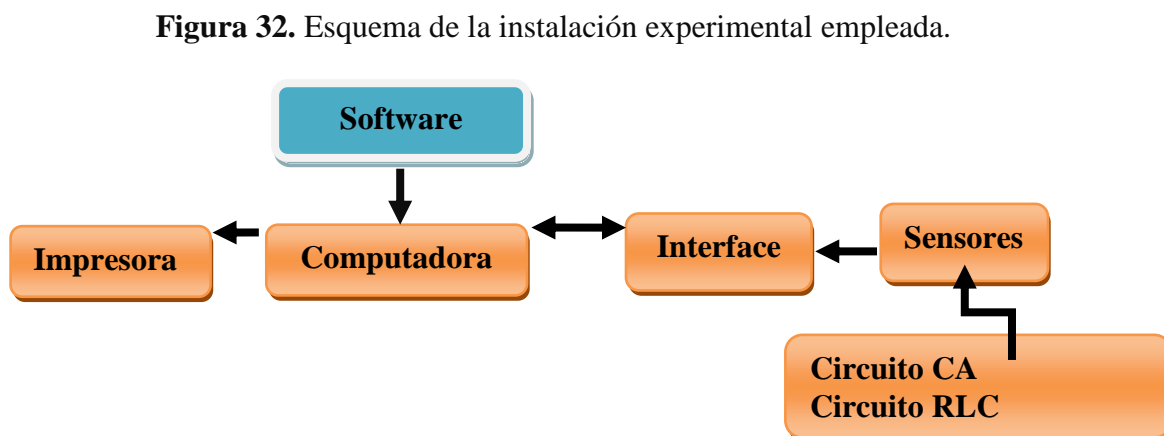
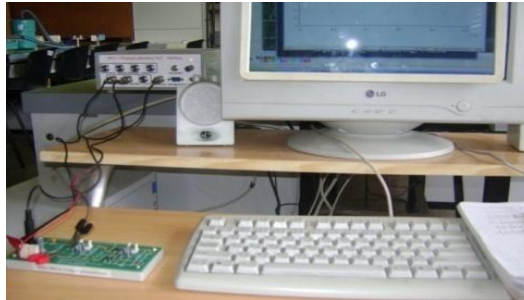


Figura 33. Foto de los componentes empleados en la instalación experimental.



2.1.1 Interfase experimental.

La interface “HPCI-1” funciona con corriente alterna de 110v a 60 Hz de frecuencia y posee 4 canales digitales que permite trabajar al mismo tiempo a una potencia máxima de 30 Watts (Fig. 34). Además, dicho sistema posee 4 sensores de voltaje con los cuales se puede estudiar el comportamiento de la corriente alterna en un circuito RC en serie, RC en paralelo con rectificador de media onda y onda completa, el filtrado de la corriente alterna con filtros de condensadores de media onda y onda completa, los cambios de fase que experimental la corriente de entrada con relación a la corriente de salida de un circuito y las oscilaciones electromagnéticas en diversos circuitos, donde todos los resultados tanto numéricos como gráficos se registran en la pantalla del ordenador.

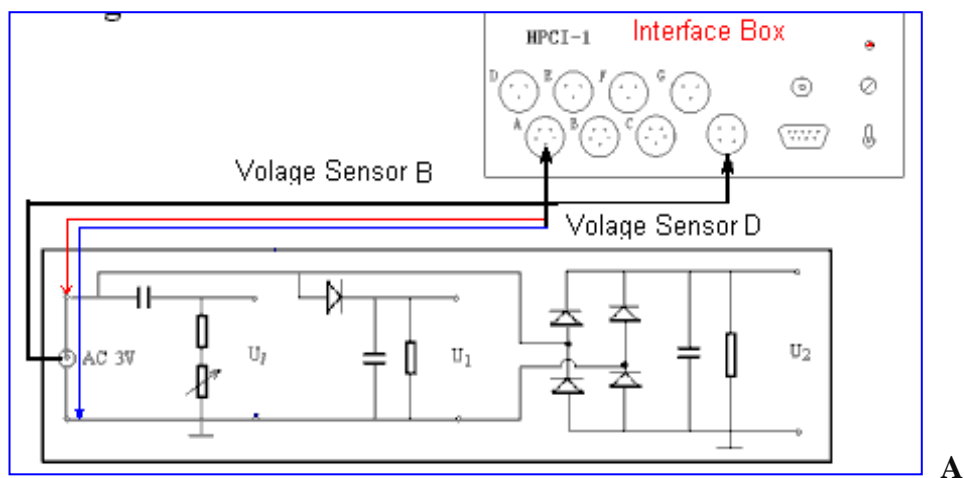
Figura 34. Foto de la interface modelo “HPCI-1“ Physics Laboratory V4.0.



2.2 Caracterización de la corriente eléctrica alterna de un circuito RC en serie, RC en paralelo con rectificador de media onda y onda completa.

Para la caracterización de la corriente eléctrica alterna en un circuito RC en serie, RC en paralelo con rectificador de media onda y onda completa, se empleó el circuito experimental siguiente (Fig. 35a y 35b). Para ello, conectamos un extremo del sensor de voltaje D con el enchufe de corriente alterna auxiliar de la interface y el otro extremo con el circuito de corriente alterna “HPCI06” (Fig. 35c). Luego conectamos el sensor de voltaje B al canal A de la interface y el otro extremo con los bornes respectivos de los extremos de la señal del circuito de corriente alterna y de la salida a tierra. Luego, determinamos el comportamiento y el oscilograma de la corriente alterna en cada una de estas configuraciones de circuito.

Figura 35. a) Circuito experimental de corriente alterna “HPCI06”, b) Foto del circuito de corriente alterna, c) sensores de voltaje B y D.



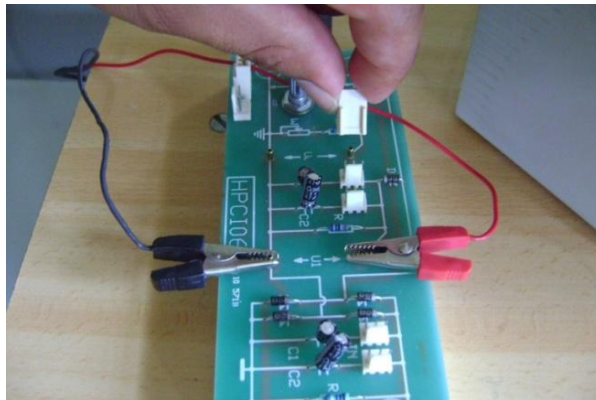
B

C

2.3 Determinación del comportamiento de la corriente alterna filtrada con filtros de condensadores de media onda y onda completa.

Para la caracterización de la corriente alterna filtrada con filtros de condensadores de media onda y onda completa, se empleo el circuito experimental siguiente (Fig. 35a y 35b), pero se conectó el enchufe blanco en el lugar donde aparecen las espigas de los dos condensadores en el circuito RC en paralelo con un diodo rectificador y RC en paralelo con cuatros diodos o puente rectificador (Fig. 36). Luego, conectamos un extremo del sensor de voltaje D con el enchufe de corriente alterna auxiliar de la interface y el otro extremo con el circuito de corriente alterna “HPCI06” (Fig. 36). Luego conectamos el sensor de voltaje B al canal A de la interface y el otro extremo con los bornes respectivos de los extremos de la señal del circuito de corriente alterna y de la salida a tierra. Luego, determinamos el comportamiento y el oscilograma de la corriente alterna en cada una de estas configuraciones de circuito.

Figura 36. Circuito experimental para el filtrado de corriente alterna.

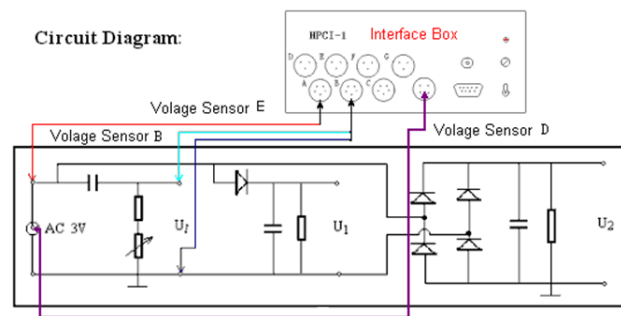


2.4 Determinación de los cambios de fase en un circuito RC en serie.

Para la caracterización de los cambios de fase de la corriente de entrada con relación a la de salida, se empleo el circuito experimental siguiente (Fig. 37). Luego, conectamos un extremo del sensor de voltaje D con el enchufe de corriente alterna auxiliar de la interface y el otro extremo con el circuito de corriente alterna “HPCI06”. Después conectamos un extremo del sensor de voltaje E con el canal

A de la interface y el otro extremo con el extremo de entrada de la entrada de corriente al circuito. Luego, determinamos el comportamiento y el oscilograma de la corriente alterna de entrada y de salida en cada una de estas configuraciones de circuito.

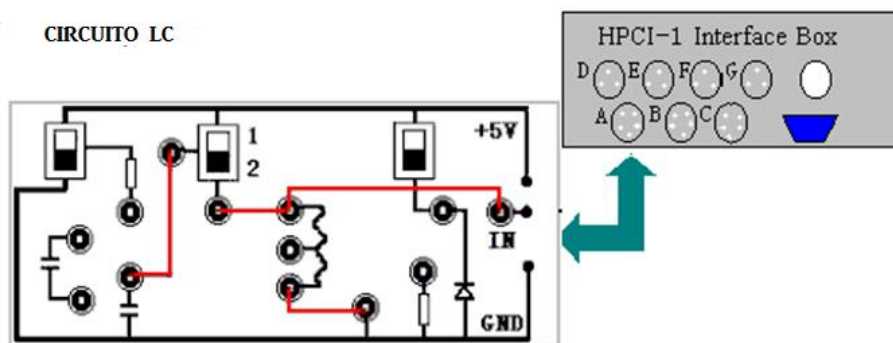
Figura 37. Circuito experimental “HPCI06” para el cambio de fase de la corriente alterna de entrada.



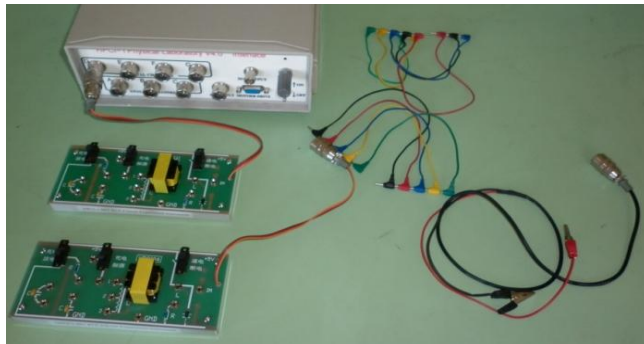
2.5 Estudio de las oscilaciones electromagnéticas en un circuito LC.

Para el estudio de las oscilaciones electromagnéticas en un circuito LC en serie y en paralelo con y sin alimentación externa, se empleó el circuito experimental siguiente (Fig. 38^a y 38b). Luego con los alambres de conexión, conectamos el circuito LC en serie y después en paralelo. Después conectamos de dicho circuito con el canal A de la interface y determinamos las oscilaciones electromagnéticas producidas durante la descarga del condensador tanto en el circuito LC en serie como en paralelo.

Figura 38. a) Circuito experimental de corriente LC.



A



B

Las oscilaciones electromagnéticas que se producen en los circuitos LC en serie y paralelo son particularmente convenientes para el uso de un software específico (la interface HPCI-1), la cual nos permite capturar los datos en un ordenador ““HPCI-1 Computer Assist Physics Laboratory CAE” y realizar un tratamiento gráfico de la familia de curvas (oscilaciones) correspondientes a cada solución particular, para poder hacer un análisis e interpretación gráfica de las señales obtenidas de la situación problemática, pues de otra forma no es posible en un tiempo razonable.

2.6 Análisis de datos e información gráfica.

Todos los datos y la información gráfica fueron almacenados y capturados directamente en la pantalla del ordenador con el software “Computer Aided Physics Laboratory”, versión 4.0, 2006 (Beijing Kemingyan Technology, China).

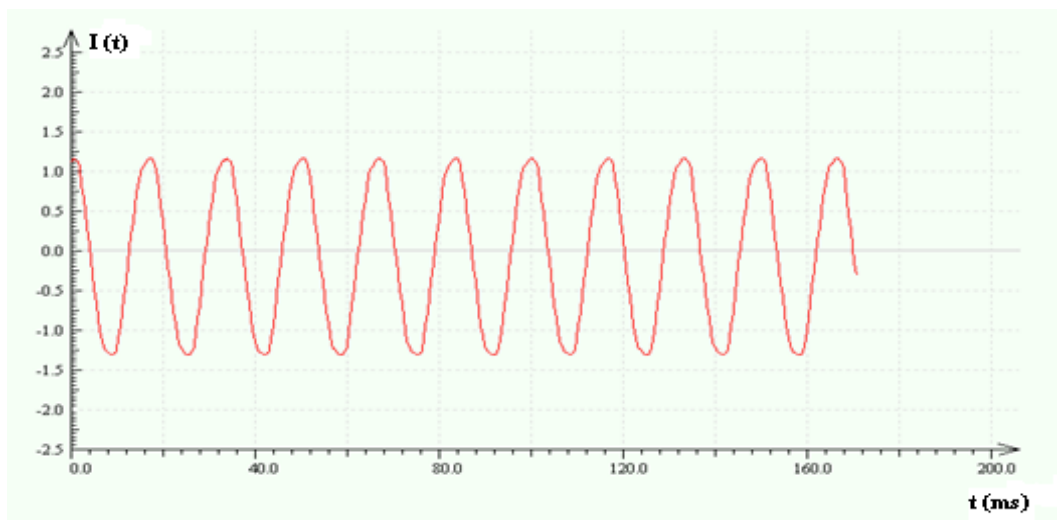
CAPITULO III

ANALISIS Y DISCUSION DE LOS RESULTADOS

3.1 Corriente eléctrica alterna de un circuito RC en serie.

El oscilograma de la corriente eléctrica alterna en un circuito RC en serie tiene la forma de onda senoidal con una frecuencia de 60 Hz, que coincide con la forma de la onda y la frecuencia del voltaje de alimentación (Fig. 39). Se determinó el valor máximo de la corriente (1.3A), el valor pico a pico (0), el valor promedio (0.82 A) y el valor efectivo de la corriente (0.92A), así como el período de las oscilaciones que es de 12 ms.

Figura 39. Señal de corriente alterna en un circuito RC en serie.

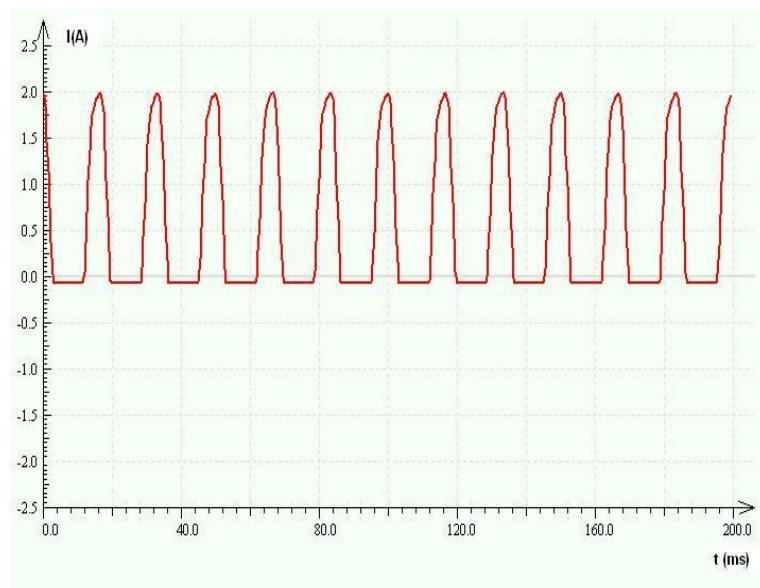


3.2 Corriente eléctrica alterna de un circuito RC en paralelo con rectificador de media onda.

El oscilograma de la corriente eléctrica alterna en un circuito RC en paralelo con rectificador de media onda muestra que la parte negativa de la señal de corriente alterna de entrada se elimina y se convierte en corriente directa de salida (Fig. 40),

lo que demuestra que el diodo está conectado en directa. También, se determinó el valor máximo de la corriente (2.0A), el valor promedio (1.27 A) y el valor efectivo de la corriente (1.41A), así como el período de las oscilaciones que es de 12 ms.

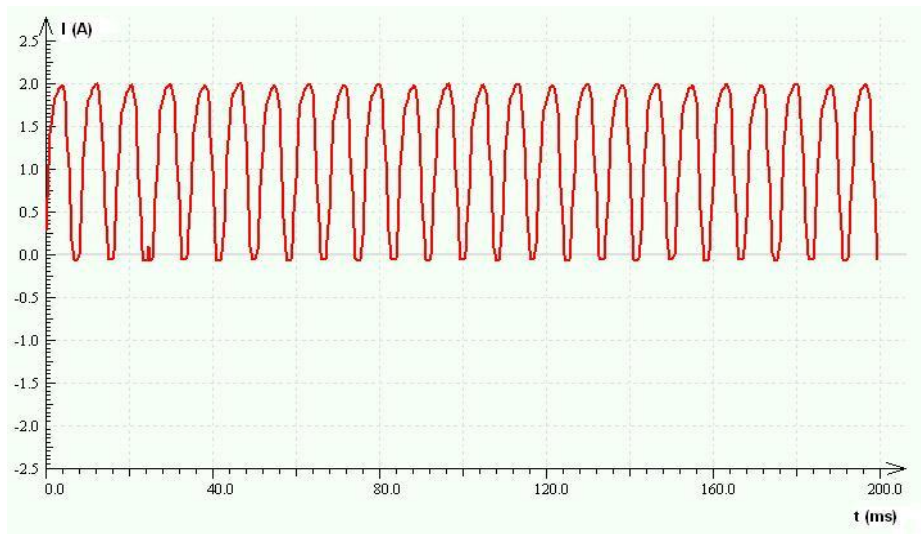
Figura 40. Señal de corriente alterna en un circuito RC en paralelo con rectificador de media onda.



3.3 Corriente eléctrica alterna de un circuito RC en paralelo con rectificador de onda completa.

El oscilograma de la corriente alterna en un circuito RC en paralelo con rectificador de onda completa indica que la parte negativa de la señal de corriente alterna de entrada se convierte en una señal de corriente continua pulsante (Fig. 41). También, se determinó el valor máximo de la corriente (2.0A), el valor promedio (1.27 A) y el valor efectivo de la corriente (1.41A), así como el período de las oscilaciones que es de 4 ms.

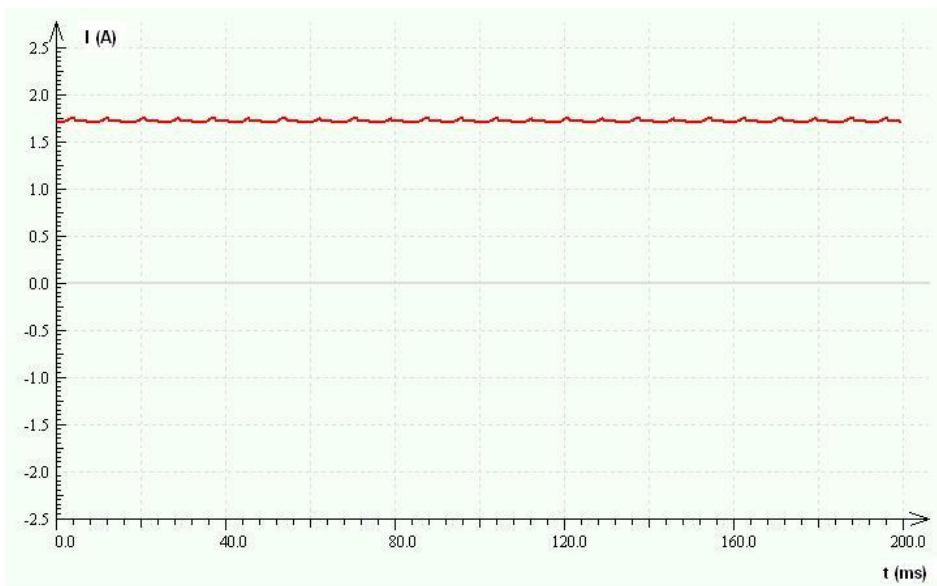
Figura 41. Señal de corriente alterna en un circuito RC en paralelo con rectificador de onda completa.



3.4 Corriente alterna filtrada con filtros de condensador de media onda.

El oscilograma de la corriente eléctrica alterna filtrada con filtros de dos condensadores de media onda refleja que se ha reducido el rizado de la componente de corriente alterna remanente tras la rectificación y por tanto se ha modificado la amplitud de la señal de corriente de entrada (Fig. 42).

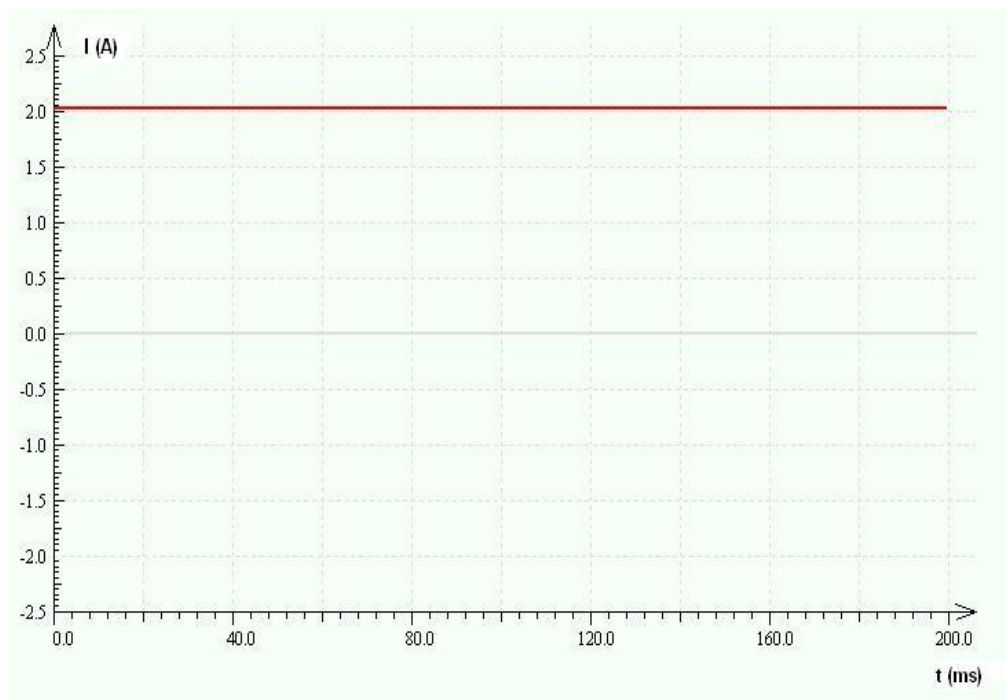
Figura 42. Señal de corriente alterna en un filtro de dos condensadores de media onda.



3.5 Corriente alterna filtrada con filtros de condensador de onda completa.

El oscilograma de la corriente eléctrica alterna filtrada con filtros de dos condensadores de onda completa muestra que se ha eliminado el rizado de la componente de corriente alterna remanente tras la rectificación y por tanto se ha modificado la amplitud de la señal de corriente alterna de entrada (Fig. 43).

Figura 43. Señal de corriente alterna en un filtro de dos condensadores de onda completa.



3.6 Cambios de fase en un circuito RC en serie.

El oscilograma de la corriente alterna de entrada y de salida en un circuito RC en serie indica que la corriente de salida en cada circuito ha cambiado la fase (180°) de propagación con relación a la corriente de entrada (Fig. 44y 45).

Figura 44. Señal de corriente alterna en un circuito RC en serie con conectado normalmente.

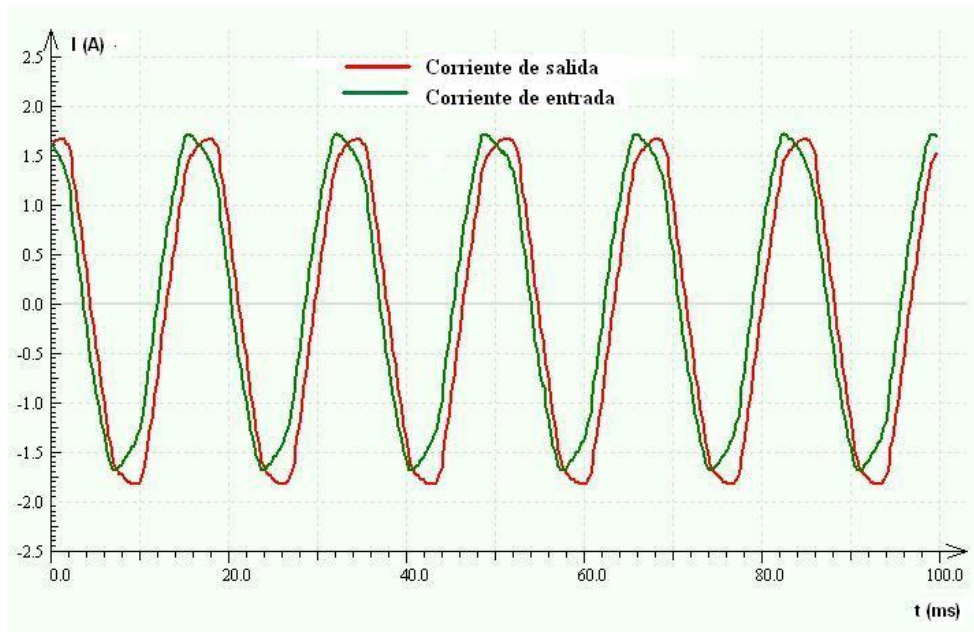
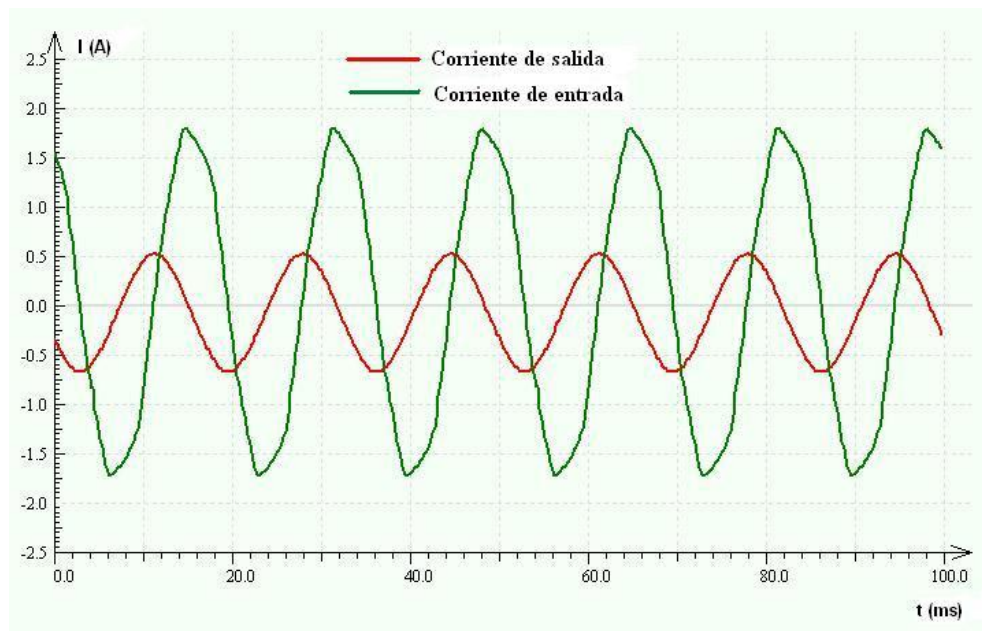


Figura 45. Señal de corriente alterna en un circuito RC en serie conectado como cambio de fase.

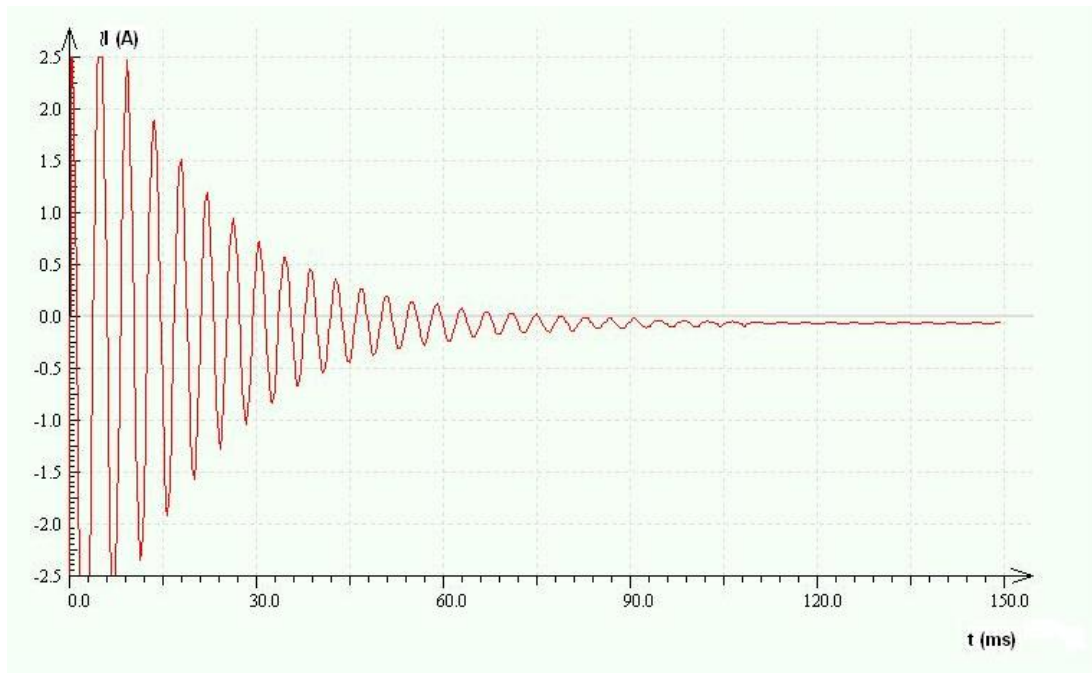


3.7 Oscilaciones electromagnéticas en un circuito LC en serie.

Los resultados muestran que oscilaciones electromagnéticas producidas por un circuito LC en serie se van amortiguando con el transcurso del tiempo hasta alcanzar los 114 ms, que corresponde con la descarga completa del condensador (Fig. 46). En este circuito oscilante la energía del campo eléctrico (a través de la descarga del condensador) es constantemente convertida en energía del campo magnético (almacenada en la bobina inductora), pero como el circuito tienen una resistencia interna, estas oscilaciones se van amortiguando hasta que desaparecen con el tiempo.

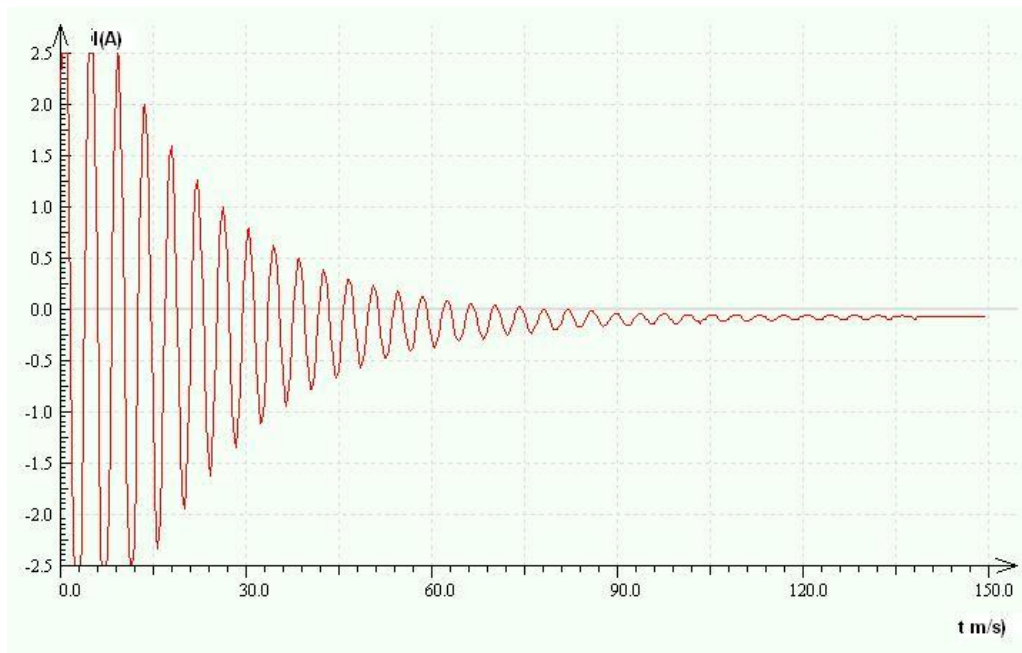
3.8 Oscilaciones electromagnéticas en un circuito LC en paralelo.

Figura 46. Oscilaciones electromagnéticas en un circuito LC en serie.



Las oscilaciones electromagnéticas producidas por un circuito LC en paralelo se van amortiguando con el transcurso del tiempo hasta alcanzar los 144 ms, que es cuando el condensador se descarga por completo (Fig. 47). Por lo tanto, las oscilaciones electromagnéticas en este circuito tiene un mayor intervalo de tiempo para amortiguarse que el circuito LC en serie.

Figura 47. Oscilaciones electromagnéticas en un circuito LC en paralelo.



III. CONCLUSIONES

- La forma de onda de corriente alterna de 60 Hz en un circuito RC en serie es senoidal.
- La forma de la onda de corriente alterna al pasar por un circuito RC en paralelo con rectificador de media onda se transforma, donde la parte negativa se convierte en corriente directa, mientras que en el rectificador de onda completa se transforma en corriente continua pulsante.
- La corriente alterna al pasar por un circuito RC en paralelo con filtros de condensadores de media onda y de onda completa se reduce considerablemente el rizado de la corriente y se convierte en corriente directa.
- La forma de onda de la corriente alterna de 60 Hz al atravesar un circuito RC en serie conectados en cambio de fase produce un cambio de fase de 180° en la señal de salida con relación a la señal de entrada.
- Los oscilaciones de los circuitos LC pueden describirse con una ecuación diferencial de segundo orden cuya solución general incluye varios modos de oscilación.
- Los circuitos LC conectados en serie deben ser estudiados considerando las impedancias, mientras los LC conectados en paralelo deben ser analizados teniendo en cuenta las admitancias.
- Las oscilaciones electromagnéticas en los circuitos LC se amortiguadas y se desvanecen para un período de tiempo largo por la resistencia interna del circuito.

IV. RECOMENDACIONES

- Diseñar circuitos de RC y LC experimentales para estudiar los fenómenos transitorios de formas de onda en condiciones de laboratorio.
- Incluir los circuitos cambio de fase dentro de los programas de estudios de la carrera de la ingeniería eléctrica.
- Estudiar las oscilaciones electromagnéticas que puedan satisfacer las condiciones de funcionamiento de los equipos eléctricos, electrónicos y de comunicación para evitar el ruido y el caos en el futuro.

V. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Alonso, M., E. J. Finn. 1970. Física, Volumen II “Campos y Ondas”. Fondo Educativo Interamericano, México.
- Agarwal, A. H. L. Jeffrey. 2005. Foundations of analog and digital electronic circuits. Morgan Kaufmann.
- Bohemia, www.bohemia.cubaweb.cu/2005/ene/03/sumarios/economia/articulo3.htm. 2006. Tomado 11 de Octubre.
- Borrelli, R., C. Courtney. 2002. Ecuaciones diferenciales: una perspectiva de modelación, Mexico, Oxford University Press.
- Castro, F. 2006. Discurso pronunciado por motivo de la culminación del montaje de los grupos electrógenos en Pinar del Río. Granma. La Habana. Enero 17, 2006.
- CEPAL. 2004. Anuario Estadístico de América Latina y el Caribe. Naciones Unidas.
- Cereijo, M. 2006. Cuba. Crisis de energía eléctrica. Revista Electrónica GUARACABUYA, 2006.
- Conejo, J., A. Clamagirand, J.L. Polo, N. Alguacil. N. 2004 .Circuitos Eléctricos para la Ingeniería. McGraw-Hill. Madrid. ISBN: 84-481-4179-2.
- EIA. 2005. System for the Analysis of Global Energy Markets. International Energy Annual. Washington, DC. Disponible en: www.eia.doe.gov/iea/
- EIA. 2009. System for the Analysis of Global Energy Markets. International Energy Annual. Washington, DC. Disponible en: www.eia.doe.gov/iea/.
- Faleski M. C. 2006. Transient behaviour of the driven RLC circuit. Am . J. Phys. 74 (5) May, pp. 429-437.
- Harper, G. E. 1994. Fundamentos de electricidad, Volumen 5. Editorial “Limusa”.
- Hermosa, A. D. 1999. Principios de Electricidad y Electrónica II, Capítulo 7: Rectificación de la corriente alterna.
- Horowitz, P., W. Hill. 1989. The art of electronics, 2nd ed., Cambridge University Press, Cambridge.
- Josebachuili, M., P. Zurita. 2005. Circuitos RLC forzados en serie y paralelo.
- Kiseliiov, A., M. Krasnov, G. Makarenko, G. 1988. Problemas de Ecuaciones Diferenciales Ordinarias. MIR. Moscú.

Montaño F. C., V. D. González, y V. Espinosa-Bustamante. 2006. Prospectiva del sector eléctrico 2005-2014, Secretaria de Energía Eléctrica, SENER, México.

Nilsson, J. W., S.A. Riedel. 2005. Circuitos Eléctricos. Séptima Edición. Pearson Prentice Hall. ISBN: 84-205-4458-8

Nocetti, M., A. Blenkman. 2002. Respuesta Temporal de Circuitos RLC Serie.

OLADE, 200. Reunión 31 de Ministros de Energía de *OLADE*, Octubre 13-14: Asunción, Edición "Quito" OLADE.

Purcell, E. M. 1969. Berkeley physics course, volumen 2, Electricidad y Magnetismo. Reverté, Barcelona.

Rodríguez Arias, P., J. L. Ruiz Hernández. 2006. Corriente alterna. McGraw-Hill, Interamericana de España, S.A.

Rehmark, S. 2000. Theory and Application of Microwave Couplers, Phase Shifters and Power Dividers, Ed. Chalmers University of Technology, Suecia

Sears, F. W., M.W. Zemansky, H.D. Young y R.A. Freedman. 2008. Física Universitaria. Volumen II, Parte I. Editorial "Felix Varela", La Habana.

Tufillaro, N. B., R. Ramshankar, J.P. Gollub. 1989. Order-disorder transition in capillary ripples", *Physical Review Letters* **62** (4), 422.

Viera de Carvalho, A., A.M. Poveda, A.M. y J. 1996. Diseño de Programas de Eficiencia Energética. La Experiencia de OLADE. *Revista Energética*. N0 3, Tema: Eficiencia Energética, septiembre-diciembre pp 6 y 7.

www.terra.es/personal2/equipos2/rlc.htm

<http://www.labc.usb.ve/mgimenez/Ec1181ele/Material/Circuitos%2520RLC/Circuitos%2520RLC.pdf>

http://ar.geocities.com/labo3_uba

http://ar.geocities.com/labo5_uba

<http://www.df.uba.ar/users/sgil>

www.OLADE.org.ec/documentos/ONE.doc

ANEXOS



Análisis en el laboratorio de Física 1



Tutor: Físico, Angel De Souza.



Investigador Wilson Moreno