



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELÉCTRICO-MECÁNICA

TÍTULO:

**MODELADO DE CIRCUITOS ELÉCTRICOS EN CC Y AC A TRAVÉS DE  
LA PLATAFORMA DE SIMULACIÓN MATLAB/SIMULINK.**

AUTOR:

Gonzalo Geovanny Ramos Barrionuevo

Previa la obtención del Título

**INGENIERO EN ELÉCTRICO-MECÁNICA**

TUTOR:

MsC. Celso Bayardo Bohórquez Escobar

Guayaquil, Ecuador

2015



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELÉCTRICO-MECÁNICA

**CERTIFICACIÓN**

Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por el Sr.  
**Gonzalo Geovanny Ramos Barrionuevo** como requerimiento parcial para  
la obtención del título de INGENIERO EN ELÉCTRICO-MECÁNICA.

TUTOR

---

MsC. Celso Bayardo Bohórquez Escobar

DIRECTOR DE CARRERA

---

MsC. Miguel A. Heras Sánchez.

Guayaquil, a los 15 del mes de Febrero del año 2015



# **UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELÉCTRICO-MECÁNICA

## **DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD**

Yo, **Gonzalo Geovanny Ramos Barrionuevo**

### **DECLARÓ QUE:**

El trabajo de titulación “MODELADO DE CIRCUITOS ELÉCTRICOS EN CC Y AC A TRAVÉS DE LA PLATAFORMA DE SIMULACIÓN MATLAB/SIMULINK” previo a la obtención del Título de Ingeniero en Eléctrico-Mecánica, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan al pie de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía. Consecuentemente este trabajo es de mi autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del Trabajo de Titulación referido.

Guayaquil, a los 15 del mes de Febrero del año 2015

EL AUTOR

---

GONZALO GEOVANNY RAMOS BARRIONUEVO



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELÉCTRICO-MECÁNICA

**AUTORIZACIÓN**

Yo, **Gonzalo Geovanny Ramos Barrionuevo**

Autorizamos a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la publicación, en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación: “MODELADO DE CIRCUITOS ELÉCTRICOS EN CC Y AC A TRAVÉS DE LA PLATAFORMA DE SIMULACIÓN MATLAB/SIMULINK”, cuyo contenido, ideas y criterios es de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

Guayaquil, a los 15 del mes de Febrero del año 2015

EL AUTOR

---

GONZALO GEOVANNY RAMOS BARRIONUEVO

## **DEDICATORIA**

A mis padres Wilson Geovanny Ramos Camacho e Hilda Patricia Barrionuevo de Ramos, por realizar los esfuerzos para poder brindarme el apoyo incondicional para lograr mi anhelado título.

A mis hermanas Mischell y Stefania quienes me han ayudado y han sido el eje principal para llegar a mi meta, a mis abuelas, abuelos, tíos y tías, que cada uno de ellos siempre estuvieron presentes en todo este camino.

A mi director de tesis: MsC. Celso Bayardo Bohórquez Escobar que con su paciencia, sabiduría y buenos consejos he podido culminar mi trabajo.

**EL AUTOR**

**GONZALO GEOVANNY RAMOS BARRIONUEVO**

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco primero a Dios por haberme permitido culminar mis estudios.

Agradezco al MsC. Celso Bayardo Bohórquez director de mi tesis quien aportó con sus conocimientos, a los miembros del Tribunal.

A la Universidad Católica, Autoridades y Personal Docente a través de la Carrera Eléctrico-Mecánica de la Facultad Técnica Para el Desarrollo por haber contribuido en mi formación profesional.

A mis amigos quienes durante mi etapa estudiantil me supieron brindar su amistad y a las personas que de manera directa o indirecta me apoyaron.

**EL AUTOR**

**GONZALO GEOVANNY RAMOS BARRIONUEVO**



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELÉCTRICO-MECÁNICA

**CALIFICACIÓN**

---

MsC. Celso Bayardo Bohórquez Escobar  
TUTOR

## Índice General

Índice de Figuras .....	X
Índice de Tablas.....	XIII
Resumen .....	XIV
CAPÍTULO 1: GENERALIDADES DEL TRABAJO DE TITULACIÓN .....	15
1.1. Introducción.....	15
1.2. Antecedentes. ....	15
1.3. Justificación del Problema.....	16
1.4. Definición del Problema.....	16
1.5. Objetivos del Problema de Investigación.....	17
1.5.1. Objetivo General.....	17
1.5.2. Objetivos Específicos. ....	17
1.6. Idea a Defender.....	17
1.7. Metodología de Investigación.....	18
CAPÍTULO 2: Fundamentación Teórica de Circuitos Eléctricos en DC y AC. ....	19
2.1. Sistema de Unidades en los Circuitos Eléctricos. ....	19
2.2. Fuentes independientes y dependientes.....	20
2.2.1. Fuentes independientes. ....	20
2.2.2. Fuentes dependientes. ....	21
2.3. Ley de Ohm.....	23
2.4. Leyes de Kirchhoff.....	25
2.4.1. Ley de Corriente de Kirchhoff. ....	26
2.4.2. Ley de Kirchhoff de Voltaje.....	28
2.5. Técnicas de Análisis de Circuitos.....	29
2.5.1. Análisis Nodal.....	29
2.5.2. Supernodos. ....	31
2.5.3. Análisis de Mallas.....	33
2.5.4. Supermalla. ....	35
2.6. Condiciones iniciales y finales en los elementos inductivos y capacitivos.....	36

2.6.1. El inductor.....	36
2.6.2. El Capacitor.....	38
2.7. Procedimiento para la evaluación de condiciones iniciales.....	40
CAPÍTULO 3: DIAGNÓSTICO DEL SIMULADOR MULTISIM.....	42
3.1. Qué es MULTISIM.....	42
3.2. Simulación en MULTIM de Circuitos Resistivos.....	43
3.3. Simulación en MULTIM de Circuito RL en el dominio del tiempo.....	51
CAPÍTULO 4: SIMULACIONES EN MATLAB/SIMULINK DE CIRCUITOS ELÉCTRICOS I Y II.....	55
4.1. Introducción a Simulink/SimPowerSystems.....	55
4.2. Modelado de un circuito eléctrico en serie de CC.....	56
4.3. Modelado de un circuito eléctrico en serie de AC.....	63
4.4. Modelado mediante análisis de mallas.....	66
4.5. Modelado de un circuito RLC.....	70
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	72
5.1. Conclusiones.....	72
5.2. Recomendaciones.....	73
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	74

## Índice de Figuras

### Capítulo 2:

Figura 2. 1: Prefijos del S.I.....	19
Figura 2. 2: Símbolos para (a) fuentes de tensión o voltaje independientes y (b) fuentes de corriente independientes.....	21
Figura 2. 3: Simbología de las fuentes de (a) voltaje dependiente y (b) corriente dependientes. ....	22
Figura 2. 4: Fuentes de (a) FVCV, (b) FVCC, (c) FCCV y (d) FCCC. ....	22
Figura 2. 5: Simbología de la resistencia eléctrica.....	23
Figura 2. 6: Gráfica de la relación entre voltaje – corriente.....	24
Figura 2. 6: Descripciones gráficas de una resistencia en (b) cortocircuito y (c) circuito abierto. ....	24
Figura 2. 8: Descripción gráfica de nodos, ramas y bucles.....	26
Figura 2. 9: Descripción gráfica de mallas. ....	26
Figura 2. 10: Representación de un circuito a través de LKC.....	27
Figura 2. 11: Representación de un circuito a través de LKV.....	28
Figura 2. 12: Circuito con tres nodos para análisis nodal. ....	30
Figura 2. 13: Circuito simplificado para aplicación de la LKC en el nodo 1..	30
Figura 2. 14: Circuito simplificado para aplicación de la LKC en el nodo 2..	31
Figura 2. 15: Circuito con supernodo entre $v_a$ y $v_b$ . ....	32
Figura 2. 16: Circuito de cuatro mallas con fuente de voltaje independiente. ....	33
Figura 2. 17: Circuito con dos mallas.....	34
Figura 2. 18: Circuito de cuatro mallas con fuente de corriente independiente. ....	34
Figura 2. 19: Circuito con una supermalla mostrada por la línea discontinua. ....	35
Figura 2. 20: Circuito para explicar la acción de conmutación de un inductor. ....	37
Figura 2. 21: El circuito equivalente de condiciones iniciales de un inductor. ....	38
Figura 2. 22: El circuito equivalente de condiciones finales de un inductor.	38

Figura 2. 23: Circuito para explicar la acción de conmutación de un capacitor. .....	39
Figura 2. 24: El circuito equivalente de condiciones iniciales de un inductor. .....	40
Figura 2. 25: El circuito equivalente de condiciones finales de un inductor.	40

### Capítulo 3:

Figura 3. 1: Circuito resistivo con una fuente independiente de voltaje continua. ....	44
Figura 3. 2: Ventana principal de Multisim. ....	44
Figura 3. 3: Componentes virtuales y reales.....	47
Figura 3. 4: Ventana de parámetros de fuentes de voltaje. ....	47
Figura 3. 5: Ventana para personalizar la barra de herramientas de MULTISIM.....	48
Figura 3. 6: Ventana para personalizar la barra de herramientas de MULTISIM.....	49
Figura 3. 7: Simulación de circuito resistivo en serie. ....	50
Figura 3. 8: Simulación que incluye osciloscopio virtual Tektronix.....	51
Figura 3. 9: Circuito RC con interruptor. ....	52
Figura 3. 10: Simulación del circuito RC con interruptor cerrado.....	52
Figura 3. 11: Circuito RC en $t=0^-$ .....	53
Figura 3. 12: Simulación del circuito RC con interruptor abierto. ....	53
Figura 3. 13: Simulación del circuito RC con interruptor abierto. ....	54

### Capítulo 4:

Figura 4. 1: Circuito básico a modelar en Simulink. ....	56
Figura 4. 2: Librería de diagramas de bloques para SimPowerSystems. ....	56
Figura 4. 3: Nueva ventana para modelar el circuito de la figura 4.1. ....	57
Figura 4. 4: Ventana con la adición del bloque powergui.....	58
Figura 4. 5: Componentes del circuito CC a modelar. ....	59
Figura 4. 6: Parámetros del diagrama de bloques <i>Series RLC Branch</i> .....	59
Figura 4. 7: Modelo con elementos agregados y renombrados. ....	60
Figura 4. 8: Modelado final en SimPowerSystems del circuito de la figura 4.1. .....	61

Figura 4. 9: Ajustes de los parámetros en el bloque <i>AC Voltage Source</i> .....	62
Figura 4. 10: Modelo con <i>AC Voltage Source</i> usada como <i>DC Voltage Source</i> . .....	62
Figura 4. 11: Modelo con una fuente de voltaje dependiente. ....	63
Figura 4. 12: Circuito RLC en serie a modelar en Simulink. ....	64
Figura 4. 13: Modelado del circuito RLC en serie sobre Simulink.....	64
Figura 4. 14: Modelado del circuito RLC en serie sobre Simulink.....	65
Figura 4. 15: Modelado del circuito RLC en serie sobre Simulink.....	65
Figura 4. 16: Circuito con fuentes independientes mediante análisis de mallas. ....	66
Figura 4. 17: Circuito con asignación de corrientes errónea.....	67
Figura 4. 18: Circuito con asignación de corrientes correcta. ....	67
Figura 4. 19: Circuito con asignación de corrientes correcta. ....	69
Figura 4. 20: Circuito con asignación de corrientes correcta. ....	70
Figura 4. 21: Simulación en Simulink del circuito RLC.....	71
Figura 4. 22: Formas de onda para el modelado en Simulink del circuito RLC. ....	71

## Índice de Tablas

### Capítulo 3:

Tabla 3. 1: Iconos disponibles en la barra de herramientas de componentes. .....	45
---	----

## Resumen

El trabajo de titulación se ha desarrollado en base a las plataformas de simulación Matlab/Simulink, ya que nos permitirán ahorrar tiempo y gastos al momento de diseñar y realizar modificaciones, este programa nos ayuda a generar una mejor simulación de circuitos eléctricos ya sea en corriente continua u corriente alterna debido a que sus herramientas son más fuertes y robustas que las otras plataformas de simulación relacionadas con las materias de circuitos eléctricos y electrónicos (análogos y digitales).

Simulink es una plataforma integrada en Matlab, Simulink, ya que dispone de una extensa librería de diagramas de bloques lo que nos permite realizar diferentes aplicaciones de la Ingeniería Eléctrica, Eléctrico-Mecánica, Electrónica, Telecomunicaciones, Mecánica, lo que permitirá a los docentes y estudiantes conocer y descubrir las bondades que nos ofrece esta herramienta de simulación.

## **CAPÍTULO 1: GENERALIDADES DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

### **1.1. Introducción.**

En la actualidad la simulación de circuitos eléctricos en corriente continua o directa (CC o DC) y corriente alterna (AC o CA) son realizados a través de plataformas como Multisim, Orcad Pspice, Isis Proteus, Electronics Workbench y otras muy pocas conocidas. MatLab también se podría incluir pero no para simulación, sino más bien para resolver ecuaciones que son generadas en los análisis de nodos y mallas.

Estos tipos de plataformas de simulación permiten ahorro de tiempo al momento de diseñar y de reducción de costos, especialmente al realizar modificaciones en el diseño y ver un correcto funcionamiento a nivel de la modelación con elementos virtuales. Uno de los programas más utilizados en la enseñanza de Circuitos Eléctricos y Electrónicos (análogos y digitales) es Multisim basado básicamente en Pspice, siendo esta una interfaz gráfica.

Mientras que Simulink, es una plataforma integrada en Matlab. Simulink, dispone de una extensa librería de diagrama de bloques para diferentes aplicaciones de la Ingeniería Eléctrica, Eléctrico-Mecánica, Electrónica, Telecomunicaciones, Mecánica. Los estudiantes y algunos docentes de la Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo (FETD) no conocen Simulink ni de las bondades que ofrece esta herramienta de simulación.

### **1.2. Antecedentes.**

En la mayoría de Instituciones de Educación Superior (IES) del Ecuador, cuentan con trabajos de fin de carrera, o trabajos de grado, donde exponen y explican las bondades de la plataformas de simulación para modelar Circuitos Eléctricos e inclusive otras materias relacionadas a la Electrónica Analógica y Digital.

A nivel internacional, estas herramientas son muy utilizadas en clases y trabajos de grado, aunque también utilizan a MATLAB/SIMULINK como alternativa para la modelación de Circuitos Eléctricos en DC y AC, aunque MATLAB/SIMULINK no es un programa orientado solamente a modelar Circuitos Eléctricos, sino un sinnúmero de áreas de la Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones.

### **1.3. Justificación del Problema.**

En la Carrera de Ingeniería en Eléctrico-Mecánica de la FETD, se han desarrollado algunos trabajos relacionados con la simulación de circuitos eléctricos, mediante Pspice y Multisim, pero no se han encontrado trabajos de titulación que traten la modelación de circuitos eléctricos sobre MATLAB/SIMULINK. En los laboratorios de la FETD se disponen de varios computadores que serían de gran ayuda para realizar la modelación y evaluación de circuitos eléctricos en DC y AC. Por tal motivo, Simulink sería de gran ayuda como herramienta al aprendizaje de circuitos eléctricos I y II de la Carrera de Ingeniería Eléctrico-Mecánica.

### **1.4. Definición del Problema.**

Necesidad de simular modelos de circuitos eléctricos de CC y AC en una plataforma de simulación diferente como Simulink de Matlab, para demostrar que no solamente Multisim, Pspice o Proteus son las únicas herramientas de simulación como apoyo a la enseñanza de circuitos eléctricos y electrónicos.

## **1.5. Objetivos del Problema de Investigación.**

### **1.5.1. Objetivo General.**

Desarrollar modelos de simulación de circuitos eléctricos en corriente continua y alterna sobre la plataforma MATLAB/SIMULINK

### **1.5.2. Objetivos Específicos.**

- Explicar los fundamentos teóricos y básicos del análisis de circuitos eléctricos en corriente continua y directa.
- Diagnosticar la plataforma de simulación de circuitos MULTISIM.
- Diseñar los modelos de simulación sobre la plataforma MATLAB/SIMULINK.

## **1.6. Idea a Defender.**

Mediante los modelos de simulación de circuitos eléctricos en CC y AC escogidos, permitirá demostrar que la plataforma MATLAB/SIMULINK es una herramienta muy poderosa y robusta al momento de realizar simulaciones, y también permitirá que los estudiantes de Ingeniería Eléctrico-Mecánica utilicen este programa para modelar sistemas trifásicos, electromecánicos,

etc., que están relacionados con la formación académica de la Carrera de Eléctrico-Mecánica.

### **1.7. Metodología de Investigación.**

El trabajo de titulación se orienta a la simulación de circuitos eléctricos mediante MATLAB/SIMULINK, para lo cual, el tipo de estudio es empírico-analítico, en la que el tipo de investigación es Explicativo y Exploratorio.

## CAPÍTULO 2: Fundamentación Teórica de Circuitos Eléctricos en DC y AC.

### 2.1. Sistema de Unidades en los Circuitos Eléctricos.

El sistema de unidades que empleamos es, el Sistema Internacional de Unidades, que normalmente se conoce como el sistema estándar SI. Este sistema, que se compone de las unidades básicas, tales como, metro (m), kilogramo (kg), segundo (s), amperios (A), Kelvin (K), y candela (cd), se define en todos los textos modernos de física y por lo tanto no se define aquí. Sin embargo, vamos a hablar de las unidades con algún detalle como los encontramos en nuestros análisis posteriores.

Los prefijos estándar que se emplean en SI se muestran en la figura 2.1, pero hay que tener en cuenta la relación decimal entre estos prefijos. Estos prefijos estándar se emplean a lo largo de nuestro estudio de los circuitos eléctricos. La tecnología de los Circuitos Eléctricos ha cambiado drásticamente en los últimos años.

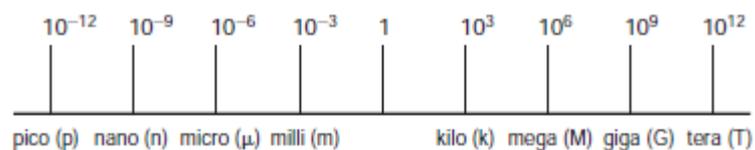


Figura 2. 1: Prefijos del S.I.

Fuente:

Por ejemplo, a principios de 1960 el espacio en una placa de circuito ocupado por la base de un tubo de vacío solo era del tamaño de una moneda

(moneda de 25 centavos). Hoy ese mismo espacio podría ser ocupado por un chip de circuito integrado Intel Pentium con 50 millones de transistores. Estos chips son el motor para una gran cantidad de equipos electrónicos.

## **2.2. Fuentes independientes y dependientes**

A continuación se describirán las fuentes de voltaje y corriente, ya sean independientes o dependientes, cuyas fuentes de información han sido texto importantes de circuitos eléctricos.

### **2.2.1. Fuentes independientes.**

Una fuente de tensión independiente según Irwin, J. D. & Nelms, R. M. (2011), es un elemento de dos terminales que mantiene una tensión o voltaje específica entre sus terminales, independientemente de la corriente a través de él, tal como se muestra en la gráfica  $v$  vs  $i$  de la figura 2.2a. El símbolo general para una fuente independiente, es un círculo (véase la figura 2.2a) donde el terminal A es  $v(t)$  voltios positivo con respecto al terminal B.

En contraste con la fuente de voltaje independiente, la fuente de corriente independiente es un elemento de dos terminales que mantiene una corriente especificada, independientemente de la tensión a través de sus terminales, como se ilustra la gráfica  $v$  vs  $i$  de la figura 2.2b. El símbolo general para una fuente de corriente independiente también se muestra en la figura 2.2b, donde  $i(t)$  es la corriente especificada y la flecha indica la dirección positiva del flujo de corriente.

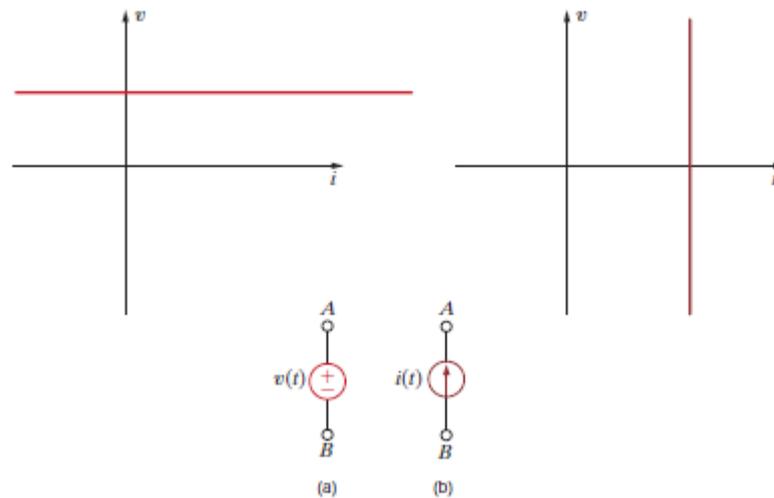


Figura 2. 2: Símbolos para (a) fuentes de tensión o voltaje independientes y (b) fuentes de corriente independientes.  
Fuente: Irwin, J. D. & Nelms, R. M. (2011)

### 2.2.2. Fuentes dependientes.

Alexander, C. K. & Sadiku, M. N. O. (2013) una fuente dependiente (o controlada) ideal es un elemento activo en el que la cantidad fuente es controlado por otro voltaje o corriente. Mientras que Irwin, J. D. et al (2011) sostiene que las fuentes dependientes generan una tensión o corriente que es determinada por una tensión o corriente en una ubicación especificada en el circuito. Estas fuentes son muy importantes debido a que son una parte integral de los modelos matemáticos utilizados para describir el comportamiento de muchos elementos de circuitos electrónicos. En general, las fuentes dependientes son generalmente designadas por símbolos en forma de diamante tal como se muestra en la figura 2.3.

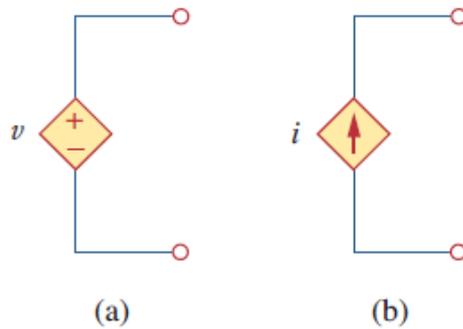


Figura 2. 3: Simbología de las fuentes de (a) voltaje dependiente y (b) corriente dependientes.  
Fuente: Alexander, C. K. et al (2013)

Puesto que el control de la fuente dependiente se consigue mediante un voltaje o corriente de algún otro elemento en el circuito. La fuente puede ser de voltaje o corriente, y hay cuatro posibles tipos de fuentes de:

- Voltaje controlado por voltaje (FVCCV) como la figura 2.4a.
- Voltaje controlado por corriente (FVCC) como la figura 2.4b.
- Corriente controlado por voltaje (FCCV) como la figura 2.4c.
- Corriente controlado por corriente (FCCC) como la figura 2.4d.

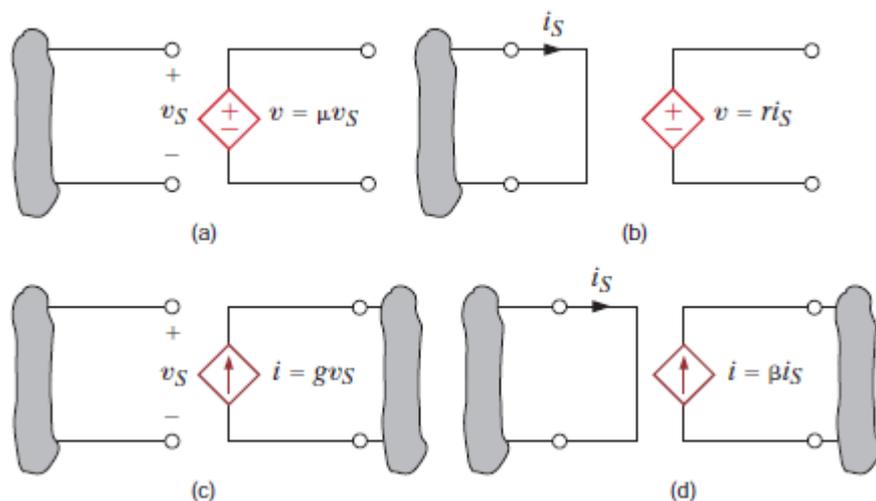


Figura 2. 4: Fuentes de (a) FVCCV, (b) FVCC, (c) FCCV y (d) FCCC.  
Fuente: Irwin, J. D. & Nelms, R. M. (2011)

### 2.3. Ley de Ohm.

La ley de Ohm se llama así por el físico alemán Georg Simon Ohm, que se acredita con el establecimiento de la relación tensión-intensidad de la resistencia. Como resultado de su trabajo pionero, la unidad de resistencia lleva su nombre. Irwin, J. D. et al (2011) manifiesta que la ley de Ohm indica que el voltaje a través de una resistencia es directamente proporcional a la corriente que fluye a través de él. La resistencia, medida en ohmios, es la constante de proporcionalidad entre la tensión y la corriente.

La relación matemática de la ley de Ohm es:

$$v(t) = Ri(t), \quad \text{donde } R \geq 0$$

O equivalente, por la característica de voltaje-corriente que se muestra en la figura 2.5.

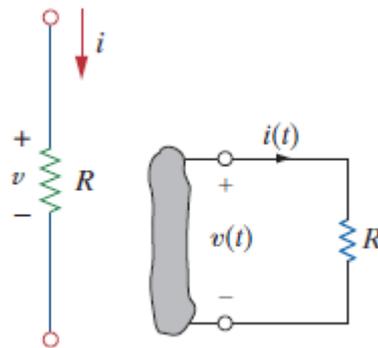


Figura 2. 5: Simbología de la resistencia eléctrica.  
Fuente: Irwin, J. D. et al (2011)

En la figura 2.6 se muestra la representación gráfica del voltaje – corriente para resistencias lineales y bombillos.

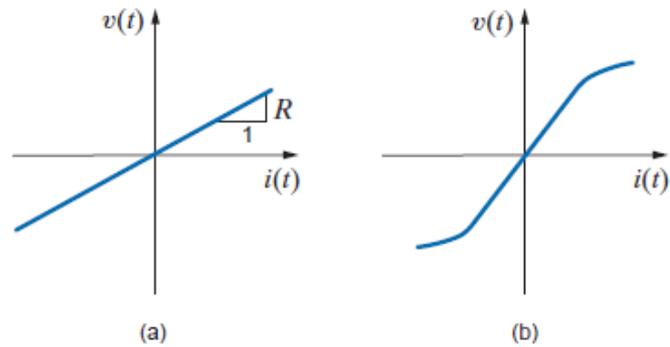


Figura 2. 6: Gráfica de la relación entre voltaje – corriente.  
Fuente: Irwin, J. D. et al (2011)

La ecuación expresada como la Ley de Ohm, se puede utilizar para encontrar potencia, conductancia.

$$p(t) = v(t)i(t) = Ri^2(t) = \frac{v^2(t)}{R}$$

$$G = \frac{1}{R}$$

$$p(t) = \frac{i^2(t)}{G} = Gv^2(t)$$

Existen dos valores específicos de resistencia, y por lo tanto la conductancia, son muy importantes:  $R = 0$  y  $R = \infty$ . Al examinar los dos casos, debemos considerar la red de la figura 2.7.

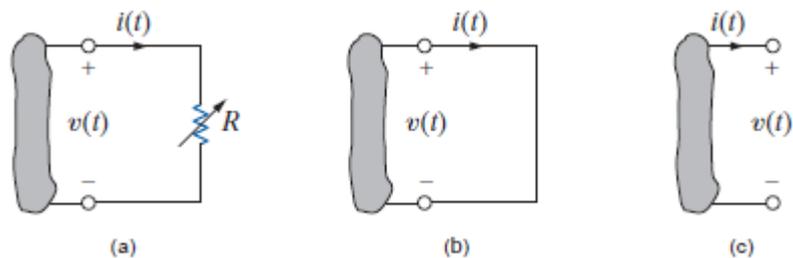


Figura 2. 7: Descripciones gráficas de una resistencia en (b) cortocircuito y (c) circuito abierto.

Fuente: Irwin, J. D. et al (2011)

El símbolo de la resistencia variable se utiliza para describir una resistencia tales como el control de volumen en un aparato de radio o televisión.

#### **2.4. Leyes de Kirchhoff.**

Los principios básicos en la resolución de redes de resistencia sencilla pueden ser resueltos para la corriente, resistencia, potencial, etc. utilizando el concepto de la ley de Ohm. Pero a medida que la red se vuelve compleja, la aplicación de la ley de Ohm para la solución de las redes se vuelve más tediosa y por lo tanto consume mucho tiempo.

Para resolver este tipo de redes complejas, hacemos uso de las leyes de Kirchhoff. Gustav Kirchhoff (1824-1887), fue un eminente físico alemán, que realizó una cantidad considerable de trabajos sobre los principios que rigen el comportamiento de los circuitos eléctricos. Posteriormente, estableció dos leyes muy utilizadas en Carreras de Ingeniería Eléctrica, tales como:

- a) Ley de Kirchhoff de Corriente.
- b) Ley de Kirchhoff de Voltaje.

Antes de proceder a la descripción de las dos leyes mencionadas, debemos familiarizarnos con ciertas expresiones definidas muy a menudo en el mundo de los circuitos eléctricos, tales como:

1. **Nodo:** un nodo de una red es una superficie equipotencial en el que se unen dos o más elementos de circuitos. En la figura 2.8 vemos que a, b y c se consideran nodos con respecto a la definición anterior.

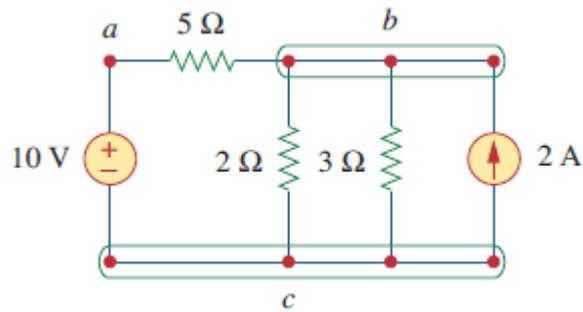


Figura 2. 8: Descripción gráfica de nodos, ramas y bucles.  
Fuente: Alexander, C. K. et al (2013)

2. **Rama:** es aquella que parte de una red que se encuentra entre dos puntos de unión. En la figura 2.8, bac y bc son las ramas.
3. **Bucle:** es cualquier trayectoria cerrada de una red. Por lo tanto, en la figura 2.8, abca y bcb son bucles.
4. **Malla:** Una malla es la forma más elemental de un bucle y no puede ser dividida en otros bucles. En la figura 2.9 se muestra un ejemplo de un circuito con dos mallas.

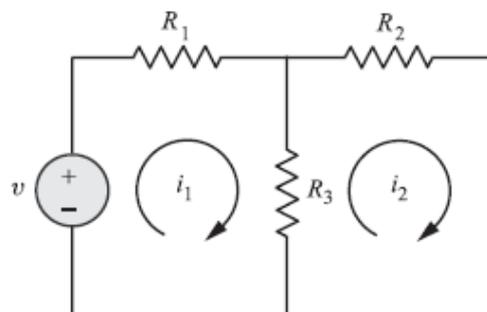


Figura 2. 9: Descripción gráfica de mallas.  
Fuente: Alexander, C. K. et al (2013)

#### 2.4.1. Ley de Corriente de Kirchhoff.

La primera ley es la Ley de Kirchhoff de Corriente (LKC), donde Hayt, W., Kemmerly, J. & Durbin, S. (2012) establecen que la suma algebraica de las corrientes que entran en cualquier nodo es cero.

$$\sum_{n=1}^N i_n = 0$$

Consideremos el nodo mostrado por la figura 2.10.

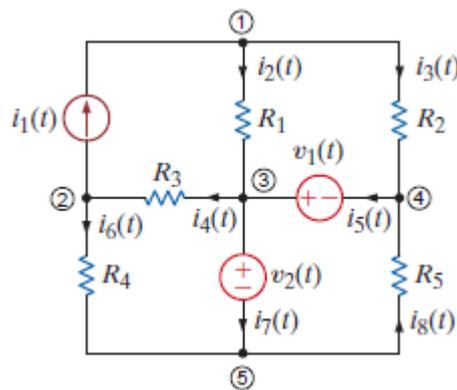


Figura 2. 10: Representación de un circuito a través de LKC.  
Fuente: Irwin, J. D. et al (2011)

La suma de las corrientes que entra en el nodo es:

$$i_2(t) - i_4(t) + i_5(t) - i_7(t) = 0$$

O también,

$$i_2(t) + i_5(t) = i_4(t) + i_7(t)$$

Se establece que la suma de las corrientes que entran en un nodo es igual a la suma de las corrientes que salen del nodo. Ambas expresiones son formas alternativas de ley de Kirchhoff. Si la suma de las corrientes que entran en un nodo no fuese igual a cero, entonces la carga se acumula en un nodo.

Sin embargo, un nodo es un conductor perfecto y no puede acumular o almacenar la carga. Por lo tanto, la suma de las corrientes que entran en un nodo es igual a cero.

#### 2.4.2. Ley de Kirchhoff de Voltaje.

Ley de Kirchhoff de Voltaje (LKV) según Hayt, W., et al (2012) establece que la suma algebraica de los voltajes alrededor de cualquier trayectoria cerrada en un circuito es cero. En general, la representación matemática de la ley de voltaje de Kirchhoff es:

$$\sum_{n=1}^N v_n = 0$$

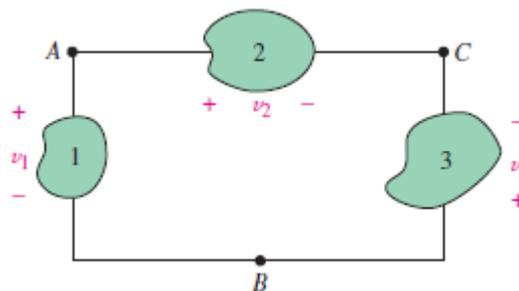


Figura 2. 11: Representación de un circuito a través de LKV.  
Fuente: Hayt, W., et al (2012)

De la figura 2.11 se tiene que:

$$v_1 = v_2 - v_3$$

En la ley de voltaje de Kirchhoff, el signo se utiliza para realizar un seguimiento de la polaridad de la tensión. En otras palabras, a medida que atravesamos el circuito, es necesario sumar los aumentos y disminuciones en la tensión a cero. Por lo tanto, es importante no perder de vista que la tensión

está aumentando o disminuyendo a medida que avanzamos a través de cada elemento.

## **2.5. Técnicas de Análisis de Circuitos.**

Una vez que se describieron las leyes fundamentales Ohm y Kirchhoff, ahora veremos cómo aplicarlas para el desarrollo de dos técnicas de gran alcance para el análisis de circuitos: (a) análisis nodal, según Alexander, C. K. et al (2013) se basa en una aplicación sistemática de la ley de Kirchhoff de Corriente, y (b) análisis de malla, según Alexander, C. K. et al (2013) se basa en una aplicación sistemática de la ley de Kirchhoff de Voltaje.

### **2.5.1. Análisis Nodal.**

El análisis nodal se utiliza la LKC para escribir las ecuaciones de equilibrio. Un nodo se define como una unión de dos o más ramas. Si definimos un nodo de la red como un nodo de referencia (un punto de potencial cero o tierra), los nodos restantes de la red tendrán un potencial fija en relación a esta referencia. Ecuaciones relativas a todos los nodos excepto el nodo de referencia se pueden escribir mediante la aplicación de LKC.

Refiriéndose al circuito mostrado por la figura 2.12, podemos elegir arbitrariamente cualquier nodo como el nodo de referencia. Sin embargo, es conveniente elegir el nodo con más ramas conectadas a tierra. Por lo tanto, el nodo 3 se elige como el nodo de referencia y vemos que hay tres nodos.

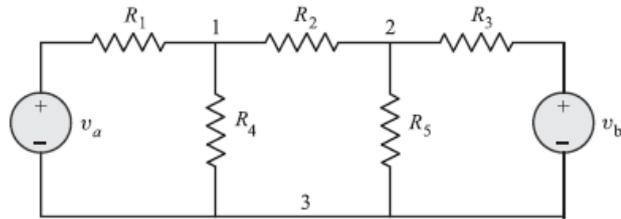


Figura 2. 12: Circuito con tres nodos para análisis nodal.  
Fuente: López R., V. (2013)

Por lo tanto, el número de ecuaciones basadas en la LKC será el número total de nodos menos uno. Esto es, en el presente contexto, vamos a tener sólo dos ecuaciones LKC que hace referencia como ecuaciones de nudo. Para la aplicación de LKC en el nodo 1 y el nodo 2, se supone que todas las corrientes salen de estos nodos tal como se muestra en las figuras 2.13 y 2.14.

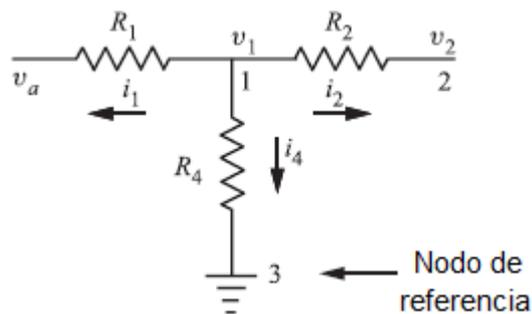


Figura 2. 13: Circuito simplificado para aplicación de la LKC en el nodo 1.  
Fuente: López R., V. (2013)

Aplicando LKC al nodo 1 y nodo 2, encontramos que:

a) Para el nodo 1:

$$i_1 + i_2 + i_4 = 0$$

$$\frac{v_1 - v_a}{R_1} + \frac{v_1 - v_2}{R_2} + \frac{v_1 - 0}{R_4} = 0$$

$$v_1 \left[ \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_4} \right] - v_2 \left[ \frac{1}{R_2} \right] = \frac{v_a}{R_1}$$

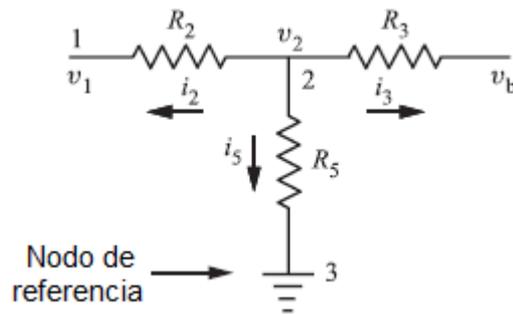


Figura 2. 14: Circuito simplificado para aplicación de la LKC en el nodo 2.  
Fuente: López R., V. (2013)

b) Para el nodo 2:

$$i_2 + i_3 + i_5 = 0$$

$$\frac{v_2 - v_1}{R_2} + \frac{v_2 - v_b}{R_3} + \frac{v_2 - 0}{R_5} = 0$$

$$v_1 \left[ \frac{1}{R_2} \right] + v_2 \left[ \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_5} \right] = \frac{v_b}{R_3}$$

### 2.5.2. Supernodos.

Para entender el concepto de un Supernodo, consideremos el circuito eléctrico que se muestra en la figura 2.15. Aplicando LKV hacia la derecha para el bucle que contiene a  $R_1$ ,  $R_2$  y la fuente de voltaje o tensión, obtenemos:

$$v_a - v_s = v_b$$

$$v_a = v_s + v_b$$

$$v_a - v_b = v_s$$

Para tener en cuenta el hecho de que se conoce el voltaje de la fuente, consideramos tanto  $v_a$  y  $v_b$  como parte de un nodo más grande representada por la elipse punteada mostrada por la figura 2.15.

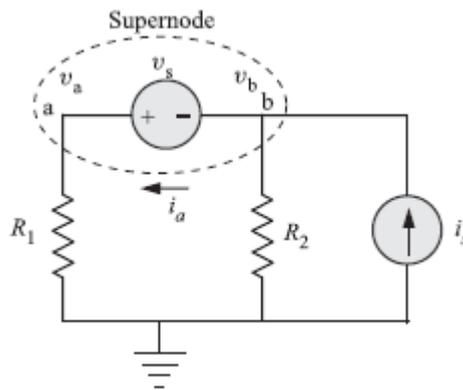


Figura 2. 15: Circuito con supernodo entre  $v_a$  y  $v_b$ .  
Fuente: López R., V. (2013)

En el supernodo, aplicamos LKC:

$$\frac{v_a}{R_1} - i_a = 0$$

Y

$$\frac{v_b}{R_2} + i_a = i_s$$

Sumando estas dos expresiones, queda:

$$\frac{v_a}{R_1} + \frac{v_b}{R_2} = i_s$$

Procedimiento para el uso de supernodo:

1. Utilizarlo cuando una rama entre nodos de no referencia está conectada mediante una fuente de voltaje independiente o dependiente.
2. Encerrar la fuente de voltaje o tensión entre dos nodos de conexión dentro de una elipse de puntos para formar el supernodo.
3. Escribir la ecuación de restricción que define la relación de tensión entre los dos nodos de no referencia como resultado de la presencia de la fuente de tensión.

4. Escribir la ecuación de la LKC en el supernodo.
5. Si la fuente de voltaje es dependiente, entonces se necesita también la ecuación de restricción para la fuente dependiente.

### 2.5.3. Análisis de Mallas.

Antes de iniciar el concepto de análisis de mallas, queremos reiterar que un camino cerrado o un bucle se dibujan empezando en un nodo y trazando un camino tal que volvemos al nodo original sin pasar un nodo intermedio más de una vez. Una malla es un caso especial de un bucle. Una malla es un bucle que no contiene ningún otro bucle dentro de ella. La red mostrada por la figura 2.16, tiene cuatro mallas y se identifican como  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_3$  y  $M_4$ .

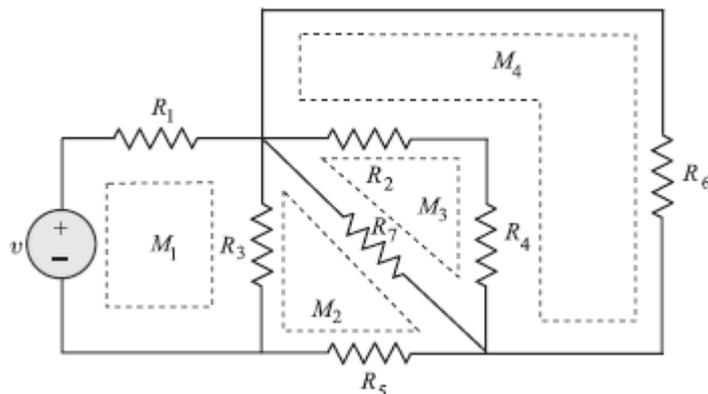


Figura 2. 16: Circuito de cuatro mallas con fuente de voltaje independiente.  
Fuente: López R., V. (2013)

La corriente que fluye en una malla se define como corriente de malla. Como una cuestión de convención, las corrientes de malla suponen que el flujo en una malla es en la dirección de las agujas del reloj. Consideremos el circuito básico de dos mallas mostrado por la figura 2.17.

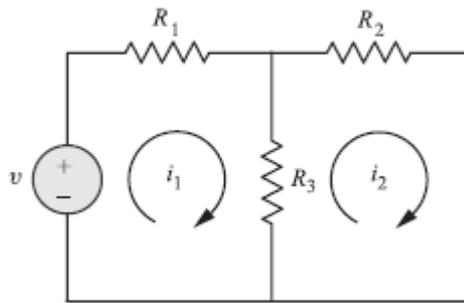


Figura 2. 17: Circuito con dos mallas.  
Fuente: López R., V. (2013)

Podemos emplear LKV alrededor de cada malla, en la que viajamos por cada malla en la dirección hacia la derecha y resumir las subidas de tensión y caídas registradas en dicho malla. Así, para la red que se muestra en la figura

2.17 tenemos:

$$\text{Malla 1:} \quad -v + i_1 R_1 + (i_1 - i_2) R_3 = 0$$

$$\text{Malla 2:} \quad R_3 (i_2 - i_1) + R_2 i_2 = 0$$

Consideremos una fuente circuito eléctrico que tiene una fuente de corriente independiente, como se muestra la figura 2.18.

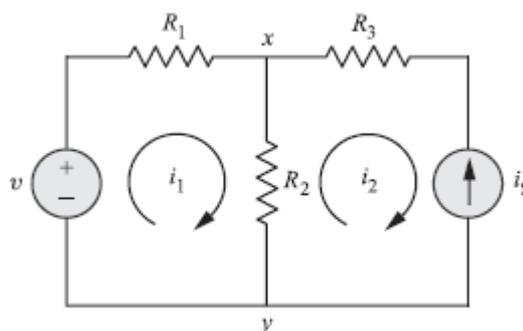


Figura 2. 18: Circuito de cuatro mallas con fuente de corriente independiente.  
Fuente: López R., V. (2013)

En la malla 2, la corriente  $i_2 = -i_s$ , por lo tanto sólo determinamos la corriente  $i_1$  de la malla 1. En consecuencia, aplicamos LKV quedando:

$$(R_1 + R_2)i_1 - R_2i_2 = v$$

Puesto que  $i_2 = -i_s$

Obtenemos:  $(R_1 + R_2)i_1 + R_2i_s = v$

$$i_1 = \frac{v - i_s R_2}{R_1 + R_2}$$

#### 2.5.4. Supermalla.

Una técnica más general para el método de análisis de mallas, cuando una fuente de corriente es común a dos mallas, consiste en el concepto de una supermalla. A supermalla, se crea a partir de dos mallas que tienen una fuente de corriente como un elemento común; la fuente de corriente está en el interior de la supermalla. De este modo se reduce el número de mallas en una por cada fuente de corriente presente.

En la figura 2.19 se muestra una supermalla creada a partir de las dos mallas que tienen una fuente de corriente en común.

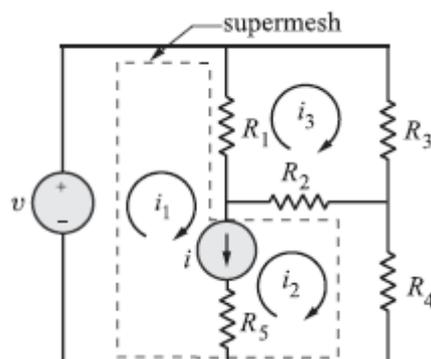


Figura 2. 19: Circuito con una supermalla mostrada por la línea discontinua.  
Fuente: López R., V. (2013)

## 2.6. Condiciones iniciales y finales en los elementos inductivos y capacitivos.

Hay muchas razones para estudiar las condiciones iniciales y finales. La razón más importante es que las condiciones iniciales y finales evalúan las constantes arbitrarias que aparecen en la solución general de una ecuación diferencial. En esta sección, nos concentramos en encontrar el cambio en las variables seleccionadas en un circuito cuando un interruptor se abrió de golpe desde la posición cerrada o viceversa.

Si consideramos que en un tiempo “t” se abre o cierra el interruptor en  $t=0$ , y debemos determinar los valores de las variables en  $t=0^-$  y en  $t=0^+$ . Así, un circuito conmutado es un circuito eléctrico con uno o más interruptores que abren o cierran en el momento  $t=0$ . A continuación se describen las condiciones iniciales y finales en elementos, tales como, el inductor y capacitor.

### 2.6.1. El inductor.

El interruptor de la figura 2.20 se cerrará en  $t=0$ . Por lo tanto, en  $t=0^-$  corresponde al instante en que el interruptor está abierto y  $t=0^+$  corresponde al instante en que el interruptor se acaba de cerrar. La expresión para la corriente a través del inductor está dada por:

$$i = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^t v d\tau$$

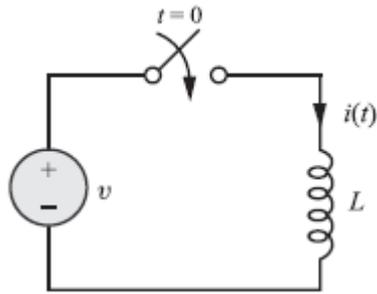


Figura 2. 20: Circuito para explicar la acción de conmutación de un inductor.  
Fuente: López R., V. (2013)

$$i = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^{0^-} v d\tau + \frac{1}{L} \int_{0^-}^t v d\tau$$

$$i(t) = i(0^-) + \frac{1}{L} \int_{0^-}^t v d\tau$$

Poniendo  $t=0^+$  en ambos lados, obtenemos:

$$i(0^+) = i(0^-) + \frac{1}{L} \int_{0^-}^{0^+} v d\tau$$

$$i(0^+) = i(0^-)$$

La ecuación anterior significa, que la corriente de un inductor no puede cambiar instantáneamente. Consecuentemente, si  $i(0^-) = 0$ , tenemos  $i(0^+) = 0$ . Esto significa que en  $t = 0^+$ , el inductor actuará como circuito abierto, independientemente del voltaje en los terminales o bornes. Si  $i(0^-) = I_o$ , entonces  $i(0^+) = I_o$ . En el caso de que  $t = 0^+$ , el inductor puede ser pensado como una fuente de corriente  $I_o$ .

Los circuitos equivalentes de un inductor en  $t = 0^+$  se muestran en la figura 2.21.

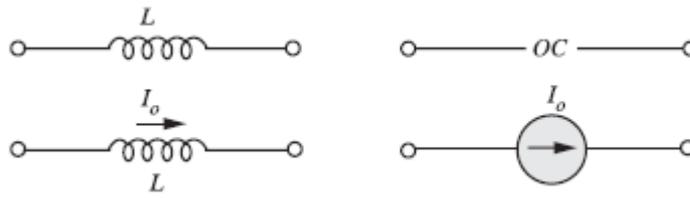


Figura 2. 21: El circuito equivalente de condiciones iniciales de un inductor.  
Fuente: López R., V. (2013)

El circuito equivalente de condiciones finales de un inductor, se logra derivando la siguiente relación básica:

$$v = L \frac{di}{dt}$$

En condiciones estacionarias o estables,  $\frac{di}{dt} = 0$ . Esto significa,  $v = 0$  y por lo tanto,  $L$  actúa como en corto en  $t = \infty$  (estado final o estable). En la figura 2.22 se muestra el circuito equivalente de la condición final de un inductor.

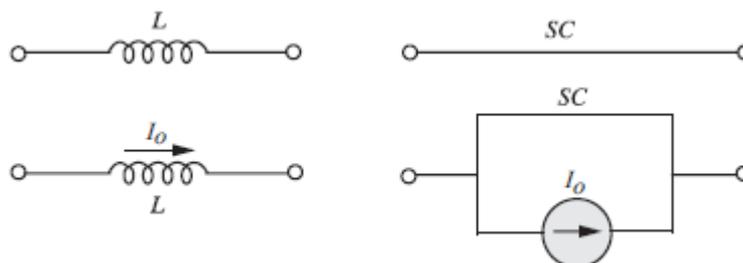


Figura 2. 22: El circuito equivalente de condiciones finales de un inductor.  
Fuente: López R., V. (2013)

### 2.6.2. El Capacitor.

El interruptor de la figura 2.23 está cerrado en  $t=0$ . Por lo tanto,  $t = 0^-$  corresponde al instante en que el interruptor está abierto y  $t=0^+$  corresponde

al instante en que el interruptor se acaba de cerrar. La expresión para el voltaje a través del condensador viene dada por:

$$v = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i d\tau$$

$$v(t) = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^0 i d\tau + \frac{1}{C} \int_0^t i d\tau$$

$$v(t) = v(0^-) + \frac{1}{C} \int_0^t i d\tau$$

Evaluando la expresión en  $t = 0^+$ , obtenemos:

$$v(0^+) = v(0^-) + \frac{1}{C} \int_0^{0^+} i d\tau$$

$$v(0^+) = v(0^-)$$

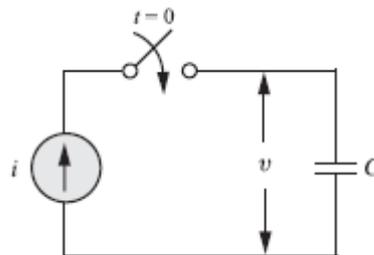


Figura 2. 23: Circuito para explicar la acción de conmutación de un capacitor.

Fuente: López R., V. (2013)

Así, el voltaje a través del capacitor no cambia instantáneamente. Si  $v(0^-) = 0$ , entonces  $v(0^+) = 0$ . Esto significa que para  $t = 0^+$ , el capacitor  $C$  actúa como cortocircuito. Por el contrario, si  $v(0^-) = \frac{q_0}{C}$  entonces  $v(0^+) = \frac{q_0}{C}$ . Estas conclusiones son resumidas en la figura 2.24.

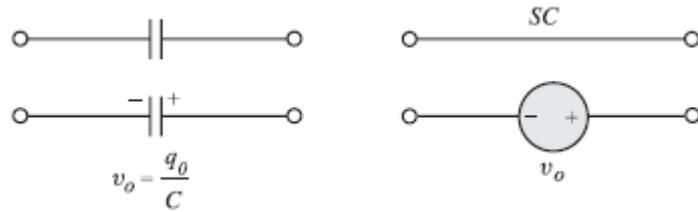


Figura 2. 24: El circuito equivalente de condiciones iniciales de un inductor.  
Fuente: López R., V. (2013)

El circuito equivalente de la condición final de un capacitor es una ecuación diferencial, dada como:

$$i = C \frac{dv}{dt}$$

Bajo condiciones de estado estacionario  $\frac{dv}{dt} = 0$ . Esto es, en  $t = \infty$ ,  $i = 0$ . Esto significa que  $t = \infty$  o en estado estacionario, el capacitor C actúa como un circuito abierto. En la figura 2.25 se muestra lo explicado previamente.

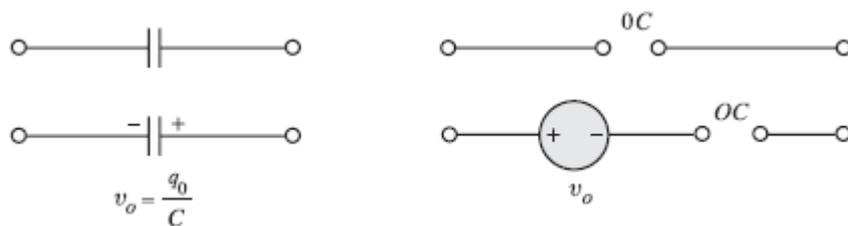


Figura 2. 25: El circuito equivalente de condiciones finales de un inductor.  
Fuente: López R., V. (2013)

## 2.7. Procedimiento para la evaluación de condiciones iniciales.

No existe un procedimiento único que se debe seguir en la solución de las condiciones iniciales. Por lo general, para resolver los valores iniciales de corrientes y voltajes, y entonces resolvemos mediante derivadas. Para

encontrar los valores iniciales de corrientes y tensiones, una red equivalente de la red original en  $t=0^+$  se construye de acuerdo a las siguientes reglas:

- i. Reemplace todos los inductores con circuito abierto o con fuentes de corriente que tienen el valor de la corriente que fluye en  $t=0^+$ .
- ii. Reemplace todos los condensadores con cortocircuitos o con una fuente de tensión de valor  $v_o = \frac{q_o}{C}$  si hay una carga inicial.
- iii. Las resistencias se dejan en la red sin ninguna modificación.

## CAPÍTULO 3: DIAGNÓSTICO DEL SIMULADOR MULTISIM

En el presente capítulo se describirá la plataforma de simulación MULTISIM, que es una herramienta que permite comprobar los resultados obtenidos teóricamente.

### 3.1. Qué es MULTISIM.

Hay varios simuladores de circuitos en el mercado. El simulador más popular es SPICE (*Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis, Programa de Simulación con Énfasis Circuito Integrado*) diseñado por la Universidad de California en Berkeley. Este simulador es tan poderoso que los simuladores comerciales se basan en él. De los muchos simuladores disponibles, Multisim ha surgido como la mejor herramienta para la simulación de circuitos.

Multisim es un simulador basado en SPICE, producido por National Instruments Inc. en Austin, TX, con una interfaz de captura esquemática que permite introducir fácilmente la topología de un circuito y la especificación de datos de simulación. Una versión de evaluación se puede descargar desde: <http://ni.com>

El análisis de circuitos usando Multisim permite al usuario:

- a) Observar el comportamiento del circuito antes de la fabricación real;

- b) Utilizar componentes ideales para aislar el diseño y las limitaciones de circuitos;
- c) Realizar mediciones que son difíciles de hacer en circuitos reales porque:
  - ✓ podrían dañar el circuito,
  - ✓ se ven afectadas por el ruido eléctrico;
  - ✓ no es posible debido a la falta de equipos de medición adecuados;
- d) Realizar simulaciones repetidas con valores paramétricos para un componente;
- e) Observar dependencia de la temperatura del comportamiento del circuito;
- f) Observar el comportamiento del circuito bajo elementos parásitos debido a los componentes reales.

Estas son sólo algunas de las muchas ventajas de la utilización de simulación de circuitos.

### **3.2. Simulación en MULTIM de Circuitos Resistivos.**

El primer circuito que analizaremos en Multisim se muestra en la figura 3.1. Se trata de un circuito resistivo que tiene tres resistencias y una fuente independiente de voltaje. Al abrir Multisim, se muestra una página de un esquema en blanco donde podemos realizar nuestro circuito esquemático, de varias ventanas, y algunas barras de herramientas, como se muestra en la figura 3.2.

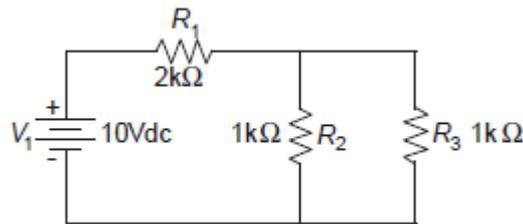


Figura 3. 1: Circuito resistivo con una fuente independiente de voltaje continua.  
Fuente: El Autor.

Algunos de los iconos en las barras de herramientas son convencionales tales como abrir, copiar, guardar, etc. Las ventanas se muestran en la ventana más grande para dibujar el circuito, denominada *Design Toolbox Window*. Una de las barras de herramientas es la barra de componentes y contiene enlaces a algunos de los diferentes componentes disponibles para modelar circuitos.

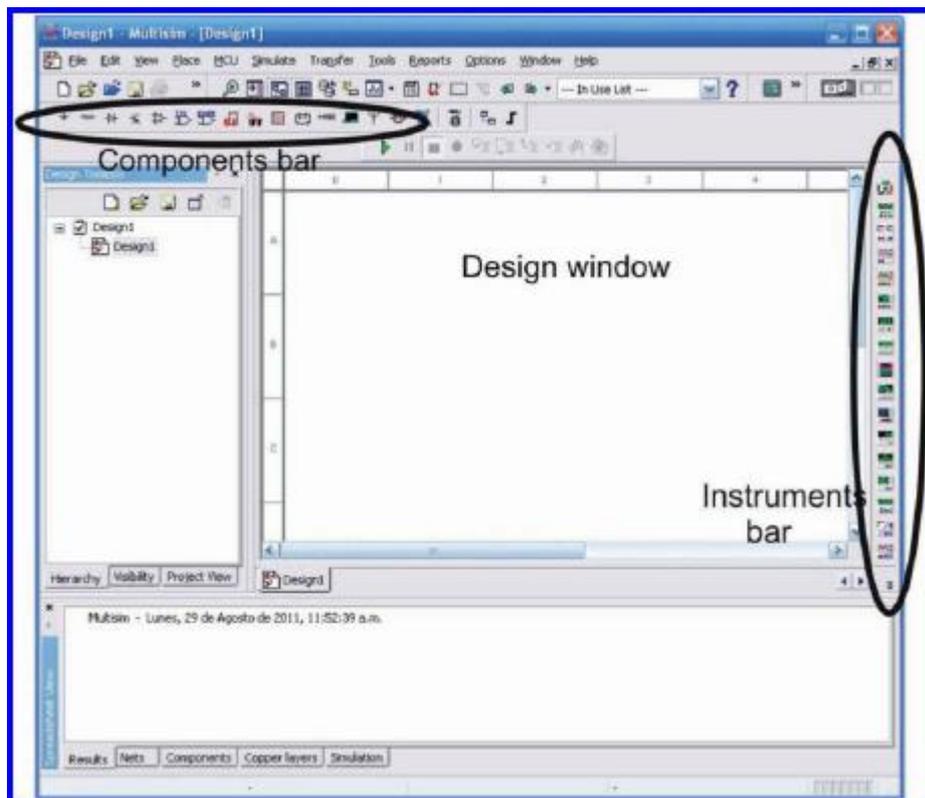


Figura 3. 2: Ventana principal de Multisim.  
Fuente: El Autor.

En la tabla 3.1 se presenta una breve descripción de los iconos disponibles en esta barra de herramientas.

Tabla 3. 1: Iconos disponibles en la barra de herramientas de componentes.

	Fuentes de voltaje, corriente y tierra.
	Resistores, condensadores, inductores, transformadores y otros componentes pasivos.
	Diferentes tipos de diodos.
	Transistores bipolares (BJT), JFET y MOSFET.
	OpAmps, comparadores y otros ICs analógicos.
	Piezas lógicas TTL
	Diversos circuitos digitales.
	Modos mixtos de ICs.
	Indicadores visuales, voltímetros, lámparas, etc.
	Componentes de potencia.
	Interruptores giratorios, motores, etc.

Fuente: Multisim National Instrument.

Multisim utiliza tres tipos diferentes de componentes para crear esquemas. Se trata de componentes virtuales, reales (o del fabricante), y 3D. Los componentes virtuales y reales utilizan los símbolos esquemáticos de la industria estándar. De forma predeterminada, los componentes virtuales son de color negro y los componentes reales son de color azul. Por el contrario, los componentes 3D se parecen más a las fotografías de la componente real, tal como se muestran en la figura 3.3. Aunque los componentes 3D añaden una cierta cantidad de color y realidad falsa a un circuito, que no son estándar y no se utiliza generalmente para las simulaciones.

La diferencia entre los componentes virtuales y reales es que los componentes reales reflejan los elementos de la base de datos del fabricante. Los artículos incluyen parámetros físicos, tales como el tamaño y disposición de patillas, que son necesarios para el diseño de placas de circuito impreso adecuado. Además, los modelos de comportamiento reales para dispositivos semiconductores tales como amplificadores operacionales serán más precisos que los modelos virtuales.

Por último, los valores reales de componentes pasivos (resistencias, condensadores e inductores) se limitan a los valores nominales especificados por el fabricante. En contraste, los valores de los componentes virtuales se pueden configurar para casi cualquier cosa, sin embargo, no hay datos físicos correspondientes. Como consecuencia, si se necesita una PCB, los componentes virtuales no son la elección adecuada.

En la práctica, si el objetivo es la creación de un circuito de producción, se utilizarán componentes reales. Si el objetivo es simular un ejercicio de laboratorio, los componentes virtuales se utilizan para elementos pasivos (resistencias, condensadores e inductores) y los reales se destinarán a los componentes activos (transistores, diodos, amplificadores operacionales, etc.).

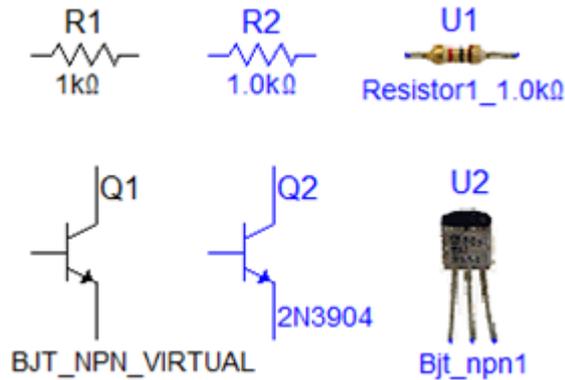


Figura 3. 3: Componentes virtuales y reales.  
Fuente: El Autor.

Para ilustrar el uso y edición de componentes, arrastramos una fuente de voltaje DC en el espacio de trabajo. Se mostrará con un valor de voltaje predeterminado y etiquetado, para modificar damos doble clic en el símbolo y un cuadro de diálogo aparecerá al lado de ella (véase la figura 3.4).

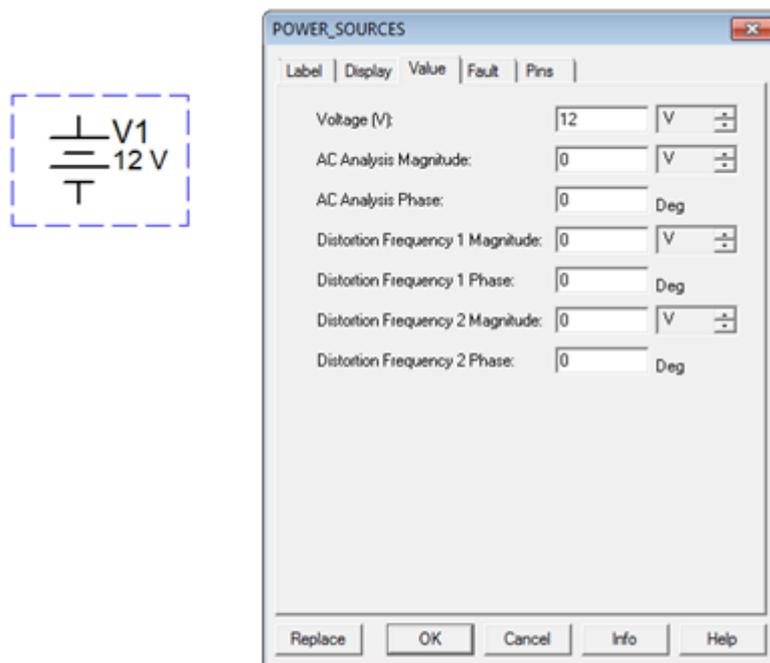


Figura 3. 4: Ventana de parámetros de fuentes de voltaje.  
Fuente: El Autor.

Este cuadro de diálogo permite modificar una variedad de atributos, el más importante sería el valor del voltaje y nombre. Al hacer doble clic en cualquier componente, se abrirán cuadros de diálogo de configuración, aunque los elementos contenidos en ella variarán de componente a componente. Por ejemplo, para resistores habrá un ajuste del valor de resistencia en lugar de voltaje.

La edición de posición y orientación de un componente, es sencillo. Seleccionamos el elemento (línea discontinua) para así moverlo utilizando el teclado o cursor del ratón. Si necesitamos mover un grupo de componentes, con el ratón seleccionamos varios elementos haciendo clic y arrastrándolo sobre ellas. Los componentes también se pueden rotar y voltear, utilizando algunos atajos de teclado (CTRL-R). También podemos agregar comandos con sus propios botones para facilitar el acceso, tal como se muestra en la figura 3.5.

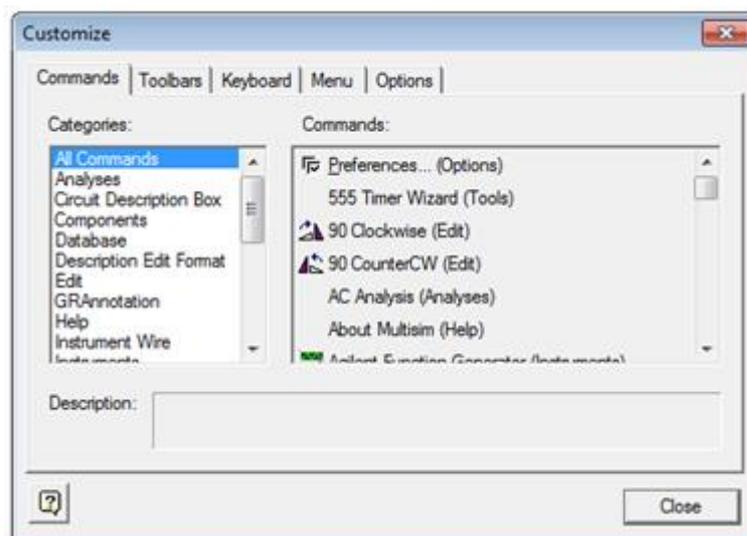


Figura 3. 5: Ventana para personalizar la barra de herramientas de MULTISIM.  
Fuente: El Autor.

Junto con la edición de componentes y personalización de la barra de herramientas, también podemos personalizar el aspecto del espacio de trabajo. Desde el menú Opciones, seleccionamos **Sheet Properties** (véase figura 3.6) desde aquí escogemos una variedad de esquemas de color para los componentes y cableado. Las fuentes también pueden ser modificadas.

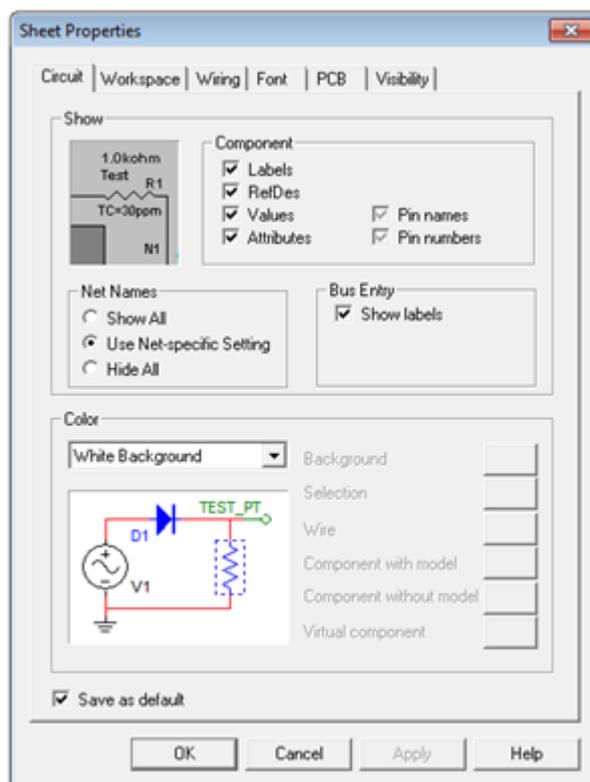


Figura 3. 6: Ventana para personalizar la barra de herramientas de MULTISIM.  
Fuente: El Autor.

Ahora, realizaremos la simulación de un circuito eléctrico, escogemos una fuente de voltaje DC en el área de trabajo. A partir de la barra de herramientas, en componentes virtuales (Azules) seleccionamos 2 resistencias y un símbolo de conexión a tierra. Vamos a hacer un bucle en serie de los tres elementos con el extremo negativo de la fuente de voltaje.

Es posible hacer clic en el medio de un cable con el fin de vincular varios artículos de forma conjunta. Un pequeño nodo se tiene en el punto de conexión. Una vez que los componentes están en su lugar y cableados, establecemos sus valores (véase la figura 3.7). Posterior añadimos dos voltímetros.

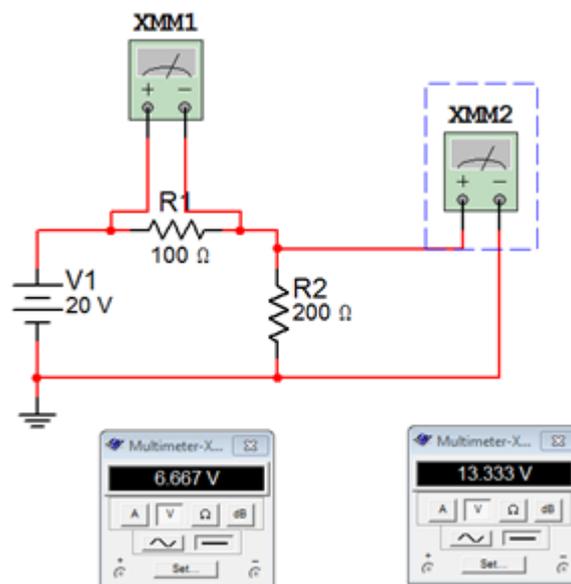


Figura 3. 7: Simulación de circuito resistivo en serie.  
Fuente: El Autor.

Para añadir los voltímetros (XMM1 y XMM2 de la figura 3.6), seleccionamos un DMM virtual en la parte superior de la barra de herramientas “Instrumentos”, llevamos al espacio de trabajo y unimos a R1. Y en forma similar para un segundo DMM virtual. El circuito está ahora listo para llevar a cabo una simulación. Vemos que la suma de los voltajes en R1 y R2 es igual a la fuente de alimentación de 20 V.

Multisim tiene una amplia variedad de instrumentos virtuales. Algunos de ellos son bastante simples, como el DMM. Otros instrumentos son

recreaciones virtuales de instrumentos de prueba en el mundo real. Por ejemplo, el osciloscopio Tektronix (XSC1) como se muestra en la figura 3.7 es muy similar al osciloscopio Tektronix TDS 2024. Esto tiene la ventaja de la inmediatez (suponiendo que usted ha utilizado este tipo de osciloscopio antes), sin embargo, no es la mejor manera de realizar una simulación.

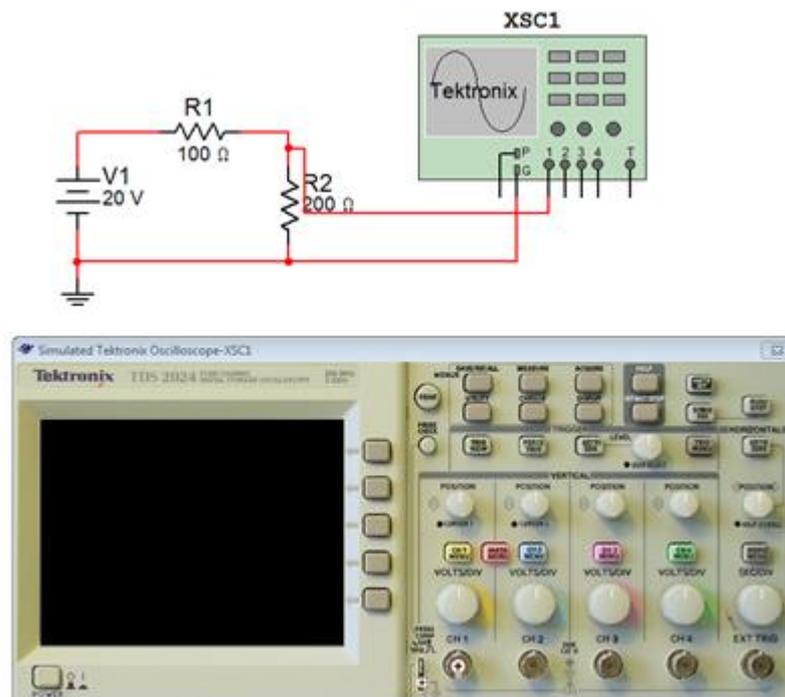


Figura 3. 8: Simulación que incluye osciloscopio virtual Tektronix.  
Fuente: El Autor.

A continuación se expondrán una serie de simulaciones realizadas en Multisim.

### 3.3. Simulación en MULTIM de Circuito RL en el dominio del tiempo.

En la figura 3.9 se muestra un circuito RC donde el interruptor ha estado cerrado durante un largo tiempo y en  $t=0$  se abre. Se va a determinar el valor de  $v_0(0^-)$  y  $v_0(0^+)$ .

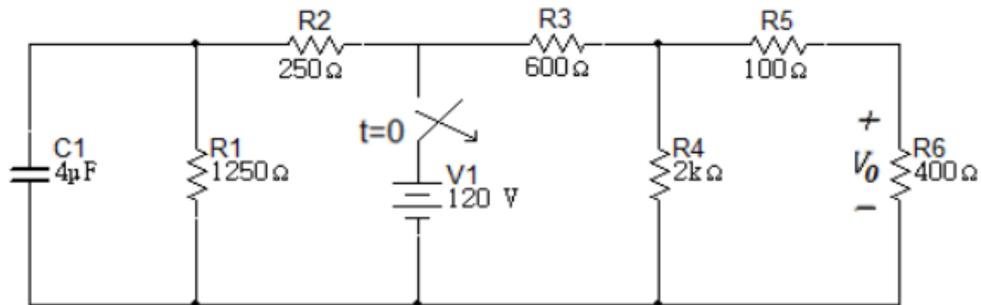


Figura 3. 9: Circuito RC con interruptor.  
Fuente: El Autor.

En  $t = 0^-$  el interruptor está cerrado y la simulación en Multisim sería la mostrada en la figura 3.10.

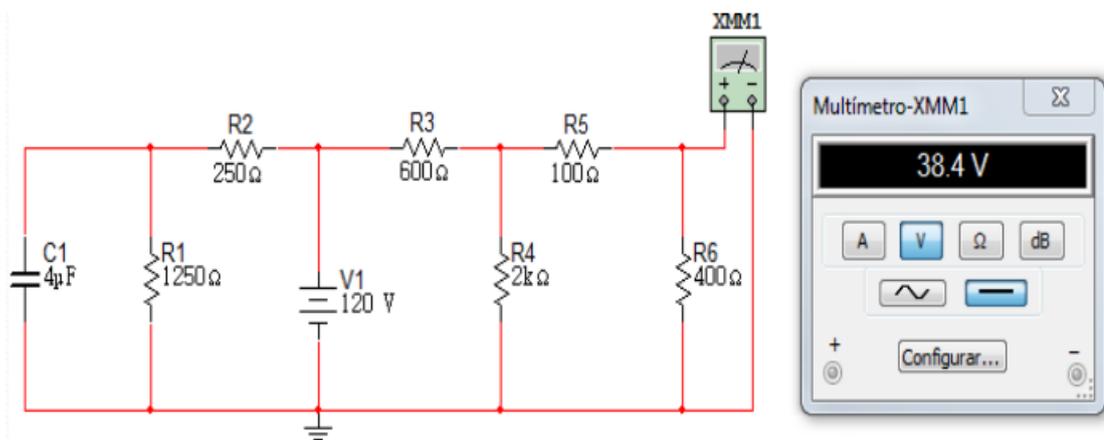


Figura 3. 10: Simulación del circuito RC con interruptor cerrado.  
Fuente: El Autor.

En la figura 3.11 se muestra la solución teórica del circuito RC para  $t = 0^-$  y los resultados serían:

$$R_7 = R_5 + R_6 = 500\Omega$$

$$R_8 = \frac{R_4 R_7}{R_4 + R_7} = \frac{(2k\Omega)(500\Omega)}{2k\Omega + 500\Omega} = 400\Omega$$

$$v_c(0^-) = v_c(0^+) = 120 \left( \frac{1250}{1250 + 250} \right) = 100V$$

$$v_a(0^-) = 120 \left( \frac{400}{400 + 600} \right) = 48V$$

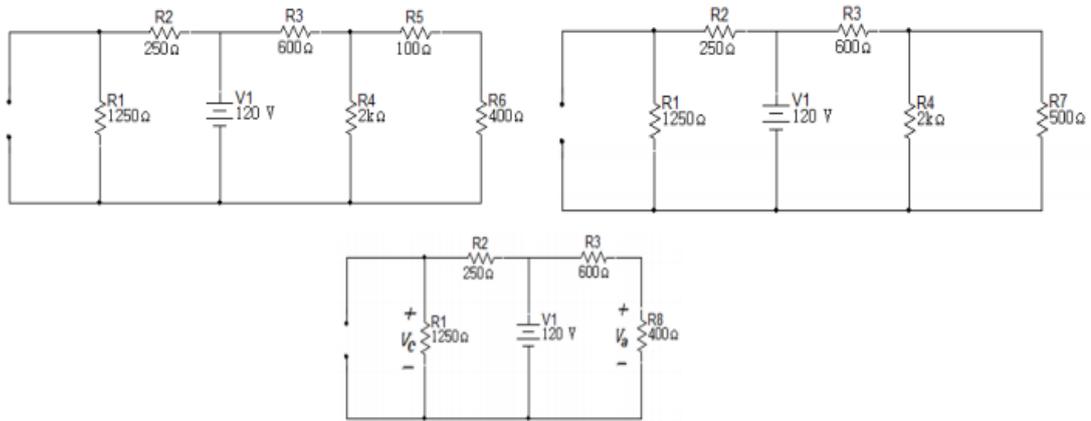


Figura 3. 11: Circuito RC en  $t=0^-$ .  
Fuente: El Autor.

Finalmente, vemos que el valor del voltaje obtenido en la figura 3.10 coincide con el valor teórico:

$$v_o(0^-) = 48 \left( \frac{400}{400 + 100} \right) = 38.4V$$

En  $t = 0^+$  el interruptor se abre y la simulación en Multisim sería la mostrada en la figura 3.12.

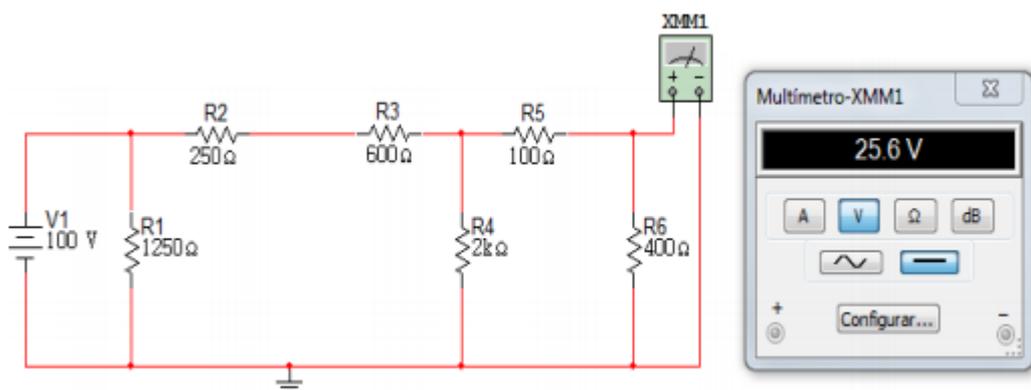


Figura 3. 12: Simulación del circuito RC con interruptor abierto.  
Fuente: El Autor.

En la figura 3.13 se muestra la solución teórica del circuito RC para  $t = 0^+$  y los resultados serían:

$$R_7 = R_5 + R_6 = 500\Omega$$

$$R_8 = \frac{R_4 R_7}{R_4 + R_7} = \frac{(2k\Omega)(500\Omega)}{2k\Omega + 500\Omega} = 400\Omega$$

$$v_b = 100 \left( \frac{400}{400 + 600 + 250} \right) = 32V$$

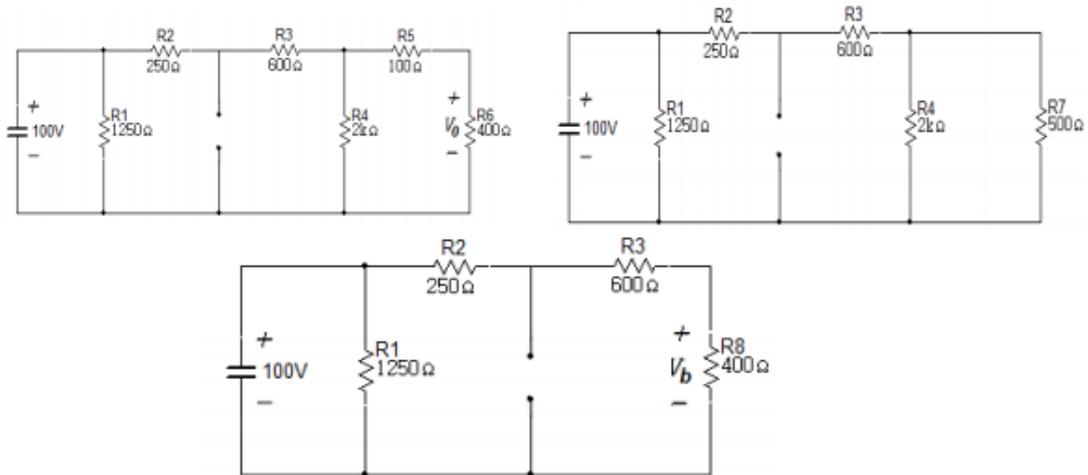


Figura 3. 13: Simulación del circuito RC con interruptor abierto.  
Fuente: El Autor.

Finalmente, vemos que el valor del voltaje obtenido en la figura 3.12 coincide con el valor teórico:

$$v_o(0^+) = 32 \left( \frac{400}{400 + 100} \right) = 25.6V$$

## **CAPÍTULO 4: SIMULACIONES EN MATLAB/SIMULINK DE CIRCUITOS ELÉCTRICOS I Y II**

En el presente capítulo, se presenta el aporte experimental a nivel de simulación en MATLAB/SIMULINK del trabajo de titulación. Se presentan algunos modelos seleccionados en las asignaturas de circuitos eléctricos I y II. En la que podemos comprobar que no necesariamente se puede simular circuitos eléctricos en plataformas de simulación como PSPICE, MULTISIM, PROTEUS, etc.

### **4.1. Introducción a Simulink/SimPowerSystems.**

Para la mayoría de estudiantes de la Carrera de Ingeniería en Eléctrico-Mecánica, se conocía a MatLab, pero no se sabía que Simulink es una programación en bloques dentro de MatLab. Simulink, dispone de varias librerías que permiten simular diferentes aplicaciones, entre ellas la Simulación de Circuitos Eléctricos mediante *SimPowerSystems*.

Los entornos MatLab/Simulink están integrados en una sola entidad, y por lo tanto podemos analizar, simular y revisar nuestros modelos en cualquier entorno en cualquier punto. Podemos invocar Simulink de MATLAB o escribiendo Simulink en el prompt de MATLAB, así como invocar SimPowerSystems desde de Simulink o escribiendo ***powerlib*** en el indicador de comandos de MATLAB.

Simularemos algunos modelos, los dos primeros explican los pasos a seguir para simular circuitos eléctricos en CC y AC, y posteriormente otros modelos que permitan cumplir con los objetivos específicos.

#### 4.2. Modelado de un circuito eléctrico en serie de CC.

Simularemos un circuito resistivo en serie con una fuente de voltaje. Los parámetros del circuito mostrado en la figura 4.1 son  $v_s = 12 [V]$ ,  $R_1 = 7\Omega$  y  $R_2 = 5\Omega$ .

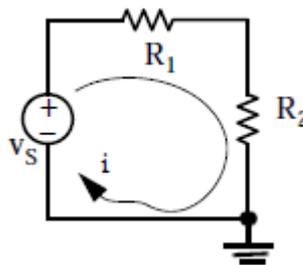


Figura 4. 1: Circuito básico a modelar en Simulink.  
Fuente: El Autor.

Para modelar el circuito de la figura 4.1, escribimos en el prompt de MATLAB “**powerlib**” y después se muestra la ventana **powerlib** (véase la figura 4.2).

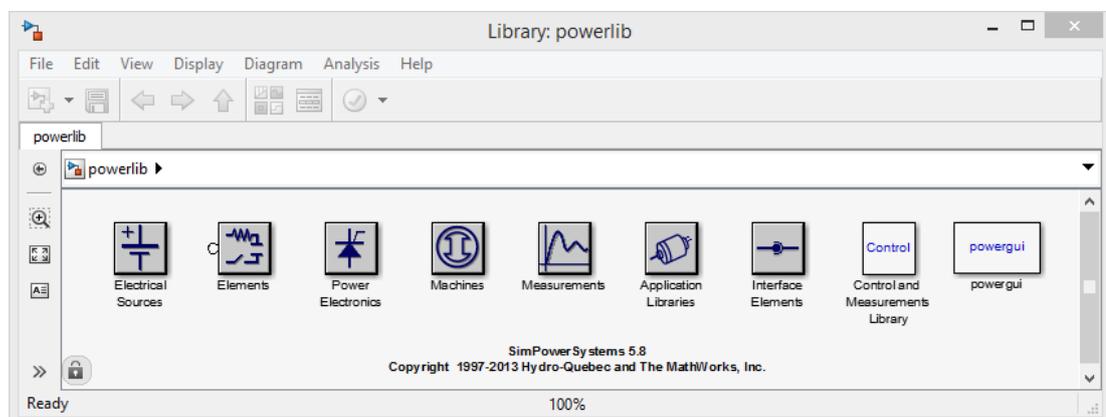


Figura 4. 2: Librería de diagramas de bloques para SimPowerSystems.  
Fuente: El Autor.

En el menú **File** de la figura 4.2, abrimos una nueva ventana y lo nombramos `sim_fig_41` como se muestra en la figura 4.3.

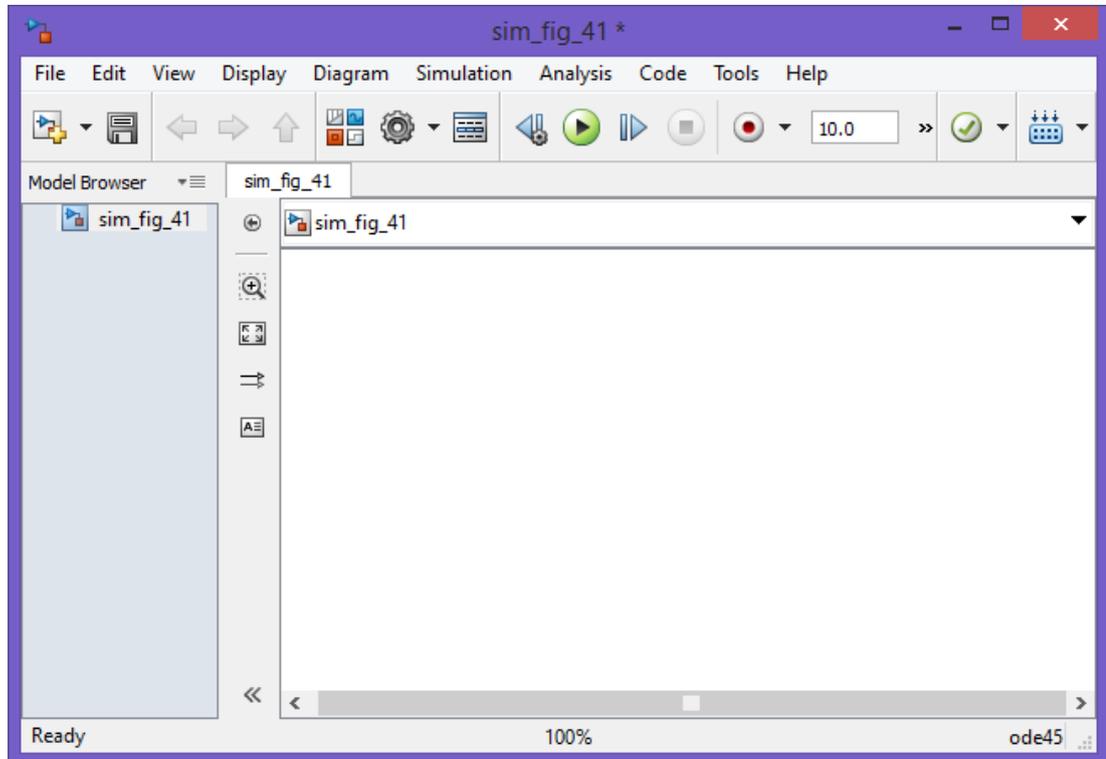


Figura 4. 3: Nueva ventana para modelar el circuito de la figura 4.1.  
Fuente: El Autor.

El bloque **powergui** de la figura 4.2 se conoce como el bloque de ambiente para los modelos SimPowerSystems y debe ser incluido en todos los modelos que contiene los bloques de SimPowerSystems. En consecuencia, añadiremos el modelo del circuito tal como se muestra en la figura 4.4.

El bloque **powergui** se denomina **continuous** (continua), que es un método por defecto de la resolución de un circuito eléctrico y utiliza un solucionador de paso variable. Otros métodos son el método discreto que se

utiliza cuando se desea la discretización del sistema, y el método de fasores que realiza la simulación de fasores a la frecuencia especificada por el parámetro de frecuencia. Estos métodos se describen en detalle más adelante utilizando SimPowerSystems.

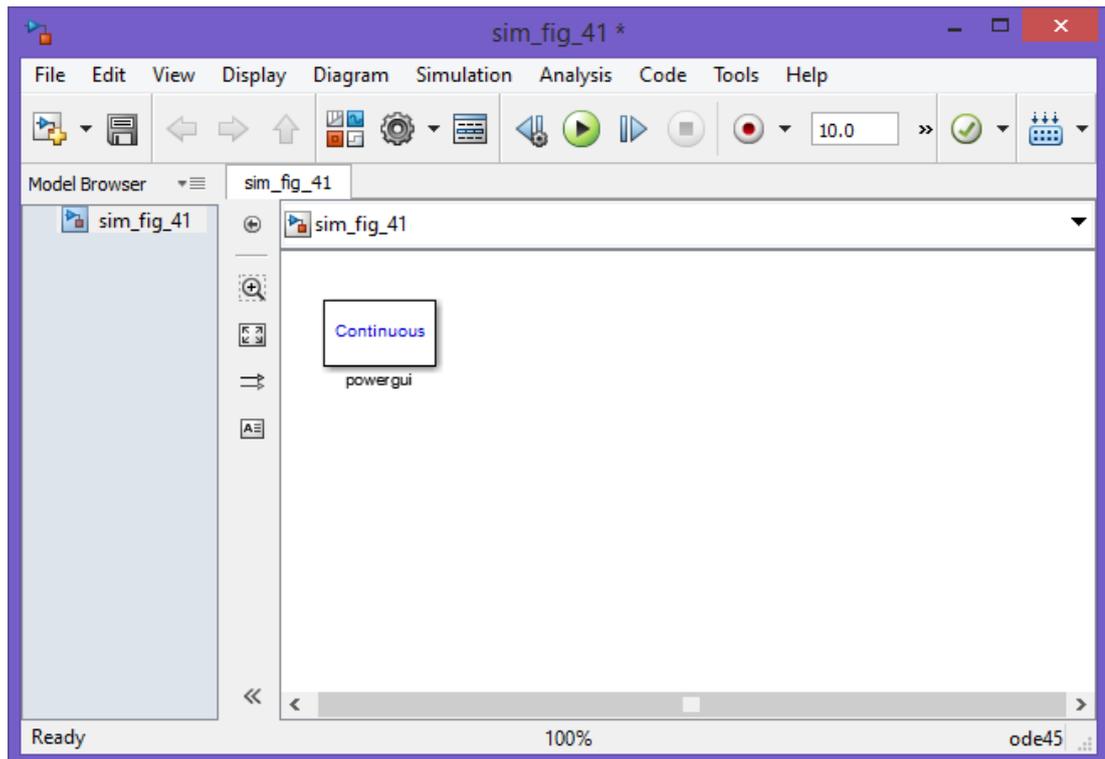


Figura 4. 4: Ventana con la adición del bloque powergui.  
Fuente: El Autor.

A continuación, tenemos que añadir los componentes del circuito eléctrico mostrado en la figura 4.1. Desde el bloque **Electrical Sources** mostrado por la figura 4.2 seleccionamos el bloque **DC Voltage Source** y arrastramos a la ventana sim\_fig\_41, desde el bloque **Elements** seleccionamos y movemos el bloque **Series RLC Branch**, así como el bloque **Ground** (tierra), del bloque **Measurements** seleccionamos los bloques de medición de voltaje y corriente, y desde la librería de **Simulink Sinks**

seleccionamos y arrastramos el bloque **Display (visualización)**. Finalmente, el modelo aparece ahora como se muestra en la Figura C.5.

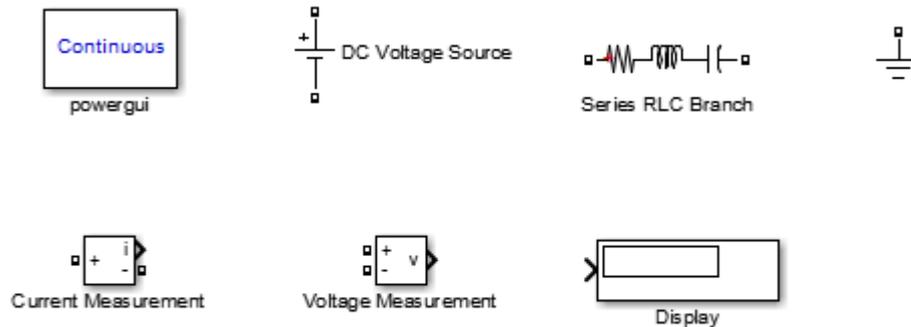


Figura 4. 5: Componentes del circuito CC a modelar.  
Fuente: El Autor.

Desde el bloque **Series RLC Branch** sólo necesitamos la resistencia, y para eliminar el inductor y el condensador, hacemos doble clic en él y desde la ventana de parámetros del bloque, seleccionamos el componente R con el valor fijado en  $7\Omega$  como se ilustra en la figura 4.6.

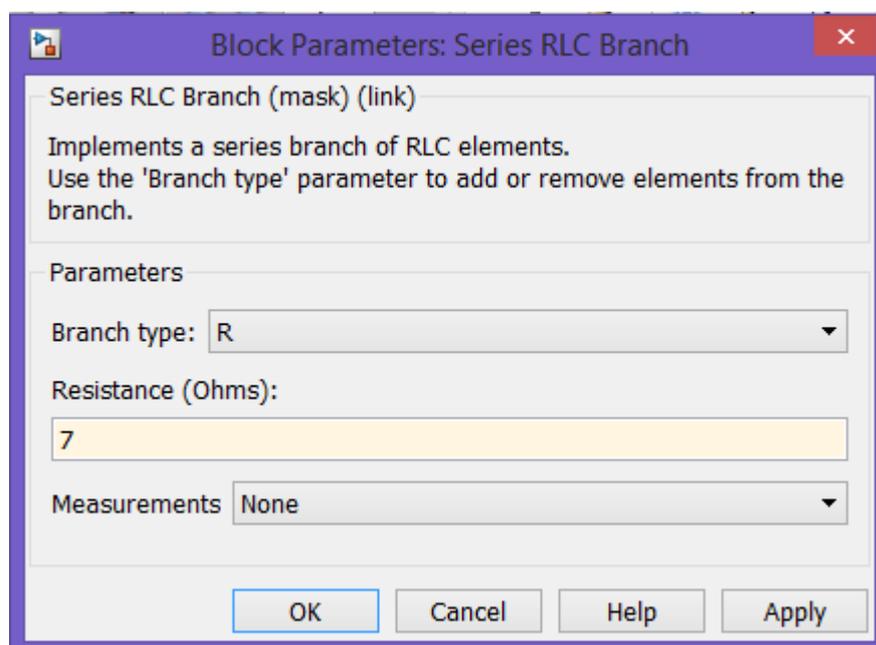


Figura 4. 6: Parámetros del diagrama de bloques **Series RLC Branch**.  
Fuente: El Autor.

Se requiere de otra resistencia de  $5\Omega$  para nuestro modelo, por tanto copiamos y pegamos la resistencia de  $7\Omega$  y modificamos el valor en el bloque de parámetros, tal como se mostró en la figura 4.6. Para girar la resistencia a la derecha basta con **Ctrl+R**. Adicionalmente, necesitamos dos bloques **Display** (visualización), uno para medir la corriente y otro para medir el voltaje, por tanto copiamos y pegamos el bloque **Display** en el modelo. También tenemos que copiar y pegar dos veces el bloque **Ground** (tierra) y el modelo final se muestra en la figura 4.7 donde también hemos cambiado el nombre de los bloques por nombres más cortos.

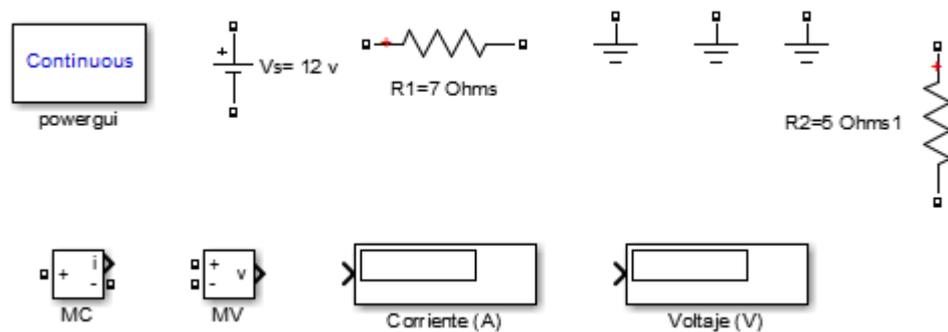


Figura 4. 7: Modelo con elementos agregados y renombrados.  
Fuente: El Autor.

De la figura 4.7 observamos que las dos terminales de la fuente de tensión y las resistencias se muestra un pequeño puerto cuadrado ( $\square$ ), los puertos izquierdo de MC (Medición de Corriente), y MV (Medición de Voltaje) se muestran también con los puertos, pero los terminales de la derecha se muestran como puertos de salida  $>$  de Simulink.

Las reglas en **SimPowerSystems** para terminales eléctricos, puertos y líneas de conexión son los siguientes:

1. Podemos conectar los puertos de Simulink (>) sólo a otros puertos de Simulink.
2. Podemos conectar puertos SimPowerSystems () sólo a otros puertos SimPowerSystems. Es decir que al igual que Simulink, podemos conectar automáticamente dos bloques SimPowerSystems seleccionando el bloque de origen, luego manteniendo presionada la tecla Ctrl y haciendo clic izquierdo del bloque de destino.
3. Si es necesario conectar los puertos de Simulink (>) a los puertos SimPowerSystems (), podemos utilizar los bloques SimPowerSystems que contienen los dos puertos de Simulink y SimPowerSystems como el bloque de medición de corriente (MC) y el bloque de medición de voltaje (MV).

El modelo para el circuito eléctrico en la figura 4.1 se muestra en la figura

4.8.

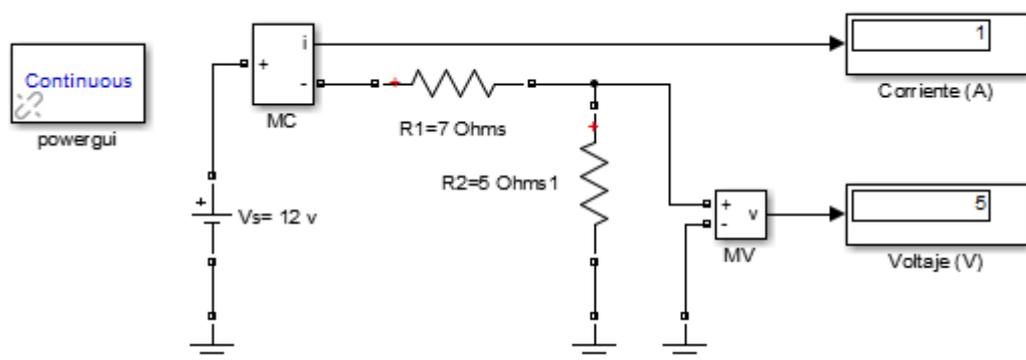


Figura 4. 8: Modelado final en SimPowerSystems del circuito de la figura 4.1.  
Fuente: El Autor.

Para el modelo de la figura 4.8 utilizamos el bloque **DC Voltage Source**. La ventaja en SimPowerSystems es que también podemos utilizar el bloque

**CA Voltage Source** como un bloque **DC Voltage Source** siempre que establezcamos la frecuencia  $0\text{ Hz}$  y la fase  $90^\circ$  en la ventana de parámetros del bloque, tal como se muestra en la figura 4.9.

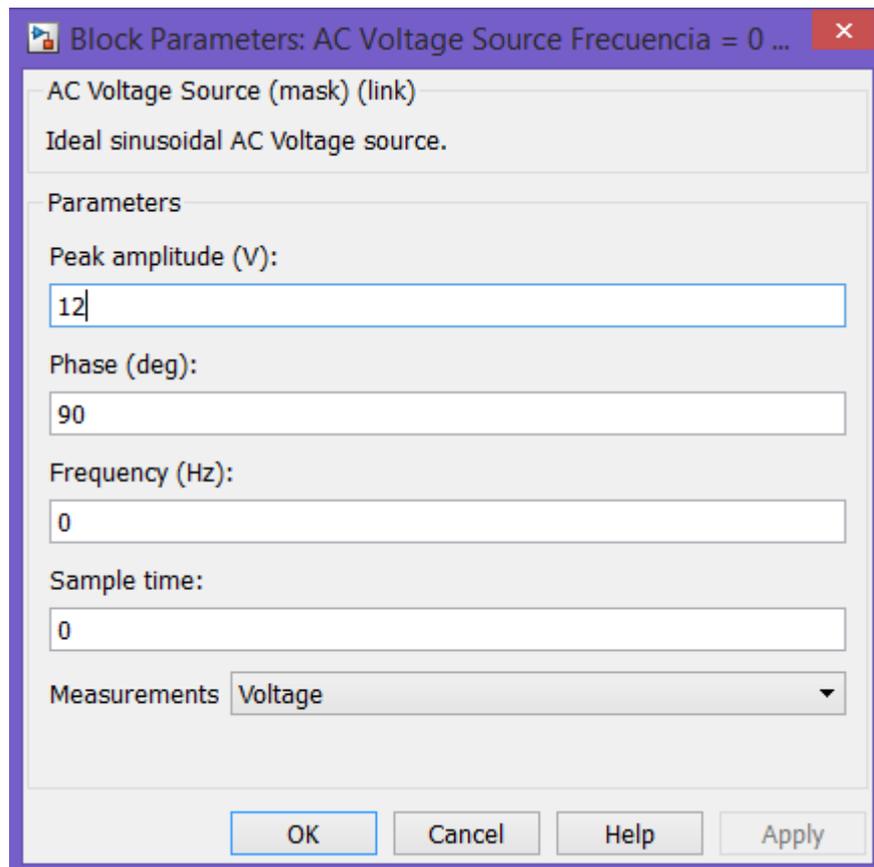


Figura 4. 9: Ajustes de los parámetros en el bloque *AC Voltage Source*.  
Fuente: El Autor.

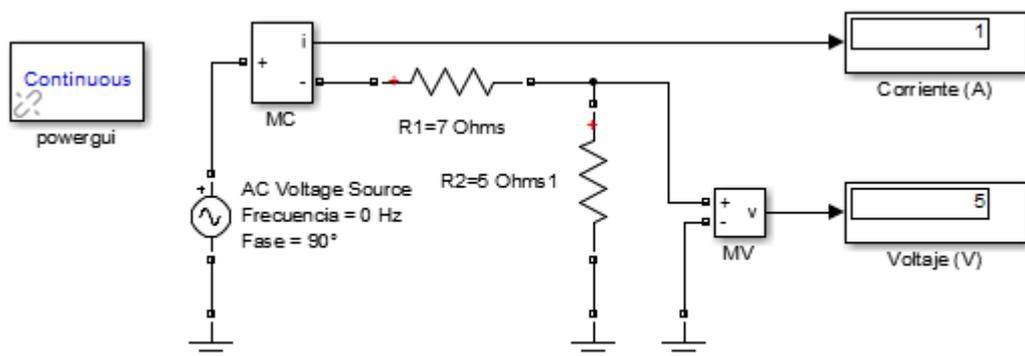


Figura 4. 10: Modelo con *AC Voltage Source* usada como *DC Voltage Source*.  
Fuente: El Autor.

Una tercera opción es utilizar un bloque de una fuente de voltaje dependiente (controlada) con un bloque constante establecido por el valor numérico de *DC Voltage Source* como se muestra en el modelo de la figura 4.11.

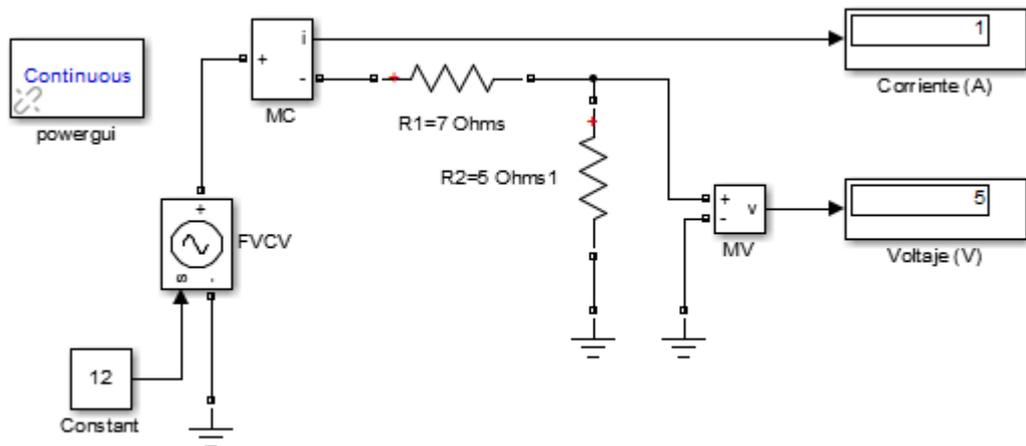


Figura 4. 11: Modelo con una fuente de voltaje dependiente.  
Fuente: El Autor.

Como pudimos observar en los tres modelos realizados con sus respectivas variantes, los resultados fueron los mismos. Por lo tanto, queda demostrado, que no necesariamente se requiere de MULTISIM, PROTEUS, PSPICE u otro software para simular circuitos eléctricos en corriente continua y alterna.

### 4.3. Modelado de un circuito eléctrico en serie de AC.

Ahora, simularemos un circuito RLC en serie con una fuente de voltaje alterna, tal como se muestra en la figura 4.12.

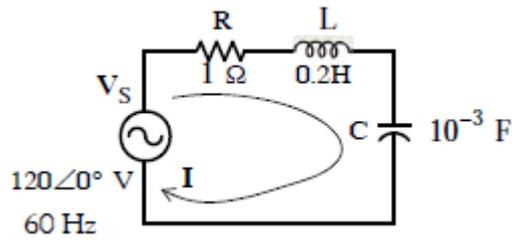


Figura 4. 12: Circuito RLC en serie a modelar en Simulink.  
Fuente: El Autor.

La corriente  $I$  y el voltaje  $V_C$  a través del capacitor serán calculados con MATLAB como sigue:

```
>> Vs=120; f=60; R=1; L=0.2; C=10^(-3);
>> XL=2*pi*f*L; XC=1/(2*pi*f*C);
>> Z=sqrt(R^2+(XL-XC)^2); I=Vs/Z, Vc=XC*I
```

I =

1.6494

Vc =

4.3752

En un proceso similar al circuito resistivo, se procede a realizar el modelado del circuito a través de SimPowerSystems (véase la figura 4.13).

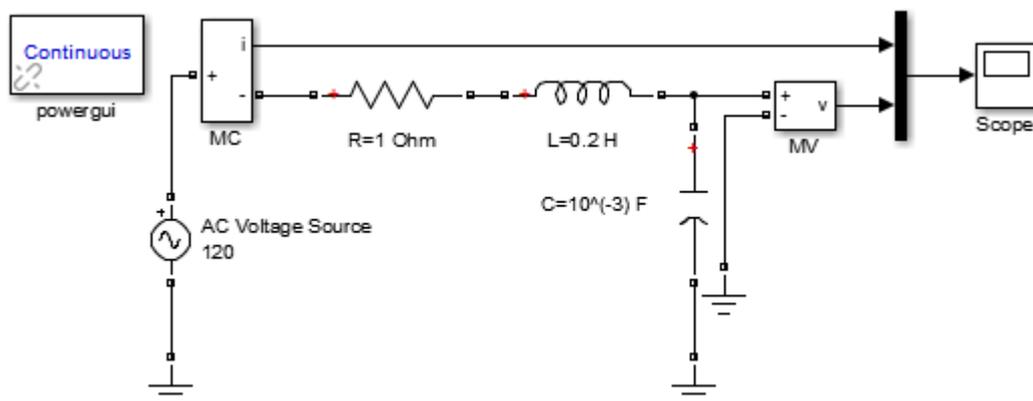


Figura 4. 13: Modelado del circuito RLC en serie sobre Simulink.  
Fuente: El Autor.

Una vez que ejecutamos la simulación (Ctrl+T) mediante el bloque **Scope** observamos las de ondas de voltaje y corriente (véase la figura 4.14).

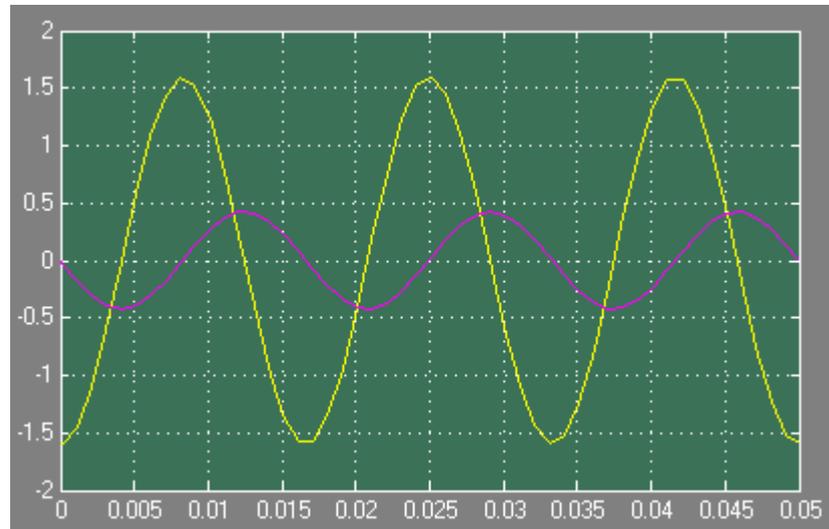


Figura 4. 14: Modelado del circuito RLC en serie sobre Simulink.  
Fuente: El Autor.

Se obtendrían los mismos resultados si sustituimos el bloque de fuente de voltaje alterna aplicada en el modelo de la figura 4.13 con un bloque (FVCV) fuente de voltaje controlado por voltaje, tal como se muestra en la figura 4.15.

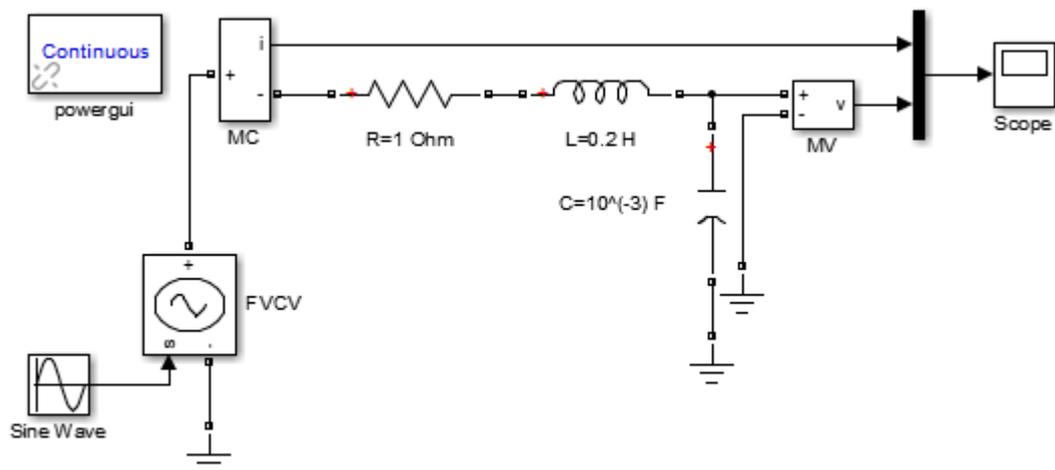


Figura 4. 15: Modelado del circuito RLC en serie sobre Simulink.  
Fuente: El Autor.

#### 4.4. Modelado mediante análisis de mallas.

De acuerdo a lo descrito en la fundamentación teórica del capítulo 2, la modelación para la solución de circuitos mediante análisis de nodos, mallas, teoremas como Thevenin y Norton. En esta sección escogemos el análisis de mallas, y las demás técnicas podrán ser abordadas por docentes y estudiantes de la de la Carrera de Ingeniería en Eléctrico-Mecánica.

El circuito que se muestra en la figura 4.16 será modelado a través de Simulink, y comprobar su resultado con el desarrollo teórico mediante análisis de mallas. Se pide calcular el voltaje de la fuente de corriente de 5A.

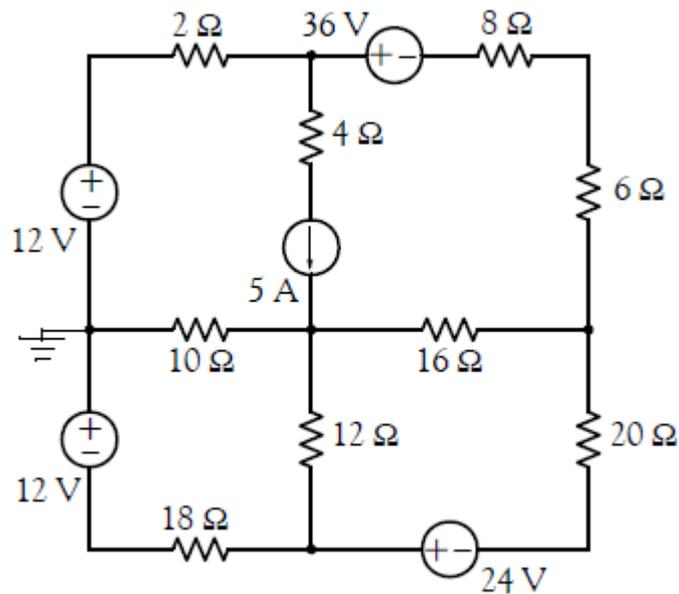


Figura 4. 16: Circuito con fuentes independientes mediante análisis de mallas.  
Fuente: El Autor.

Suponiendo que la asignación de corrientes de mallas son como las mostradas en la figura 4.17. Las corrientes  $i_3$  e  $i_4$  de las mallas 3 y 4, respectivamente, no presentan inconvenientes; pero en las mallas 1 y 2 no

podemos escribir las ecuaciones de malla para las corrientes  $i_1$  e  $i_2$  porque no hay como escribir un término que representa al voltaje a través de la fuente de corriente de 5A. Es decir, que podemos quitar temporalmente (abrir) la fuente de corriente 5A y se forma una supermalla. La corriente que fluye alrededor de esta malla combinada se muestra en la figura 4.18.

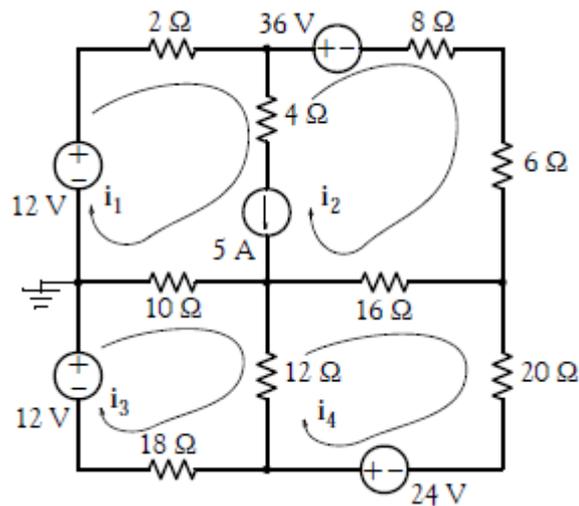


Figura 4. 17: Circuito con asignación de corrientes errónea.  
Fuente: El Autor.

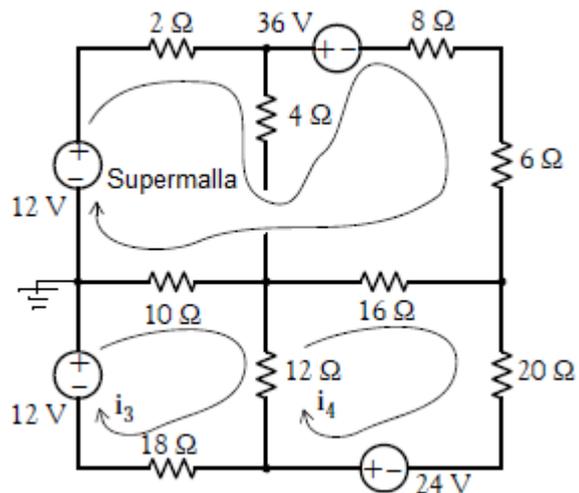


Figura 4. 18: Circuito con asignación de corrientes correcta.  
Fuente: El Autor.

Ahora, aplicamos LKV alrededor de:

➤ La supermalla:

$$12 - 36 = 2i_1 + 8i_2 + 6i_2 + 16(i_2 - i_4) + 10(i_1 - i_3)$$

$$12i_1 + 30i_2 - 10i_3 - 16i_4 = -24$$

$$6i_1 + 15i_2 - 5i_3 - 8i_4 = -12$$

En la misma supermalla:  $i_1 - i_2 = 5$

➤ La malla 3:  $12 = 10(i_3 - i_1) + 12(i_3 - i_4) + 18i_3$

$$-10i_1 + 40i_3 - 12i_4 = 12$$

$$5i_1 - 20i_3 + 6i_4 = -6$$

➤ La malla 4:  $24 = 16(i_4 - i_2) + 20i_4 + 12(i_4 - i_3)$

$$-16i_2 - 12i_3 + 48i_4 = 24$$

$$4i_2 + 3i_3 - 12i_4 = -6$$

Expresando en forma matricial:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} 6 & 15 & -5 & -8 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \\ 5 & 0 & -20 & 6 \\ 0 & 4 & 3 & -12 \end{bmatrix}}_R \underbrace{\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ i_4 \end{bmatrix}}_I = \underbrace{\begin{bmatrix} -12 \\ 5 \\ -6 \\ -6 \end{bmatrix}}_V$$

A continuación se muestra el código para resolver esta matriz sobre el script de Matlab:

```
R=[6 15 -5 -8; 1 -1 0 0; 5 0 -20 6; 0 4 3 -12]; V=[-12 5 -6 -6]'; I=R\V;...
fprintf(' \n');...
fprintf('i1 = %5.4f amps \t',I(1)); fprintf('i2 = %5.4f amps \t',I(2));...
fprintf('i3 = %5.4f amps \t',I(3)); fprintf('i4 = %5.4f amps',I(4)); fprintf(' \n')
i1=3.3975 amps i2=-1.6025 amps i3=1.2315 amps i4=0.2737 amps
```

Una vez que se obtuvieron los valores de las corrientes  $i_1$ ,  $i_2$ ,  $i_3$  e  $i_4$ , se procede a realizar el modelado del circuito a través de la plataforma SIMULINK que nos permite comprobar los resultados obtenidos, tal como se muestra en la figura 4.19.

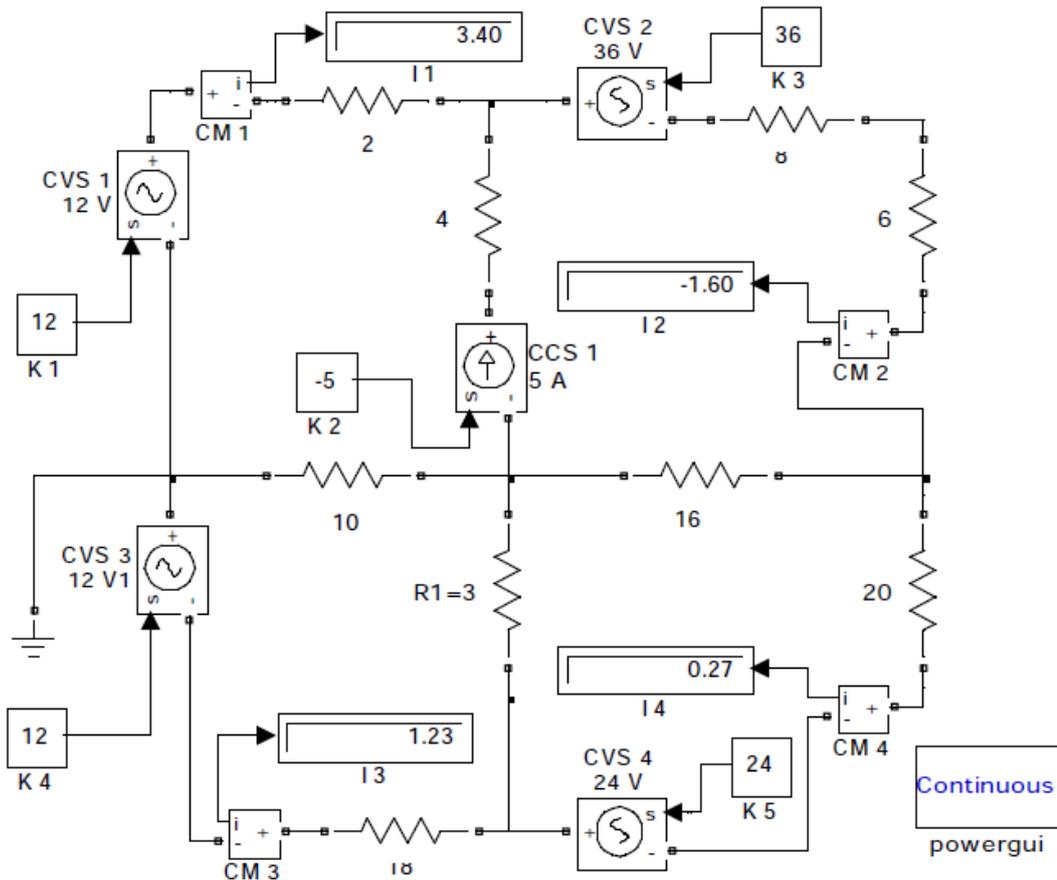


Figura 4. 19: Circuito con asignación de corrientes correcta.  
Fuente: El Autor.

Ahora, podemos encontrar la caída de tensión en la fuente de corriente de 5A, aplicando la LKV alrededor de la malla 1 con la siguiente relación:

$$2(3.3975) + 4(3.3975 + 1.6025) + v_{5A} + 10(3.3975 - 1.2315) - 12 = 0$$

$$v_{5A} = -36.455$$

Podemos verificar este valor mediante la aplicación de LKV alrededor de malla 2 donde comienza con el extremo inferior de la resistencia de 6w y yendo hacia la izquierda obtenemos:

$$1.6025(6 + 8) - 36 + 4(3.3975 + 1.6025) - 36.455 + 16(1.6025 + 0.2737) = 0$$

#### 4.5. Modelado de un circuito RLC.

Crear un modelo en Simulink para mostrar la diferencia de potencial  $v_a - v_b$  en el circuito mostrado por la figura 4.20.

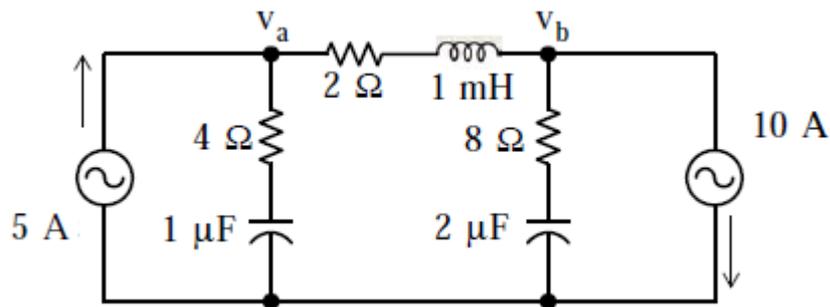


Figura 4. 20: Circuito con asignación de corrientes correcta.  
Fuente: El Autor.

El modelado del circuito se muestra en la figura 4.21, y las formas de onda para cada nodo y diferencia se ilustran en la figura 4.22 donde se obtienen los siguientes valores:

$$v_a = 5 \sin \omega t, \quad v_b = -15 \sin \omega t, \quad v_{ab} = 20 \sin \omega t$$

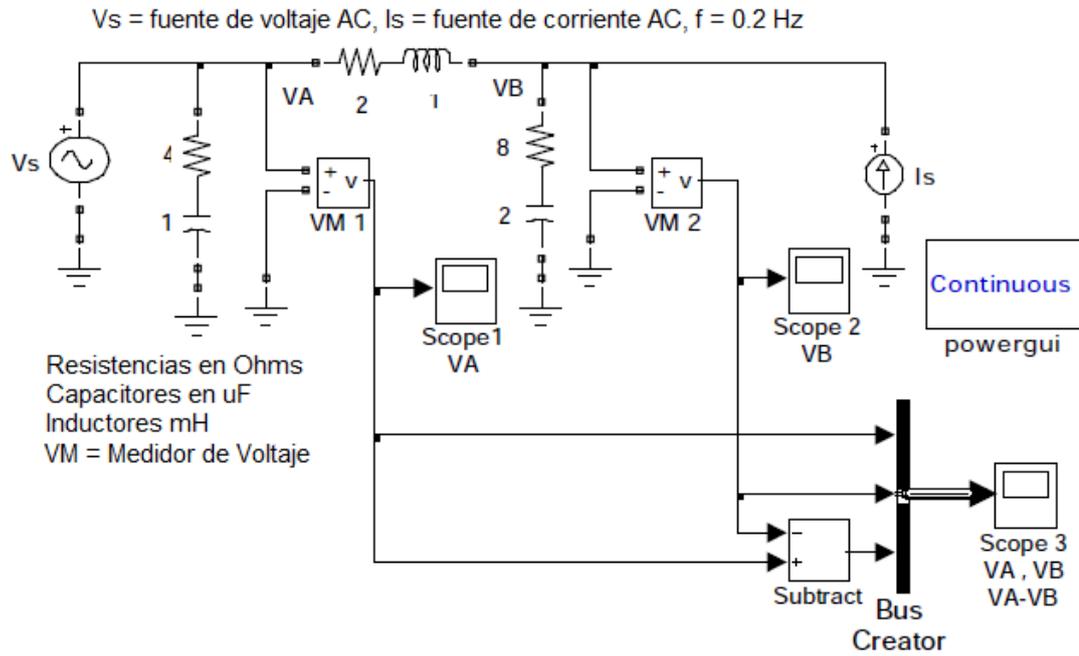


Figura 4. 21: Simulación en Simulink del circuito RLC.  
Fuente: El Autor.

En la gráfica de la figura 4.7 se muestra las formas de ondas de los voltajes  $v_a$ ,  $v_b$  y  $v_{ab} = v_a - v_b$ .

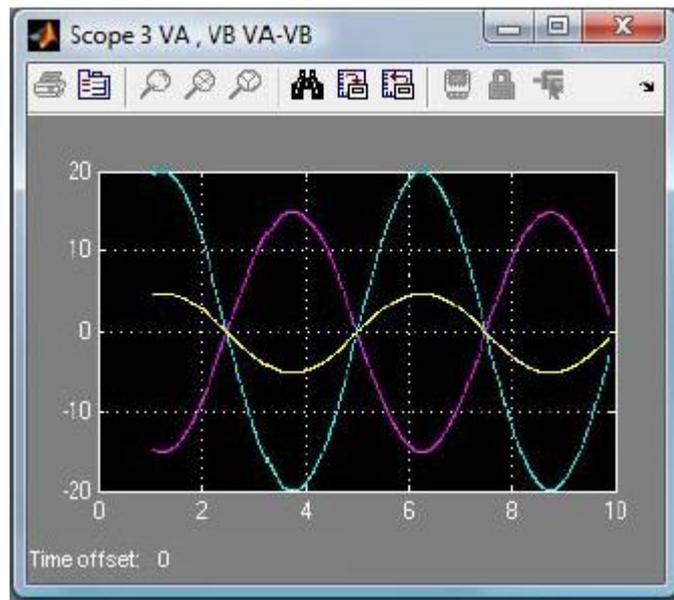


Figura 4. 22: Formas de onda para el modelado en Simulink del circuito RLC.  
Fuente: El Autor.

## **CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.**

### **5.1. Conclusiones.**

- Mediante la fundamentación teórica del análisis de circuitos eléctricos se describieron y resumieron métodos circuitales para la resolución de circuitos de corriente continua y alterna, que ayudarán al entendimiento de los estudiantes de Circuitos I y Circuitos II en la Carrera de Ingeniería Eléctrico-Mecánica.
- Multisim basado en Pspice es el estándar de la industria para el diseño y simulación de circuitos eléctricos y electrónicos, aunque el único problema es de la convergencia y el tiempo para la simulación, lo que hace que sea un inconveniente a la hora de simular sistemas eléctricos más complejos.
- En el trabajo de titulación se eligió a Matlab/Simulink sobre Multisim por su mayor resolución de ecuaciones y por los diagramas de bloques de Simulink que permiten modelar y simular la funcionalidad de circuitos eléctricos de corriente continua y alterna.
- A través del modelamiento de circuitos eléctricos se pudo comprobar que Matlab/Simulink es una herramienta robusta al momento de simular cualquier circuito eléctrico.

## 5.2. Recomendaciones.

- Utilizar más herramientas de simulación de circuitos eléctricos, especialmente Matlab/Simulink, que hasta la presente paso desapercibido como simulador de circuitos.
  
- Adquirir las licencias profesionales de los programas de simulación tales como Matlab/Simulink, Multsim, etc., para el mejorar el aprendizaje y conocimientos de los estudiantes de Ingeniería Eléctrico-Mecánica.
  
- Desarrollar futuros trabajos de titulación utilizando la herramienta de simulación Matlab/Simulink que permitan el modelamiento de algunos sistemas eléctricos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alexander, C. K. & Sadiku, M. N. O. (2013). *Fundamentos de Circuitos Eléctricos*. 5ta Edición. Editorial McGraw-Hill, New York, EEUU.

Allan, R., Wilhelm, M., & Dan, O. (2008). *Análisis de Circuitos: Teoría y Práctica*. 1era Edición. Cengage Learning Latín America, México.

Hayt, W., Kemmerly, J. & Durbin, S. (2012). *Análisis de Circuitos en Ingeniería*. 8va Edición. Editorial McGraw-Hill, New York, EEUU.

Irwin, J. D. & Nelms, R. M. (2011). *Análisis Básico de Circuitos en Ingeniería*. 10ma Edición. Editorial Wiley, New Jersey, EEUU.

López E., J., Muñoz M., J. & Camps V., G. (2011). *Análisis de Circuitos*. 1era Edición. Publicaciones Universidad de Valencia, España.

López R., V. (2013). *Teoría de Circuitos y Electrónica*. 1era Edición. Editorial UNED (Universidad Nacional de Educación a Distancia), Madrid, España.

Pastor, A., Ortega, J., Parra, V., & Pérez, A. (2014). *Circuitos Eléctricos Vol. I*. 1era Edición. Editorial UNED (Universidad Nacional de Educación a Distancia), Madrid, España.

Pastor G., A. & Ortega J., J. (2014). *Circuitos Eléctricos Vol. II*. 1era Edición. Editorial UNED (Universidad Nacional de Educación a Distancia), Madrid, España.