

FUNDAMENTOS DE

CIRCUITOS ELÉCTRICOS

Prácticas de Laboratorio

Javier Ricardo Castro Ladino

**Editorial
Unillanos**



FUNDAMENTOS DE CIRCUITOS ELÉCTRICOS

Prácticas de Laboratorio

FUNDAMENTOS DE CIRCUITOS ELÉCTRICOS

Prácticas de Laboratorio

Javier Ricardo Castro Ladino

Editorial
Unillanos



Castro Ladino, Javier Ricardo

Fundamentos de Circuitos Eléctricos Prácticas de Laboratorio / Javier Ricardo Castro Ladino. – Villavicencio: Editorial Unillanos, 2019.

p. 116, ilustraciones.; tablas.; gráficas 17 x 24 cm

Incluye: Referencias Bibliográficas

ISBN 978-958-8927-41-1 ISBN Digital 978-958-8927-42-8

1. Circuitos Eléctricos. 2. Electricidad. 3. Análisis de Circuitos Eléctricos

CDD 621.319 ed. 21

Catalogación en la publicación – Biblioteca Universidad de los Llanos

Primera edición, 2019

Fundamentos de Circuitos Eléctricos Prácticas de Laboratorio

ISBN 978-958-8927-41-1

ISBN Digital 978-958-8927-42-8

© Javier Ricardo Castro Ladino

© Universidad de los Llanos

Coordinación editorial: Ana María Lombana Gracia

Diseño de cubierta y diagramación: Juan Sebastián Bazzani Delgado

Corrección de estilo: Julian Acosta Riveros

Editorial Unillanos, 2019

Kilómetro 12 vía Puerto López, vereda Barcelona

Email: editorialunillanos@unillanos.edu.co

www.editorial.unillanos.edu.co

Villavicencio, Meta

Impresión

Xpress Estudio Gráfico y Digital S.A.S.

Carrera 69H No. 77 - 40, CP: 111061

PBX: +57(1) 602 0808 | Fax: +57(1) 795 4340

Bogotá, Colombia

www.xpress.com.co

Descargo de responsabilidad: la información contenida en este libro es producto del autor y por consiguiente no compromete la posición de la Universidad de los Llanos.

Prohibida la reproducción total o parcial, en cualquier medio, formato o propósito, sin la autorización escrita de la Editorial Unillanos.

*Con todo mi amor para Nancy,
Juan Sebastián y María Fernanda.*

*Por su comprensión, paciencia y
apoyo, en todos estos años de lucha.*

Tabla de contenido

Presentación.....	17
1. Resistencia eléctrica equivalente y ley de Ohm	19
1.1 Objetivos.....	19
1.2 Marco de referencia.....	19
1.2.1 Circuito eléctrico.....	19
1.2.2 Carga eléctrica	19
1.2.3 Corriente eléctrica.....	20
1.2.4 Voltaje	21
1.2.5 Ley de Ohm	22
1.2.6 Potencia y energía eléctrica	22
1.2.7 Resistencia eléctrica	23
1.2.8 Resistencias conectadas en serie	25
1.2.9 Resistencias conectadas en paralelo.....	26
1.2.10 Transformación delta-estrella y estrella-delta	27
1.2.11 Divisor de voltaje	31
1.2.12 Divisor de corriente.....	34
1.3 Materiales y equipos	38
1.4 Procedimiento	39
1.4.1 Medición de resistencia eléctrica	39
1.4.2 Medición de voltaje y corriente.....	40
1.4.3 Comprobación gráfica de la ley de Ohm	41
1.4.4 Conclusiones.....	42
2. Análisis de circuitos resistivos mediante corrientes de malla.....	43
2.1 Objetivos.....	43
2.2 Marco de referencia.....	43
2.3 Materiales y equipos	46
2.4 Procedimiento	46
Análisis mediante corrientes de malla	46
2.5 Observaciones y conclusiones.....	47
3. Análisis de circuitos resistivos mediante voltajes de nodo.....	49
3.1 Objetivos.....	49
3.2 Marco de referencia.....	49
3.3 Materiales y equipos	52
3.4 Procedimiento	52
Análisis mediante voltajes de nodos.....	52
3.5 Observaciones y conclusiones.....	53
4. Teorema de superposición	55
4.1 Objetivos.....	55

4.2	Marco de referencia.....	55
4.3	Materiales y equipos	61
4.4	Procedimiento	61
	Análisis de circuitos por superposición.....	61
4.5	Observaciones y conclusiones.....	62
5.	Transformación de fuentes	63
5.1	Objetivos.....	63
5.2	Marco de referencia.....	63
5.3	Materiales y equipos	68
5.4	Procedimiento	68
	Análisis de circuitos, aplicando transformación de fuentes	68
5.5	Observaciones y conclusiones.....	69
6.	Teoremas de Thévenin y Norton	71
6.1	Objetivos.....	71
6.2	Marco de referencia.....	71
	6.2.1 Teorema de Thévenin.....	71
	6.2.2 Teorema de Norton.....	76
6.3	Materiales y equipos	77
6.4	Análisis de un circuito aplicando el teorema de Thévenin.....	78
6.5	Análisis de un circuito aplicando el teorema de Norton.....	80
6.6	Observaciones y conclusiones.....	81
7.	Teorema de transferencia máxima de potencia	83
7.1	Objetivos.....	83
7.2	Máxima transferencia de potencia.....	83
7.3	Materiales y equipos	88
7.4	Análisis de transferencia máxima de potencia	88
	7.4.1 Cálculo y simulación del circuito	88
	7.4.2 Análisis práctico del circuito	89
7.5	Observaciones y conclusiones.....	89
8.	Amplificador operacional, aplicaciones básicas	91
8.1	Objetivos.....	91
8.2	El amplificador operacional.....	91
	8.2.1 Diagrama de bloques	92
	8.2.2 Diagrama híbrido.....	92
	8.2.3 Diagrama esquemático amplificador operacional LM741	95
	Modelo de estructura interna.....	95
	8.2.4 Polarización del amplificador operacional.....	96
8.3	Circuitos lineales con amplificador operacional.....	98
	8.3.1 Amplificador en configuración inversor.....	98
	8.3.2 Amplificador en configuración no inversor.....	99
	8.3.3 Configuración como seguidor de voltaje	100
	8.3.4 Configuración como amplificador sumador	101

8.3.5	Configuración como amplificador diferencial.....	102
8.4	Ecuaciones algebraicas con amplificadores operacionales.....	104
8.4.1	Materiales y equipos	107
8.5	Amplificador inversor.....	107
8.6	Amplificador no inversor.....	108
8.7	Seguidor de voltaje	109
8.8	Amplificador sumador.....	110
8.9	Amplificador diferencial	110
8.10	Implementación de una ecuación algebraica lineal.....	111
8.11	Observaciones y conclusiones	111
	Referencias.....	113

Lista de tablas

Tabla 1-1	Valor nominal (<i>código de colores</i>) y valor real (<i>medido</i>) de las resistencias	39
Tabla 1-2	Voltajes y corrientes, calculados y medidos (<i>circuito figura 1.18</i>)	41
Tabla 1-3	Voltajes y corrientes medidos en el circuito de la figura 1-14.....	42
Tabla 2-1	Voltajes y corrientes calculados y medidos en el circuito de la figura 2.3	47
Tabla 3-1	Voltajes y corrientes calculados y medidos en el circuito de la figura 3.1.....	53
Tabla 4-1	Voltajes calculados, simulados y medidos en el circuito de la figura 4-9	62
Tabla 5-1	Corrientes y voltajes calculados y simulados en el circuito de la figura 5.13.....	69
Tabla 6-1	Voltajes y corrientes calculadas y simuladas en el circuito de la figura 6.12.....	78
Tabla 6-2	Parámetros obtenidos en el circuito de la figura 6.13	79
Tabla 6-3	Parámetros obtenidos en el circuito de la figura 6.15.....	80
Tabla 7-1	Parámetros obtenidos en el circuito de la figura 7.7	89

Lista de figuras

Figura 1.1.	Representación de circuito eléctrico. (a) Diagrama esquemático de una linterna portátil. (b) Diagrama del circuito eléctrico equivalente a la linterna.	20
Figura 1.2.	Señales de corriente: (a) onda cuadrada, AC; (b) corriente directa, DC; (c) senoidal, AC; y (d) exponencial.	21
Figura 1.3.	(a) Resistencia de película de carbón. (b) Resistencia bobinada cubierta con cerámica. (c) Resistencia metálica.	24
Figura 1.4.	Código de colores para resistencias eléctricas de películas de carbón	25
Figura 1.5.	Circuito resistivo en serie	25
Figura 1.6.	Circuito resistivo en paralelo	26
Figura 1.7.	Circuito puente	27
Figura 1.8.	Conversión delta a estrella	28
Figura 1.9.	Resistencia equivalente entre las terminales a y b , del circuito de la figura 1.7.	29
Figura 1.10.	Resistencia equivalente entre las terminales a y b , del circuito de la figura 1.9.	29
Figura 1.11.	Conversión estrella a delta	30
Figura 1.12.	Ejemplo de conversión de un circuito delta a su equivalente circuito estrella.	30
Figura 1.13.	Circuito divisor de voltaje.....	31
Figura 1.14.	Simulación circuito divisor de voltaje.....	33
Figura 1.15.	Circuito divisor de corriente	34
Figura 1.16.	Circuito equivalente del mostrado en la figura 1.15	35
Figure 1.17.	Circuito divisor de corriente con dos resistencias	36
Figura 1.18.	Circuito divisor de corriente	37
Figura 1.19.	Simulación circuito divisor de corriente	38
Figura 1.20.	Circuito resistivo para ser implementado	39
Figura 1.21.	Circuito resistivo polarizado con fuente de voltaje DC	40
Figura 1.22.	Circuito resistivo para la verificación de la ley de Ohm.....	41
Figura 2.1.	Circuito resistivo de dos mallas.....	43
Figura 2.2.	Simulación circuito resistivo de dos mallas	45
Figura 2.3.	Circuito para análisis por corrientes de malla	46
Figura 3.1.	Circuito resistivo análisis por nodos	49
Figura 3.2.	Resultados de la simulación del circuito del ejemplo 3-1.....	51
Figura 3.3.	Circuito para el análisis por voltajes de nodo.....	53
Figura 4.1.	Circuito para análisis aplicando teorema de superposición	55
Figura 4.2.	Circuito resultante al anular las dos fuentes de corriente	56
Figura 4.3.	Circuito de una malla, equivalente al de la figura 4.2.....	56
Figura 4.4.	Circuito resultante al anular la fuente de corriente de 30 mA y la de voltaje de 10 V.	57
Figura 4.5.	Circuito equivalente al de la figura 4.4.....	57
Figura 4.6.	Circuito de una malla, equivalente al de la figura 4.5.....	58

Figura 4.7.	Circuito resultante al anular la fuente de corriente de 20 mA y la de voltaje de 10 V	59
Figura 4.8.	Circuito equivalente al mostrado en la figura 4.7.....	59
Figura 4.9.	Resultado simulación del circuito considerado en el ejemplo 4-1	60
Figura 4.10.	Circuito para analizar, aplicando el teorema de superposición	61
Figura 5.1.	Modelo de fuentes reales. (a) Fuente de voltaje. (b) Fuente de corriente.....	63
Figura 5.2.	Modelo de transformación de fuentes, entregando potencia a un circuito.....	64
Figura 5.3.	Circuito para el ejemplo 5-1, teorema de transformación de fuentes.....	64
Figura 5.4.	Simulación del circuito del ejemplo 5-1.....	65
Figura 5.5.	Circuito equivalente transformado la fuente de corriente de 2 A.....	65
Figura 5.6.	Simulación del circuito mostrado en la figura 5.5	66
Figura 5.7.	Circuito equivalente al transformar la fuente de corriente de 3 A	66
Figura 5.8.	Simulación del circuito mostrado en la figura 5.7	66
Figura 5.9.	Circuito equivalente al convertir la fuente de 24 V en una fuente de corriente.	67
Figura 5.10.	Simulación del circuito mostrado en la figura 5.9	67
Figura 5.11.	Circuito equivalente de una malla.....	67
Figura 5.12.	Simulación del circuito mostrado en la figura 5.11	68
Figura 5.13.	Circuito para resolver en forma analítica y mediante simulación	69
Figura 6.1.	Reemplazo de un circuito lineal por su equivalente Thévenin. (a) Circuito original. (b) Circuito equivalente Thévenin.....	72
Figura 6.2.	Circuito para el ejemplo 6-1	72
Figura 6.3.	Circuito para calcular la resistencia equivalente Thévenin	73
Figura 6.4.	Circuito para el ejemplo 6-2	73
Figura 6.5.	Circuito para determinar la i_{sc} en circuito del ejemplo 6-2	74
Figura 6.6.	Circuito para calcular V_{oc} en el ejemplo 6-2	75
Figura 6.7.	Circuito equivalente Thévenin del circuito mostrado en la figura 6.3.....	76
Figura 6.8.	Reemplazo de un circuito lineal por su equivalente Norton. (a) Circuito original. (b) Circuito equivalente Norton.....	76
Figura 6.9.	Esquema del circuito equivalente Norton adaptado a partir de Dorf y Svodoba, 2015, p. 217.	77
Figura 6.10.	Circuito para el ejemplo 6-3 (Dorf y Svodoba, 2015, p. 217).	77
Figura 6.11.	Circuito equivalente Norton del circuito mostrado en la figura 6.7.....	77
Figura 6.12.	Circuito para calcular y simular el circuito equivalente de Thévenin.....	78
Figura 6.13.	Circuito para verificar el equivalente Thévenin	79
Figura 6.14.	Circuito equivalente de Thévenin.....	79
Figura 6.15.	Circuito para calcular y simular el equivalente de Norton	80
Figura 6.16.	Circuito equivalente de Norton.....	81
Figura 7.1.	(a) Circuito A que entrega potencia a una carga R_L . (b) Circuito equivalente Thévenin del circuito mostrado en (a).....	83
Figura 7.2.	Circuito para análisis de transferencia máxima de potencia (Dorf, 2011, p. 203).	85
Figura 7.3.	Circuito resultante al retirar el potenciómetro en el circuito de la figura 7.2.....	85

Figura 7.4.	Circuito para calcular la resistencia equivalente entre los puntos a y b (resistencia Thévenin).	86
Figura 7.5.	Circuito equivalente para evaluar la transferencia de potencia máxima.	87
Figura 7.6.	Potencia en la resistencia de carga R_L (potenciómetro) al simular los circuitos de las figuras 7.2 y 7.5	87
Figura 7.7.	Circuito para analizar la transferencia de potencia máxima.....	88
Figura 8.1.	Símbolo de un amplificador operacional	91
Figura 8.2.	Diagrama (en bloques) de la estructura de un amplificador operacional	92
Figura 8.3.	Equivalente híbrido del amplificador operacional	93
Figura 8.4.	Amplificador inversor, simulado	94
Figura 8.5.	Respuesta en frecuencia del circuito del amplificador inversor, figura 8.4	94
Figura 8.6.	Diagrama esquemático amplificador operacional LM741	95
Figura 8.7.	Estructura interna del AO LM741, indicando los bloques funcionales.....	96
Figura 8.8.	Disposición de dos fuentes de voltaje independientes, para polarizar el AO.....	97
Figura 8.9.	Circuito de polarización del AO, utilizando una fuente de voltaje	97
Figura 8.10.	Circuito de polarización del AO. (a) Utilizando una fuente de voltaje y un potenciómetro. (b). Utilizando dos diodos Zener, para garantizar que los voltajes de polarización sean iguales.	97
Figura 8.11.	Circuito amplificador en configuración inversor	98
Figura 8.12.	Circuito amplificador en configuración no inversor	99
Figura 8.13.	Circuito seguidor de voltaje	100
Figura 8.14.	Circuito amplificador sumador	101
Figura 8.15.	Circuito amplificador diferencial.....	102
Figura 8.16.	Diagrama en bloques del circuito con amplificador operacional para implementar la ecuación algebraica 8.31.	104
Figura 8.17.	Circuito inversor para lograr el término de la ecuación 8.31.....	105
Figura 8.18.	Circuito sumador no inversor para implementar la ecuación 8.31	106
Figura 8.19.	Circuito con amplificador operacional, que implementa la ecuación 8.30.....	107
Figura 8.20.	Circuito amplificador inversor	108
Figura 8.21.	Circuito amplificador no inversor	109
Figura 8.22.	Circuito seguidor de voltaje	109
Figura 8.23.	Circuito amplificador sumador	110
Figura 8.24.	Circuito amplificador diferencial básico.....	110
Figura 8.25.	Función lineal a implementar mediante un circuito con amplificadores operacionales	111

Presentación

El análisis y diseño de circuitos eléctricos es una competencia indispensable tanto en la formación como en el desempeño de los profesionales en ingeniería eléctrica y electrónica. Para el avance tecnológico de la sociedad, los ingenieros deben estar calificados en el diseño y desarrollo de equipos y sistemas eléctricos; por tanto, es fundamental que adquieran habilidades y conocimientos adecuados en dicha competencia. Además, los circuitos eléctricos son importantes en otras disciplinas que han surgido de la ingeniería eléctrica, como las telecomunicaciones, mecatrónica, robótica, ingeniería de sistemas y computación, instrumentación, electromecánica, automatización y control, entre otras.

En los últimos años, la formación de ingenieros electrónicos y eléctricos tiende al desarrollo de dos cursos de análisis y diseño de circuitos eléctricos lineales: el primero se dedica a estudiar las técnicas de análisis de circuitos que emplean una señal continua, es decir, una señal que no varía en el tiempo, ampliamente conocida como corriente directa (DC); el segundo privilegia el análisis de circuitos con señales que varían en el tiempo, o señales alternas (AC), en los cuales están involucrados elementos pasivos capaces de almacenar energía, como lo son el condensador (capacitancia) y la bobina (inductancia). Este trabajo pretende aportar en el análisis de circuitos de corriente directa.

En consecuencia, las prácticas de laboratorio presentadas buscan apoyar al estudiante para que aplique los conceptos y desarrolle habilidades en el análisis y diseño de circuitos eléctricos de DC. Para esto, la estructura del texto se ha adaptado para las personas que van a abordar el estudio de los circuitos eléctricos por primera vez.

El libro inicia con el estudio de las variables y elementos que conforman un circuito eléctrico, para luego asumir el análisis básico de circuitos resistivos, en donde el estudiante debe reconocer que el comportamiento de estos puede ser descrito mediante ecuaciones algebraicas y leyes físicas; se sigue con el estudio y dominio de los principales métodos y técnicas para su análisis y diseño.

Cada uno de los circuitos propuestos han sido analizados mediante el cálculo de sus diferentes parámetros y variables, simulados e implementados en el laboratorio en varias oportunidades, utilizando diferentes niveles en las fuentes de alimentación, al igual que en los elementos usados. Para la simulación se ha utilizado el *software* especializado Multisim, de National Instrument¹, el cual, en sus últimas versiones, ha mejorado varios aspectos y procedimientos, convirtiéndose en una poderosa herramienta para el diseño, simulación y análisis de circuitos eléctricos y electrónicos.

¹ www.ni.com, edición académica.

Este texto es el resultado del trabajo conjunto durante varios semestres con mis estudiantes del programa de Ingeniería Electrónica, de la Universidad de los Llanos, en desarrollo de los cursos de Fundamentos de Circuitos y Circuitos Eléctricos. Para todos ellos y para quienes de una u otra forma han colaborado en la estructuración de esta experiencia académica y técnica, mis agradecimientos.

Javier Ricardo

