



**VARIACIÓN DEL ÁNGULO DE DISPARO DE UN
SISTEMA SENOIDAL PARA DESARROLLAR UN
SISTEMA ELÉCTRICO DE AHORRO DE POTENCIA**

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE

**MAESTRO EN
MANUFACTURA AVANZADA**

PRESENTA

**ING. JAVIER CABRERA ORNELAS
ASESOR: DR. CARLOS JUAREZ TOLEDO**

TOLUCA, MÉXICO, SEPTIEMBRE 2019.

**VARIACIÓN DEL ÁNGULO DE DISPARO DE UN SISTEMA
SENOIDAL PARA DESARROLLAR UN SISTEMA ELÉCTRICO DE
AHORRO DE POTENCIA**

AGRADECIMIENTOS

A Dios:

Por darme las fuerzas suficientes mediante la fe para lograr concluir mis estudios de maestría, que es una de las metas más importantes de mi vida.

A mis Padres: Francisco y Heriberta.

Donde quiera que estén gracias por darme la vida.

A Mi Esposa: *Ma. Antonia*.

Por brindarme todo su apoyo, comprensión y motivación para seguir mi superación profesional.

A Mis Hijos: Patricia, Javier Olaf y Adán Isaac.

Por su apoyo, de quien espero y les deseo lo mejor de la vida.

A Mi Asesor: Dr. Carlos Toledo Juárez.

De quien recibí ampliamente su ayuda para la elaboración de este trabajo.

Gracias por todo.

Al CIATEQ:

Por darme la oportunidad de formarme como maestro.

CARTA DE LIBERACIÓN DEL ASESOR



15 de Octubre de 2018

Mtro. Geovany González Carlos
Coordinador Académico

Los abajo firmantes, miembros del Comité Tutorial del alumno M.I. Javier Cabrera Omelas, una vez revisada la Tesis o tesina titulada: **"VARIACIÓN DEL ÁNGULO DE DISPARO DE UN SISTEMA SENOIDAL PARA DESARROLLAR UN SISTEMA ELÉCTRICO DE AHORRO DE POTENCIA"**, autorizamos que el citado trabajo sea presentado por el alumno para la revisión del mismo con el fin de alcanzar el grado de Maestro en manufactura Avanzada durante el Examen de Titulación correspondiente.

Y para que así conste se firma la presente a los 15 días del mes de Octubre del año 2018.

Dr. Carlos Juárez Toledo
Asesor Académico

CARTA DE LIBERACIÓN DEL REVISOR



29 de enero de 2019.

Dra. María Guadalupe Navarro Rojero
Directora
Posgrado CIATEQ

PRESENTE

Por este medio le envío un cordial saludo y al mismo tiempo me permito informarle que fui designado como revisor del trabajo de tesis del Ing. **Javier Cabrera Ornelas**, del trabajo titulado:

**"VARIACIÓN DEL ÁNGULO DE DISPARO DE UN SISTEMA SENOIDAL PARA
DESARROLLAR UN SISTEMA ELÉCTRICO DE AHORRO DE POTENCIA"**

Después de haber leído, corregido e intercambiado información con el estudiante en mención, el trabajo de tesis que me fue entregado, hago destacar que el alumno realizó todos los cambios que le fueron sugeridos a la tesis, por lo tanto, puede ser autorizada para su publicación y así, iniciar los trámites correspondientes para el proceso de titulación.

Sin más por el momento, y en espera de que mis sugerencias sean tomadas en cuenta en beneficio del estudiante y de la institución, agradezco la atención que se sirva prestar a la presente.

ATENTAMENTE


Dr. Carlos Juárez Toledo

CARTA DE LIBERACIÓN DEL REVISOR



**GOBIERNO DE
MÉXICO**



CONACYT
Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología



Querétaro, Querétaro, 21 de agosto del 2019.

Dra. María Guadalupe Navarro Rojero
Directora de Posgrado
CIATEQ, A.C.

Por medio de la presente me dirijo a usted en calidad de Revisor del proyecto terminal del alumno Javier Cabrera Ornelas, cuyo título es:

"VARIACIÓN DEL ÁNGULO DE DISPARO DE UN SISTEMA SENOIDAL PARA DESARROLLAR UN SISTEMA ELÉCTRICO DE AHORRO DE POTENCIA"

Después de haberlo leído, corregido e intercambiado información con el alumno, y realizado los cambios que le fueron sugeridos, puede ser autorizada su impresión, a fin de que se inicien los trámites correspondientes para su defensa.

Sin otro particular por el momento, y en espera de que mis sugerencias sean tomadas en cuenta en beneficio del estudiante y la Institución, agradezco la atención prestada.

Atentamente,

M. en C. José Juan Rivera Ramírez

"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"

El Marqués, Qro.

+52 (442) 196 1500

| 01 800 800 3798

| mkt@ciateq.mx

www.ciateq.mx

RESUMEN

El ahorro de potencia juega un rol muy importante en cualquier empresa, donde en ocasiones existen motores de corriente alterna que no cuentan con un control de velocidad por lo que trabajan a la máxima potencia.

En el mercado existe una gran cantidad de variadores de velocidad los cuales en su mayoría funcionan modificando la frecuencia de oscilación y con esto varían la energía suministrada al motor. Esto los hace muy confiables, pero representan costos adicionales para su diseño, programación e implementación.

En esta Tesis se presenta un método para modificar la velocidad de un motor de corriente alterna, el cual consiste en usar el circuito RC para cortar la señal de alimentación senoidal a intervalos periódicos por medio de un triac y de esta forma obtener diferentes potencias de suministro al motor.

Como se muestra en el contenido del trabajo el control es muy accesible, por lo que, también podría implementarse de forma sustentable en otros dispositivos que trabajen en corriente alterna como lo son luminarias o calentadores.

Palabras clave: Sistema dinámico, Circuito RC, Ahorro de energía, Electrónica.

ABSTRACT

The energy-saving is essential for corporations and consumer, in the industries there are electric motors without speed control with these motors rotating at nominal speed.

In the market exists many efficient devices for the speed control, almost all change the frequency of the motor supply with electronic technology. These devices are reliable and effective, but to operate correctly these must be incurring additional costs in their design, programming and implementation.

This article shows a method to modify the speed of an AC motor using the conventional RC circuit. The goal is to cut the supply signal in periodic times using a triac.

The result is a simple control and costs less to operate. Due to the versatility of the control can be applied in others AC circuits like luminaires or heaters.

Keywords: Dynamic system, RC circuit, Energy saving, Electronic.

Acrónimos

| | |
|----------------------|--|
| Semiconductor | Dispositivo electrónico que se comporta como conductor y aislante bajo ciertas condiciones eléctricas. |
| Triac | Interruptor semiconductor de CA de tres terminales. |

Símbolos

| | |
|----------|-------------------|
| Θ | Ángulo |
| Ω | Ohm |
| α | Ángulo eléctrico |
| τ | Periodo de tiempo |

Abreviaturas

| | |
|-----------------------------|--|
| AE | Ahorro de energía. |
| CA | Fuente de corriente alterna o senoidal. |
| CD | Fuente de corriente continua o directa. |
| ED | Ecuación Diferencial. |
| EMI | Interferencias electromagnéticas. |
| FT | Función de transferencia. |
| Hz | Hertz (frecuencia). |
| I | Corrientes. |
| KΩ | Kilo ohm. |
| LCK | Ley de corriente de Kirchhoff. |
| N1 | Energía de entrada. |
| N2 | Energía de salida. |
| RC | Resistivo capacitivo. |
| RPM | Revoluciones por minuto |
| Tc | Función de transferencia de lazo cerrado |
| TL | Transformada de Laplace. |
| V | Volts. |
| W | Watts. |

ÍNDICE DE CONTENIDO

| | |
|---|------------|
| CARTA DE LIBERACIÓN DEL ASESOR | I |
| CARTA DE LIBERACIÓN DEL REVISOR | II |
| CARTA DE LIBERACIÓN DEL REVISOR | III |
| RESUMEN..... | IV |
| ABSTRACT | V |
| ÍNDICE DE FIGURAS | X |
| ÍNDICE DE TABLAS | XI |
| CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1 ANTECEDENTES..... | 1 |
| 1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA..... | 1 |
| 1.3 JUSTIFICACIÓN..... | 1 |
| 1.3.1 Objetivo general | 2 |
| 1.3.2 Objetivos específicos | 2 |
| 1.3.3 Hipótesis | 2 |
| CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO SISTEMA DINÁMICO RC | 3 |
| 2.1 INTRODUCCIÓN | 3 |
| 2.1.1 Preliminares de control | 3 |
| 2.1.2 Retroalimentación | 4 |
| 2.1.3 Generales | 4 |
| 2.1.4 Transformada de Laplace..... | 4 |
| 2.1.5 Propiedades de la transformada de Laplace..... | 5 |
| 2.1.6 Transformada inversa de Laplace..... | 5 |
| 2.1.7 La función de transferencia | 5 |
| 2.1.8 Introducción a la retroalimentación | 5 |
| 2.1.9 Lugar geométrico de las raíces | 7 |
| 2.1.10 Sistema | 8 |
| 2.1.11 Sistema dinámico..... | 8 |
| 2.1.12 Polos, ceros y estabilidad | 11 |
| 2.2 PRINCIPIOS ELÉCTRICOS | 15 |
| 2.2.1 Introducción | 15 |
| 2.2.2 Elementos pasivos de un circuito eléctrico | 16 |
| 2.2.3 Fuentes de voltaje..... | 17 |

| | |
|---|-----------|
| 2.3 MODELOS CONVENCIONALES DE CIRCUITOS RC | 18 |
| 2.3.1 Introducción | 18 |
| 2.3.2 Circuito RC sin fuente. | 19 |
| 2.3.3 Respuesta escalón de un circuito RC | 21 |
| 2.3.4 Respuesta senoidal de un circuito RC en serie | 22 |
| 2.3.5 Circuito RC paralelo..... | 24 |
| 2.4 COMPUERTA TRIAC | 25 |
| 2.4.1 Teoría del triac..... | 25 |
| 2.4.2 Características del triac | 25 |
| 2.4.3 Métodos de control | 28 |
| 2.4.4 Control de fase con tiristores..... | 32 |
| CAPÍTULO 3 PROCEDIMIENTO DE INVESTIGACIÓN | 35 |
| 3.1 INTRODUCCIÓN | 35 |
| 3.2 MODELO DINÁMICO DE UN SISTEMA RC | 36 |
| 3.3 CIRCUITO DE CONTROL DE COMPUERTA TRIAC..... | 41 |
| 3.4 RESULTADOS | 43 |
| 3.4.1 Sistema de disparo del triac mediante resistencias..... | 43 |
| CAPÍTULO 4 MEDICIÓN DEL AHORRO DE ENERGÍA | 49 |
| 4.1 INTRODUCCIÓN | 49 |
| 4.2 INTEGRAL NUMÉRICA SIMPSON | 49 |
| 4.2.1 Introducción. | 49 |
| 4.3 REGLA DEL TRAPECIO (Segmentación múltiple) APLICADO AL ESTUDIO DE AHORRO DE ENERGÍA DE UN SISTEMA RC..... | 52 |
| 4.3.1 Determinación de la potencia según el desplazamiento del ángulo eléctrico. | 52 |
| 4.3.2 Cálculos de potencia obtenidos en función al desplazamiento de la señal senoidal | 54 |
| 4.4 ESTUDIO DE AHORRO DE ENERGÍA | 56 |
| CAPITULO 5 ESTUDIO CON CARGA INDUCTIVA (Motor de inducción) | 57 |
| 5.1 INTRODUCCIÓN | 57 |
| 5.2 RESULTADOS (CASO PRÁCTICO) | 58 |
| 5.3 RESULTADOS DE LABORATORIO (CASO PRÁCTICO) | 59 |
| 5.4 CONCLUSIONES | 61 |

| | |
|----------------------------------|----|
| CONCLUSIONES | 63 |
| APORTACIÓN DE LA TESIS | 64 |
| RECOMENDACIONES | 65 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 66 |
| ANEXOS | 69 |

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

- Figura 2.1. Retroalimentación general
- Figura 2.2. Elementos básicos de circuitos
- Figura 2.3. Fuentes de voltaje convencionales
- Figura 2.4. Circuito RC sin fuente de alimentación
- Figura 2.5. Respuesta natural
- Figura 2.6. Circuito RC con entrada escalón con $\tau = \infty$.
- Figura 2.7. Respuesta escalón circuito RC.
- Figura 2.8. Circuito RC con alimentación CA.
- Figura 2.9. Símbolo, composición y características eléctricas del triac
- Figura 2.10. Cuadrantes de disparo del triac.
- Figura 2.11. Control de fase.
- Figura 2.12. Interruptores básicos con triac.
- Figura 2.13. Circuito base para el control de base
- Figura 2.14. Forma de onda con $\alpha = 90^\circ$.

CAPÍTULO 3

- Figura 3.1. Circuito RC
- Figura 3.2. S1 conmuta con S2
- Figura 3.3. Ubicación del polo del sistema
- Figura 3.4. Sistema RC para el control de un triac
- Figura 3.5. Circuito Electrónico de estudio
- Figura 3.6. Voltaje de disparo para valores numéricos obtenidos en las ec (3.14) y (3.15).
- Figura 3.7. V_r para diferentes valores de R_4
- Figura 3.8. Ubicación de los polos en el plano complejo
- Figura 3.9. Valores de las resistencias variables seleccionados.
- Figura 3.10. Características de disparo para R_4 seleccionada

CAPÍTULO 4

- Figura 4.1. Integración cerrada
- Figura 4.2. Integral numérica

Gráfico 4.3. Ciclo de trabajo Vs Factor de Potencia

CAPITULO 5

- Figura 5.1 Diagrama esquemático del motor de inducción [Dor, 2008].
Figura 5.2 Diagrama del motor de inducción de ca simulink de matlab.
Figura 5.3 Velocidad del motor en condiciones nominales.
Figura 5.4 Relación voltaje/corriente.
Figura 5.5 Relación voltaje/rpm.
Figura 5.6 Variación de voltaje sobre la bobina del motor de inducción.

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO 2

- Tabla 2.1 Cuadrantes de disparo del Triac.

CAPÍTULO 3

- Tabla 3.1. Elementos del sistema RC
Tabla 3.2. Características del circuito de estudio
Tabla 3.3. Valores de R1 y R4

CAPÍTULO 4

- Tabla 4.1. Cálculo de potencia
Tabla 4.2. Ahorro de energía

CAPITULO 5

- Tabla 5.1 Datos de placa.
Tabla 5,2 Condiciones nominales del sistema de estudio.
Tabla 5.3 Relación de voltaje, corriente, potencia, resistencia y RPM.

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

Hoy en día el consumo de energía eléctrica alrededor del mundo se ha incrementado esto ocasiona que las plantas generadoras sean insuficientes en el suministro eléctrico, tanto residencial como industrial por lo que en los últimos años ha surgido la necesidad de crear nuevas tecnologías que contribuyan al ahorro de la energía eléctrica.

Como todos sabemos la mayor parte de la generación de energía eléctrica proviene de plantas que requieren del petróleo para su funcionamiento, el cual es un recurso no renovable que debemos de cuidar ya que cada día que pasa la energía eléctrica costara más por lo que debemos de pensar en proponer soluciones tecnológicas de ahorro de energía.

1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Hoy en día existen empresas que cuentan con motores eléctricos y que trabajan a su máxima potencia por no contar con un control de velocidad lo que provoca un consumo de energía eléctrica elevado e innecesario.

En este trabajo se propone un método económico de como variar el valor energético de la corriente alterna para tener un ahorro de potencia en equipo industrial el cual no tienen la necesidad de trabajar a su máxima potencia.

1.3 JUSTIFICACIÓN

El método de control que se propone en este trabajo para variar el valor energético de una corriente alterna es muy confiable, económico y fácil de utilizar, no requiere de conocimientos avanzados de programación como los actuales controles industriales (variadores de frecuencias); el método presentado tiene una gran gama de aplicación industrial como podrían ser en motores, luminarias, resistencias eléctricas, relevadores de estado sólido y arrancadores suaves.

1.3.1 Objetivo general

Desarrollar el estudio que soporte el modelo matemático para el cálculo de la resistencia adecuada de un variador de amplitud de la corriente alterna mediante un modelo dinámico de un circuito eléctrico RC que tenga aplicación en el ahorro de energía eléctrica.

1.3.2 Objetivos específicos

- Modelar matemáticamente el sistema dinámico RC utilizando TL.
- Aplicar el modelo del sistema dinámico RC a un circuito eléctrico para controlar la compuerta de un semiconductor de potencia (triac).
- Obtener el estudio de ahorro de energía mediante métodos numéricos (Regla del trapecio).

1.3.3 Hipótesis

Si se tiene variación entre 0 y 90 grados eléctricos de la señal senoidal entonces se puede variar la potencia aplicada a una carga entre 0% y 50% teniendo un ahorro de potencia de hasta el 50%.

CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO SISTEMA DINÁMICO RC

2.1 INTRODUCCIÓN

En la predicción del comportamiento dinámico de un sistema (fase de análisis), o en su mejora en la evolución temporal o frecuencial (fase de diseño), se requiere del conocimiento del modelo matemático tanto del equipo como de las señales que hay en su alrededor. Este requisito es cada vez más importante en las nuevas etapas de elaboración y producción de los equipos y está íntimamente relacionado con la competitividad de las empresas.

Hoy en día, cuando un nuevo producto se diseña antes de iniciar las etapas de realización física del sistema, es requisito para su fabricación que supere las pruebas de la simulación. Los simuladores se basan en el modelado matemático de los elementos que constituyen los sistemas y de las señales. La validez de los simuladores depende de la aproximación que hay entre los modelos matemáticos de los componentes y sus verdaderos comportamientos físicos. Se ha observado que una mayor sofisticación de los modelos aproxima mejor el comportamiento físico, produciendo casi nulas diferencias entre lo indicado en la simulación y en su implementación física.

Hay una gran variedad de modelado dinámico, se podrían citar áreas de la construcción, la aeronáutica, la producción industrial o la logística, entre otros. Pero concretando sobre los sistemas de control, estos suelen tener componentes eléctricos y mecánicos, aunque algunos también llevan elementos neumáticos e incluso hidráulicos.

2.1.1 Preliminares de control

En el sistema dinámico RC se pretende tener el control de la señal tanto en su parte transitoria como en su estado permanente, por medio del control dinámico RC se pretende que la desviación, o error, entre el rendimiento final del sistema y el rendimiento final real sea mínimo.

Además, se busca la amortización de la respuesta ante pequeñas perturbaciones libre de oscilaciones que lleven a la inestabilidad del sistema y siempre cuidando las tres

cualidades principales del arreglo RC las cuales son: velocidad de respuesta, error de estado permanente y estabilidad (Dorsey 2005).

2.1.2 Retroalimentación

En este trabajo es importante mantener un sistema retroalimentado dependiendo la aplicación que se le pueda dar en forma particular. Si el sistema es aplicado para el control de luminosidad de un espacio a través de la intensidad del sol, el sistema necesitara de una señal de retroalimentación para mantener los lúmenes necesarios.

2.1.3 Generales

Para desarrollar el trabajo se identificaron tres etapas:

- Debido a que no se cuenta con un modelo detallado de los componentes la primera etapa considera un estudio de diseño del sistema dinámico RC, partiendo de datos experimentales se obtiene el modelo matemático apropiado.
- Una vez obtenido el modelo matemático el sistema es analizado para formular una estrategia de control preliminar a través de una simulación en computadora.
- La etapa final consiste en implementar el modelo en el sistema real midiendo directamente el valor de la señal y el ahorro de energía obtenido por medio de una integral numérica.

Nota: El sistema de control real requiere ajustes porque nuestra representación matemática, aun cuando es muy precisa, es solo una aproximación del sistema real. El control propuesto cumple con su principal objetivo de obtener un ahorro de energía en sistemas senoidal, pero para ser implementado de forma masiva es necesario una etapa adicional que optimice los elementos descritos en este trabajo.

2.1.4 Transformada de Laplace

Generales

La transformada de Laplace se utiliza debido a su robustez para modelar el sistema dinámico RC.

2.1.5 Propiedades de la transformada de Laplace

Es importante mencionar que el objetivo principal de utilizar la transformada de Laplace en el estudio del sistema dinámico RC, es para resolver la ecuación diferencial que describe su comportamiento. Determinando la función de transferencia podemos garantizar de forma precisa la estabilidad del sistema.

2.1.6 Transformada inversa de Laplace

La transformada inversa de Laplace será empleada en el análisis del sistema dinámico RC para encontrar la variable de interés en el dominio del tiempo. Como ya sabemos la transformada de Laplace nos lleva a un campo en el dominio de la frecuencia por lo que una vez resuelta la ecuación de interés en el campo de Laplace se tendrá que aplicar la transformada inversa de Laplace para regresar al dominio del tiempo (Smith, Corripio, 2016).

2.1.7 La función de transferencia

Generales

La función de transferencia que se obtuvo al aplicar la transformada de Laplace de la ED no es más que una representación en el plano "s" del sistema dinámico RC.

2.1.8 Introducción a la retroalimentación

Generales

En la actualidad contamos con dos tipos de sistemas; de lazo abierto o lazo cerrado (retroalimentados) el uso principal de la retroalimentación es hacer que un sistema o proceso tenga mejor respuesta ante perturbaciones, responda con mayor rapidez y exactitud con respecto a la señal de entrada como referencia.

- La ventaja de los sistemas de lazo abierto es que son estables con entradas de referencia limitadas. Los sistemas de lazo abierto carecen de velocidad y precisión suficiente para seguir la señal de entrada de referencia.
- Los sistemas retroalimentados pueden reconfigurar el comportamiento del sistema, tiene el potencial de desestabilizarlo. La retroalimentación tiene ventajas

como rechazar las perturbaciones que puedan presentarse junto con la entrada. También puede cambiar el ancho de banda y la ganancia total de un sistema.

La salida de nuestro sistema dinámico RC se medirá mediante la función de transferencia y posiblemente se retroalimentará a través de la función de transferencia. Para proporcionar una señal de control al sistema físico a ser controlado.

Formulación básica

La forma general del problema de retroalimentación de salida se muestra en la figura 2.1. La función de transferencia efectiva entre la entrada R y la salida C se obtiene de la siguiente forma (Saucedo, Schiring 1968).

$$\frac{C_s}{R_s} = \frac{G_s}{1 + G_s * H_s} \quad (2.1)$$

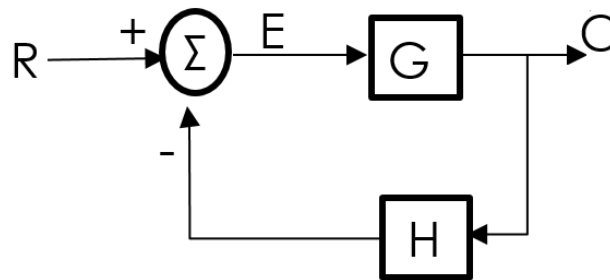


Figura 2.1 Retroalimentación general

donde:

G es la función de transferencia (bloque de proceso).

H representa la función de transferencia de retroalimentación (bloque de retroalimentación).

E es la entrada al sistema después del comparador (señal de error entre la entrada – y + del comparador).

R corresponde la entrada al sistema antes del comparador (señal de referencia).

C determina la salida del sistema (variable a controlar)

Σ es el comparador de la señal de retroalimentación con la señal de entrada.

2.1.9 Lugar geométrico de las raíces

Generales.

En este estudio del circuito dinámico RC emplea la técnica del lugar geométrico de las raíces para factorizar y aplicar el criterio de Routh al polinomio resultante de la función de transferencia.

Este método tiene la ventaja de ubicar visualmente el lugar geométrico de todas las soluciones posibles del polinomio característico de la función de transferencia de lazo cerrado T_c . Con lo cual proporciona un panorama al mostrar cómo cambian las ubicaciones de los polos de T_c . De esta forma es posible estimar con rapidez el impacto de compensadores al desempeño del sistema.

Intercambio del algebra por la geometría

Las ventajas que no ofrece la geometría en lugar del algebra es relacionada con facilidad de observar los cambios de la respuesta respecto a variaciones de los parámetros del sistema. Como se observa en la ecuación 2.2 es fácil observar los posibles cambios en los resultados cuando se tiene un cambio en el valor de las variables a tratar.

$$1 + Gs * Hs = 0 \quad (2.2)$$

Reglas del lugar geométrico de las raíces

Para poder aplicar el método del lugar geométrico de las raíces es necesario aplicar las siguientes reglas.

- El lugar geométrico de las raíces en el eje real se encuentra a la izquierda de una cuenta impar de polos reales y ceros reales de GH.
- El inicio del lugar geométrico de las raíces es en los polos de GH.
- El final de las ramas en el lugar geométrico de las raíces es en los ceros de GH.
- El número de ramas que se extienden al infinito es igual a la diferencia entre el número de polos y el número de ceros de GH.
- Los puntos en los cuales el lugar geométrico de las raíces se aparta de y se acerca al eje real pueden determinarse encontrando los puntos máximos y mínimos de la ganancia K en función de " s ", con s restringida a valores reales.

- El lugar geométrico de las raíces es simétrico con respecto al eje del plano s .
- El ángulo de partida de una rama del lugar geométrico de las raíces desde un polo de GH. O el ángulo de arribo de una rama en un cero de GH, puede determinarse satisfaciendo la condición del ángulo sobre un círculo de radio pequeño centrado en el polo o cero en cuestión (Gene, Powell, Addison, 1991).

2.1.10 Sistema

Según el biólogo austríaco Ludwig von Bertalanffy: *"Un sistema es una entidad que mantiene su existencia mediante la interacción mutua de sus partes"* (Bertalanffy 1967). Parece claro que un sistema es más complejo que un conjunto o simple adición de sus partes. Por consiguiente, se puede considerar que un sistema se puede definir como un conjunto de partes o entidades que interaccionan y operan a lo largo del tiempo y del espacio, para realizar algún fin lógico o trabajo dado.

En este trabajo de investigación el estudio de sistemas tiene una función importante ya que se trabajará con dispositivos electrónicos pasivos, que se encuentran interactuando entre sí con un fin común para obtener una respuesta eléctrica en función del tiempo.

El sistema que se estudia en este trabajo de investigación es un circuito RC, se pretende estudiar el comportamiento o la interacción de sus componentes en función del tiempo para obtener una respuesta eléctrica adecuada para aplicarlo en aplicaciones de ahorro de energía.

2.1.11 Sistema dinámico

Al estudiar un sistema de control por medio de un simulador, este debe ser capaz de modelar los parámetros dinámicos más sobresalientes. Una característica fundamental del conjunto de ecuaciones que representan la dinámica del sistema es que debe de aproximar la solución con precisión respecto al sistema real.

Téngase presente que un modelo matemático no es único para un sistema determinado y, además, un sistema puede representarse de muchas formas diferentes, por lo que puede tener muchos modelos matemáticos, dependiendo de cada perspectiva.

La dinámica de sistemas eléctricos se describe en términos de ecuaciones diferenciales. Dichas ecuaciones diferenciales se obtienen a partir de leyes físicas que gobiernan un sistema determinado, como las leyes de Kirchhoff para sistemas eléctricos. Se debe siempre recordar que obtener un modelo matemático razonable es la parte más importante de todo el análisis.

"El principio de causalidad significa que la salida actual del sistema (la salida en $t = 0$) depende de las entradas pasadas (entradas en $T < 0$) pero no depende de las entradas futuras (entradas para $t > 0$)" (Ogata 2003).

Este trabajo estudia la dinámica de un sistema dinámico RC a través de un modelo matemático, usando la herramienta numérica correspondiente para solucionar el sistema de Ecuaciones Diferenciales, para tal fin es necesario emplear las leyes físicas de circuitos eléctricos como: la ley de Kirchhoff junto con la ley de Ohm.

Modelos matemáticos. Estos modelos pueden adoptar muchas formas distintas dependiendo del sistema del que se trate y de las circunstancias específicas, además un modelo matemático puede ser más conveniente que otros.

Por ejemplo, en problemas de control óptimo es provechoso usar representaciones en el espacio de estados, en cambio, para los análisis de la respuesta transitoria o de la respuesta en frecuencia de sistemas lineales con una entrada y una salida invariante en el tiempo, la representación mediante la función de transferencia puede ser más conveniente (Ogata 2003).

Una vez que se cuente con el modelo matemático representado con ecuaciones diferenciales es conveniente obtener una función de transferencia en el dominio de la frecuencia, para analizar la salida respecto a la entrada usando diversos recursos analíticos o programas computacionales.

Sistemas lineales invariantes en el tiempo. Una ecuación diferencial es lineal si sus coeficientes son constantes o son funciones de una sola variable independiente. Los sistemas dinámicos formados por componentes de parámetros concentrados lineales

invariantes con el tiempo se describen mediante ecuaciones diferenciales “*lineales invariantes en el tiempo (de coeficientes constantes)*” (Ogata 2003).

Uno de los aspectos más importantes de la ingeniería es poder representar un fenómeno físico en forma matemática, ya que así es posible llevar a cabo un análisis cuantitativo del sistema y determinar sus características, su comportamiento y sus limitaciones; además, en dado caso, también será posible buscar alternativas para mejorar el funcionamiento del sistema. Para dar este paso primero es necesario identificar la variable o las variables que ocasionan el cambio en el sistema y después establecer una hipótesis empírica o basada en alguna ley física que permita representar al sistema en forma matemática (Hernández 2010).

Para comprender y controlar sistemas complejos, hay que obtener modelos matemáticos cuantitativos de ellos. Por tanto, es necesario analizar las relaciones entre las variables del sistema y obtener un modelo matemático. Como los sistemas considerados son de naturaleza dinámica, las ecuaciones descriptivas son generalmente ecuaciones diferenciales. Además, si estas ecuaciones pueden linealizarse, entonces se puede utilizar la transformada de Laplace para simplificar el método de solución.

En la práctica, por la complejidad de los sistemas y el desconocimiento de todos los factores relevantes, es necesario introducir hipótesis sobre la operación del sistema. Por tanto, a veces será útil considerar el sistema físico, delinear algunas hipótesis necesarias y linealizar el sistema. Luego, empleando las leyes físicas que describen el sistema lineal equivalente, se pueden obtener un conjunto de ecuaciones diferenciales lineales. Finalmente, utilizando herramientas matemáticas, como la transformada de Laplace, se obtienen una solución que describe la operación del sistema. En resumen, de los problemas de sistemas dinámicos puede establecerse como sigue (Dorf 2005):

- Definir el sistema y sus componentes.
- Formular el modelo matemático y enumerar las suposiciones necesarias.
- Escribir las ecuaciones diferenciales que describan el modelo.
- Resolver las ecuaciones para las variables de salida deseadas.

- Examinar las soluciones y las hipótesis.
- Si es necesario, volver a analizar o diseñar el sistema.

Es importante mencionar que el sistema dinámico RC se modela en términos de ecuaciones diferenciales mediante la transformada de Laplace, para posteriormente utilizar el método de solución de las variables independientes y dependientes (voltaje y corriente) con la finalidad de que el sistema sea lineal y se pueda obtener una ecuación de transferencia que represente la variable dependiente (corriente).

Las ecuaciones diferenciales que describen el funcionamiento dinámico de un sistema físico se obtienen utilizando las leyes físicas del proceso, este método se aplica a sistemas eléctricos (Mayr 1970, 1971).

Los capacitores se emplean en circuitos eléctricos para muchos propósitos, por ejemplo, para almacenar energía, dejar pasar corriente alterna mientras bloquean la corriente directa y para producir o compensar el desfase entre corriente y voltaje (Paul, Gordon y David, 2010).

El sistema dinámico RC empleado en el estudio tiene la finalidad de obtener un voltaje específico en el capacitor durante un intervalo de tiempo, para variar el grado de apertura eléctrica de un circuito con señal senoidal (entrada al sistema).

Sistemas eléctricos y electrónicos. Las leyes fundamentales que gobiernan los circuitos eléctricos son las leyes de corriente y voltaje de Kirchhoff. Un modelo matemático de un circuito eléctrico se obtiene aplicando una o ambas leyes de Kirchhoff (Ogata 2003).

2.1.12 Polos, ceros y estabilidad

Un requerimiento importante para un sistema de control es que debe ser estable. Esto significa que si al sistema se aplica una magnitud finita, entonces la salida debería ser también finita y de ningún modo infinita, es decir, incrementarse dentro de un límite. Para sistemas lineales el requerimiento de estabilidad se puede definir en términos de los polos de la función de transferencia en lazo cerrado. Los polos son las raíces del

polinomio del denominador de la función de transferencia y los ceros las raíces del polinomio del numerador de la función de transferencia.

Estabilidad. Un sistema se puede definir como *estable* si toda entrada acotada, es decir, finita, produce una salida acotada. De manera alternativa, un sistema se puede definir como estable si al estar sujeto a una entrada impulso la salida tiende a cero a medida que el tiempo tiende a infinito.

Pero si al responder a la entrada impulso, la salida del sistema tiende a infinito a medida que el tiempo tiende a infinito, entonces el sistema es *inestable*. Sin embargo, si tiende a un valor finito diferente de cero, se dice entonces que el sistema es *crítica* o *marginamente estable* (Bolton 2001, pp. 182- 2001).

La estabilidad en cualquier sistema dinámico es importante, en nuestro sistema de estudio se tratará de comprobar la estabilidad del sistema RC mediante la función de transferencia obtenidas con la transformada de Laplace aplicada a la ecuación diferencial, en la que se busca que el sistema tienda a un valor finito en un tiempo determinado y tener la certeza de que nuestro sistema es confiable para los fines que se pretende.

Polos y ceros. La función de transferencia en lazo cerrado $G(s)$ de un sistema, en general se puede representar mediante la siguiente expresión:

$$G(s) = \frac{K(s^m + a_{m-1}s^{m-1} + a_{m-2}s^{m-2} + \dots + a_1s + a_0)}{(s^n + b_{n-1}s^{n-1} + b_{n-2}s^{n-2} + \dots + b_1s + b_0)} \quad (2.3)$$

y, si las raíces del denominador y del numerador se establecen como:

$$G(s) = \frac{K(s+z_1)(s+z_2)\dots(s+z_m)}{(s+p_1)(s+p_2)\dots(s+p_n)} \quad (2.4)$$

donde las raíces del numerador son z_1, z_2, \dots, z_m y se denominan ceros y las raíces del denominador son p_1, p_2, \dots, p_n y se denominan polos, K es una constante de multiplicación de la ganancia del sistema.

Los ceros son los valores de “ s ” para los cuales la función de transferencia se convierte en cero. Los polos son los valores de “ s ” para los cuales la función de transferencia es infinita, es decir, éstos hacen que el valor del denominador sea cero. De esta manera, si el numerador es $(s-2)$, entonces la función de transferencia es cero si $(s-2) = 0$, es decir, $s=+2$. Por lo tanto, el cero está en $+2$. Si el denominador es $(s+5)$, entonces la función de transferencia es infinita si $(s+5) = 0$, es decir, $s= -5$. Por lo tanto, el polo está en -5 (Bolton 2005, p. 183).

Los polos y los ceros pueden ser cantidades reales o complejas. Así, por ejemplo, si el denominador fuera (s^2-6s+8) , entonces, debido a que esto es $(s-4)(s-2)$, los polos están en $+4$ y $+2$. Sin embargo, si el denominador fuera (s^2+1) , entonces, puesto que éste se puede escribir como $(s-j)(s+j)$, los polos están en $+j$ y $-j$, en general, los polos y los ceros se pueden escribir como:

$$S = \sigma + j\omega \quad (2.5)$$

donde σ es la parte real y $j\omega$ es la parte imaginaria (Bolton 2015, pp. 184-2015).

Patrón de polos y ceros. Los polos y ceros de una función de transferencia se pueden representar en un diagrama llamado el *patrón de polos y ceros (plano cartesiano)*. El eje x es la parte real del polo o cero y el eje y , la parte imaginaria. La posición de un polo se marca con una cruz “ x ” y la posición de un cero por un pequeño círculo “ o ”.

Estabilidad y polos. La estabilidad de un sistema se puede determinar considerando cómo cambia la salida con el tiempo después de una entrada impulso. Con un sistema estable la salida deberá tender a cero con el tiempo, y con un sistema inestable la salida crecerá con el tiempo.

Considere un sistema sin ceros y un polo en -2 la función de transferencia $G(s)$ será;

$$G(s) = \frac{1}{s+2} \quad (2.6)$$

Ésta es una transformada de Laplace de la forma $1/(s+a)$ y así, la transformada inversa da por resultado:

$$\theta_0 = e^{-2t} \quad (2.7)$$

El valor de e^{-2t} decrece con el tiempo, haciéndose cero en un tiempo infinito y por lo tanto, el sistema es estable.

Ahora considere un sistema sin ceros y un polo en +2. La función de transferencia $G(s)$ será:

$$G(s) = \frac{1}{s-2} \quad (2.8)$$

Ésta es una transformada de Laplace de la forma $1/(s-a)$ y así, la transformada inversa da por resultado:

$$\theta_0 = e^{2t} \quad (2.9)$$

A medida que se incrementa, el valor de e^{2t} también se incrementa, por lo tanto, el sistema es inestable (Bolton 2025, p. 187).

Para poder determinar la estabilidad de nuestro sistema en forma matemática y confiable empleamos la transformada de Laplace de la ecuación diferencial, la cual es obtenida del análisis del circuito RC.

Posteriormente la ecuación lineal de la función de transferencia (FT) se determina los polos y los ceros los cuales nos proporcionarán información sobre la estabilidad y la dinámica del sistema. Como ya se sabe los polos nos proporcionan la estabilidad del sistema mientras que los ceros nos proporcionarán información sobre la dinámica del mismo, debido a que entre más a la izquierda del cero del plano cartesiano se ubiquen los polos del sistema este será más estable pero más lento y, entre más cerca del cero este ubicado el polo el sistema será más rápido.

2.2 PRINCIPIOS ELÉCTRICOS

2.2.1 Introducción

Entender los conceptos fundamentales de la corriente eléctrica ha ayudado a construir nuevos controles, lo cuales son cada vez más sofisticados los cuales tienen la finalidad de hacer más robusto, confiable y económico para operar. Algunos conceptos básicos para desarrollar este trabajo son:

Ley de Coulomb: La magnitud de cada una de las fuerzas eléctricas con que interactúan dos cargas puntuales en reposo es directamente proporcional al producto de la magnitud de ambas cargas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa, la ecuación que la representa es la siguiente.

$$f = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (2.10)$$

Donde:

f representa la fuerza entre las dos cargas.

q1 y q2 representan las cargas eléctricas.

r² representa el cuadrado de la distancia que existe entre las dos cargas.

k es la constante de proporcionalidad y es igual a 9.0E+9 N*m²/C²

Campo eléctrico: El campo eléctrico existe cuando existe una carga y representa el vínculo entre ésta y otra carga al momento de determinar la interacción entre ambas y las fuerzas ejercidas. Tiene carácter vectorial (campo vectorial) y se representa por medio de líneas de campo. Si la carga es positiva, el campo eléctrico es radial y saliente a dicha carga. Si es negativa es radial y entrante. Sus unidades son newton/coulomb.

Potencial eléctrico: El potencial eléctrico en un punto del espacio de un campo eléctrico es la **energía potencial eléctrica** que adquiere una **unidad de carga positiva** situada en dicho punto, se representa por la siguiente ecuación.

$$V = \frac{E_p}{q} \quad (2.11)$$

donde:

- V es el potencial eléctrico en un punto del campo eléctrico. Su unidad en el S.I. es el julio por culombio (J/C) que en honor a Alessandro Volta recibe el nombre de Voltio.
- E_p es la energía potencial eléctrica que adquiere una carga testigo positiva q' al situarla en ese punto.

Diferencia de potencial: La diferencia de potencial entre dos puntos A y B de un campo eléctrico es un valor escalar que indica el trabajo que se debe realizar para mover una carga q_0 desde el punto A hasta el punto B. La unidad en la que se mide el potencial es el voltio o volt y se expresa por la fórmula:

$$V_1 - V_2 = E * r \quad (2.12)$$

donde:

$V_1 - V_2$ es la diferencia de potencial

E es la Intensidad de campo en newton/culombio

r es la distancia en metros entre los puntos 1 y 2.

(Molina, Cánovas 2013).

(Alber Malvino, 2007)

2.2.2 Elementos pasivos de un circuito eléctrico

Los componentes pasivos son aquellos que tienen alguna de las siguientes funciones, disipan la electricidad en forma de calor o la almacenan en forma de campo magnético o eléctrico. Los elementos pasivos son tres (ver figura 2.2).

R1 Resistor: Componente electrónico que opone cierta dificultad al paso de la corriente eléctrica o paso de electrones para cumplir diversas funciones tales como la polarización.

C1 capacitor: es un elemento electrónico pasivo que almacena energía en forma de campo eléctrico, adquiriendo carga eléctrica. El capacitor está formado por dos láminas conductoras, separadas por un aislante o dieléctrico, de tal modo que puedan estar cargados con el mismo valor, pero con signos contrarios.

L1 Inductor: es un componente electrónico pasivo que almacena energía en forma de campo magnético, un inductor está constituido por una bobina de alambre

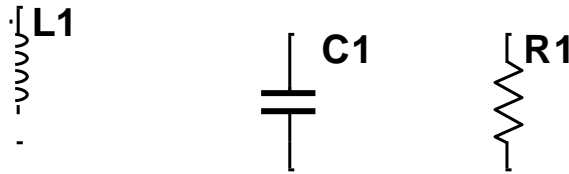


Figura 2.2 Elementos básicos de circuitos

Recordemos que en nuestro estudio la energía eléctrica será transportada por medio de los cables conductores a través de todo el circuito para poderla transformar o modificar en energía calorífica, luminosa, mecánica, química etc (Alcalde, 2003).

2.2.3 Fuentes de voltaje

En la actualidad existen varios tipos de fuentes de corriente, las dos corrientes convencionales son (Gil. 2005):

Corriente continua (C.C. o CD) Cuando la fuerza eléctrica es constante y siempre en el mismo sentido.

Alterna (C.A. o A.C). Cuando la fuerza eléctrica cambia constantemente de sentido de aplicación.



Figura 2.3 Fuentes de voltaje convencionales

La figura 2.3 muestra las representaciones de las fuentes de corriente de corriente directa y corriente alterna.

2.3 MODELOS CONVENCIONALES DE CIRCUITOS RC

2.3.1 Introducción

Los elementos pasivos de los circuitos eléctricos son resistor “ R ”, capacitor “ C ” e inductor “ L ”, y las combinaciones de estos forman circuitos con nuevas características muy utilizadas en electricidad y electrónica. En particular para nuestro estudio se utiliza la combinación resistivo-capacitivo “RC”.

Los circuitos RC se analizan aplicando las leyes de Kirchhoff, Cabe mencionar que las leyes de Kirchhoff aplicadas a los circuitos resistivos nos generan una ecuación algebraica, mientras que su aplicación a circuitos RC produce ecuaciones diferenciales, las cuales son más difícil de resolver que las ecuaciones algebraicas. Las ecuaciones diferenciales que son el resultado del análisis de circuitos RC son de primer orden, así, a estos circuitos se les conoce de manera genérica como circuitos de primer orden.

Los circuitos RC tienen dos aplicaciones usuales que son: circuitos de retraso, unidad de flash fotográfico (Alexander, Sadiku 2006, p. 254).

Existen dos formas típicas de excitar a los circuitos RC:

- La primera es mediante las condiciones iniciales de los elementos de almacenamiento del circuito. A estos circuitos se les conoce como *circuitos sin fuente*, la energía se almacena inicialmente en el elemento capacitivo.
- La segunda forma de excitar circuitos de primer orden es mediante fuentes independientes de CD y AC.

La transformada de Laplace es una herramienta muy poderosa para el análisis de circuitos la cual nos permite convertir el conjunto de ecuaciones diferenciales que describen un circuito al dominio de la frecuencia compleja, con la ventaja de usar un conjunto de ecuaciones algebraicas lineales y la de poder despejar las variables de interés.

Una vez realizada la operación de desacoplamiento de la variable de interés se procede a regresar al dominio del tiempo por medio de la transformada inversa de Laplace, expresando la respuesta deseada de tal forma que pueda ser graficada de manera directa por medio de un programa computacional (Dorf, Svoboda 2017, p. 617).

Los circuitos RC toman un papel importante en este trabajo ya que están involucrados en la parte de control de un sistema dinámico, se estudia la respuesta transitoria y permanente con la finalidad de obtener una ecuación de transferencia de la variable deseada a través del método de la transformad de Laplace.

2.3.2 Circuito RC sin fuente.

Convencionalmente se dice que un circuito RC sin fuente ocurre cuando su fuente de cd se desconecta súbitamente y, la energía ya almacenada en el capacitor se libera hacia los resistores. Considerando una combinación en serie de un resistor y un capacitor inicialmente cargado, como en la fig.2.4.

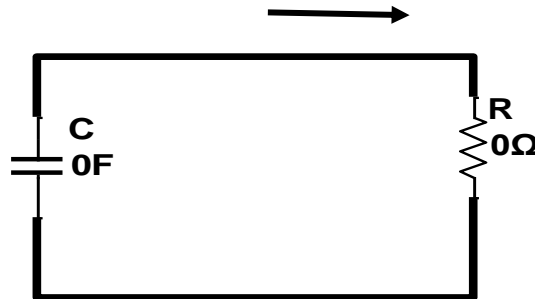


Figura 2.4 Circuito RC sin fuente de alimentación.

El objetivo es determinar la respuesta del circuito, se supondrá como la tensión $v(t)$ a lo largo del capacitor. Puesto que el capacitor está inicialmente cargado, es posible suponer que en el momento $t = 0$ la tensión inicial es:

$$v(0) = V_0 \quad (2.13)$$

La aplicación de la LCK en el circuito de la fig.2.4 produce que la suma de las corrientes del capacitor " i_c " y corriente de la resistencia " i_R " es:

$$i_c + i_R = 0 \quad (2.14)$$

Por definición, $i_c = C dv/dt$ e $i_r = v/R$. así,

$$C * \frac{dv}{dt} + \frac{v}{R} = 0 \quad (2.15)$$

donde el valor de la resistencia R está determinada en Omhs y la capacitancia C en Faradios.

Esta es una ecuación diferencial de primer orden, al resolver la ecuación diferencial y considerando lo condición inicial $V(0) = A = V_o$ se obtiene el siguiente resultado:

$$v(t) = V_o e^{-t/RC} \quad (2.16)$$

Este tipo de respuesta es conocida como **respuesta natural** de un circuito y es el comportamiento (en términos de tensiones y corrientes) del circuito, sin fuentes externas de excitación.

La respuesta natural se muestra en la fig. 2.5 donde V_r representa el voltaje a través de la resistencia y τ representa el tiempo que dura en descargar el capacitor

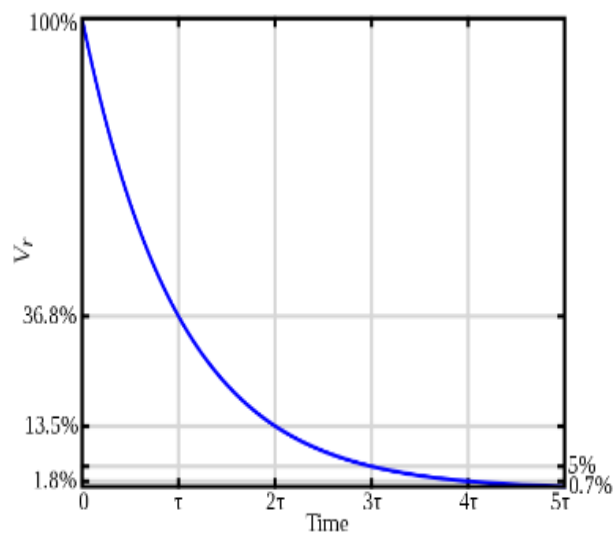


Figura 2.5 Respuesta natural

Es importante tener los conocimientos previos de los circuitos RC en cuanto a su respuesta natural, así como sus Ecuaciones matemáticas que representan su comportamiento físico a través de leyes físicas de los circuitos eléctricos. Como puede observarse en la fig. 2.5 el tiempo de descarga de un capacitor es aproximadamente 5τ .

2.3.3 Respuesta escalón de un circuito RC

La respuesta escalón de un circuito es su comportamiento cuando la excitación es la función de escalón, la cual puede ser una fuente de tensión o de corriente (Alexander, Sadiku 2006). Considere el circuito de la fig. 2.6 donde $V1$ es una fuente de tensión constante de cd.

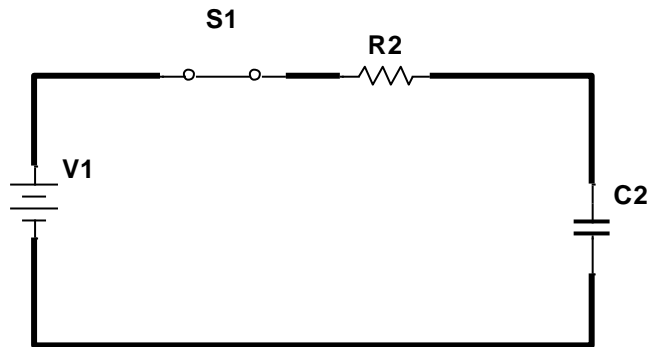


Figura 2.6 Circuito RC con entrada escalón con $\tau = \infty$.

Al aplicar la LCK se tiene:

$$\frac{dv}{dt} + \frac{v}{RC} = V_s/RC \quad (2.17)$$

Al integrar e introducir las condiciones iniciales se obtiene:

$$v(t) = V_s(1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \quad (2.18)$$

La Fig. 2.7 muestra la respuesta escalón de un circuito RC

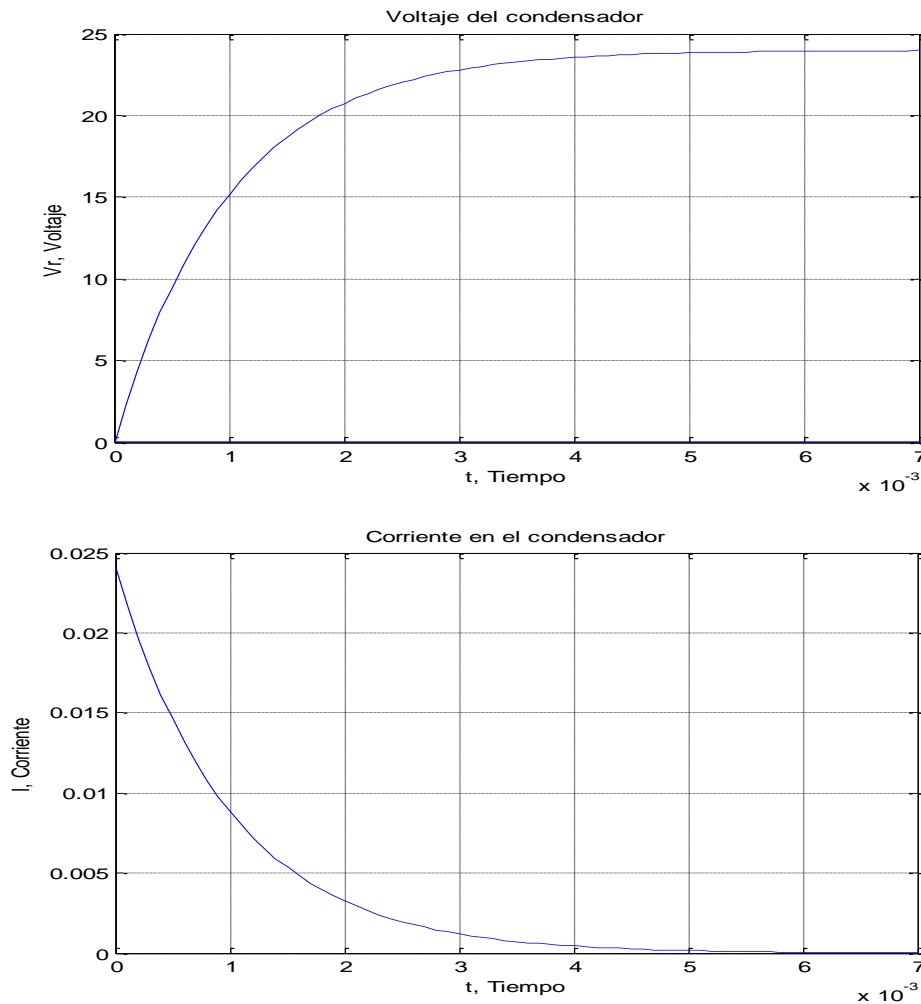


Figura 2.7 Respuesta escalón circuito RC.

Los circuitos RC en serie alimentados con una fuente de voltaje son parte fundamental en nuestro estudio ya que es en parte de donde partiremos nuestro trabajo de investigación. Como se observa en la fig. 2.7 mientras el voltaje de capacitor se carga es decir aumenta de valor, la corriente tiende a cero.

2.3.4 Respuesta senoidal de un circuito RC en serie

Cuando se aplica un voltaje senoidal a un circuito RC dispuesto en serie, las caídas de voltaje y de corriente resultantes en el circuito son también senoidales y tienen la misma frecuencia que el voltaje aplicado. La capacitancia provoca un desplazamiento de fase entre el voltaje y la corriente, el cual depende de los valores relativos de la resistencia y la reactancia capacitiva (Floyd 2007, P. 610).

El modelo matemático para el circuito RC de la Fig. 2.8 se puede obtener de la siguiente forma, por la ley de Kirchhoff se tiene la ecuación:

$$RI + \frac{q}{C} = E(t) \quad (2.19)$$

Derivando esta ecuación respecto al tiempo se obtiene la ecuación para corriente $I(t)$

$$\frac{RdI}{dt} + \frac{I}{C} = dE/dt \text{ Donde } E_t = E_o \text{ sen}(wt) \quad (2.20)$$

Resolviendo la ecuación diferencial se obtiene la solución general (García, Calderón 2009, pp. 73-74).

$$I(t) = ce^{-\frac{t}{RC}} + \frac{E_o w}{[1 + (RCw)^2]} (R\omega C \text{ sen } wt + \text{cos}wt) \quad (2.21)$$

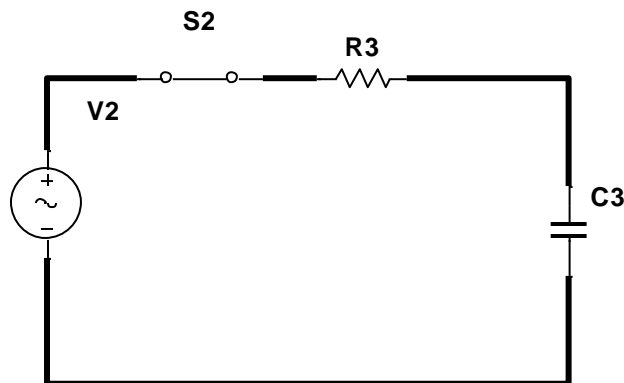


Figura 2.8 Circuito RC con alimentación CA.

Este trabajo fundamenta gran parte de su estudio en el análisis del circuito RC conectado en serie fig. 2.8 de donde se puede observar:

- El sistema cuenta con una fuente principal de corriente alterna (CA) la cual alimenta al circuito RC.
- Debido al efecto senoidal de la fuente el capacitor se encuentra en constante cambio de carga y descarga.

En este estudio se tomará en cuenta las operaciones matemáticas ya establecidas en física General para poder modelarlas de acuerdo con las leyes físicas de circuitos eléctricos, como son las leyes de Kirchhoff y la ley de Ohm. Obteniendo una ecuación diferencial a la que se le aplicara la (TL) para obtener características eléctricas que nos puedan ayudar a predecir su función natural.

2.3.5 Circuito RC paralelo

El siguiente circuito RC está conectado a una fuente de corriente continua $i(t) = I$, su modelo matemático es el siguiente (Papoulis, Bertran 1994, pp. 82-83).

$$C \frac{dv(t)}{dt} + Gv(t) = I \quad (2.22)$$

con $v(0)=0$. Aplicando la transformada de Laplace, tenemos que

$$CsV(s) + GV(s) = \frac{I}{s} \quad (2.23)$$

Puesto que $v(0) = 0$ y la transformada de Laplace de la constante I es I/s y despejando

$$Vs = \frac{1}{s(G+sC)} \quad (2.24)$$

debido a que:

$$\frac{I}{s(G+sC)} = \frac{\frac{1}{G}}{s} - \frac{\frac{I}{G}}{s+G/C} \quad (2.25)$$

Aplicando la transformada inversa de Laplace se obtiene $v(t)$

$$v(t) = RI(1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \quad (2.26)$$

2.4 COMPUERTA TRIAC

2.4.1 Teoría del triac

El triac es un interruptor semiconductor de CA de tres terminales que se activa en conducción cuando se aplica una señal de baja energía a su **puerta**. El cual conduce corriente en cualquier dirección cuando se enciende. Una señal de puerta positiva o negativa activará al dispositivo en la conducción, además el triac puede ser pensado como dos SCR complementarias en paralelo.

Las principales ventajas que ofrece la compuerta triac son:

- Es un medio económico y versátil de controlar con precisión la energía de corriente alterna.
- Tiene varias ventajas de rapidez de operación sobre los interruptores mecánicos convencionales.
- Tiene un efecto positivo "sobre" una corriente cero "off" característica, que no sufre el rebote de contacto o arcos inherente a los interruptores mecánicos.
- Puede ser activado por corriente continua, corriente alterna, o pulsos rectificados.
- Debido a la baja energía requerida para la activación, el circuito de control puede utilizar cualquiera de los muchos dispositivos de estado sólido de bajo costo, tales como transistores, interruptores bilaterales, SCR puerta sensitive- y triacs, los conductores acoplados ópticamente y circuitos integrados.

2.4.2 Características del triac

La Fig. 2.9a muestra el símbolo triac, mostrando que es un dispositivo bilateral, las terminales se designan simplemente con MT1, MT2, y G, donde MT1 y MT2 son los terminales de conducción de corriente, y G, es el terminal de puerta se usa para disparar el triac. Para evitar confusiones, se ha convertido en una práctica estándar para especificar todas las corrientes y voltajes utilizando MT1 como punto de referencia.

La estructura básica de un triac se muestra en la Fig. 2.9 b. Este dibujo muestra por qué el símbolo adoptado para el triac se compone de dos SCR complementarias con una puerta común. El triac es un dispositivo de cinco capas con la región entre MT1 y MT2, un

interruptor P-N-P-N (SCR) en paralelo con un interruptor de N-P-N-P (SCR complementaria).

La región entre MT1 y G consiste en dos diodos complementarios. Una señal de puerta positivo o negativo polariza uno de estos diodos que causan la misma acción del transistor se encuentra en el SCR. Esta acción rompe la unión de bloqueo sin tener en cuenta la polaridad de MT1.

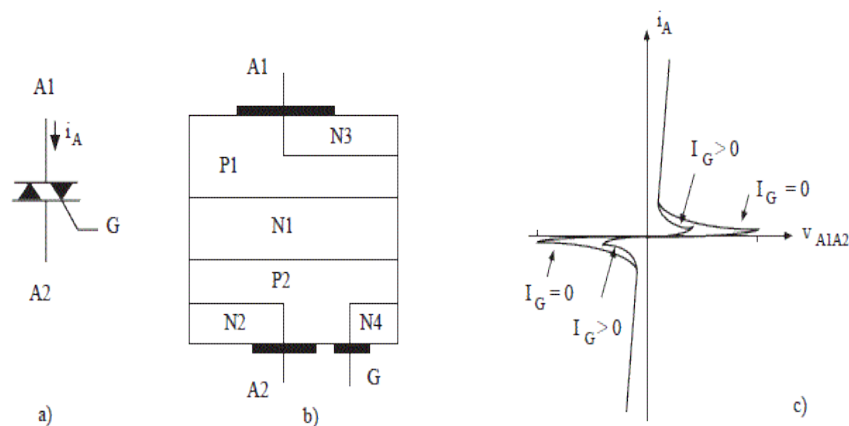


Figura 2.9 Símbolo, composición y características eléctricas del triac.

El flujo de corriente entre MT2 y MT1 hace que el dispositivo proporcione corriente de puerta internamente y permanezca encendida hasta que se interrumpa el flujo de corriente. La característica de tensión de corriente del triac se muestra en la figura 2.9c, donde, MT1 se utiliza como punto de referencia. El primer cuadrante, Q-I, es la región donde MT2 es positivo con respecto a MT1 y el cuadrante III es el caso opuesto.

Varios de los términos utilizados en la caracterización del triac se describen a continuación: VDRM es la tensión de ruptura del dispositivo y es la tensión más alta del triac permitido para bloquear en cualquiera dirección. Si se excede este voltaje, incluso de forma transitoria, el triac puede entrar en la conducción sin una señal de puerta.

Un triac para una aplicación particular debe tener VDRM al menos tan alto como el pico de la forma de onda de corriente alterna que se aplica de manera fiable. La corriente de retención (I_H) es el valor mínimo de la corriente necesaria para mantener la

conducción. Cuando la corriente cae por debajo de I_H , el triac deja de conducir y se revierte al estado de bloqueo.

IDRM es la corriente de fuga del triac, con VDRM aplicado desde MT2 a MT1. El triac puede ser activado en el estado encendido en cualquier valor de tensión de hasta VDRM por la aplicación de una señal de puerta. Esta importante característica hace que el triac sea muy útil. Hay cuatro posibles modos de disparo (Tabla. 2.1 y Figura. 2.10):

Tabla. 2.1 Cuadrantes de disparo del Triac.

| Cuadrante I | Cuadrante II | Cuadrante III | Cuadrante IV |
|-------------|--------------|---------------|--------------|
| MT2 (+) | MT2 (+) | MT2 (-) | MT2 (-) |
| G (+) | G (-) | G (-) | G (+) |

donde:

Cuadrante I: el voltaje positivo y corriente de puerta positivo.

Cuadrante II: el voltaje positivo y corriente de puerta negativa.

Cuadrante III: el voltaje negativo y corriente de puerta negativa.

Cuadrante IV: el voltaje negativo y corriente de puerta positivo.

Los triacs actuales son más sensibles en los cuadrantes I y III, un poco menos en el cuadrante II, y mucho menos sensible en el cuadrante IV, por lo tanto, no se recomienda el uso del cuadrante IV a menos que se trate de circunstancias especiales.

Un hecho importante a recordar es que un triac puede conducir la corriente en ambas direcciones, tiene sólo un breve intervalo durante el cual la corriente de onda senoidal está pasando por cero para recuperarse y volver a su estado de bloqueo. Por esta razón, su funcionamiento es fiable, en los actuales triacs se limita a la frecuencia de línea de 60 Hz y las frecuencias más bajas.

Para cargas inductivas, el desplazamiento de fase entre la corriente y el voltaje la intensidad cae por debajo de I_H y el triac deja de conducir, existe una cierta tensión que debe aparecer en el triac. Si este voltaje aparece demasiado rápido, el triac reanudará la conducción y el control se pierde.

Con el fin de lograr el control de ciertas cargas inductivas, la tasa de aumento de la tensión dv/dt debe estar limitado por una red RC en serie a través del triac. El condensador entonces limitara el dv/dt a través del triac. La resistencia es necesaria para limitar el aumento de la corriente del condensador cuando se dispara el triac, y para amortiguar el sonido de la capacitancia con la inductancia de carga.

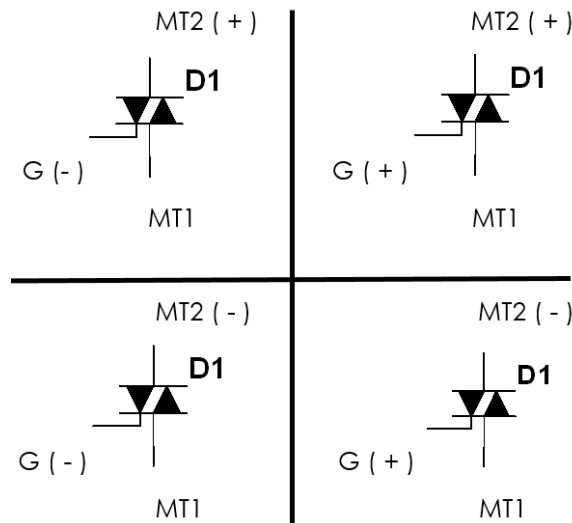


Figura 2.10 Cuadrantes de disparo del triac.

2.4.3 Métodos de control

Interruptor AC

Una aplicación útil del triac es como un reemplazo directo para un relé mecánico de corriente alterna. En esta aplicación, el triac proporciona control de encendido y apagado y no se utiliza la capacidad de regulación de potencia del triac. El circuito de control para esta aplicación es usualmente muy simple, consistente en una fuente para la señal de compuerta y algún tipo de interruptor de corriente pequeño, mecánico o eléctrico. La señal de puerta se puede obtener de una fuente separada o directamente de la tensión de línea en el terminal MT2 del triac.

Control de fase.

Un método eficaz y ampliamente utilizado de control de la potencia media a una carga a través del triac es por control de fase. Control de fase es un método de utilizar el triac para aplicar el suministro de corriente alterna a la carga por una fracción controlada de

cada ciclo. En este modo de funcionamiento, el triac se mantiene en una condición abierta o fuera de una porción de cada ciclo positivo y negativo, y luego se activa en una condición en un momento en el ciclo medio determinado por el circuito de control. La condición de la corriente en el circuito está limitada sólo por la carga, es decir, toda la tensión de red (menos la caída hacia delante del triac se aplica directamente. La figura 2.11 muestra la onda de tensión junto con los ángulos de disparo y conducción que se utilizan para el funcionamiento del triac.

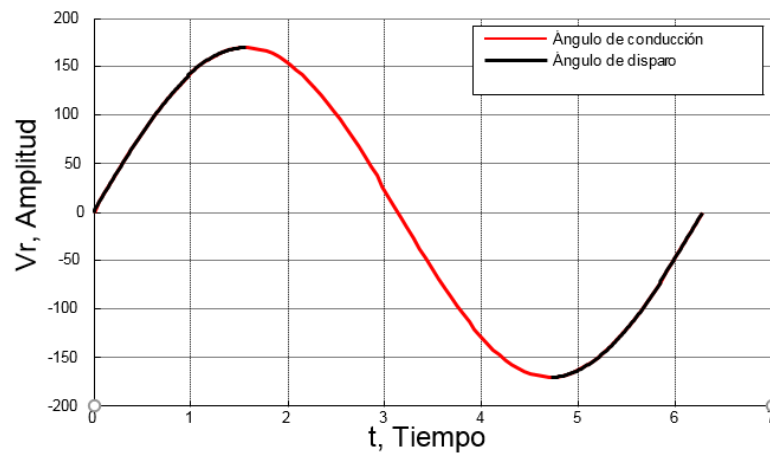


Figura 2.11 Control de fase.

En la figura 2.11 se pueden observar los dos ángulos (medidos en grados eléctricos) en los que actúa el dispositivo triac para el control de fase, los cuales son:

- **Ángulo de disparo**, durante el cual el triac está bloqueando la tensión de red y no permite el flujo de corriente eléctrica.
- **Ángulo de conducción** El período durante el cual el triac permite el flujo de corriente.

Como desventajas del uso de triac podemos identificar:

- La principal desventaja de usar control de fase en aplicaciones triac es la generación de interferencia electromagnética (EMI).
- Cada vez que el triac es disparado las subidas de corriente de carga desde cero hasta el valor de la corriente de carga limitada en un tiempo muy corto.

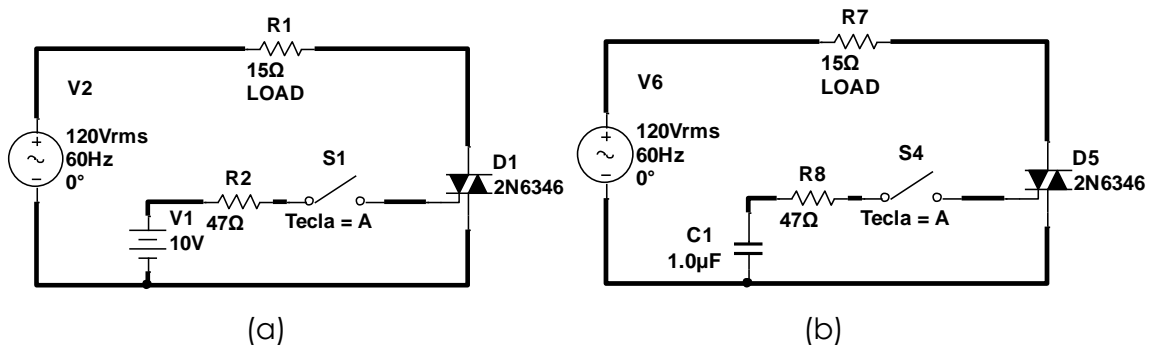
- La velocidad instantánea de la corriente (di/dt) resultante puede generar un amplio espectro de ruido que puede interferir con el funcionamiento de los equipos electrónicos cercanos.

Interruptores CA TRIAC básicos

Debido a que los triacs son detectores de estado sólido fiables, los tiristores tienen muchas aplicaciones, especialmente como controles, uno de los usos más comunes para los tiristores es el control de cargas de CA, tales como motores eléctricos.

El control de los motores se realiza mediante el control de la parte de cada ciclo de corriente alterna cuando el circuito lleva a cabo (control de fase) actual o mediante el control del número de ciclos por período de tiempo cuando la corriente realiza (el control del ciclo). Además, los tiristores pueden servir como la base de los osciladores de relajación de los temporizadores y otras aplicaciones.

La figura 2.12 muestra los métodos de uso del triac como un interruptor de encendido / apagado. Estos circuitos son útiles en aplicaciones donde la simplicidad y la fiabilidad son importantes. Como se ha indicado anteriormente, no hay arco eléctrico con el triac, que puede ser muy importante en algunas aplicaciones. Los circuitos son para cargas resistivas como se muestra y requieren la adición de una red (dv/dt) a través del triac para cargas inductivas.



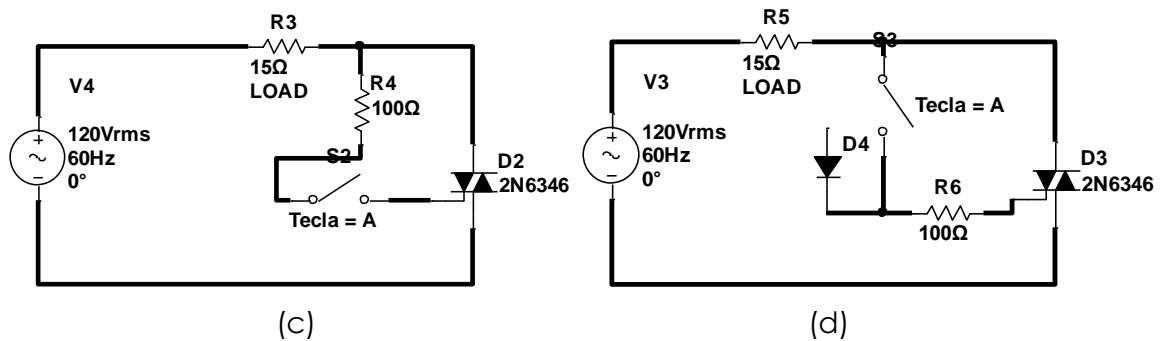


Fig 2.12 Interruptores básicos con triac.

La figura 2.12 (a) muestra el control de bajo voltaje del triac. Cuando el interruptor S1 está cerrado, la corriente de puerta se suministra al triac desde la batería de 10 V. Con el fin de reducir fallas de corriente de sobretensión durante la activación (on), esta corriente debe ser de 5 a 10 veces la corriente de puerta máxima (IGT) requerida para activar el triac. El triac se enciende y permanece encendido hasta que se abre S1. Este circuito cambia a corriente cero excepto para el encendido inicial. S1 puede ser un conmutador de muy baja corriente porque sólo lleva la corriente de puerta triac.

La Figura. 2.12 (b) muestra un interruptor triac con las mismas características que el circuito de la Fig. 2.12 (a), excepto que se ha eliminado la necesidad de una batería. La señal de compuerta se obtiene a partir de la tensión en MT2 del triac antes de encender.

El circuito mostrado en la Figura 2.12 (c) es una modificación de la Figura 2.12 (b). Cuando el interruptor S1 está en la posición uno, el triac no recibe corriente de puerta y no es conductor. Con S1 en la posición dos, el funcionamiento del circuito es el mismo que el de la Figura 2.12 (b). En la posición tres, el triac recibe la corriente de puerta solamente en semiciclos positivos. Por lo tanto, el triac sólo conduce en semiciclos positivos y la potencia a la carga es media onda.

Finalmente, la figura 2.12 (d) muestra el control de corriente alterna del triac. El impulso puede ser acoplado por transformador para aislar circuitos de potencia y control. La intensidad de pico debe ser 10 veces IGT (máx.) Y la constante de tiempo RC debe ser 5 veces (máx.). A menudo se utiliza un impulso de alta frecuencia (1 a 5 kHz) para obtener la conmutación de punto cero.

2.4.4 Control de fase con tiristores.

La figura 2.13 ilustra el control de fase de una onda senoidal que consiste en un interruptor electrónico que abre evitando el flujo de corriente a intervalos controlados, permitiendo el suministro de corriente solo en el intervalo en color rojo (ángulo de conducción). El ángulo de conducción convencionalmente se denomina con la letra alfa (α) y es el punto de interrupción de corriente.

Un circuito electrónico simple que permite el control del ángulo α es mostrado en la fig. 2.13, en el cual:

- El interruptor electrónico en este caso es un triac (D2) que puede ser activado por un pequeño pulso de corriente en su puerta.
- El TRIAC se apaga automáticamente cuando la corriente a través de él pasa por cero.
- En el circuito que se muestra, el condensador C2 se carga durante cada semiciclo por la corriente que fluye a través del resistor R3 Y R8.
- El hecho de que la carga está en paralelo con R3 y R8 durante esta parte del ciclo es de poca importancia ya que la resistencia de R3 Y R4 es muchas veces mayor que la de la carga.
- Cuando el voltaje a través de C2 alcanza la tensión de ruptura del gatillo bilateral del DIAC (D3), la energía almacenada en el condensador C2 se libera.
- Esta energía produce un impulso de corriente en el DIAC, que fluye a través de la puerta del triac.
- Dado que tanto el DIAC y el TRIAC son dispositivos bidireccionales, los valores de RT y CT determinará el ángulo de fase en la que se activa el TRIAC tanto en los semiciclos positivos y negativos de la onda senoidal de corriente alterna.

La forma de onda de la tensión en el condensador por las condiciones típicas de control ($\alpha = 90^\circ$) se muestra en la Figura. 2.14 Si un rectificador controlado de silicio se usa en este circuito en lugar del TRIAC, será controlado sólo un medio ciclo de la forma de onda. El otro medio ciclo será bloqueado, lo que resulta en una salida de pulso de corriente continua cuyo valor medio se puede variar mediante el ajuste de RT (Thyristor Device Data 2000).

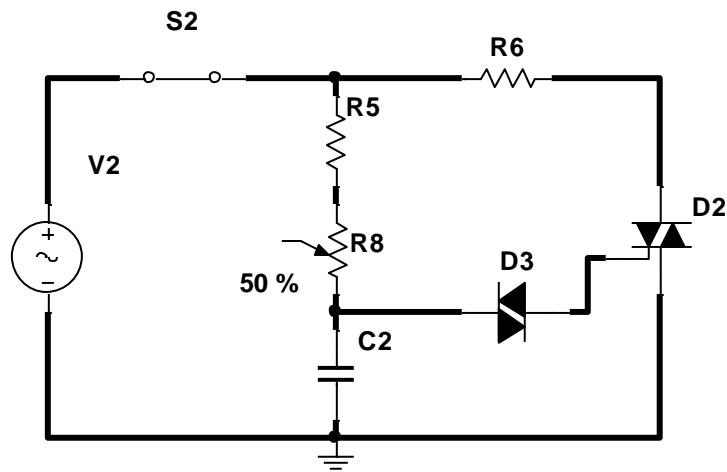


Fig.2.13 Circuito base para el control de fase

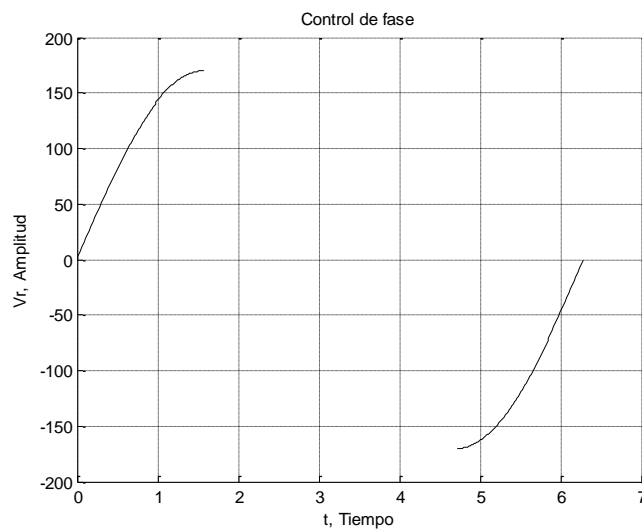


Fig.2.14 Forma de onda con $\alpha = 90^\circ$.

Otra de las etapas importantes en este estudio de investigación es correspondiente a la **etapa de potencia**, donde se tiene contemplado utilizar un dispositivo semiconductor con una respuesta superior a los 60 **Hz** ya que es la frecuencia a la cual opera la señal senoidal convencional y que va a ser la fuente principal que alimentara al sistema dinámico RC.

Una vez que se realizó el estudio general de los Tiristores se pudo determinar que el más adecuado por sus características eléctricas de funcionamiento es el triac, el cual es un dispositivo electrónico semiconductor de potencia y que puede conmutar en los cuatros

cuadrantes, para nuestra aplicación lo usaremos aprovechando el cuadrante I y III que es donde la fuente principal de alimentación de nuestro circuito RC trabaja y así lo pueda conmutar adecuadamente (ver tabla 2.1).

Notas:

- Como material de apoyo y conocimiento general sobre las características del triac se consultó el manual Electronics, Inc NTE (Semiconductor NTE).
- En las figuras correspondientes a los circuitos electrónicos se empleó el software Multisim (NI Multisim, 2016).
- Para el desarrollo de las figuras correspondientes a respuestas de circuitos de señales se empleó el Software Matlab (MatLab, 2015).
- En la generación de las gráficas las cuales representan las figuras correspondientes a las respuestas de señales fue necesario consultar bibliografía para el uso de MatLab (Gilat, 2004).

CAPÍTULO 3 PROCEDIMIENTO DE INVESTIGACIÓN

3.1 INTRODUCCIÓN

El ahorro de energía es un tema de interés en la mayoría de las empresas de cualquier giro González (2016). En esta tesis se presenta una técnica con control de tensión alterna y que por su simplicidad no depende de la frecuencia.

El control propuesto, está basado en el suministro de corriente alterna mediante un corte periódico en la señal senoidal (Rashid, 2004). Para tal fin es necesario un dispositivo con suficiente velocidad de respuesta tal y como sería un triac.

Convencionalmente existen dos formas de controlar la velocidad en el motor de corriente alterna:

- Para una carga que presenta una característica par-velocidad, será posible controlar la velocidad ajustando la tensión del motor (Hart 2001).
- Variando la frecuencia, debido a que el par producido por un motor de inducción es proporcional al cuadrado de la tensión aplicada (Jamaica G 2016).

El inconveniente de esta técnica es que necesita de equipos costosos en su diseño y programación.

El modelo que se presenta en este trabajo para controlar la velocidad de un motor de inducción consiste en el análisis dinámico variante en el tiempo de un circuito RC, con lo que se modifica la compuerta de disparo de un dispositivo electrónico semiconductor (triac) mediante el comportamiento del voltaje de la resistencia del circuito RC, variando el valor energético suministrado al motor.

Existen métodos convencionales para el disparo del ángulo de los sistemas de control para dispositivos eléctricos, los atenuadores más utilizados son de luminosidad o el control de velocidad de los motores de inducción (Mosqueda V 2016).

El avance significativo que han tenido los dispositivos semiconductores tanto en precio, rapidez, bajo consumo de energía y confiabilidad hacen que el control por medio del corte del ángulo de disparo sea una opción confiable y de bajo costo (Figueroa F 2016).

Existen varios modelos (interruptores) que se pueden utilizar para tal fin, en nuestro caso en particular emplearemos un sistema RC para operar adecuadamente este dispositivo (triac).

Este tipo de tiristor en la actualidad es empleado para varios propósitos de control electrónico de potencia donde la fuente principal que alimentara a la carga es una señal senoidal; para nuestro estudio aprovecharemos la aplicación de **control de fase**.

El control de fase mediante tiristores es un método muy eficaz por medio del cual se puede entregar una porción de voltaje medio a la carga, este control de fase se aprovechará para aplicarlo en ahorro de energía en sistemas industriales que tengan esta necesidad en sus procesos de producción.

3.2 MODELO DINÁMICO DE UN SISTEMA RC

Un sistema RC, como el que se muestra en la Fig. 3.1, está constituido de los siguientes componentes:

1. El conmutador tiene tres posiciones:
 - Posición S1 no hay carga del capacitor
 - Posición S2 carga al capacitor
 - Posición S3 descarga al capacitor
2. El circuito consta de un voltaje que carga a un capacitor,
3. El capacitor está conectado en serie con una resistencia

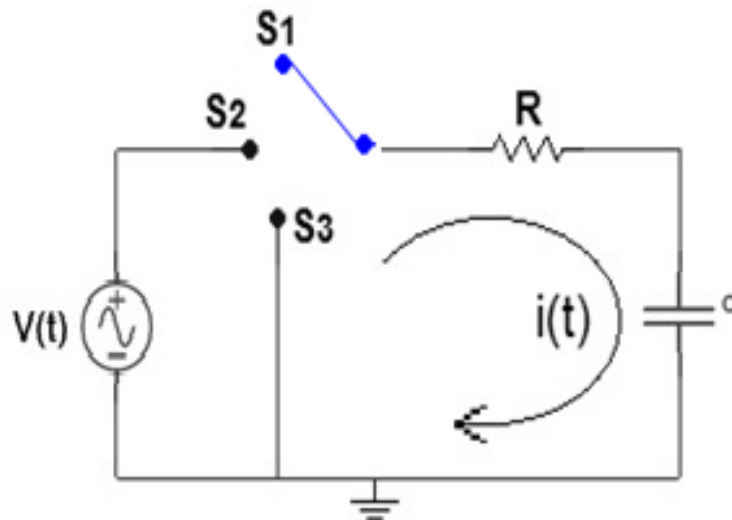


Figura 3.1 Circuito RC

Los elementos que intervienen en el circuito RC, del sistema de estudio se presentan en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Elementos del sistema RC

| Elemento | Símbolo | Unidades de medida |
|---|---------|--------------------|
| Generador de corriente alterna (Señal de entrada) | | Volts (V) |
| Conmutador | | Off-On |
| Resistencia | | Ohms(Ω) |
| Capacitancia | | Faradios (F) |
| Corriente | $i(t)$ | Amperes (A) |

El análisis del comportamiento dinámico del sistema de la Fig. 3.1, se visualiza desde dos casos (Muhammad H, 2004).

1. Cuando **S1** conmuta con **S2**, el capacitor se carga con respecto al generador de corriente alterna (Generador de C. A.).
2. Si **S1** conmuta con **S3**, entonces el capacitor entrega energía al sistema lo que propicia su descarga.

En este trabajo al análisis del sistema RC de estudio, se analizará desde el caso 1.

S1 conmuta con S2, para fines de este estudio, considérese la Figura 3.2.

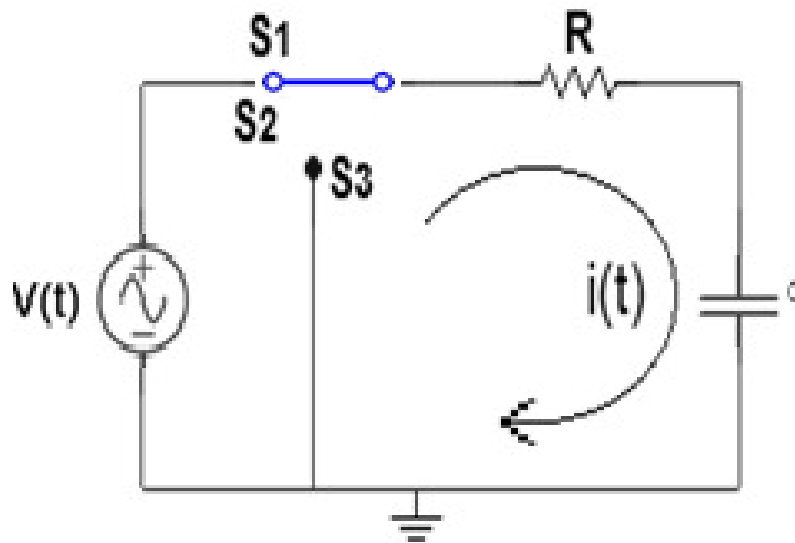


Figura 3.2 S1 conmuta con S2

Cuando S1 conmuta con S2 los elementos del circuito se alimentan de la fuente de voltaje $V(t)$, entonces el comportamiento dinámico del sistema es representado por (Ogata K 2003):

$$V(t) = V_R + V_C \quad (3.1)$$

donde V_R y V_C son el voltaje de la resistencia y del capacitor respectivamente y cuya correspondencia es de la forma:

$$V(t) = Ri(t) + \frac{1}{C} \int i(t)dt \quad (3.2)$$

A partir de la Ecuación (3.2) se requiere obtener un modelo analítico que permita conocer el comportamiento del sistema en el dominio del tiempo, por lo que se usará el método transformada de Laplace (Rosales J 2011). Siendo $V(t)$ la señal de entrada e $i(t)$ la señal de salida del sistema de estudio y aplicando transformada de Laplace a la ec. (3.2) resulta:

$$V(S) = RI(S) + \frac{1}{C} \left[\frac{I(S)}{S} - \int \frac{i(t)}{S} dt | t_0 \right] \quad (3.3)$$

De la Ecuación (3.3) con condiciones iniciales cero, entonces la función de transferencia (FT) que es el cociente de la señal de salida entre la señal de entrada (Martinez I 2015) mediante:

$$\frac{I(S)}{V(S)} = \frac{1}{R} \frac{S}{S + \frac{1}{RC}} \quad (3.4)$$

La función de transferencia representada por la ec. (3.4) contiene las siguientes características:

- Tiene un cero en $S=0$
- Un polo en $S = -\frac{1}{RC}$ con $RC > 0$

Por la ubicación del único polo en el plano complejo del sistema representado por la (FT) de la Ecuación (3.4) el circuito RC de estudio siempre será estable como se muestra en la figura 3.3.

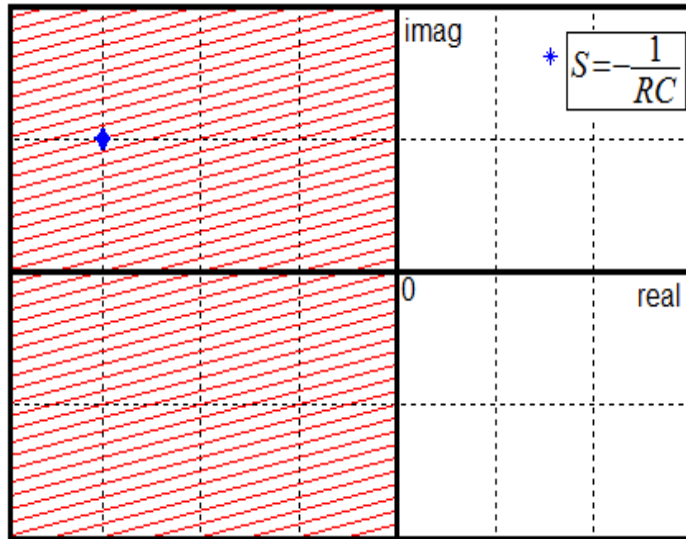


Figura 3.3 Ubicación del polo del sistema

Introduciendo una señal senoidal de entrada en la FT de la ecuación (3.4) de la forma:

$$V(t) = A \sin(\omega t) \text{ Volts} \quad (3.5)$$

Entonces, la ec. (3.4) resulta:

$$I(S) = \frac{A}{R} \frac{S}{\left(S + \frac{1}{RC}\right)} \frac{\omega}{(S^2 + \omega^2)} \quad (3.6)$$

donde A es el valor máximo de voltaje de la fuente de alimentación de ca. Aplicando transformada inversa de Laplace a la ecuación (3.6) se obtiene:

$$i(t) = \frac{AC\omega}{C^2 R^2 \omega^2 + 1} \left[-e^{\frac{t}{CR}} + \cos(\omega t) + CR\omega \sin(\omega t) \right] \text{ Amp} \quad (3.7)$$

A partir de la ecuación (3.7), se puede obtener fácilmente el efecto de voltaje de carga y descarga del capacitor y de la resistencia del sistema de estudio siendo:

$$V_C = \frac{1}{C} \int i(t) dt = \frac{AC}{C^3 R^2 \omega^2 + C} \left[\text{sen}(\omega t) + CR\omega \left[e^{\frac{-t}{CR}} - \cos(\omega t) \right] \right] \quad (3.8)$$

$$V_R = Ri(t) = \frac{ACR\omega}{C^2 R^2 \omega^2 + 1} \left[-e^{\frac{-t}{CR}} + \cos(\omega t) + CR\omega \text{sen}(\omega t) \right] \quad (3.9)$$

por lo tanto:

$$V(t) = A \text{sen}(\omega t) = V_C + V_R \quad (3.10)$$

Una vez conocido el comportamiento del sistema de estudio se colocará un sistema de apertura para un triac como a continuación se describe.

3.3 CIRCUITO DE CONTROL DE COMPUERTA TRIAC

Para el sistema circuito RC que se muestra en la figura 3.2, se conecta un circuito de control de compuerta para un triac, como se ilustra en la figura 3.4.

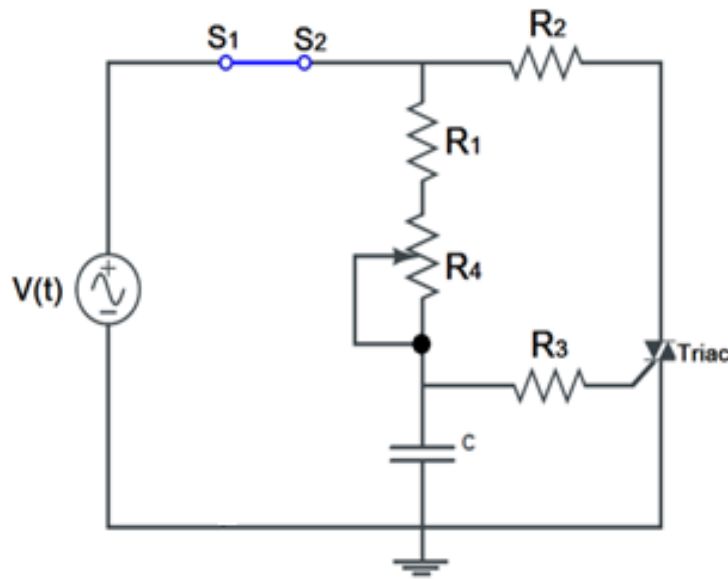


Figura 3.4 Sistema RC para el control de un triac

La función del triac por sus características bidireccionales, en su estado de conducción queda controlado por el potencial de disparo aplicado a la compuerta y la dirección de la corriente eléctrica queda determinada por la polaridad del potencial que recibe (Zetina, 2000).

Una corriente (I_G) se aplica a la compuerta del triac, la cual fluye a través de la unión entre la compuerta y la terminal MT1, la cantidad de corriente de compuerta para disparar un triac es una corriente establecida I_{GT} . Una vez que el triac se ha disparado, mientras que la corriente continúe su flujo a través de las terminales principales, de MT2 a MT1, el triac permanecerá encendido (San Miguel, 2014).

De acuerdo con la ecuación 3.10, el voltaje total de la fuente se divide en dos partes, una correspondiente al voltaje de la resistencia y la segunda al voltaje de carga o descarga del capacitor, es decir, el voltaje requerido para disparar el triac dependerá del voltaje de la resistencia (Choque S, 2014), siendo:

$$R = R_1 + R_4 \quad (3.11)$$

Donde, R_4 es una resistencia variable que tomará el valor ideal para disparar el triac para una señal senoidal donde ωt está en radianes, la frecuencia de onda f en Hz y el periodo T en segundos(s) determinados por la relación:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi} \quad (3.12)$$

Convencionalmente la frecuencia natural de la corriente alterna comercial en México es de $f = 60$ Hz. (Boylestand R, 2009).

3.4 RESULTADOS

3.4.1 Sistema de disparo del triac mediante resistencias

Para la implementación del método propuesto se usó un circuito como el que se muestra en la figura 3.4, para accionar una carga en un tiempo establecido. La tabla 3.2 describe las características de los elementos del circuito de estudio.

Tabla 3.2 Características del circuito de estudio

| Parámetro | Valor |
|-----------|--|
| R3 | 100.0 Ω |
| R4 | 1 a 500.0 Ω |
| C | 0.01 μ F |
| V(t) | 120Vrms, 60Hz. 0° |
| Triac | 2N6073 VGT: 2.5 máx. I GT: 30mA. |

En la figura 3.5 se muestra el diagrama del sistema de potencia de estudio.

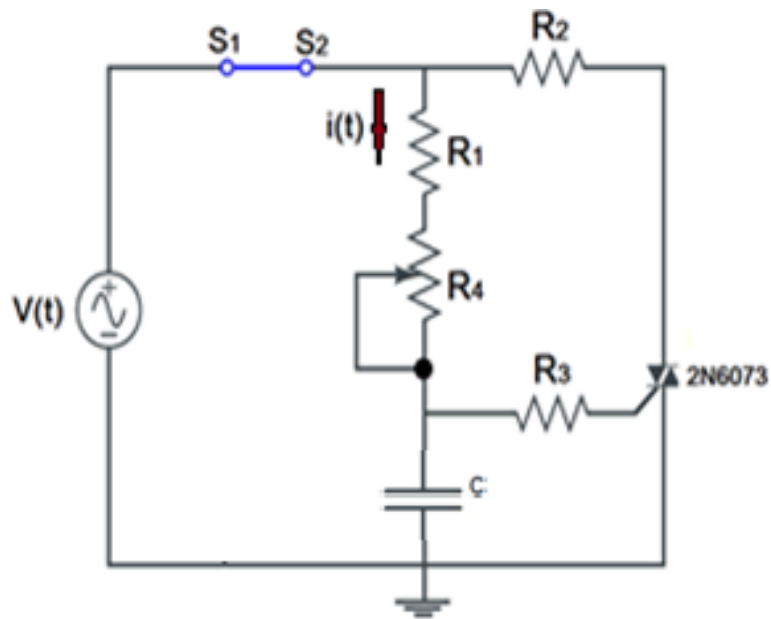


Figura 3.5 Circuito Electrónico de estudio

El objetivo se centra en obtener el valor requerido de la resistencia variable para disparar el triac en una constante de tiempo determinada por la ecuación (3.7) siendo:

$$(R_1 + R_4)C \quad (3.13)$$

Convencionalmente la sincronización con un dispositivo de arranque triac se da través de la siguiente hipótesis: para un rango de 1 – 30ms. Suponiendo un rango de ajuste de 2×10^{-3} a 25×10^{-3} ms (Timothy J, 2006), la constante de tiempo mínima ocurre cuando R_4 está ajustada hacia un extremo, siendo:

$$(R_1 + 0)0.01 \times 10^{-6} = 2 \times 10^{-3}$$

$$R_1 = 200k\Omega \quad (3.14)$$

El valor estándar de R_1 ocurre en 180 kΩ. La constante de tiempo máxima sucede cuando R_1 está completamente ajustado hacia el otro extremo, es decir:

$$(R_4 + 180 \times 10^3) 0.01 \times 10^{-6} = 25 \times 10^{-3}$$

$$R_4 = 2320 \text{ k}\Omega \quad (3.15)$$

El valor más cercano estándar para R_4 es de $2200 \text{ k}\Omega$. Usando como referencia los valores obtenidos en las ec (3.14) y (3.15) se obtiene la gráfica de la fig. 3.6.

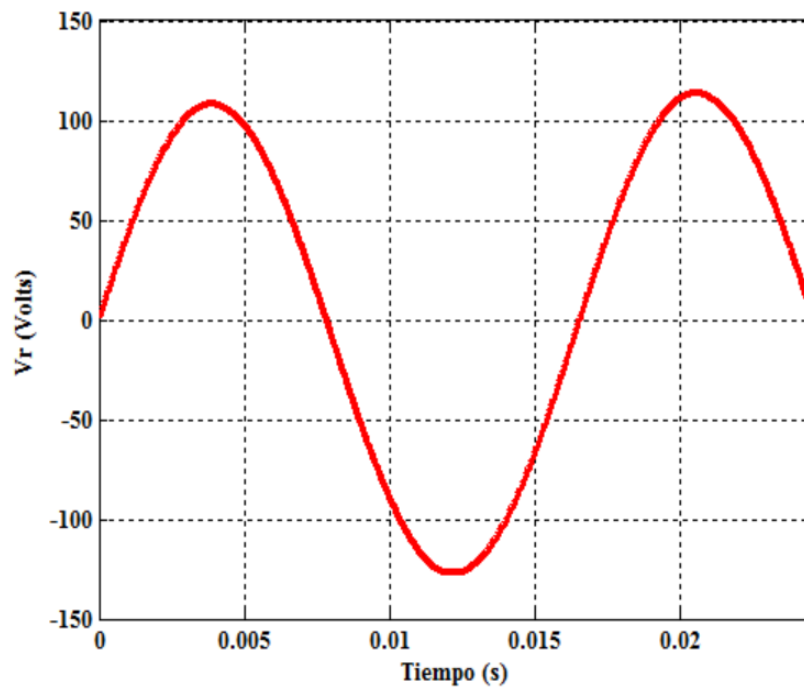


Figura 3.6 Voltaje de disparo para valores numéricos

Los valores propuestos por el método convencional producen un voltaje fuera del rango requerido para un ángulo eléctrico de 90° , por lo que se procederá a la selección de los valores de las resistencias considerando valores estándar comerciales de la tabla 3.3.

Tabla 3.3 Valores de R_1 y R_4

| Parámetro | Valor |
|-----------|-----------------------|
| R_1 | $1.0 \text{ k}\Omega$ |
| R_4 | $1.0 \text{ k}\Omega$ |
| | $3.3 \text{ k}\Omega$ |

| | |
|--|----------------|
| | 3.9 k Ω |
| | 4.7 k Ω |

De acuerdo a los valores de la tabla 3.2 y la tabla 3.3, sustituyendo en la ec. (3.9) de la resistencia, dado que si el voltaje alcanza 2.5 volts a un ángulo eléctrico de 90°, se disparará el triac, como se muestra en la figura 3.7.

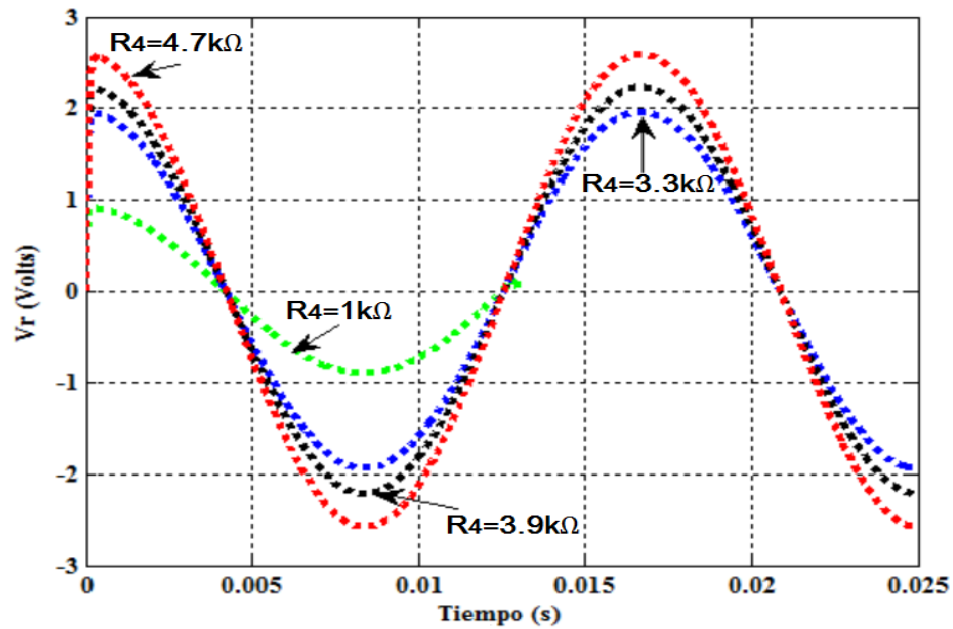


Figura 3.7 Vr para diferentes valores de R4

Sustituyendo los valores de R_4 en la función de transferencia de la ec. (3.4), se mapean los polos en el plano complejo como se ilustra en la fig. 3.8.

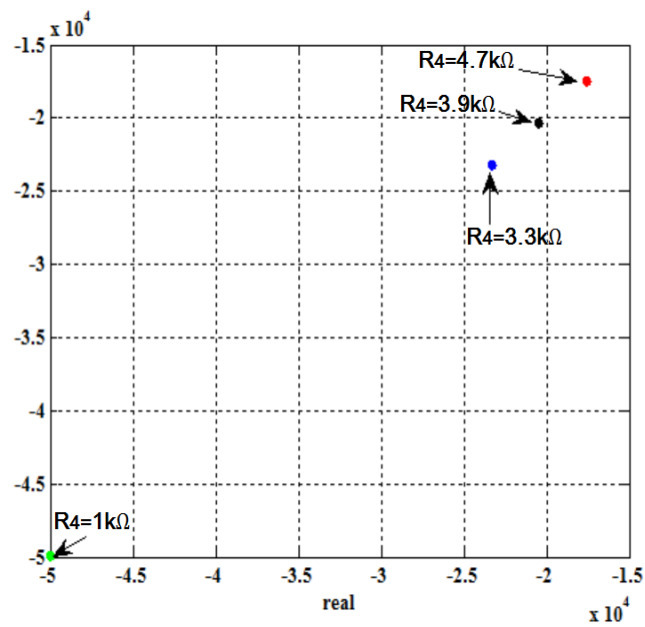


Figura 3.8 Ubicación de los polos en el plano complejo

La gráfica de la figura 3.7, muestra el valor aproximado que debe tener la resistencia variable para disparar el triac dentro de los parámetros requeridos, siendo los valores seleccionados de R_4 de $3.3\text{k}\Omega$ o $4.7\text{k}\Omega$. La gráfica de la figura 3.9, muestra una ventana más amplia del voltaje de las resistencias en serie con respecto al voltaje requerido para disparar el triac.

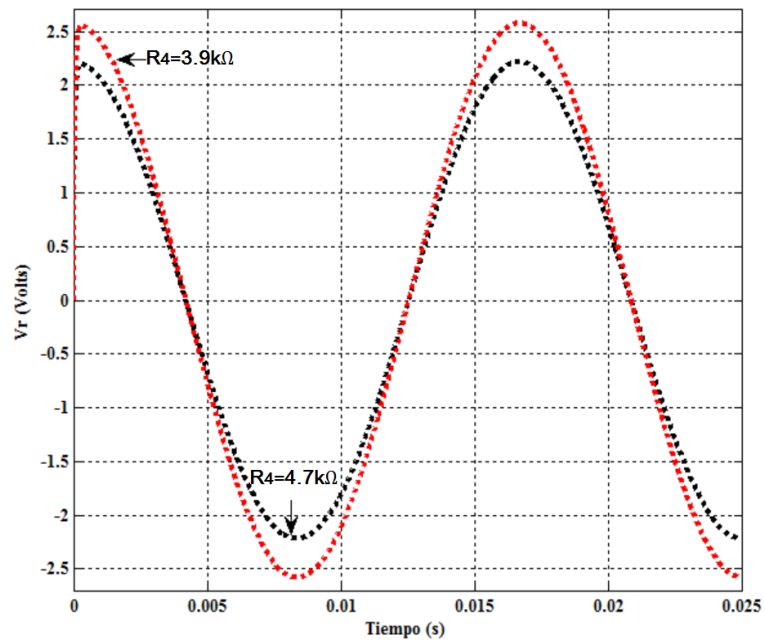


Figura 3.9 Valores de las resistencias variables seleccionados.

La gráfica de la figura 3.9, muestra que la resistencia variable ideal está dentro de los valores estándar de $4.7k\Omega$.

Identificada la resistencia variable de interés, se grafica individualmente como se muestra en la figura 3.10 para comprobar las características de disparo del triac.

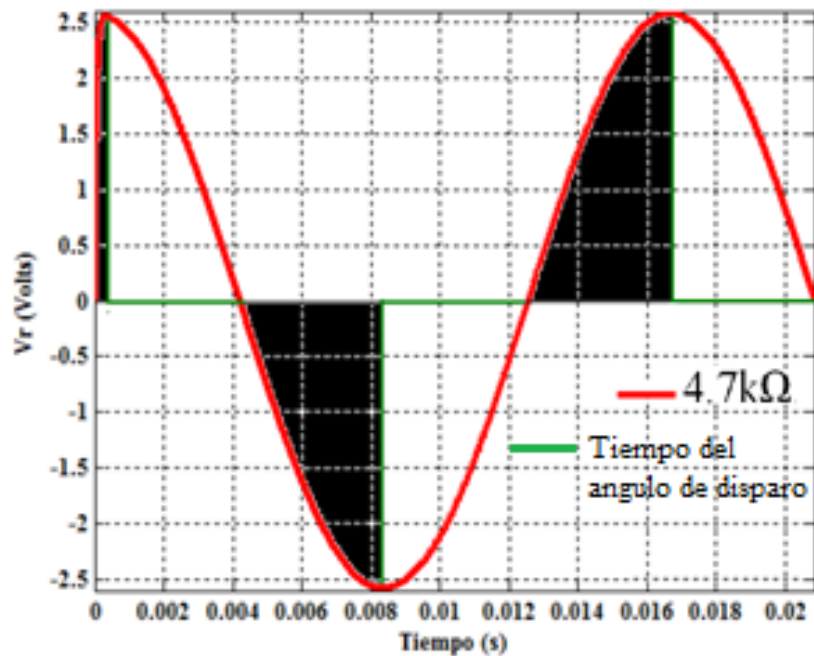


Figura 3.10 Características de disparo para R4 seleccionada

En la figura 3.10, se visualiza que el sistema de disparo fue inmediato para $t = 0.345ms$ permitiendo una acción rápida al sistema de control de potencia de estudio lo que permite tener un ahorro de potencia por tiempo de disparo del triac, en el anexo A se muestran diferentes pruebas de laboratorio para el sistema de estudio.

CAPÍTULO 4 MEDICIÓN DEL AHORRO DE ENERGÍA

4.1 INTRODUCCIÓN

Hoy en día existen diferentes métodos para el estudio del comportamiento de la corriente alterna, con el fin de encontrar alternativas de como poder ahorrar energía eléctrica tanto a nivel residencial e industrial. En este apartado de este trabajo de investigación utilizaremos un método propuesto para el estudio de la "CA" el cual consiste en utilizar el campo de las matemáticas correspondiente a métodos numéricos.

Como sabemos dentro del estudio de métodos numéricos encontramos un método conocido como Regla del Trapecio en el cual basaremos nuestro estudio para determinar el ahorro de energía eléctrica mediante un sistema dinámico RC; se propone este método como alternativo a los ya estudiados por otras personas.

4.2 INTEGRAL NUMÉRICA SIMPSON

4.2.1 Introducción.

Las fórmulas de Newton-Cotes son los tipos de integración numérica más comunes. Se basan en la estrategia de remplazar una función complicada o datos tabulados por un polinomio de aproximación que es más fácil de integrar.

Existen formas cerradas y abiertas de las fórmulas de Newton-Cotes. Las fórmulas cerradas son aquellas donde se conocen los datos al inicio y al final de los límites de integración (Fig. 4.1). *Las formas abiertas* tienen límites de integración que se extienden más allá del intervalo de los datos. Por lo general, las fórmulas abiertas de Newton-Cotes no se usan para integración definida, sin embargo, se utilizan para evaluar integrales impropias y para resolver ecuaciones diferenciales ordinarias (Chapra, Canale 2015 p. 471).

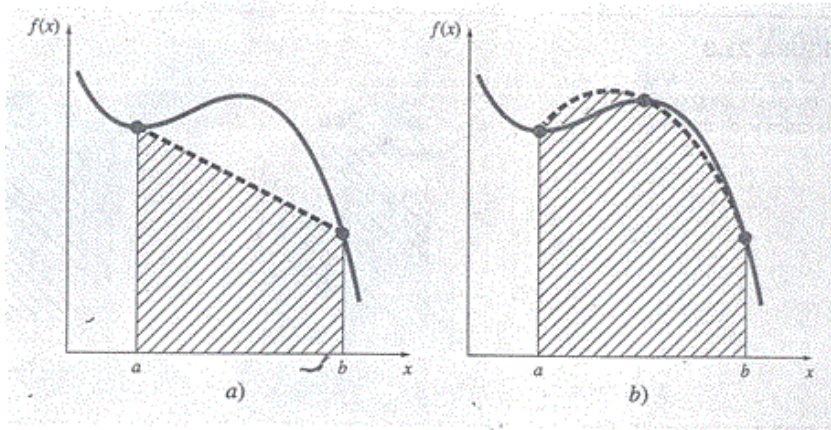


Figura 4.1 Integración cerrada

Reglas de Simpson. Además de aplicar la regla del trapecio con una segmentación más fina, otra forma de obtener una estimación más exacta de una integral consiste en usar polinomios de grado superior para unir los puntos. Por ejemplo, si hay otro punto a la mitad entre $f(a)$ y $f(b)$, los tres puntos se pueden unir con una parábola. Si hay dos puntos igualmente espaciados entre $f(a)$ y $f(b)$, los cuatro puntos se pueden unir mediante un polinomio de tercer grado. Las fórmulas que resultan de tomar las integrales bajo esos polinomios se conocen como *reglas de Simpson*.

Reglas de Simpson 1/3. La regla de Simpson 1/3 se puede expresar usando el siguiente formato.

$$I = (b - a) \left[\frac{f(x_0) + 4f(x_1) + f(x_2)}{6} \right] \quad (4.1)$$

Donde $a = x_0$, $b = x_2$ y x_1 es el punto a la mitad entre a y b , que ésta dado por $(b+a)/2$. Observe que, de acuerdo a la ecuación anterior, el punto está ponderado por dos tercios; y los dos puntos extremos, por un sexto.

La regla de Simpson 1/3 de aplicación múltiple. La regla de Simpson se mejora al dividir el intervalo de integración en varios segmentos de un mismo tamaño.

$$h = \frac{b-a}{n} \quad (4.2)$$

La integral total se puede representar como:

$$I = (b - a)[f(x_0) + 4 \sum_{i=1,3,5}^{n-1} f(x_i) + \sum_{j=2,4,6}^{n-2} f(x_j) + f(x_n)]/3n \quad (4.4)$$

Como se ilustra en la fig. 4.2 se debe utilizar un número par de segmentos para implementar el método. Además, los coeficientes 4 y 2 en la ecuación anterior a primera vista parecerían peculiares. No obstante, siguen en forma natural la regla de Simpson 1/3. Los puntos impares representan el término medio en cada aplicación y, por lo tanto, llevan el peso de 4 de la ecuación. Los puntos impares son comunes a aplicaciones adyacentes y, por lo tanto, se cuentan dos veces (Chapra, Canale 2015).

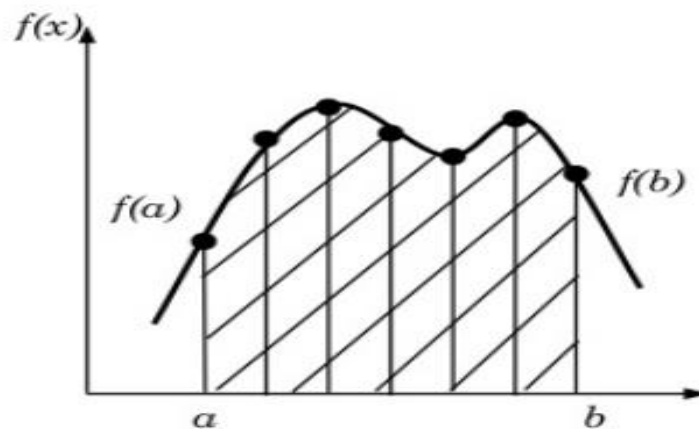


Fig. 4.2 Integral numérica

Regla de Simpson 3/8. De manera similar a la *regla de Simpson 1/3*, es posible ajustar un polinomio de LaGrange de tercer grado a cuatro puntos e integrarlo:

para obtener

$$I = \frac{3h}{8}[f(x_0) + 3f(x_1) + 3f(x_2) + f(x_3)] \quad (4.5)$$

donde $h=(b-a)/3$

Esta ecuación se llama *regla de Simpson 3/8* debido a que h se multiplica por 3/8. Esta es la tercera fórmula de integración cerrada de Newton-cotes.

Los métodos numéricos son una herramienta matemática alternativa para calcular áreas bajo la curva y es recomendada cuando la curva no está bien definida o representada por una función trigonométrica conocida.

En la parte correspondiente al cálculo del valor energético de la curva generada por la señal senoidal de la variación del ángulo en función del tiempo se empleará el método de Simpson para el cálculo del valor energético de acuerdo con el ángulo eléctrico de desplazamiento de la señal senoidal con la finalidad de poder determinar el ahorro de energía relativo a nuestro sistema RC en estudio.

Hoy en día existen diferentes métodos para el estudio del comportamiento de la corriente alterna, con el fin de encontrar alternativas de como poder ahorrar energía eléctrica tanto a nivel residencial e industrial. En este apartado de este trabajo de investigación utilizaremos un método propuesto para el estudio de la "CA" el cual consiste en utilizar el campo de las matemáticas correspondiente a métodos numéricos. Como sabemos dentro del estudio de métodos numéricos encontramos un método conocido como Regla del Trapecio en el cual basaremos nuestro estudio para determinar el ahorro de energía eléctrica mediante un sistema dinámico RC; se propone este método como alternativo a los ya estudiados por otras personas.

4.3 REGLA DEL TRAPECIO (SEGMENTACIÓN MÚLTIPLE) APLICADO AL ESTUDIO DE AHORRO DE ENERGÍA DE UN SISTEMA RC.

Para este estudio el análisis del gasto de energía está basado puede analizarse mediante el cálculo de las áreas que se determinan por medio de las aperturas de los ángulos (α). Entonces a menor área mayor será el grado de ahorro de energía del sistema.

4.3.1 Determinación de la potencia según el desplazamiento del ángulo eléctrico.

La corriente de carga presenta semiciclos positivos y negativos. Se puede analizar un semiciclo positivo del controlador de tensión, para posteriormente extrapolar el resultado

por simetría para describir el funcionamiento para el periodo completo (Hart, 2001, p. 178). La tensión algebraica de la fuente es

$$V_s(wt) = V_m \text{Sen}(wt) \quad (4.6)$$

La tensión media algebraica de salida es

$$V_o(wt) = V_m \text{Sen}(wt) \quad \alpha < wt < \pi, \quad \alpha + \pi < wt < 2\pi \quad (4.7)$$

En cualquier otro caso V_o es cero.

Calculando la tensión media aplicada a la carga teniendo en cuenta la simetría positiva y negativa de la forma de la tensión, por lo que solo es necesario evaluar medio periodo de la forma de onda senoidal.

La fórmula algebraica general es:

$$V_o = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} f(x) dx \quad (4.8)$$

Sustituyendo valores tenemos

$$V_o = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_m \text{Sen}(wt) d(wt) \quad (4.9)$$

Aplicando la regla del trapecio para resolver la ecuación 4.9 tenemos la solución general.

La fórmula general del de la regla del trapecio es la siguiente:

$$V_o = \left\{ \left[\frac{h}{2} \right] [f(x_0) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} f(x_i) + f(x_n)] \right\} \quad (4.10)$$

donde $h = \frac{\pi - \alpha}{n}$ y n es el número de particiones.

Sustituyendo los valores del anexo "B" y el valor de "h" en la Ec 4.5 se obtienen los valores del voltaje promedio para diferentes valores de "a"; alfa puede tomar valores entre (0 y 2π). La corriente media se obtiene a partir de los resultados de la Ec. 4.11

$$I_o = \frac{V_o}{R} \quad (4.11)$$

4.3.2 Cálculos de potencia obtenidos en función al desplazamiento de la señal senoidal.

La tabla 4.1 muestra la concentración de los valores energéticos obtenidos con los diferentes desplazamientos de los grados eléctricos de la señal senoidal con una resistencia de prueba de 16Ω .

Tabla 4.1 Calculo de potencia

| V _o V | I _o A | E V | I A | P _o W | P W | α | ε % |
|---------------------|---------------------|--------|--------|---------------------|--------|----------|-----------------|
| 110 | 6.88 | 81.5 | 5.1 | 729 | 415. | 0.000 | 25.9 |
| 108.8 | 6.8 | 80.46 | 5.03 | 717 | 405 | 0.074 | 26 |
| 105.8 | 6.6 | 78 | 4.87 | 685 | 380 | 0.349 | 26 |
| 101.9 | 6.36 | 74.75 | 4.67 | 635 | 349 | 0.520 | 26 |
| 96.1 | 6.00 | 70.15 | 4.38 | 568 | 307 | 0.698 | 27 |
| 89.00 | 5.55 | 64.58 | 4.03 | 491 | 260 | 0.872 | 27 |
| 81.33 | 5.08 | 58.8 | 3.67 | 410 | 216 | 1.047 | 27 |
| 72.90 | 4.55 | 52 | 3.25 | 328 | 169 | 1.220 | 28.7 |
| 63.58 | 3.97 | 45.5 | 2.84 | 251 | 129 | 1.396 | 28.5 |
| 54.18 | 3.38 | 38.22 | 2.38 | 182 | 91 | 1.570 | 29.5 |

donde:

V_o representa el voltaje medio calculado con la Ec 4.9,

I_o es la corriente media calculada con la EC 4.9

P_o es la potencia eléctrica y representan el valor exacto

α representa el ángulo de disparo el cual se debe de restar de los 90° para determinar el ángulo de conducción

E, I y P son voltaje, la corriente y la potencia promedio respectivamente, cuyos valores numéricos son obtenidos mediante la regla del trapecio. Para nuestro estudio se

usaron los valores reales de la señal alterna obtenidos en el laboratorio, usando osciloscopio digital

ε es el error relativo que se obtiene de la siguiente manera:

$$\varepsilon \% = \frac{V_o - E}{V_o} * 100\% \quad (4.12)$$

Como podemos observar en la tabla 4.1 el voltaje de salida (V_o) varía de acuerdo con la raíz cuadrada del ciclo de trabajo, lo anterior lo podemos observar en LA Figura 4.3.

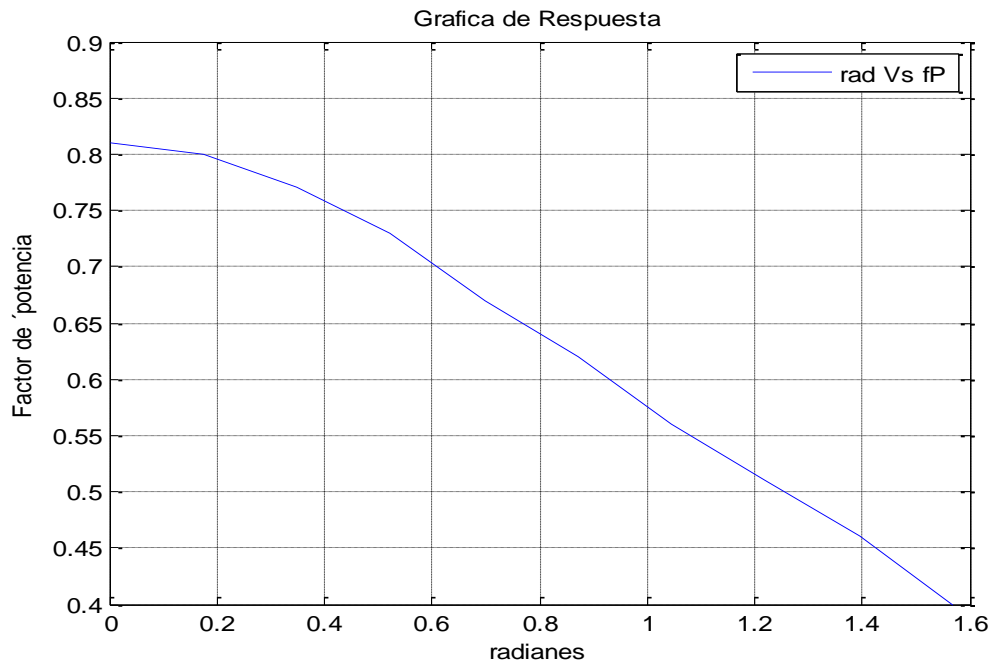


Figura 4.3 Ciclo de trabajo Vs Factor de Potencia

Como se puede observar en la figura 4.3 el factor de potencia de la señal senoidal se ve afectado conforme aumenta el ángulo de disparo, el cual está comprendido desde 0 a 1.6 radianes aproximadamente. Para el cálculo del factor de potencia de la figura 4.3 se utilizó la siguiente formula:

$$fp = \frac{P}{S} \quad (4.13)$$

donde: Fp es el factor de potencia, P es la potencia media y S es la potencia aparente.

4.4 ESTUDIO DE AHORRO DE ENERGÍA

El ahorro de energía está en función del ángulo de conducción y del tiempo que permanezca sin variar dicho ángulo recordemos que el consumo eléctrico se determina mediante los KW/H. la siguiente tabla muestra el concentrado para los diferentes ángulos de conducción los cuales fueron obtenidos mediante la siguiente ecuación

$$AE = \frac{N1-N2}{N1} 100\% \quad (4.14)$$

donde: AE es el ahorro de Energía, N1 Voltaje de entrada y N2 Voltaje de salida

Tabla 4.2 Ahorro de energía

| N1 | N2 | Ahorro de Energía % | ángulo de disparo del triac α |
|------|-------|---------------------|--------------------------------------|
| 81.5 | 81.5 | 0 | 0.000 |
| 81.5 | 80.46 | 1.27 | 0.074 |
| 81.5 | 78 | 4.29 | 0.349 |
| 81.5 | 74.75 | 8.28 | 0.520 |
| 81.5 | 70.15 | 14 | 0.698 |
| 81.5 | 64.58 | 20.7 | 0.872 |
| 81.5 | 58.8 | 28 | 1.047 |
| 81.5 | 52 | 36 | 1.220 |
| 81.5 | 45.5 | 44 | 1.396 |
| 81.5 | 38.22 | 53 | 1.570 |

Como se puede observar en la tabla 4.2 el Ahorro relativo consiste en que tanto variemos el ángulo de disparo y cuánto tiempo se mantenga en esta posición, como ejemplo si se tuviera un ángulo $\alpha = 0^\circ$ por un tiempo determinado el ahorro de energía sería cero, mientras que, si fuera necesario mantener una luminaria al 50% de su capacidad por un tiempo determinado, el ángulo $\alpha = 90^\circ$ nos proporcionaría un ahorro del 50% aproximadamente.

CAPITULO 5 ESTUDIO CON CARGA INDUCTIVA (MOTOR DE INDUCCIÓN)

5.1 INTRODUCCIÓN

Un motor de inducción es un sistema que está constituido de una parte eléctrica y una mecánica para conformar un sistema electromecánico como se muestra en la figura 5.1

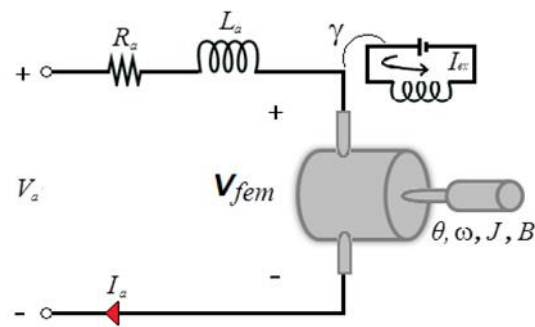


Figura 5.1 Diagrama esquemático del motor de inducción [Dorf, 2008].

Para fines de este estudio se simula el motor de inducción de ca a través de simulink para conocer el comportamiento del motor ante condiciones de operación de placa, la figura 5.2 muestra el sistema en simulink de la figura 5.1.

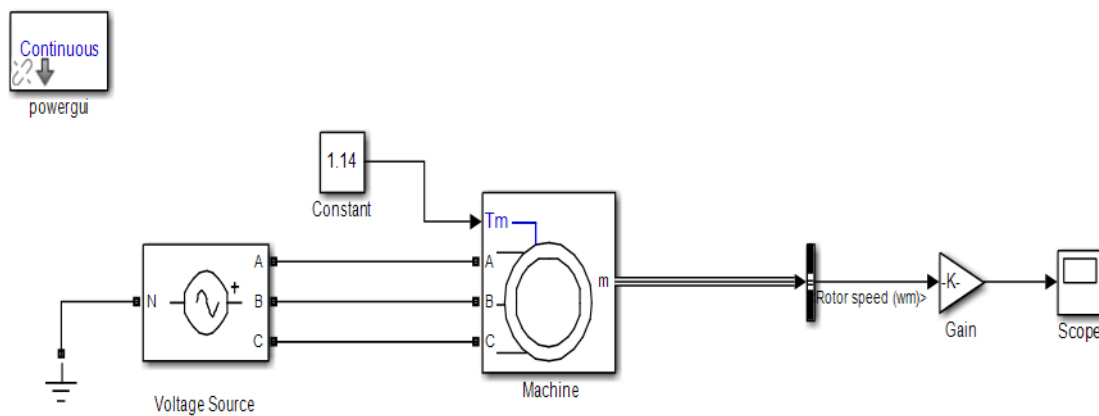


Figura 5.2 Diagrama del motor de inducción de ca en simulink de matlab.

La tabla 5.1 muestra los datos de placa del motor.

Tabla 5.1 Datos de placa.

| Símbolo | Definición |
|-------------|--|
| $V_a(t)$ | Tensión aplicada al motor |
| $I_a(t)$ | Corriente del motor |
| $L_a(t)$ | Inductancia total equivalente en serie |
| R_a | Resistencia total |
| $\omega(t)$ | Velocidad angular del motor |
| J | Momento de inercia |
| B | Coeficiente de rozamiento |
| T_r | Par resistente |

5.2 RESULTADOS (CASO PRÁCTICO)

En la tabla 5.2 se muestran las condiciones nominales del sistema de estudio. Cabe mencionar que los datos mostrados en la tabla 5.2 fueron obtenidos del motor de inducción el cual se utilizó para las pruebas de laboratorio.

Tabla 5.2 Condiciones nominales del sistema de estudio.

| Valores de placa | |
|------------------|------------------------------|
| $V_a = 120$ Volt | $B = 0.006$ N.m |
| $I_a = 2.5$ Amp | $K = 0.57$ |
| $RPM = 1800$ | $R_a = 5$ Ω |
| $T_r = 1.14$ | $L_a = 0.043$ H |
| $HP = 1/4$ | $J = 0.57$ Kg.m ² |

La figura 5.3 muestra la velocidad del motor en condiciones nominales de operación.

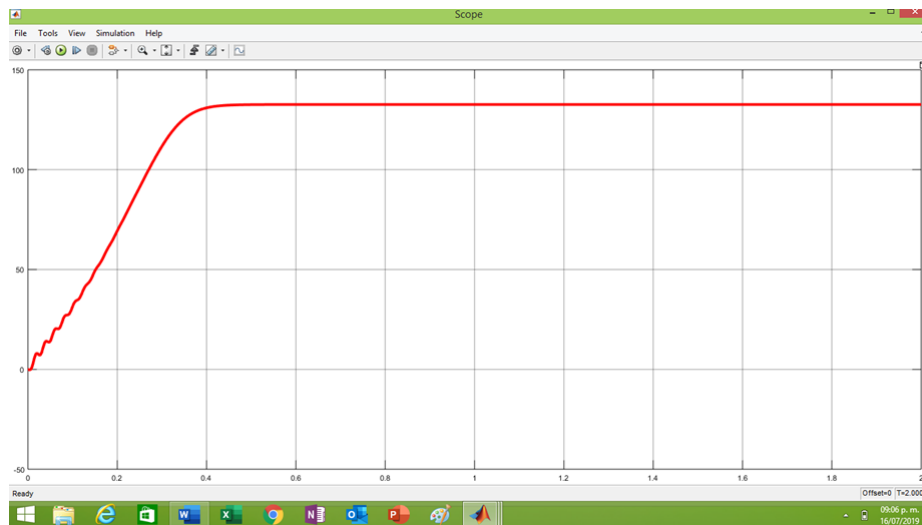


Figura 5.3 Velocidad del motor en condiciones nominales

5.3 RESULTADOS DE LABORATORIO (CASO PRÁCTICO)

En la tabla 5.3 se puede observar la relación de las diferentes variables eléctricas.

Estos resultados fueron obtenidos en el laboratorio utilizando el mismo circuito electrónico que se muestra en el capítulo 3, en el que únicamente se sustituyó la resistencia de prueba por un motor de inducción con características eléctricas mostradas en la tabla 5.2.

Tabla 5.3 Relación de voltaje, corriente, potencia, resistencia y RPM

| VOLTAJE rms | CORRIENTE rms | POTENCIA Watts | RESISTENCIA DE CONTROL | RPM | Rad/seg |
|-------------|---------------|----------------|------------------------|------|---------|
| 40 | 0.95 | 39.2 | 130 K Ω | 1638 | 171.53 |
| 45 | | | | 1675 | 175.4 |
| 50 | 1 | 50 | 117 K Ω | 1701 | 178.128 |
| 55 | | | | 1717 | 179.80 |
| 60 | 1.14 | 68.4 | 96 K Ω | 1730 | 181.16 |
| 65 | | | | 1738 | 182 |
| 70 | 1.33 | 93.1 | 78 K Ω | 1744 | 182.63 |
| 75 | | | | 1750 | 183.26 |
| 80 | 1.56 | 124.8 | 61 K Ω | 1753 | 183.57 |
| 85 | | | | 1756 | 183.88 |
| 90 | 1.81 | 162.81 | 46 K Ω | 1758 | 184.09 |
| 95 | | | | 1759 | 184.20 |
| 100 | 2.03 | 203 | 28 K Ω | 1762 | 184.51 |
| 105 | | | | 1764 | 184.72 |
| 110 | 2.3 | 253 | 12 K Ω | 1765 | 184.83 |
| 117 | 2.47 | 288.99 | 0 Ω | 1765 | 188 |

Las gráficas 5.4 y 5.5 muestran respectivamente el comportamiento grafico de la variación de voltaje/corriente y voltaje/rpm.

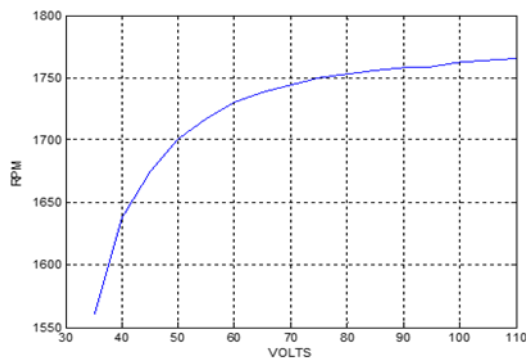


Figura 5.4 Relación voltaje/corriente

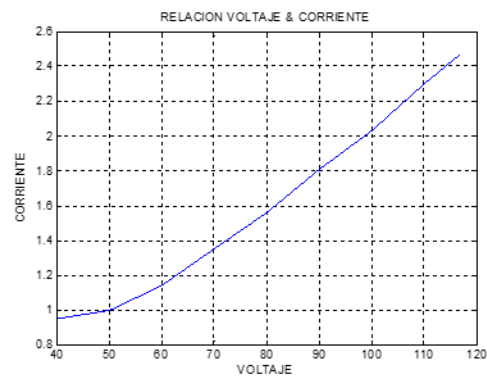
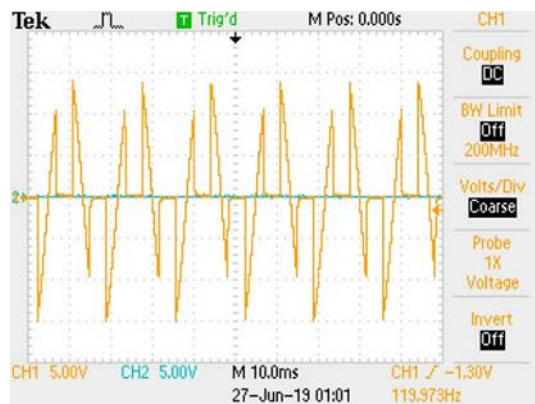


Figura 5.5 Relación Voltaje/rpm

Las siguientes graficas corresponden a la variación del voltaje sobre la bobina del motor de inducción con una variación a intervalos de 5 volts en aumento, las cuales fueron obtenidas directamente en el laboratorio con un osciloscopio digital.



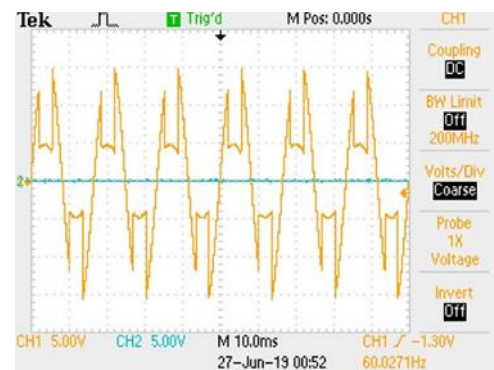
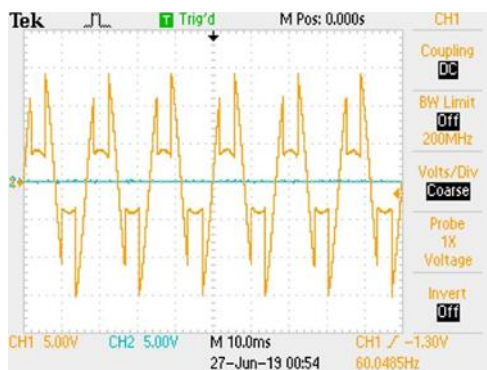
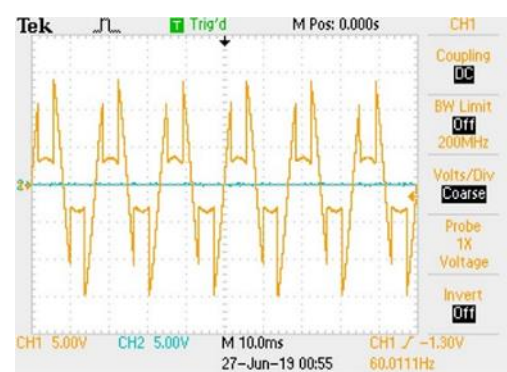
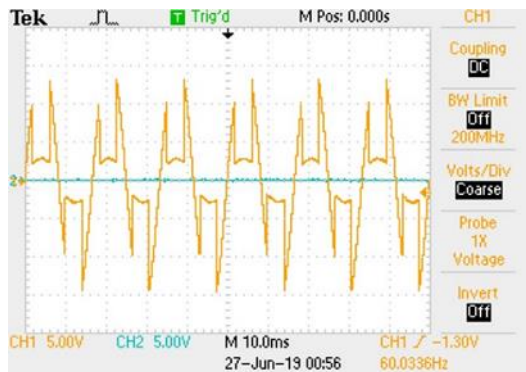
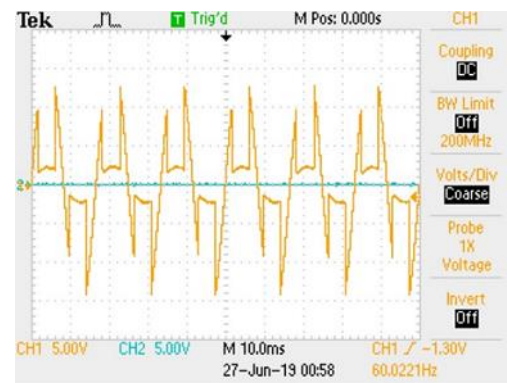
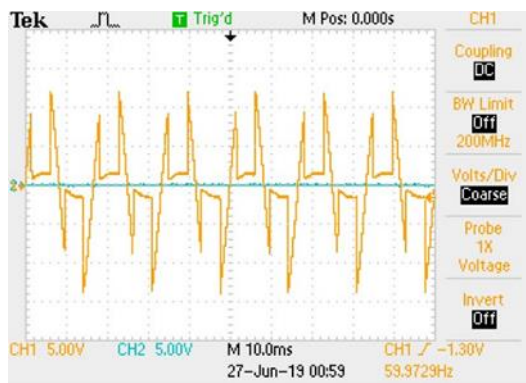


Figura 5.6 variación de voltaje sobre la bobina del motor de inducción

5.4 CONCLUSIONES

Existen diferentes aplicaciones para el control de la velocidad de un motor de inducción, en la industria surgen diariamente los retos por gestionar y optimizar costos. En los tiempos llamados set off, y los horarios de menor demanda dentro de las empresas se deben generar las menores pérdidas en cuanto a costo.

Este proyecto está planteado de manera práctica para conocer, ubicar y seleccionar el nivel de voltaje que fácilmente podría cambiarse dentro de la dinámica original, también puede considerarse para la implementación de un controlador proporcional derivativo (PD) que permita cambiar automáticamente la velocidad del motor como el proceso lo requiera.

Las ventajas de emplear variadores estáticos están en el abaratamiento de costos de los componentes electrónicos de potencia. También se sabe que la forma de onda de la tensión aplicada al motor no es senoidal.

El inconveniente que se pueda suponer a esta distorsión de la forma de onda, y por tanto las pérdidas adicionales a las que da lugar, se compensan sobradamente con la simplicidad del procedimiento y, sobre todo, por la eliminación del transitorio de arranque. Hay que tener en cuenta que para potencias pequeñas (de unos pocos kw), el coste del arrancador es varias veces superior al de propio motor.

El estudio realizado se tiene pensado escalonarlo a un motor trifásico.

CONCLUSIONES

Se obtiene el valor instantáneo del gasto energético usando integral numérica, la cual se generará por la apertura y cierre del triac de la figura 3.4 y conocer a detalle el consumo y ahorro relativo en porcentaje de energía del sistema de estudio.

Se determinó La Ecuación Diferencial para calcular el voltaje necesario del capacitor "C" mediante la variación de la resistencia R de carga del circuito RC. Con el método propuesto en este trabajo se puede variar el ángulo energético de 0° a 90° eléctricos, con lo anterior se modifica la potencia suministrada a la carga de CA a través de un triac y a la vez se puede modificar la velocidad de un motor de inducción. Los resultados obtenidos pueden aplicarse en forma muy general a toda aplicación donde se requiera modificar el suministro de potencia de una carga de CA, por ejemplo, control de potencia de AC con relevadores de estado sólido, control de calentadores, arrancadores de potencia suaves etc.

Se realizaron las pruebas de laboratorio las cuales soportan los resultados obtenidos y que se pueden analizar en los anexos A y B

Con los estudios de laboratorio se obtuvieron los valores reales de la señal de corriente alterna en función del tiempo, estos valores fueron necesarios para calcular el ahorro de energía mediante el método numérico propuesto (Regla del Trapecio).

APORTACIÓN DE LA TESIS

El trabajo desarrollado propone un método alternativo para el control de suministro de energía a un circuito eléctrico de corriente alterna, la idea principal es cortar la señal senoidal del ángulo de alimentación a intervalos regulados para reducir el abastecimiento a la carga eléctrica. Esta metodología es muy fácil de adaptar a un circuito eléctrico como es el motor o resistencias eléctricas, debido a que no necesita programación como son los variadores de frecuencia comerciales.

Se propone una metodología para obtener los valores de las resistencias adecuadas para disparar un sistema de potencia triac, mediante las ecuaciones analíticas del voltaje y corriente de la resistencia de un circuito RC.

RECOMENDACIONES

Para futuros estudios se recomienda ampliar el control de fase de 0° a 180° para tener mayor control sobre la señal de CA y un mayor rango de operación y control de los equipos de CA.

El controlador de tensión de alterna es adecuado para algunas aplicaciones de control de velocidad. Los ventiladores y las bombas son cargas adecuadas para este tipo de control de velocidad. La eficiencia energética de este tipo de control es mala, especialmente a bajas velocidades. El gran deslizamiento que se produce a bajas velocidades provoca grandes pérdidas en el rotor. Las aplicaciones típicas son aquellas en las que la carga es pequeña, como en los motores monofásicos con potencia igual a una fracción de caballo de vapor, o donde el periodo de operación a baja velocidad es corto.

Se tendrán que conectar condensadores en paralelo con las cargas inductivas para mejorar el factor de potencia FP. Si el valor VAR (voltio, amperios, reactivos) necesario para una carga es constante, podremos seleccionar un condensador fijo para corregir el factor de potencia e igualarlo a uno. Sin embargo, si el valor de VAR necesario es variable, al seleccionar un condensador fijo se obtendrá un factor de potencia variable (Hart, 2001).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] John Dorsey: Sistemas de control continuos y discretos. Ed Mc Graw Hill., México, 2005.
- [2] Carlos A, Smith. Armando B. Corripio: Control automático de procesos Teoría y práctica. LIMUSA., México, 2016.
- [3] Saucedo, R. y E. E. Schiring: Introduccion to continuous and Digital Control systems. McMillian., Nueva York, 1968.
- [4] Franklin, Gene F., J. David Powell y Abbas Emami-Naeini: Feedback Control of Dinamic Systems. Addison Wesley., Reding Mass, 1991.
- [5] Ludwig von Bertalanffy. Robotts, men, and minds: Psychology in the modern world. Ed. G. Braziller, 1997.
- [6] Katsuhiko Ogata. Ingeniería de control moderna. PEARSON EDUCACIÓN, S.A., Madrid, 2003.
- [7] Hernández Gaviño Ricardo. Introducción a los sistemas de control: Conceptos, aplicaciones y simulación con MatLAB. PEARSON EDUCACIÓN, México 2010.
- [8] Dorf, R.C; Bishop, R.H. Sistemas de control moderno. PEARSON EDUCACIÓN, S.A., Madrid 2005.
- [9] O. Mayr. Feedback. Mechanisms in the Historical Collections of the National Museum of History and Technolgy Smithsonian Institution Press. Washington, D. C., 19971.
- [10] Paul B. Zbar, Gordon Rockmaker, David J. Bates. Prácticas de Electricidad. México 2010.
- [11] ON Semiconductor. Thyristor Device Data. USA 2000.
- [12] NTE Electronics, INC. Semiconductors Edición 11.
- [13] National Instruments. Multisim 2016. Software para circuitos electrónicos. EUA, 2016.
- [14] MatLab. Software para soluciones matemáticas. 2015.
- [15] Amos Gilat. MATLAB An Introduction with Aplications. Departament of Mechanical Engineering The Ohio State University. EUA, 2004.
- [16] W Bolton. Ingeniería de control. Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V., México 2015.
- [17] José Miguel Molina Martínez. Francisco Javier Cánovas Rodríguez. Principios básicos de electrotecnia 2Fundamentos de electrotecnia para Ingenieros. Alfaomega. México, 2013.
- [18] Alcalde San Miguel, P. Curso de electricidad general. Paraninfo, Madrid. 2003.
- [19] Gil Padilla, A.J. Electrónica Genaral. Mc-Graw-Hill. Madrid 2005.

- [20] Javier Vázquez del Real. Circuitos electrónicos analógicos "Del diseño al experimento". Alfaomega (marconbo). México, 2016.
- [21] Alber Malvino. David J. Bates. Principios de electrónica. Madrid, 2007
- [22] Charles K. Alexander, Matthew N. O. Sadiku. Fundamentos de Circuitos Eléctricos. McGraw Hill. España 2015.
- [23] Richard C. Dorf y James A. Svoboda. Circuitos Eléctricos. Alfaomega. México 2007.
- [24] Floyd Thomas L. Principios de circuitos eléctricos. Pearson Educación. México, 2007.
- [25] J.Juan Rosales García. Manuel Guía Calderón. Ecuaciones Diferenciales Ordinarias. Universidad de Guanajuato. México 2009.
- [26] A. Papulis. M. Bertan. Sistemas y circuitos digitales y analógicos. Marcombo. Barcelona, 1989.
- [27] González Ramos Alma Delia, Hidalgo Baeza María del Carmen, Rojas Silva Eduardo, Gómez Nungaray Mónica Alejandra. Control y monitoreo de riego mediante el uso de dispositivos móviles. Revista de Tecnología e Innovación 2016, 3-6: 13-17.
- [28] Muhammad H. Rashid. Electrónica de Potencia, Circuitos, Dispositivos y Aplicaciones. Pearson Educación. México, 2004.
- [29] Daniel W. Hart. Electrónica de potencia. Pearson Educación. México, 2001.
- [30] David, Sensores de corriente aplicados al ahorro de energía en iluminación. Revista de Aplicaciones de la Ingeniería. 2015, 2-5: 224-229.
- [31] Mosqueda Valadez Armando, Jurado Pérez, Fernando, Lozano Luna A. Análisis del corto circuito en instalaciones eléctricas industriales trifásicas mediante la Normativa IEC-NOM. Revista de Energía Química y Física. 2016, 3-7: 1-8.
- [32] Figueroa Fernando, García José Miguel, Torres Jacinto y Zúñiga Mónica E. Análisis de dos tipos de mediciones de Descargas Parciales utilizando el método estadístico. Revista de Sistemas Experimentales. 2016, 3-7: 1-9.
- [33] Martínez, I., Juárez, C., (2015). "Modelado de un Sistema Máquina Bus Infinito Usando Transformada de Laplace". Pistas educativas, ISSN 1465-1249.
- [34] Zetina, Electrónica básica, Editorial Limusa, 2000, ISBN: 9681857909, 9789681857905, pág. 57.
- [35] Pablo Alcalde San Miguel, Electrónica, Ediciones Paraninfo, S.A., 2014, ISBN: 842839878X, 9788428398787, pág. 268.

- [36] Choque Santos Garrón Danny, Zárate Víctor y Colque Juan, Sistema automatizado para el control de iluminación eléctrica de un campo deportivo. Revista de Aplicaciones de la Ingeniería. 2014.1-1: 66-72.
- [37] Boylestand, R. L. y Nashelsky, L. (2009). "Electronic Devices and Circuit Theory". USA. Pearson/Prentice Hall. ISBN 0135026490. pp. 31.
- [38] Maloney, Timothy J. Electrónica Industrial Moderna. 5ª edición. Pearson Educación. México 2006.
- [39] Steven C. Chapra. Raymond P. Canale. Métodos numéricos McGraw Hill educación. México 2015.

ANEXOS

En las pruebas de laboratorio se puede observar en el anexo A la variación del ángulo de disparo para tres valores distintos de la resistencia R del circuito de control RC.

ANEXO A

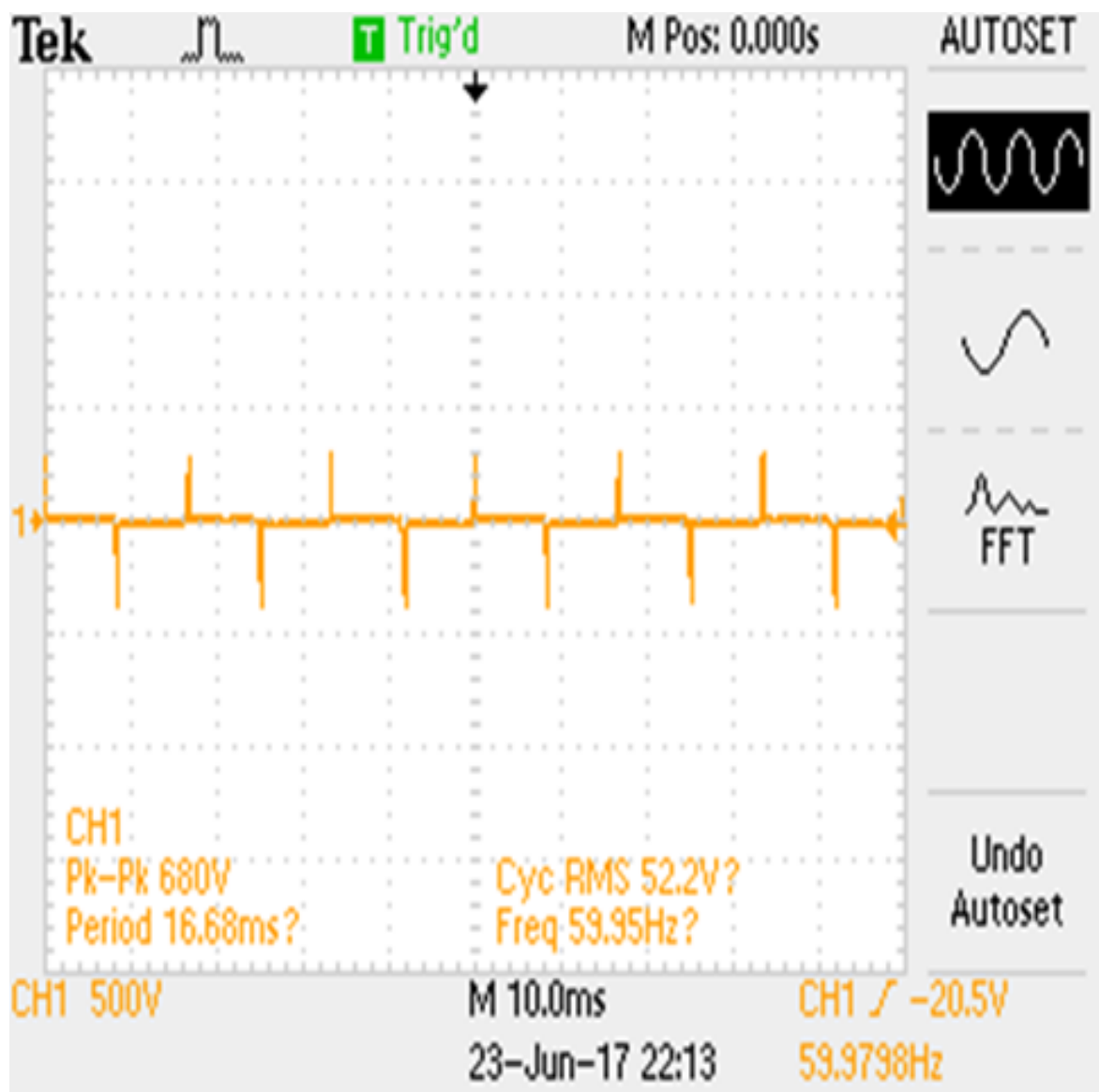


Figura A1 Ángulo de disparo a 10 grados eléctricos (elaboración propia)

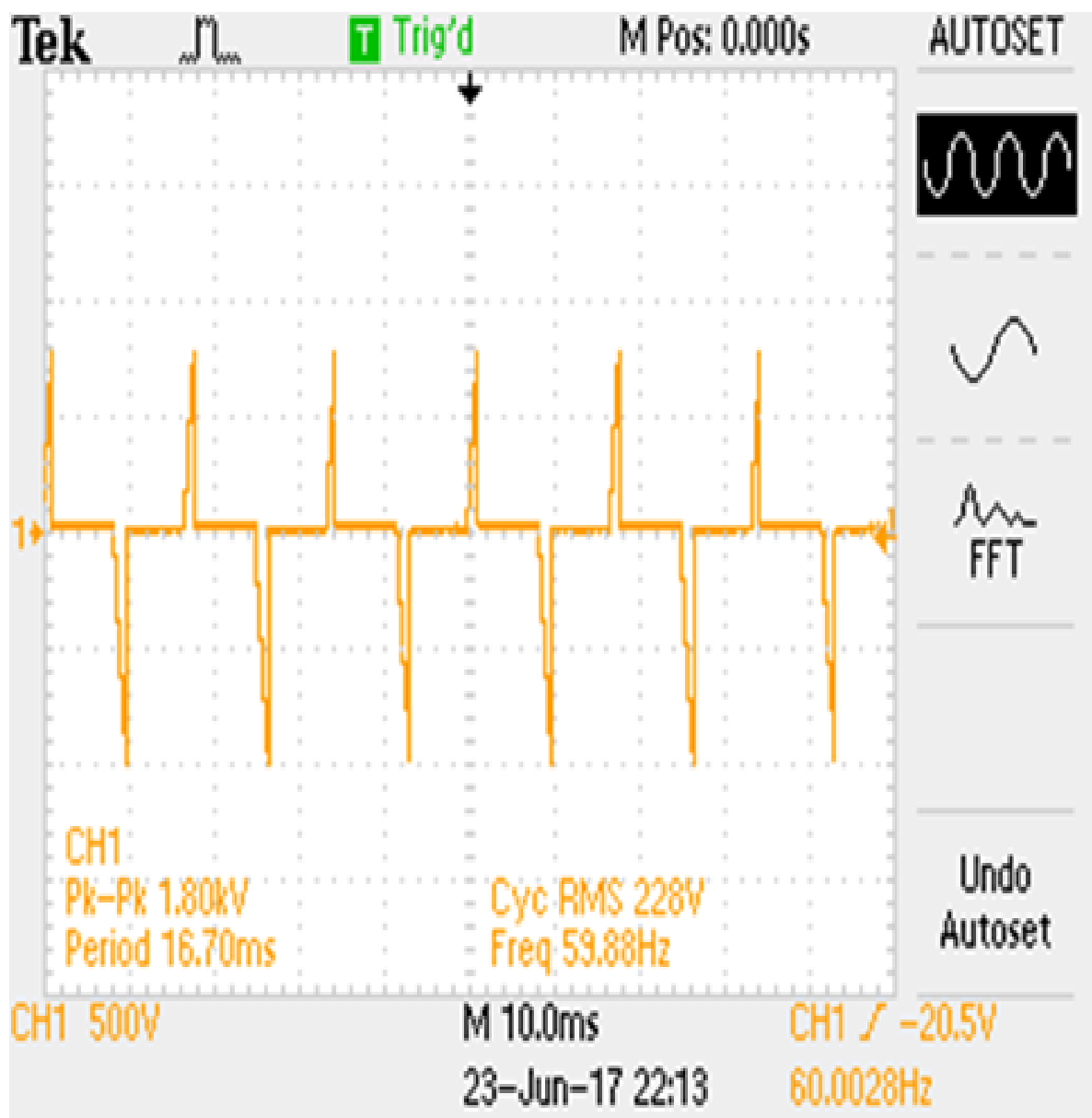


Figura A2 Ángulo de disparo a 20 grados eléctricos (elaboración propia)

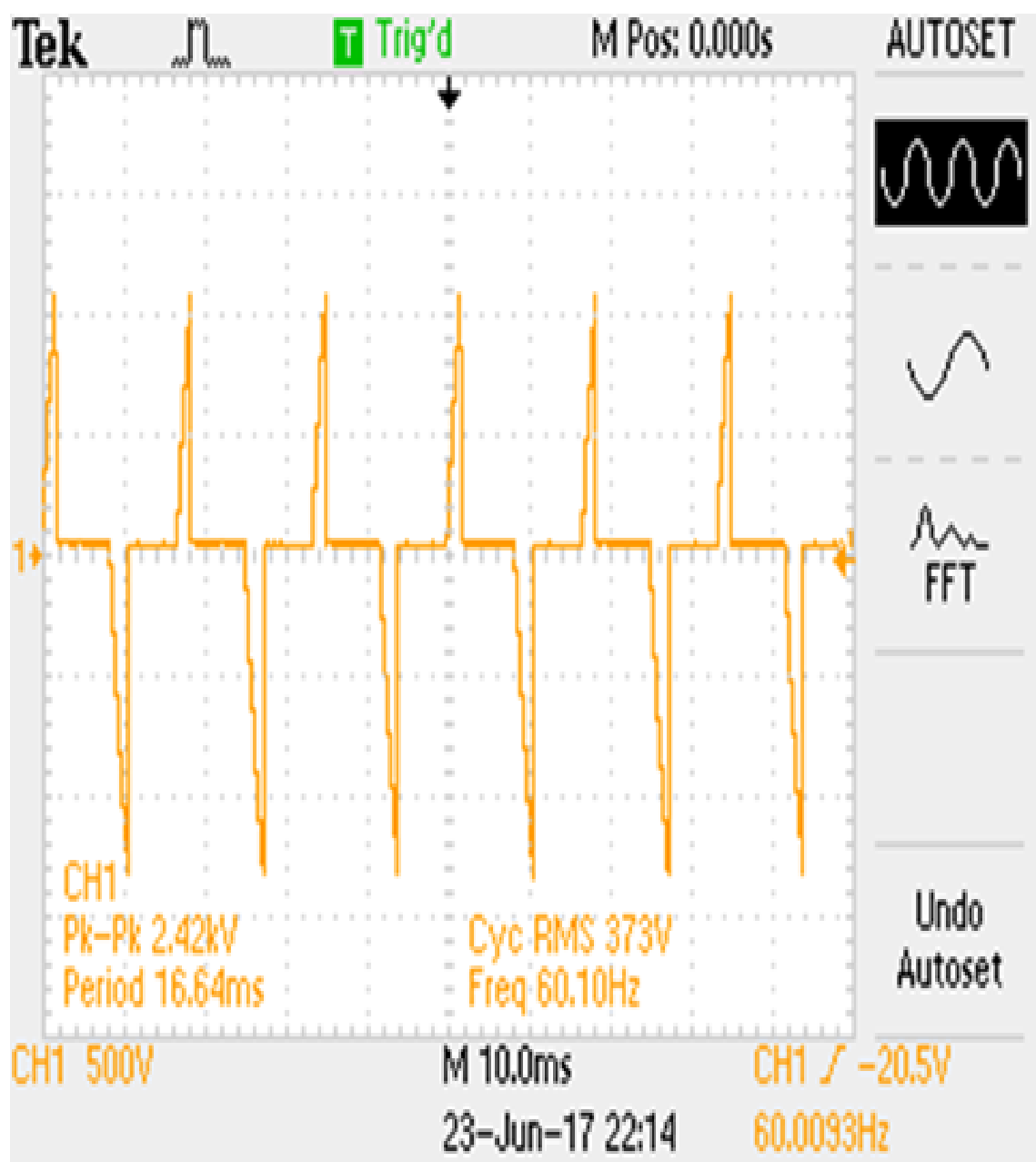


Figura A1 Ángulo de disparo a 30 grados eléctricos (elaboración propia)

ANEXO B

La siguiente tabla A.1 contiene los valores de voltaje obtenidos del laboratorio mediante un osciloscopio.

Tabla A.1 Variación real del voltaje (datos obtenidos de laboratorio)

| Tiempo | Voltaje | Alfa (α) | Tiempo | Voltaje | Alfa (α) | Tiempo | Voltaje | Alfa (α) |
|---------|---------|-------------------|---------|---------|-------------------|---------|---------|-------------------|
| 0 | 000 | 0 | 0.0012 | 90 | | 0.0024 | 144 | |
| 0.00004 | 14 | | 0.00124 | 92 | | 0.00244 | 146 | |
| 0.00008 | 18 | | 0.00128 | 94 | | 0.00248 | 148 | |
| 0.00012 | 20 | | 0.00132 | 94 | | 0.00252 | 148 | |
| 0.00016 | 24 | | 0.00136 | 96 | 30° | 0.00256 | 150 | |
| 0.0002 | 26 | | 0.0014 | 98 | | 0.0026 | 150 | |
| 0.00024 | 30 | | 0.00144 | 102 | | 0.00264 | 152 | |
| 0.00028 | 32 | | 0.00148 | 104 | | 0.00268 | 154 | |
| 0.00032 | 36 | | 0.00152 | 106 | | 0.00272 | 154 | |
| 0.00036 | 36 | | 0.00156 | 108 | | 0.00276 | 156 | 60° |
| 0.0004 | 40 | | 0.0016 | 108 | | 0.0028 | 156 | |
| 0.00044 | 42 | 10° | 0.00164 | 112 | | 0.00284 | 158 | |
| 0.00048 | 44 | | 0.00168 | 114 | | 0.00288 | 158 | |
| 0.00052 | 48 | | 0.00172 | 116 | | 0.00292 | 160 | |
| 0.00056 | 50 | | 0.00176 | 118 | | 0.00296 | 160 | |
| 0.0006 | 54 | | 0.0018 | 118 | | 0.003 | 162 | |
| 0.00064 | 56 | | 0.00184 | 120 | 40° | 0.00304 | 162 | |
| 0.00068 | 58 | | 0.00188 | 122 | | 0.00308 | 164 | |
| 0.00072 | 62 | | 0.00192 | 124 | | 0.00312 | 164 | |
| 0.00076 | 62 | | 0.00196 | 126 | | 0.00316 | 164 | |
| 0.0008 | 64 | | 0.002 | 130 | | 0.0032 | 166 | |
| 0.00084 | 66 | | 0.00204 | 130 | | 0.00324 | 168 | 70° |
| 0.00088 | 70 | | 0.00208 | 132 | | 0.00328 | 166 | |
| 0.00092 | 74 | 20° | 0.00212 | 1360 | | 0.00332 | 166 | |
| 0.00096 | 76 | | 0.00216 | 138 | | 0.00336 | 166 | |
| 0.001 | 78 | | 0.0022 | 138 | | 0.0034 | 168 | |
| 0.00104 | 78 | | 0.00224 | 138 | | 0.00344 | 170 | |
| 0.00108 | 80 | | 0.00228 | 140 | | 0.00348 | 170 | |
| 0.00112 | 82 | | 0.00232 | 142 | 50° | 0.00352 | 168 | |
| 0.00116 | 86 | | 0.00236 | 144 | | 0.00356 | 170 | |

| | | | | | | | | |
|---------|-----|-----|---------|-----|--|---------|-----|--|
| 0.0036 | 170 | | 0.0048 | 172 | | 0.006 | 126 | |
| 0.00364 | 172 | | 0.00484 | 170 | | 0.00604 | 122 | |
| 0.00368 | 172 | 80° | 0.00488 | 168 | | 0.00608 | 120 | |
| 0.00372 | 172 | | 0.00492 | 168 | | 0.00612 | 118 | |
| 0.00376 | 172 | | 0.00496 | 166 | | 0.00616 | 116 | |
| 0.0038 | 172 | | 0.005 | 166 | | 0.0062 | 114 | |
| 0.00384 | 172 | | 0.00504 | 166 | | 0.00624 | 112 | |
| 0.00388 | 172 | | 0.00508 | 164 | | 0.00628 | 110 | |
| 0.00392 | 174 | | 0.00512 | 164 | | 0.00632 | 108 | |
| 0.00396 | 174 | | 0.00516 | 162 | | 0.00636 | 106 | |
| 0.004 | 174 | | 0.0052 | 160 | | 0.0064 | 106 | |
| 0.00404 | 174 | | 0.00524 | 160 | | 0.00644 | 104 | |
| 0.00408 | 174 | | 0.00528 | 158 | | 0.00648 | 102 | |
| 0.00412 | 174 | | 0.00532 | 156 | | 0.00652 | 100 | |
| 0.00416 | 176 | 90° | 0.00536 | 156 | | 0.00656 | 96 | |
| 0.0042 | 174 | | 0.0054 | 154 | | 0.0066 | 96 | |
| 0.00424 | 174 | | 0.00544 | 152 | | 0.00664 | 94 | |
| 0.00428 | 174 | | 0.00548 | 150 | | 0.00668 | 92 | |
| 0.00432 | 174 | | 0.00552 | 148 | | 0.00672 | 90 | |
| 0.00436 | 174 | | 0.00556 | 146 | | 0.00676 | 88 | |
| 0.0044 | 174 | | 0.0056 | 142 | | 0.0068 | 86 | |
| 0.00444 | 174 | | 0.00564 | 140 | | 0.00684 | 84 | |
| 0.00448 | 174 | | 0.00568 | 140 | | 0.00688 | 82 | |
| 0.00452 | 174 | | 0.00572 | 138 | | 0.00692 | 80 | |
| 0.00456 | 174 | | 0.00576 | 136 | | 0.00696 | 78 | |
| 0.0046 | 174 | | 0.0058 | 134 | | 0.007 | 76 | |
| 0.00464 | 174 | | 0.00584 | 132 | | 0.00704 | 72 | |
| 0.00468 | 174 | | 0.00588 | 130 | | 0.00708 | 72 | |
| 0.00472 | 174 | | 0.00592 | 130 | | 0.00712 | 68 | |
| 0.00476 | 174 | | 0.00596 | 126 | | 0.00716 | 66 | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |

| | | | | | | | | |
|---------|----|--|---------|----|--|---------|------|--|
| 0.0072 | 64 | | 0.00768 | 34 | | 0.00816 | 2 | |
| 0.00724 | 62 | | 0.00772 | 30 | | 0.0082 | -20 | |
| 0.00728 | 60 | | 0.00776 | 28 | | 0.00824 | -40 | |
| 0.00732 | 56 | | 0.0078 | 26 | | 0.00828 | -80 | |
| 0.00736 | 56 | | 0.00784 | 24 | | 0.00832 | -140 | |
| 0.0074 | 52 | | 0.00788 | 22 | | 0.00836 | -140 | |
| 0.00744 | 50 | | 0.00792 | 18 | | 0.0084 | -180 | |
| 0.00748 | 48 | | 0.00796 | 16 | | 0.00844 | -200 | |
| 0.00752 | 44 | | 0.008 | 12 | | | | |
| 0.00756 | 40 | | 0.00804 | 10 | | | | |
| 0.0076 | 38 | | 0.00808 | 8 | | | | |
| 0.00764 | 36 | | 0.00812 | 4 | | | | |