



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**EXPERIMENTOS DEMOSTRATIVOS UTILIZANDO  
DISPOSITIVOS DE TECNOLOGÍA ELECTRÓNICA**

**María Fernanda Aldana Pinto**

Asesorado por el Ing. Walter Giovanni Álvarez Marroquín

Guatemala, enero de 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EXPERIMENTOS DEMOSTRATIVOS UTILIZANDO  
DISPOSITIVOS DE TECNOLOGÍA ELECTRÓNICA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

**MARÍA FERNANDA ALDANA PINTO**

ASESORADO POR EL ING. WALTER GIOVANNI ÁLVAREZ MARROQUÍN

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERA EN ELECTRÓNICA**

GUATEMALA, ENERO DE 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Raúl Eduardo Ticún Córdova
VOCAL V	Br. Henry Fernando Duarte García
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
EXAMINADOR	Ing. Armando Alonzo Rivera Carrillo
EXAMINADOR	Ing. Julio César Solares Peñate
EXAMINADORA	Inga. Wendy Nora Miranda López
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

### **EXPERIMENTOS DEMOSTRATIVOS UTILIZANDO DISPOSITIVOS DE TECNOLOGÍA ELECTRÓNICA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 3 de agosto de 2012.

**María Fernanda Aldana Pinto**



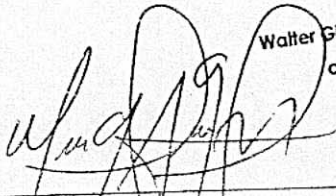
Guatemala, 9 de septiembre de 2013

Ing. Carlos Guzmán  
Coordinador Área de Electrónica  
Escuela de Mecánica Eléctrica  
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Guzmán,

Por este medio me dirijo a usted para comunicarle que he asesorado y revisado el trabajo de graduación titulado: "EXPERIMENTOS DEMOSTRATIVOS UTILIZANDO DISPOSITIVOS DE TECNOLOGÍA ELECTRÓNICA", desarrollado por la estudiante María Fernanda Aldana Pinto, quien se identifica con número de carnet **200511709**. Luego de comprobar su contenido final, considero que cumple con los requerimientos necesarios y lo apruebo como trabajo de graduación.

Agradeciendo su amable colaboración, me suscribo atentamente,

  
Walter Giovanni Alvarez Marroquin  
Ing. Electricista  
colegiado No. 8113

---

Ing. Walter Giovanni Alvarez Marroquin  
Colegiado 8113





Ref. EIME 02. 2015  
Guatemala, 12 de SEPTIEMBRE 2013.

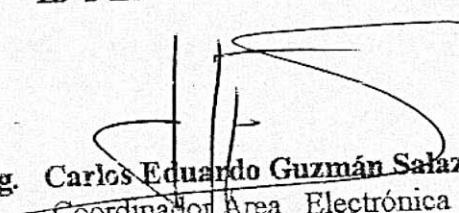
Señor Director  
Ing. Guillermo Antonio Puente Romero  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica  
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:  
**EXPERIMENTOS DEMOSTRATIVOS UTILIZANDO**  
**DISPOSITIVOS DE TECNOLOGÍA ELECTRÓNICA,** de la  
estudiante, **María Fernanda Aldana Pinto,** que cumple con los  
requisitos establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,  
D Y ENSEÑAD A TODOS

  
Ing. Carlos Eduardo Guzmán Salazar  
Coordinador Área Electrónica



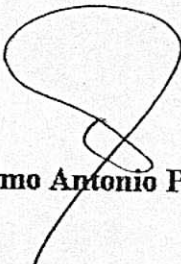
SFO





REF. EIME 02. 2015.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; **MARÍA FERNANDA ALDANA PINTO** titulado: **EXPERIMENTOS DEMOSTRATIVOS UTILIZANDO DISPOSITIVOS DE TECNOLOGÍA ELECTRÓNICA**, procede a la autorización del mismo.

  
Ing. Guillermo Antonio Puente Romero



GUATEMALA, 21 DE ENERO 2015.

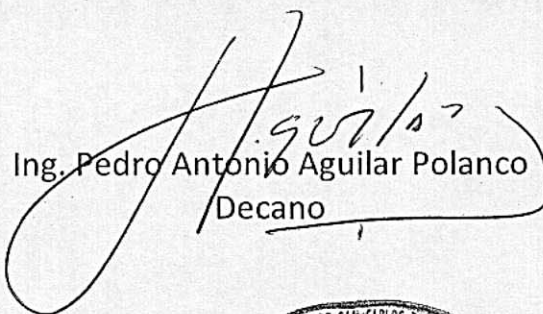




DTG. 046.2016

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **EXPERIMENTOS DEMOSTRATIVOS UTILIZANDO DISPOSITIVOS DE TECNOLOGÍA ELECTRÓNICA**, presentado por la estudiante universitaria: **María Fernanda Aldana Pinto**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

  
Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco  
Decano

Guatemala, enero de 2016

/gdech



**ACTO QUE DEDICO A:**

**Mi familia y amigos**

## **AGRADECIMIENTOS A:**

**Los ingenieros Walter  
Álvarez y Carlos  
Guzmán**

Por su asesoría en este trabajo de graduación.

**Departamento de Física  
de la Facultad de  
Ingeniería**

Especialmente a los señores Mario Guillermo Bracamonte Cordón, Fredy Estuardo Gonzales y Gonzales, Joel Reyes Bonilla, a mi amigo Julio Abac y a la señorita Isabel Vicente de la Cruz.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	IX
LISTA DE SÍMBOLOS .....	XXIII
GLOSARIO .....	XXVII
RESUMEN.....	XXIX
OBJETIVOS.....	XXXI
INTRODUCCIÓN.....	XXXIII
1. ANÁLISIS DEL RESULTADO DE LA MEDICIÓN Y SU INCERTIDUMBRE .....	1
1.1. Análisis de error.....	1
1.1.1. Tipos de errores experimentales .....	1
1.1.1.1. Errores sistemáticos .....	2
1.1.1.2. Errores aleatorios .....	2
1.1.2. Diferencia entre errores sistemáticos y aleatorios .....	2
1.1.3. Análisis estadístico de errores aleatorios .....	3
1.1.3.1. Distribución de Gauss.....	5
1.1.4. Propagación de errores .....	6
1.2. Cifras significativas.....	8
1.2.1. Precisión de la desviación estándar .....	8
1.3. Análisis gráfico .....	11
1.3.1. Ajuste de curvas .....	12
1.4. Discrepancia.....	13
1.5. Identificación de variables en experimentación .....	14

1.5.1.	La variable independiente .....	15
1.5.2.	La variable dependiente .....	15
2.	CIRCUITOS RESISTIVOS DE CORRIENTE DIRECTA .....	17
2.1.	Ley de Ohm.....	17
2.2.	Leyes de Kirchhoff.....	21
2.2.1.	Ley de corrientes de Kirchhoff.....	22
2.2.2.	Ley de voltajes de Kirchhoff .....	24
2.3.	Resistores en serie y en paralelo .....	25
2.3.1.	Resistores en serie.....	25
2.3.2.	Resistores en paralelo.....	27
2.4.	Divisor de voltaje .....	30
2.5.	Divisor de corriente .....	33
2.6.	Circuito equivalente de Thévenin .....	35
2.6.1.	Medida de la resistencia equivalente de Thévenin.....	36
2.6.2.	Medida de la resistencia equivalente de Thévenin al variar la corriente .....	38
2.6.3.	Medidas del voltaje equivalente de Thévenin al variar la resistencia de carga .....	40
2.7.	Circuito equivalente de Norton .....	40
2.8.	Equipo y materiales para circuitos resistivos de corriente directa .....	43
3.	SEÑALES EN CIRCUITOS DE CORRIENTE ALTERNA .....	45
3.1.	El osciloscopio .....	45
3.1.1.	Qué hace un osciloscopio .....	45
3.1.2.	Ajuste del osciloscopio .....	46



3.1.3.	Conectando el generador de señales .....	52
3.2.	Onda sinusoidal.....	54
3.2.1.	Valor eficaz y RMS .....	55
3.3.	Onda cuadrada.....	58
3.4.	Onda triangular.....	59
3.4.1.	Rampa .....	59
3.5.	Equipo y materiales para señales de C.A.....	60
4.	CAPACITORES E INDUCTORES.....	61
4.1.	Capacitores .....	61
4.1.1.	Capacitores en serie.....	61
4.1.2.	Capacitores en paralelo.....	64
4.2.	Inductores.....	65
4.2.1.	Inductores en serie .....	66
4.2.2.	Inductores en paralelo .....	67
4.3.	Medida experimental de la capacitancia.....	69
4.4.	Medida experimental de la inductancia .....	77
4.5.	Transformadores .....	82
4.6.	Equipo y materiales para capacitores e inductores .....	86
5.	CIRCUITOS DE CORRIENTE ALTERNA .....	89
5.1.	Forma de onda de pulso.....	89
5.2.	Circuito RC .....	91
5.3.	Circuito RL.....	96
5.4.	Circuito RLC .....	98
5.4.1.	Impedancia y reactancia.....	98
5.4.2.	Factor de calidad .....	99
5.4.3.	Respuesta de un circuito RLC a una onda cuadrada.....	99

5.5.	Circuito resonante .....	102
5.5.1.	Selectividad .....	102
5.5.2.	Medida indirecta de la inductancia, utilizando un circuito resonante .....	105
5.6.	Equipo y materiales para circuitos de C.A.....	107
6.	DIODOS.....	109
6.1.	Rectificador de propósito general.....	110
6.2.	Diodo Zener .....	112
6.3.	Diodo emisor de luz (led) .....	115
6.4.	Diodo Infrarrojo (IR).....	116
6.4.1.	Fotodiodo .....	117
6.4.2.	Comparación entre la intensidad radiante de un diodo emisor de luz infrarroja y la detectada por un fotodiodo infrarrojo. ....	117
6.5.	Diodo Láser (LD).....	120
6.6.	Circuitos con diodos.....	120
6.6.1.	Rectificador de media onda.....	123
6.6.2.	Rectificador de onda completa .....	125
6.6.3.	Regulador de diodo Zener.....	126
6.7.	Equipo y materiales para diodos .....	129
7.	TRANSISTORES .....	131
7.1.	Transistores de unión bipolar (BJT) .....	131
7.1.1.	Regiones del transistor y punto de operación.....	133
7.1.2.	Nivel de potencia máximo de disipación y recta de carga.....	134

7.1.3.	Circuito de polarización fija .....	135
7.2.	Transistores de efecto de campo (FET) .....	138
7.3.	Circuitos con transistores .....	142
7.3.1.	Configuración de base común .....	142
7.3.2.	Configuración de colector común .....	144
7.3.3.	Configuración de emisor común .....	145
7.4.	Equipo y materiales para transistores .....	147
8.	AMPLIFICADORES.....	149
8.1.	Amplificador de pequeña señal .....	149
8.2.	Amplificadores de potencia.....	160
8.3.	Amplificadores operacionales.....	164
8.3.1.	Concepto de amplificador diferencial y operacional .....	165
8.3.2.	Amplificador inversor .....	167
8.3.3.	Amplificador no inversor .....	171
8.3.4.	Seguidor .....	173
8.4.	Acoplamiento de impedancias.....	175
8.4.1.	Teorema de máxima transferencia de potencia .....	175
8.5.	Equipo y materiales para amplificadores .....	179
9.	FILTROS .....	181
9.1.	Filtros pasivos.....	181
9.1.1.	Pasa altas.....	182
9.1.2.	Pasa bajas .....	185
9.1.3.	Pasa banda.....	187
9.1.4.	Rechaza banda.....	190
9.2.	Filtros activos.....	193

9.2.1.	Filtros con amplificadores operacionales .....	195
9.2.1.1.	Filtros Butterworth, Chebyshev y Bessel .....	195
9.2.1.1.1.	Circuitos VCVS .....	197
9.3.	Equipo y materiales para filtros .....	200
10.	OSCILADORES .....	201
10.1.	Osciladores LC .....	202
10.1.1.	Osciladores Colpitts y Hartley .....	202
10.2.	Osciladores con amplificadores operacionales .....	210
10.2.1.	Oscilador de relajación .....	210
10.3.	Osciladores con circuitos integrados .....	212
10.3.1.	CI 555 como oscilador .....	212
10.3.2.	Oscilador controlado por voltaje (VCO) .....	214
10.4.	Equipo y materiales para osciladores .....	216
11.	ELECTRÓNICA DIGITAL .....	219
11.1.	Códigos numéricos .....	220
11.2.	Circuitos integrados digitales .....	221
11.3.	Compuertas lógicas .....	222
11.3.1.	Compuerta <i>OR</i> : .....	225
11.3.2.	Compuerta <i>AND</i> : .....	226
11.3.3.	<i>NAND</i> y <i>NOR</i> .....	226
11.3.4.	<i>OR</i> exclusiva .....	227
11.3.5.	Inversor ( <i>NOT</i> ) .....	233
11.4.	Lógica combinacional .....	234
11.4.1.	Decodificador .....	235
11.4.2.	Multiplexor .....	240

11.5.	Lógica secuencial .....	245
11.5.1.	<i>Flip-flop</i> D .....	246
11.5.2.	<i>Flip-flop</i> JK.....	250
11.5.3.	<i>Flip-flop</i> T.....	254
11.6.	Registros y contadores .....	257
11.7.	Diseño de un detector de secuencia .....	261
11.8.	Equipo y materiales para electrónica digital .....	276
CONCLUSIONES .....		279
RECOMENDACIONES .....		281
BIBLIOGRAFÍA.....		283



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Set de medidas .....	3
2.	Valores medidos que están distribuidos respecto del valor medio $\bar{x}$ .....	4
3.	Conjuntos de medidas de la misma cantidad física. ....	6
4.	La distribución de Gauss para el mismo $x$ y diferentes valores de $\sigma$ .....	7
5.	Gráfica de corriente contra voltaje para la ley de Ohm .....	13
6.	Dos medidas de la misma resistencia .....	14
7.	Resistor y potenciómetro conectados a una fuente de voltaje .....	19
8.	Fuente de voltaje directo, voltímetro y amperímetro .....	20
9.	Gráfica de corriente contra voltaje .....	20
10.	Discrepancia de la medida de las resistencias.....	21
11.	Ley de corrientes Kirchhoff.....	22
12.	Medición de las corrientes que entran y salen del nodo.....	23
13.	Discrepancia de las medidas de corriente.....	23
14.	Ley de voltajes Kirchhoff .....	24
15.	Discrepancia de las medidas de voltaje .....	25
16.	Circuito serie .....	26
17.	Medición de resistencias .....	26
18.	Discrepancia de la medida de la resistencia en el circuito serie.....	27
19.	Circuito paralelo .....	28
20.	Medición de resistencias .....	28

21.	Discrepancia de la medida de la resistencia en el circuito paralelo .....	29
22.	Divisor de voltaje.....	31
23.	Medición del voltaje en la salida del divisor de voltaje .....	32
24.	Discrepancia de las medidas de voltaje en el divisor de voltaje.....	33
25.	Divisor de corriente .....	34
26.	Discrepancia de las medidas de corriente en el divisor de corriente .....	35
27.	Circuito equivalente de Thévenin.....	36
28.	Resistencia de Thévenin.....	37
29.	Corriente de Thévenin .....	37
30.	Discrepancia de las medidas directa e indirecta de la resistencia de Thévenin .....	38
31.	Discrepancia de las medidas de la resistencia de Thévenin cuando la resistencia de carga es menor .....	39
32.	Circuito equivalente de Norton.....	41
33.	Discrepancia de la corriente par diferentes resistencias de carga.....	42
34.	El osciloscopio .....	45
35.	Divisiones en la pantalla de un osciloscopio.....	46
36.	Posición adecuada de los controles del osciloscopio antes de medir una señal .....	47
37.	Posición de los controles de voltios por división y tiempo por división.....	47
38.	Punto brillante a través de la pantalla en instantes de tiempo aleatorio .....	48
39.	Control de posición vertical.....	48
40.	Controles de intensidad, <i>focus</i> y posición horizontal .....	49



41.	Control de tiempo por división a 0.2 s/div.....	49
42.	Pantalla del osciloscopio cuando el control de tiempo por división está colocado a 0.2 s/div .....	50
43.	Control de voltios por división a 1volt/div .....	50
44.	Entrada del osciloscopio y <i>BNC socket</i> .....	51
45.	Punta de osciloscopio .....	51
46.	Conexión de la punta de osciloscopio a la calibración .....	51
47.	Salida del generador de señal.....	52
48.	Generador de señal.....	52
49.	Conexión con el osciloscopio .....	53
50.	Ajuste de la frecuencia .....	53
51.	Ajuste de nivel del generador.....	54
52.	Elección de la forma de la señal .....	56
53.	Elección de la frecuencia y rango .....	57
54.	Señal obtenida .....	57
55.	Onda cuadrada .....	58
56.	Señal obtenida para una onda cuadrada .....	59
57.	Diente de sierra.....	60
58.	Capacitores en serie .....	62
59.	Discrepancia de las capacitancia con circuito serie .....	63
60.	Capacitores en paralelo .....	64
61.	Discrepancia de las capacitancias con circuito paralelo.....	65
62.	Inductores en serie.....	66
63.	Discrepancia de las inductancias en circuito serie .....	67
64.	Inductores en paralelo.....	68
65.	Discrepancia de las inductancias en circuito paralelo .....	68
66.	Red básica de carga .....	69
67.	$v_c$ durante la fase de carga.....	70
68.	$i_c$ durante la fase de carga.....	70

69.	Equivalente de circuito abierto para un capacitor .....	71
70.	Equivalente de cortocircuito para un capacitor .....	71
71.	$v_c$ durante la fase de carga .....	72
72.	$v_c(t)$ para los ciclos de carga y descarga .....	72
73.	Red básica de carga con capacitor de 1 $\mu\text{F}$ .....	73
74.	Comparación de señales de entrada y salida en la red básica de carga.....	74
75.	Red básica de carga con 100 $\mu\text{F}$ .....	75
76.	$v_c$ en función del tiempo.....	75
77.	Discrepancia de la medida de la capacitancia .....	76
78.	Red básica RL .....	77
79.	El inductor en el instante en que se cierra el interruptor .....	78
80.	El inductor en estado estable.....	78
81.	$i_L$ en función del tiempo .....	79
82.	$v_L$ en función del tiempo .....	79
83.	Red básica de carga con $L= 1\text{H}$ .....	80
84.	$i_L$ en función del tiempo .....	81
85.	Discrepancia de la medida de la inductancia .....	82
86.	Transformador .....	83
87.	Medición del voltaje de entrada y salida de un transformador .....	85
88.	Medida de los voltajes de entrada y salida con el sciloscopio .....	86
89.	Forma de onda de pulso ideal .....	89
90.	Forma de onda de pulso real .....	90
91.	Definición de $t_r$ y $t_f$ .....	90
92.	Tren de pulsos .....	91
93.	Trenes de pulsos periódicos .....	91
94.	Onda cuadrada periódica.....	92
95.	$v_c$ para $T/2 = 5\tau$ .....	92
96.	$v_c$ para $T/2 > 5\tau$ .....	93

97.	$v_c$ para $T/2 < 5\tau$ .....	93
98.	Aplicación de una onda cuadrada a la red RC .....	94
99.	Respuesta de una red RC a una onda cuadrada .....	94
100.	Respuesta de la red RC para $T < 10\tau$ .....	95
101.	Respuesta de la red RC para $T > 10\tau$ .....	95
102.	Red RL .....	96
103.	Respuesta de la red RL para $T = 10\tau$ .....	96
104.	Respuesta de la red RL para $T < 10\tau$ .....	97
105.	Respuesta de la red RL para $T > 10\tau$ .....	97
106.	Formas de oscilaciones amortiguadas .....	100
107.	Circuito RLC .....	100
108.	Amortiguamiento débil .....	101
109.	Amortiguamiento fuerte .....	101
110.	Amortiguamiento crítico .....	102
111.	$i$ en función de la frecuencia para un circuito resonante .....	103
112.	Circuito RLC paralelo .....	103
113.	Voltaje contra frecuencia en un circuito RLC paralelo .....	104
114.	Circuito RL paralelo .....	105
115.	Voltaje en el inductor contra frecuencia .....	106
116.	Discrepancia de las medidas de inductancia con frecuencia de resonancia .....	107
117.	Diodos .....	109
118.	Curva V-I del diodo .....	110
119.	Aproximación de la curva característica .....	110
120.	Diodo rectificador .....	111
121.	Curva de corriente contra voltaje de un diodo de silicio .....	112
122.	Regulador simple de diodo Zener .....	113
123.	Circuito regulador con diodo Zener .....	113
124.	Características del diodo Zener bajo prueba .....	114

125.	Circuito con diodo emisor de luz .....	115
126.	Respuesta del circuito con diodo emisor de luz .....	115
127.	Circuito con diodo emisor de luz infrarroja .....	116
128.	Respuesta del circuito con diodo emisor de luz infrarroja .....	117
129.	Diodo emisor de luz infrarroja y fotodiodo infrarrojo .....	118
130.	Alineación de emisor y receptor infrarrojo .....	118
131.	Curva de voltaje contra corriente del diodo láser .....	120
132.	Diodos fijadores de nivel .....	121
133.	Salidas respectivas de los circuitos fijadores de voltaje .....	122
134.	Diodo delimitador .....	122
135.	Salida de un diodo delimitador .....	123
136.	Circuito rectificador de media onda .....	123
137.	Salida de un circuito rectificador de media onda .....	124
138.	Comparación de la señal de entrada con la salida de un circuito rectificador de media onda .....	124
139.	Circuito rectificador de onda completa .....	125
140.	Salida de un circuito rectificador onda completa .....	125
141.	Regulador de Zener com elemento de circuito compuesto .....	126
142.	Solución gráfica del circuito regulador de Zener .....	127
143.	Circuito regulador de Zener .....	127
144.	Curva característica con elemento resistivo .....	128
145.	Intersección de la curva característica del Zener y la recta generador .....	129
146.	Símbolo del transistor .....	132
147.	Las terminales de un transistor según el ohmímetro .....	132
148.	Características de salida de un transistor .....	134
149.	Circuito de polarización fija .....	136
150.	Transistor polarizado .....	137

151.	Comprobación de la polarización directa del transistor base-emisor..	137
152.	Características de salida del transistor con polarización fija	138
153.	Simbología del transistor de efecto de campo de canal n	139
154.	Circuito con FET	139
155.	Características generales de un FET	140
156.	Circuito FET con la compuerta conectada a tierra	141
157.	Corriente de drenaje contra voltaje de drenaje-fuente	141
158.	Circuito con transistor BJT de base común	142
159.	Discrepancia de medidas para la configuración base común	143
160.	Circuito con transistor BJT de colector común	144
161.	Discrepancia de medidas para la configuración colector común..	145
162.	Circuito con transistor BJT de emisor común	146
163.	Discrepancia de medidas para la configuración emisor común..	147
164.	Configuración de polarización por divisor de voltaje	149
165.	Recta de carga	151
166.	Recta de carga y potencia máxima para el transistor 2N2222A	152
167.	Recta de carga para el transistor 2N2222A	153
168.	Circuito de polarización por divisor de voltaje utilizando los valores de resistencias encontrados	154
169.	Circuito con condensador de acoplo	155
170.	Circuito equivalente para corriente alterna	156
171.	Circuito para el cálculo de la capacitancia de acoplo	157
172.	Circuito completo de amplificador con transistor	159
173.	Señales de entrada y salida del amplificador	159
174.	Amplificador de potencia de clase A para medio ciclo	160

175.	Recta de carga para el circuito amplificador de potencia.....	161
176.	Amplificador de potencia clase A .....	162
177.	Amplificador de potencia clase B .....	162
178.	Circuito de amplificador de potencia clase B .....	163
179.	Circuito amplificador clase B.....	164
180.	Amplificador diferencial clásico con transistores.....	166
181.	Símbolo del amplificador operacional .....	166
182.	Amplificador inversor .....	167
183.	Amplificador inversor con LF356N .....	168
184.	Diagrama de conexión LF356N .....	169
185.	Fuente simétrica .....	169
186.	Comparación de los voltajes de entrada y salida del amplificador inversor (a) $R_2 = 1\text{ K}\Omega$ (b) $R_2 = 3.3\text{ K}\Omega$ .....	170
187.	Amplificador no inversor .....	171
188.	Amplificador no inversor con LF356N.....	172
189.	Comparación de los voltajes de entrada y salida del amplificador no inversor (a) $R_2 = 1\text{ K}\Omega$ (b) $R_2 = 2.1\text{ K}\Omega$ .....	173
190.	Seguidor .....	174
191.	Amplificador no inversor con LF356N.....	174
192.	Comparación de los voltajes de entrada y salida del seguidor .....	175
193.	Circuito equivalente de Thévenin para las condiciones de máxima transferencia de potencia .....	176
194.	Circuito equivalente para máxima transferencia de potencia.....	178
195.	Potencia en la carga contra la resistencia de carga.....	178
196.	Comparación de resistencia de entrada y salida .....	179
197.	Divisor de voltaje con capacitor y resistor (filtro pasa altas) .....	182
198.	Respuesta en frecuencia de filtros pasa altas .....	183
199.	Filtro pasa altas con $f_{3dB} = 1.6\text{ KHz}$ .....	184
200.	Ganancia contra frecuencia del filtro pasa altas .....	184

201.	Filtro pasa bajas .....	185
202.	Respuesta en frecuencia de filtros pasa bajos .....	185
203.	Filtro pasa altas con $f_{3dB} = 16$ KHz .....	186
204.	Ganancia contra frecuencia del filtro pasa altas.....	187
205.	Filtro pasa banda con $f_{3dB} = 1.6$ KHz, 16 KHz .....	188
206.	Ganancia contra frecuencia del filtro pasa banda .....	188
207.	Circuito resonante RC: filtro pasa banda.....	189
208.	Respuesta en frecuencia del filtro pasa banda .....	189
209.	Filtro LC rechaza banda .....	191
210.	Respuesta en frecuencia del filtro LC rechaza banda .....	191
211.	Filtro rechaza banda con $\Delta_{3dB} = 400$ Hz .....	192
212.	Ganancia contra frecuencia del filtro rechaza banda .....	192
213.	Convertidor a impedancia negativa .....	193
214.	Filtro Sallen-and-Key .....	194
215.	Comparación de la respuesta en amplitud de varios filtros. ....	196
216.	Comparación de la respuesta en fase de un filtro Butterworth y un filtro Bessel .....	196
217.	Circuito VCVS .....	197
218.	Filtro Butterworth pasa bajas de dos polos .....	199
219.	Respuesta en frecuencia del filtro Butterworth pasa bajas.....	199
220.	Circuito tanque LC.....	201
221.	Oscilador Colpitts .....	202
222.	Oscilador Colpitts (circuito equivalente en corriente alterna) .....	203
223.	Oscilador Hartley.....	205
224.	Diagrama de oscilador Colpitts experimental .....	205
225.	Oscilador Colpitts experimental.....	206
226.	Partes del oscilador Colpitts experimental .....	207
227.	Respuesta en el tiempo del oscilador Colpitts experimental, con forma de onda en la entrada (a) sinusoidal (b) cuadrada .....	208

228.	Conexión del oscilador Colpitts para corregir el Efecto Miller .....	209
229.	Respuesta del oscilador Colpitts con la retroalimentación conectada a emisor.....	209
230.	Oscilador de relajación .....	210
231.	Oscilador de relajación experimental .....	211
232.	Respuesta en el tiempo del oscilador de relajación experimental .....	211
233.	CI 555 conectado como oscilador.....	212
234.	CI 555 como oscilador experimental.....	213
235.	Salida del circuito integrado 555 como oscilador .....	214
236.	74s124.....	215
237.	Conexión del 74s124 .....	215
238.	Salida del VCO 74s124.....	216
239.	Comparación de circuitos análogos y digitales .....	219
240.	Funciones lógicas fundamentales.....	222
241.	Decodificador integrado .....	223
242.	Compuertas universales .....	224
243.	Teorema de DeMorgan.....	224
244.	AND trabajando como OR-bajo. ....	225
245.	Compuerta OR.....	225
246.	Compuerta AND.....	226
247.	NAND y OR .....	226
248.	OR exclusiva.....	227
249.	Circuito para compuertas lógicas.....	228
250.	Diagrama de configuración de Pines .....	229
251.	Comportamiento de la compuerta lógica OR .....	230
252.	Comportamiento de la compuerta lógica NAND .....	231
253.	Comportamiento de la compuerta lógica XOR.....	232
254.	NOT.....	233



255.	Inversor .....	233
256.	Comportamiento del inversor .....	234
257.	Diagrama de decodificador de 2 X 4 .....	236
258.	Decodificador con compuertas AND .....	237
259.	Comportamiento del decodificador de 2 X 4 entradas 00 y 01 .....	238
260.	Comportamiento del decodificador de 2 X 4 entradas 10 y 11 .....	239
261.	AND como circuito PASS/BLOCK.....	240
262.	Multiplexor de 4 a 1 .....	241
263.	Multiplexor D <sub>0</sub> ALTA .....	242
264.	Multiplexor D <sub>1</sub> ALTA .....	243
265.	Multiplexor D <sub>2</sub> ALTA .....	244
266.	Multiplexor D <sub>3</sub> ALTA .....	245
267.	<i>Flip-flop</i> tipo <i>set-reset</i> .....	246
268.	<i>Flip-flop</i> tipo D .....	247
269.	74LS74.....	247
270.	Comportamiento del <i>flip-flop</i> tipo D .....	248
271.	RESET .....	249
272.	SET .....	250
273.	<i>Flip-flop</i> JK .....	251
274.	Comportamiento del <i>flip-flop</i> tipo JK (a) .....	252
275.	Comportamiento del <i>flip-flop</i> tipo JK (b) .....	253
276.	Comportamiento del <i>flip-flop</i> tipo JK (c) .....	254
277.	74LS73.....	254
278.	<i>Flip-flop</i> T .....	255
279.	Comportamiento del <i>flip-flop</i> tipo T .....	256
280.	Registro de desplazamiento.....	257
281.	Comportamiento del registro de desplazamiento .....	258
282.	Contador asíncrono.....	259
283.	Contador síncrono.....	260

284.	Comportamiento del contador síncrono .....	260
285.	Diagrama de estados.....	261
286.	Salida del detector .....	265
287.	Entradas de los <i>flip-flops</i> .....	266
288.	Detector de secuencia 10101010 .....	267
289.	Circuito detector.....	268
290.	Circuito detector en el estado 0001 010 X= 0 .....	269
291.	Circuito detector en el estado 1010 110 X = 0 .....	270
292.	Circuito detector en el estado 0011 001 X = 0 .....	271
293.	Circuito detecto.r en el estado 1100 101 X = 0 .....	272
294.	Circuito detector en el estado 0101 011 X = 0 .....	273
295.	Circuito detector en el estado 1110 111 X=0 .....	274
296.	Circuito detector en el estado 0111 X=1 .....	275

## TABLAS

I.	Comparación de resistencias.....	21
II.	Comparación de corrientes.....	23
III.	Comparación de voltajes .....	25
IV.	Comparación de resistencias del circuito serie.....	27
V.	Comparación de resistencias del circuito paralelo .....	29
VI.	Comparación de voltajes en el divisor de voltaje .....	32
VII.	Comparación de corrientes en el divisor de corriente .....	34
VIII.	Comparación de resistencias de Thévenin .....	38
IX.	Comparación de resistencias de Thévenin cuando la resistencia de carga es menor... ..	39
X.	Comparación de voltajes de Thévenin.....	40
XI.	Comparación de corrientes de Norton .....	42
XII.	Equipo y materiales para circuitos en D.C .....	43

XIII.	Equipo y materiales para señales en C.A .....	60
XIV.	Capacitancia equivalente en serie .....	63
XV.	Capacitancia equivalente en paralelo.....	65
XVI.	Inductancia equivalente en serie .....	67
XVII.	Inductancia equivalente en paralelo .....	69
XVIII.	Comparación de la medida de la capacitancia .....	76
XIX.	Comparación de la medida de la capacitancia .....	81
XX.	Equipo y materiales para capacitores e inductores .....	87
XXI.	Frecuencias y ancho de banda .....	104
XXII.	Medidas directa e indirecta de inductancia con frecuencia de resonancia.....	106
XXIII.	Equipo y materiales para capacitores e inductores .....	107
XXIV.	Características del diodo Zener .....	114
XXV.	Características del diodo emisor de luz rojo.....	116
XXVI.	Equipo y materiales para diodos .....	129
XXVII.	Hoja de datos del FET MPF102 .....	140
XXVIII.	Comparación de corriente de emisor y voltaje colector-base para la configuración emisor común.....	143
XXIX.	Comparación de corriente de base para la configuración colector común.....	145
XXX.	Comparación de corriente de colector y voltaje colector-emisor para la configuración emisor común.....	146
XXXI.	Equipo y materiales para transistores .....	147
XXXII.	Equipo y materiales para amplificadores.....	179
XXXIII.	Filtros VCVS pasa-bajos .....	198
XXXIV.	Equipo y materiales para filtros .....	200
XXXV.	Equipo y materiales osciladores.....	216
XXXVI.	Enteros de 4-bits en tres sistemas de representación.....	221
XXXVII.	Identidades lógicas.....	235

XXXVIII.	Entradas y salidas del decodificador de 2 X 4. ....	236
XXXIX.	Tabla de verdad del <i>flip-flop</i> tipo D .....	247
XL.	Tabla de verdad del <i>flip-flop</i> JK .....	251
XLI.	Tabla de verdad del <i>flip-flop</i> tipo T .....	255
XLII.	Estados .....	262
XLIII.	Números decimales y su equivalente binario.....	263
XLIV.	Transición de estados.....	263
XLV.	Transición de estados para cada flip-flop .....	264
XLVI.	Tabla de entrada y salida de cada flip-flop .....	264
XLVII.	Entradas y salidas para 10101010.....	267
XLVIII.	Equipo y materiales para electrónica digital.....	276

## LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
<b>BW</b>	Ancho de banda
<b>CC</b>	Cambio de reloj
<i>C</i>	Capacitancia
$(-)Q$	Carga
<i>k</i>	Coeficiente de acoplamiento
$\tau$	Constante de tiempo del capacitor
<i>I, i</i>	Corriente
<b>AC</b>	Corriente alterna
<b>DC</b>	Corriente directa
<i>em</i>	Dato empírico
<i>me</i>	Dato medido
<b>led</b>	Diodo emisor de luz
<b>DIPS</b>	DIP <i>switch</i>
<b>Q</b>	Factor de selectividad
$\phi_m$	Flujo magnético
$\phi_p$	Flujo neto en el primario
<i>f</i>	Frecuencia
<b>A</b>	Ganancia
$h_{FE}, \beta$	Ganancia de corriente del BJT
<i>HZ</i>	Hertz
<b>Z</b>	Impedancia
<b>L</b>	Inductancia
$\Omega$	Ohmios

<b>(V,I)</b>	Par voltaje-corriente
<i>NO</i>	Parámetros de Norton
<i>TH</i>	Parámetros de Thévenin
<b>T</b>	Período
<b>P</b>	Potencia
<i>eq</i>	Valor equivalente
<i>eqm</i>	Valor equivalente medido
<i>B</i>	Valores de base del BJT
<i>C</i>	Valores de colector del BJT
<i>CE</i>	Valores de colector-emisor del BJT
<i>E</i>	Valores de emisor del BJT
<i>Z</i>	Valores medidos del diodo zener
<i>Led</i>	Valores medidos del LED
<b>V, v</b>	Voltaje
<i>V<sub>GG</sub></i>	Voltaje de compuerta del FET
<i>V<sub>DD</sub></i>	Voltaje de drenaje del FET
<i>e<sub>p</sub></i>	Voltaje inducido en el primario
<i>e<sub>s</sub></i>	Voltaje inducido en el secundario
<i>N<sub>p</sub></i>	Número de vueltas del primario
<i>N<sub>s</sub></i>	Número de vueltas en el secundario
<b>X</b>	Reactancia
<b>R</b>	Resistencia
<i>R<sub>D</sub></i>	Resistencia del diodo
<i>t<sub>f</sub></i>	Tiempo de bajada
<i>t<sub>carga</sub></i>	Tiempo de carga
<i>t<sub>r</sub></i>	Tiempo de subida
<i>t<sub>al</sub></i>	Tiempo de fase de almacenamiento
<b>FET</b>	Transistor de efecto de campo

<b>BJT</b>	Transistor de unión bipolar
<b>ALTA</b>	1, +5 V.
<b>BAJA</b>	0, 0 V.





## GLOSARIO

<b>Atenuar</b>	Disminuir la amplitud de una señal.
<b>Bloque de circuito</b>	Cada parte de un circuito que se puede separar y analizar sin afectar el funcionamiento de las otras partes.
<b>Canal</b>	Medio de comunicación físico por el que se transmite una señal.
<b><i>Delay</i></b>	Desfase.
<b>Intrínseco</b>	Esencial.
<b>Más positivo</b>	Que es positivo respecto de la referencia.
<b>Óhmico</b>	Relativo al ohmio, que se comporta de acuerdo con la Ley de Ohm.
<b>Período</b>	Tiempo en el que se repite una señal o proceso.
<b><i>Plug</i></b>	Enchufe.
<b><i>Push Button</i></b>	<i>Switch</i> simple.

<b>Resistividad</b>	Resistencia eléctrica específica de una determinada sustancia.
<b>Señal</b>	Variación de una corriente eléctrica u otra magnitud que se utiliza para transmitir información.
<b>Switch</b>	Mecanismo que sirve para controlar algún aspecto de una máquina o proceso.
<b>Toggle</b>	Conmutación.

## RESUMEN

El presente trabajo de graduación busca introducir al lector a algunos de los temas básicos de la electrónica, a través de experiencias documentadas que muestran de manera sencilla la construcción y medición de las variables de entrada y salida de un circuito. La electrónica es el estudio y aplicación de sistemas cuya base de funcionamiento es la conducción y control del flujo de electrones.

En el capítulo I se muestra el análisis del resultado de una medición y los errores en la medida, para luego comprobar algunas leyes y reglas necesarias en el estudio de la electrónica. En el segundo capítulo se analizan varios circuitos resistivos; de manera análoga se analizan circuitos reactivos en el capítulo cuarto.

En el tercer capítulo se generaliza el uso del osciloscopio, y un generador de señal y cómo medir diferentes tipos de señales para ver la respuesta en el tiempo a una forma de onda en la entrada de un circuito. En el capítulo quinto se analiza la respuesta en el tiempo y en frecuencia de algunos circuitos de corriente alterna.

En la sección de semiconductores se observan las curvas características de diferentes diodos y el transistor; además se muestran algunos circuitos con diodos, las regiones de funcionamiento del transistor y su polarización, para explicar después, los amplificadores de pequeña señal, potencia y operacionales.

En el capítulo noveno se muestran las gráficas de ganancia contra frecuencia de filtros pasivos y activos. En el décimo capítulo se muestra como otra aplicación del amplificador operacional, el oscilador de relajación.

Para finalizar se comprobó el funcionamiento de compuertas lógicas y *flip-flops*, se diseñaron circuitos utilizando lógica combinacional y secuencial.

Algunos de los errores de funcionamiento de los dispositivos electrónicos se deben a la mala calibración de los instrumentos de medición o a que el experimentador no mide e interpreta adecuadamente los datos obtenidos; también es importante entender que hay factores que no pueden ser corregidos y que provocan el funcionamiento no ideal de los dispositivos electrónicos.

# OBJETIVOS

## General

Realizar y documentar experimentos que expliquen los conceptos básicos de los dispositivos de tecnología electrónica utilizados en la carrera de Ingeniería Electrónica.

## Específicos

1. Presentar los fundamentos del análisis del resultado de la medición y su incertidumbre.
2. Fundamentar el análisis de circuitos resistivos de corriente directa.
3. Describir el comportamiento de las señales en circuitos de corriente alterna.
4. Presentar los fundamentos de capacitores e inductores y analizar los circuitos de corriente alterna, con diodos y transistores.
5. Dar a conocer los fundamentos de amplificadores con transistores y amplificadores operacionales.
6. Presentar los fundamentos de filtros pasivos y activos, osciladores pasivos y activos y de electrónica digital.



## INTRODUCCIÓN

El diseño de un experimento demostrativo es la secuencia ordenada de pasos que permiten un análisis objetivo, que conduzca a deducciones válidas respecto del problema establecido.

En los experimentos con circuitos electrónicos, interesan dos cantidades físicas al experimentador, el voltaje y la corriente, y cómo se relacionan entre ellas. Estas cantidades físicas se comportan de acuerdo con las leyes de Kirchhoff; además, la potencia depende del voltaje y la corriente. La potencia es muy importante en el diseño de un sistema, algunas veces se disipa en forma de calor, se convierte en trabajo mecánico, energía radiada o energía almacenada.

Los dispositivos electrónicos más simples son los resistores, obedecen a la ley de Ohm y se utilizan para regular la corriente en un circuito. Existen dispositivos que tienen características no lineales de voltaje contra corriente.

En circuitos RLC se utilizan, además de resistores, los capacitores e inductores; la corriente que los atraviesa no es proporcional al voltaje aplicado entre sus terminales, pero sí al cambio de voltaje en el tiempo. El teorema de Thévenin es útil en el análisis de esos circuitos.

Los dispositivos semiconductores no son lineales y no tienen circuito de Thévenin. Los circuitos con semiconductores pueden, por ejemplo, aumentar la potencia de una señal o rectifican y regulan un voltaje y son elementos esenciales de amplificadores, osciladores simples y circuitos digitales.

Se pueden construir filtros simples con circuitos RL o RC, osciladores con transistores o amplificadores, todos estos circuitos se tratan con señales que varían continuamente en función del tiempo; a veces se necesitan señales discretas; en estos casos la electrónica digital es más conveniente.

El diseño de circuitos electrónicos que funcionan adecuadamente, involucra la comprobación del funcionamiento de los dispositivos que se van a utilizar; esto implica la utilización de instrumentos de medición bien calibrados y la correcta interpretación de las cantidades física medidas. La configuración del circuito que se elija para construir un sistema electrónico depende de la salida que se espera obtener o de que el sistema realice correctamente la operación para la cual se diseñó.



# 1. ANÁLISIS DEL RESULTADO DE LA MEDICIÓN Y SU INCERTIDUMBRE

Experimentar es, “probar y examinar prácticamente la virtud y propiedades de algo”.<sup>1</sup> Un experimento proporciona datos, y el análisis objetivo de estos, que conduzcan a deducciones válidas respecto de algún problema establecido.

“Los experimentos demostrativos pueden ser una introducción al tema de estudio y explicar un concepto o fenómeno complicado, o puede comprobar una ley”.<sup>2</sup>

## 1.1. Análisis de error

La verificación de una ley física o la determinación de una cantidad física involucran mediciones. La lectura tomada de la escala de un instrumento puede ser directamente relacionada por una cadena de análisis a la cantidad o ley en estudio.

### 1.1.1. Tipos de errores experimentales

Los tipos de errores experimentales son los errores sistemáticos y aleatorios.

---

<sup>1</sup> L.R.A. Española <http://lema.rae.es/drae/?al=experimentar>. Consulta: septiembre de 2012

<sup>2</sup> H., Klaus; K.; Oscar. Design and analysis of experiments, introduction to experimental design. p. 22.

### **1.1.1.1. Errores sistemáticos**

Los errores sistemáticos se deben a causas identificables y pueden, en principio, ser eliminados. Los errores de este tipo producen que el valor de la medida sea consistentemente mucho mayor o mucho menor. Las causas de estos errores pueden ser de cuatro tipos:

- Instrumentos mal calibrados.
- De observación: el paralaje al leer la escala de un instrumento.
- Ambientales.
- Teóricas: debido a simplificaciones del modelo o aproximaciones en las ecuaciones que lo describen.

### **1.1.1.2. Errores aleatorios**

Los errores aleatorios son fluctuaciones positivas y negativas que causan que alrededor de la mitad de las medidas sean mucho mayores o menores. Las fuentes de errores aleatorios no pueden ser identificadas; posibles fuentes de errores aleatorios son:

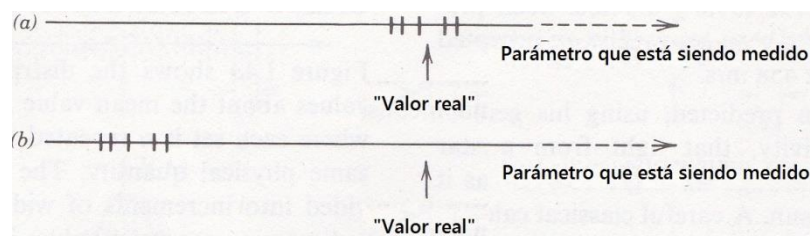
- De observación: errores de juicio del observador cuando lee la escala del instrumento de medición a su división más pequeña.
- Ambiental: fluctuaciones impredecibles en el ambiente.

### **1.1.2. Diferencia entre errores sistemáticos y aleatorios**

Suponiendo que la medida de una cantidad física es repetida cinco veces, bajo las mismas condiciones, si solo hay errores aleatorios, los cinco valores de la medida estarán esparcidos alrededor del “valor real” se muestra en la figura

1(a). Algunos serán muy altos y otros muy bajos. Si además hay también errores sistemáticos, entonces las cinco medidas estarán dispersas, no alrededor de valor real; sino alrededor de algún valor desplazado como se muestra en la figura 1(b).

Figura 1. **Set de medidas**



Fuente: Preston, Daryl; Dietz, Eric. *The art of experimental physics*. p. 9.

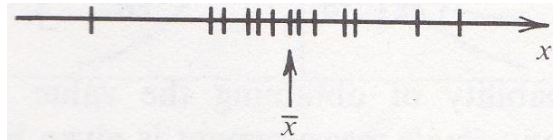
### 1.1.3. Análisis estadístico de errores aleatorios

Si una cantidad física es medida muchas veces, una distribución de lecturas pueden obtenerse debido a los errores aleatorios. Para ese conjunto de datos, el promedio o valor de  $x$ , está dado por:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad \text{Ec. [1.1]}$$

Donde  $x_i$  es el  $i$ -ésimo valor medido y  $n$  es el número total de mediciones. Los  $n$  valores medidos, se distribuyen alrededor del valor medio medido. En muchos casos  $\bar{x}$  se aproxima al valor real, si  $n$  es muy grande y no hay errores sistemáticos. Pocos valores esparcidos alrededor del valor medio implican alta precisión; ver la figura 2.

Figura 2. **Valores medidos que están distribuidos respecto del valor medio  $\bar{x}$**



Fuente: Preston, Daryl; Dietz, Eric. *The art of experimental physics*. p. 9.

Después de determinar el “mejor valor” de la medición, que es  $\bar{x}$ , necesitamos estimar la incertidumbre o error en este valor. Empezamos por definir una forma en que la dispersión de datos alrededor del valor medio pueda ser caracterizada. La desviación estándar está definida por:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad \text{Ec. [1.2]}$$

Si la desviación estándar es pequeña, la dispersión de valores alrededor del promedio es pequeña y la precisión de las medidas es alta ( $S$  siempre es positiva y con las unidades de  $x_i$ ). El error o incertidumbre en el valor medio  $\bar{x}$  es la desviación estándar de la media  $S_m$ , que está definida por:

$$S_m = \frac{S}{\sqrt{n}} \quad \text{Ec. [1.3]}$$

Donde  $S$  es la desviación estándar y  $n$  el número total de mediciones. El resultado que tiene que reportarse es:

$$\bar{x} \pm S_m \quad \text{Ec. [1.4]}$$

La interpretación de la ecuación anterior es que el valor medio se encuentra entre  $\bar{x} - S_m$  y  $\bar{x} + S_m$ .

### 1.1.3.1. Distribución de Gauss

La distribución gaussiana (o normal) representa la frecuencia con la que cada valor de  $x$  se obtiene, como resultado de cualquier única medición. La ecuación que idealmente representa de forma analítica una distribución gaussiana es:

$$N(x) = \frac{n}{(2\pi)^{\frac{1}{2}}\sigma} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}} \quad \text{Ec. [1.5]}$$

Si la medición se hace con mayor precisión  $\sigma$  será menor y la distribución de Gauss alcanza claramente un máximo en el valor medio  $\bar{x}$ . Si los lados de la ecuación se dividen entre  $n$ , se obtiene:

$$P(x) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{1}{2}}\sigma} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}} \quad \text{Ec. [1.6]}$$

La probabilidad de obtener el valor de  $x$  como resultado de cualquier única medición está dado por  $P(x)$ . Puede notarse que el valor más probable como resultado de cualquier medición es el de  $\bar{x}$ .

La distribución de Gauss tiene la propiedad que el 68 % de las medidas caerá dentro del rango de  $\bar{x} - \sigma$  a  $\bar{x} + \sigma$  y el 95 % de las medidas caerá dentro del rango de  $\bar{x} - 2\sigma$  a  $\bar{x} + 2\sigma$  (ver las figuras 3 y 4).

### 1.1.4. Propagación de errores

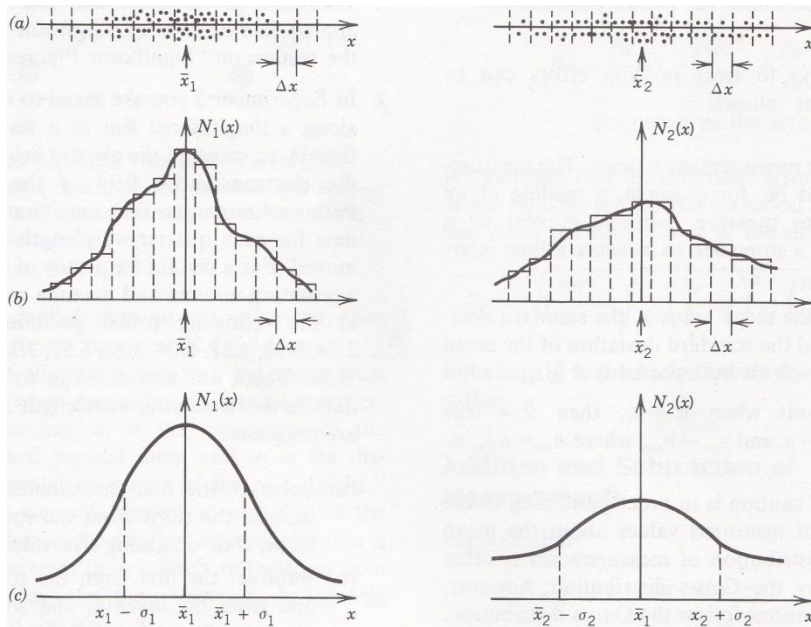
La propagación de errores es un método para determinar el error en un valor cuando se calcula usando dos o más valores medidos con errores estimados conocidos. Suponiendo que  $x, y$  y  $z$  son tres valores medidos y sus errores estimados son  $\delta_x, \delta_y$  y  $\delta_z$ ; el resultado de esas tres medidas se presenta de la forma:

$$x \pm \delta_x \quad \text{Ec. [1.7]}$$

$$y \pm \delta_y \quad \text{Ec. [1.8]}$$

$$z \pm \delta_z \quad \text{Ec. [1.9]}$$

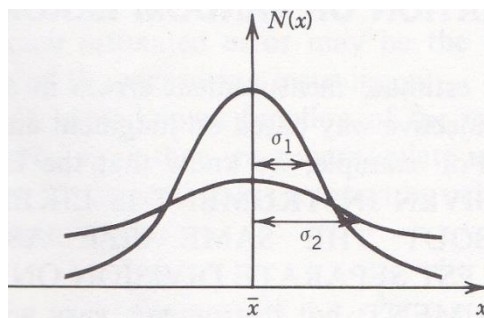
Figura 3. Conjuntos de medidas de la misma cantidad física



Fuente: Preston, Daryl; Dietz, Eric. *The art of experimental physics*. p. 11.

La figura 3(a) muestra las medidas dispersas verticalmente, si  $N(x)$  es el número de valores en un incremento  $\Delta x$  centrado en  $x$ , toman la forma de la figura 3(b). Para cada  $n$  muy grande, la distribución de medidas alrededor del valor medio es gaussiana o normal, y  $x_1$ ,  $x_2$  se aproximan al mismo valor, el “valor real”. El dato de mayor precisión tiene una desviación estándar pequeña, esto es,  $\sigma_1 < \sigma_2$ .

Figura 4. **La distribución de Gauss para el mismo  $\bar{x}$  y diferentes valores de  $\sigma$**



Fuente: Preston, Daryl; Dietz, Eric. *The art of experimental physics*. p. 11.

La figura 4 muestra que  $\sigma_1$  es menor que  $\sigma_2$  e implica datos con mayor precisión.

Cada error estimado de [1.7], [1.8] y [1.9] puede ser la división más pequeña del instrumento de medida. Si  $w$  es una función conocida de los valores medidos  $w(x, y, z)$ , se debe calcular  $w$  y su error estimado  $\delta_w$ . Aproximando las diferenciales con deltas:

$$\delta_w = \frac{\partial w}{\partial x} \delta_x + \frac{\partial w}{\partial y} \delta_y + \frac{\partial w}{\partial z} \delta_z \quad \text{Ec. [1.10]}$$

Se asume que los errores estimados  $\delta_x$ ,  $\delta_y$  y  $\delta_z$  son errores aleatorios y la teoría estadística dice que  $\delta_w$  es:

$$\delta_w = \sqrt{\left(\frac{\partial w}{\partial x} \delta_x\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} \delta_y\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \delta_z\right)^2} \quad \text{Ec. [1.11]}$$

## 1.2. Cifras significativas

Para representar correctamente una medida, además de su incertidumbre, hay que colocar la cantidad adecuada de dígitos en el resultado de la medición.

### 1.2.1. Precisión de la desviación estándar

La desviación estándar de la media  $S_m$  es la medida de precisión con la que el valor medio  $\bar{x}$  estima el valor real  $x$ . Si  $S_m$  es proporcional a  $S$  y ambos fluctúan de acuerdo con  $n$  medidas, igual que  $\bar{x}$ , entonces el intervalo en el que se espera que esté el valor medido, también tiene incertidumbre y se debe estimar la desviación estándar de  $S_m$ :  $S(S_m)$ ; esto podría responder la pregunta de cuántas cifras significativas deben ser registradas y calculadas.

La precisión relativa de  $S_m$  está definida por:

$$\frac{S(S_m)}{S_m} = \frac{1}{(n-2)^{\frac{1}{2}}} \quad \text{Ec. [1.12]}$$

Esto da una base cuantitativa para decidir cuántas cifras significativas deben retenerse en un resultado experimental. Las cifras significativas se obtienen directamente del proceso de medición y excluyen a los ceros que



tienen como propósito localizar el punto decimal. Las reglas para determinar cifras significativas son:

- Todos los números que no son cero, son significativos.
- Los ceros pueden o no ser significativos; según lo siguiente:
  - Los ceros entre dígitos no ceros, son significativos.
  - Los ceros al final de un número que incluyen un punto decimal, son significativos.
  - Los ceros al final de un número que no incluyen un punto decimal, son considerados ambiguos y no son cifras significativas.
  - Los ceros que preceden al primer dígito no cero, no son significativos.

El valor del último dígito que se retiene se obtiene por el método de redondeo de números. Las reglas para el redondeo de números son:

- Cuando el primer dígito a la derecha del dígito que se quiere retener es 4 o menor, ese dígito y todos los demás a su derecha se desechan.
- Cuando el primer dígito a la derecha del que se quiere retener es 5 y el dígito que se quiere retener es par, ese y todos los demás a su derecha se desechan. Si el dígito que se quiere retener es impar, se incrementa en 1.

- Cuando el primer dígito a la derecha del que se quiere retener es 6 o mayor, ese y todos los demás a su derecha se desechan y el dígito que se retuvo se incrementa en 1.<sup>3</sup>

Vale la pena enfatizar varias reglas para indicar incertezas. Primero, si  $\delta_x$  es el valor estimado de una incerteza, obviamente no se indica con mucha precisión.

Las incertezas experimentales usualmente se redondean a una cifra significativa. Esto se hace, si la cantidad de medidas obtenidas es lo suficientemente grande.

Por ejemplo, si la incerteza de una medida es  $\delta g = 0.02385 \frac{m}{s^2}$  debe ser redondeada a  $\delta g = 0.02 \frac{m}{s^2}$  y el resultado debe ser escrito como:

$$g = (9.82 \pm 0.02) \frac{m}{s^2}$$

Solo hay una excepción significativa a la regla anterior. Si el dígito principal en  $\delta_x$  es 1, entonces es mejor retener dos cifras significativas en  $\delta_x$ .

“Por ejemplo, suponiendo que algún cálculo nos da la incerteza  $\delta_x = 0.14$ , redondear esto a  $\delta_x = 0.1$  sería una reducción substancial; entonces se puede argumentar que es menos engañoso retener dos cifras, e indicar  $\delta_x = 0.14$ . El mismo argumento se puede aplicar si el dígito principal es 2, pero no si es mayor”.<sup>4</sup>

---

<sup>3</sup>Johnson, Catherine W; Hall, P.E. Essential laboratory mathematics. p. 30.

<sup>4</sup>Taylor, J.R. An Introduction to error analysis. p. 16.

Después que se ha estimado la incerteza en la medida, se debe considerar cuáles son las cifras significativas en el valor de la medida. La regla para indicar los resultados es que la última cifra significativa en cualquier resultado debe, usualmente, ser del mismo orden (en la misma posición decimal) que la incerteza.

Por ejemplo, la medida  $92.81 \pm 0.3$  debe ser redondeada a  $92.8 \pm 0.3$ . Si su incerteza es 3 entonces a  $93 \pm 3$  y si su incerteza es 30 a  $90 \pm 30$ . Hay una excepción a la regla anterior, si el primer dígito de la incerteza es pequeño (2 o 1) entonces es apropiado retener una cifra significativa más en la cantidad final. Por ejemplo, la medida:

$$l = (27.6 \pm 1) \text{ cm}$$

Es aceptable si se argumenta que al redondear a  $(28 \pm 1) \text{ cm}$  se pierde información.

“La incerteza en cualquier cantidad medida tiene las mismas dimensiones que la cantidad misma; por eso es mejor escribir las dimensionales después de ambas”.<sup>5</sup>

### **1.3. Análisis gráfico**

El propósito de muchos experimentos es encontrar la relación entre las variables medidas. Una forma de lograr esto es trazar una gráfica de los datos y luego analizarla. Algunos lineamientos han sido establecidos para trazar gráficas; en general se puede utilizar un software para facilitar trazar curvas y ajustar los datos a estas:

---

<sup>5</sup>Taylor, J.R. An Introduction to error analysis. p. 17.

- Dar a la gráfica un título coherente.
- La variable dependiente debe ser trazada a lo largo del eje vertical ( $y$ ) y la variable independiente a lo largo del eje horizontal ( $x$ ).
- Identificar los ejes e incluir unidades, elegir una escala para cada eje y empezar desde cero, si es posible.
- Usar barras de error para indicar los errores de medida.
- Dibujar una curva suave a través de los puntos. Si los errores son aleatorios, aproximadamente un tercio de los puntos no se encontrará dentro del rango de error de la mejor curva.

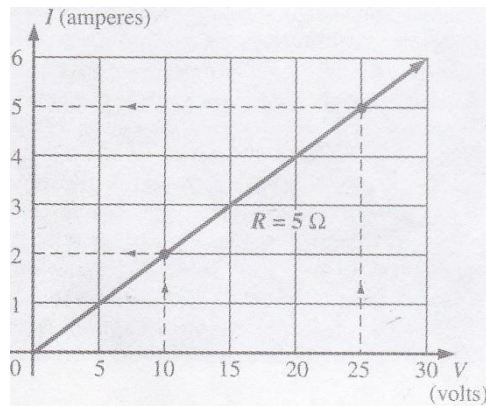
### 1.3.1. Ajuste de curvas

Dados  $n$  puntos  $(x_i, y_i)$ , se quiere encontrar la ecuación para la “mejor curva” para ese conjunto de datos. Si los datos tienen una relación lineal, entonces se utiliza el proceso de regresión lineal.

En general, los puntos no están relacionados linealmente y el proceso para obtener una ecuación para la mejor curva es *la* regresión no lineal. La técnica que se usa para determinar la curva que mejor se ajusta es el método de mínimos cuadrados.

Por ejemplo, para las características de muchos dispositivos electrónicos, la corriente está representada por el eje vertical y el voltaje por el eje horizontal, como se muestra en la figura 5. La gráfica muestra que la resistencia es constante para cualquier punto  $(V, I)$ .

Figura 5. **Gráfica de corriente contra voltaje para la ley de Ohm**



Fuente: BOYLESTAD, Robert. *Introducción al análisis de circuitos*. p. 99.

#### 1.4. Discrepancia

Si la magnitud física se mide con dos (o más) métodos o por distintos observadores, es posible (y muy probable) que los resultados no coincidan. En este caso se dice que existe una discrepancia en los resultados. Sin embargo, lo importante es saber si la discrepancia es significativa o no. Un criterio que se aplica en el caso especial en el que se supone que las mediciones siguen una distribución normal, es el siguiente:

Si las mediciones que se comparan son independientes y dieron como resultados  $x_1 \pm \Delta x_1$  y  $x_2 \pm \Delta x_2$ , se define  $\Delta x^2 = \Delta x_1^2 + \Delta x_2^2$ .

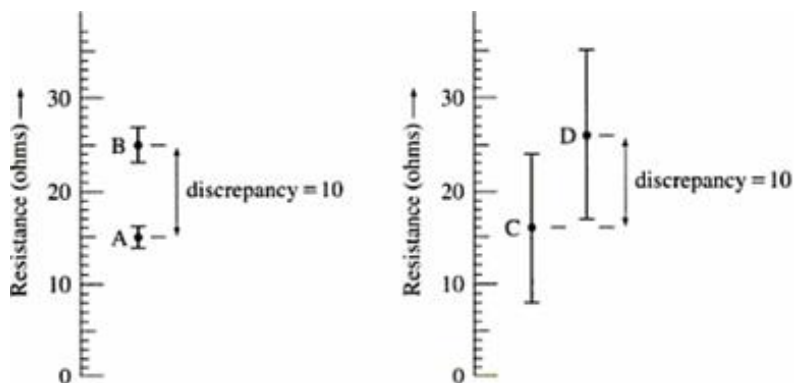
Se dice que en un límite de confianza del 68 % las medidas son distintas si  $|x_1 - x_2| \geq \Delta x$  y que con un límite de confianza del 96 % las mediciones son distintas si  $|x_1 - x_2| \geq 2 \Delta x$ . Numéricamente, se define la discrepancia entre dos medidas como la diferencia entre dos valores medidos de la misma cantidad. Específicamente, cada medición consiste en el mejor valor estimado

y su incerteza, y se define la discrepancia como la diferencia entre estos dos mejores valores estimados.

Por ejemplo  $A = (15 \pm 1)\Omega$  y  $B = (25 \pm 2)\Omega$  tienen una discrepancia de  $25 - 15 = 10$ , pero puede o no ser significativa; la figura 6 (izquierda) muestra que la discrepancia de  $10\Omega$  es significativa porque ningún valor de la resistencia es compatible con las dos medidas.

Supongase ahora otras dos medidas  $C = (16 \pm 8)\Omega$  y  $D = (26 \pm 9)\Omega$ . La discrepancia sigue siendo 10, pero no es significativa; ver la figura 6 (derecha).

Figura 6. **Dos medidas de la misma resistencia**



Fuente: TAYLOR, John. *An introduction error analysis: the study of uncertainties in physics measurements*. p. 30.

### 1.5. Identificación de variables en experimentación

Las características del fenómeno que se estudia se pueden representar como variables, debido a que la modificación de alguna de ellas puede provocar

un cambio en otra. Las variables a las que se refieren la investigación de un fenómeno pueden ser dependientes e independientes.

### **1.5.1. La variable independiente**

Al reproducir un fenómeno que se quiere comprender, se establece que hay un supuesto vínculo entre alguna característica y aquella que exige una explicación (causa y efecto). La variable independiente es la que manipula el experimentador para ver si se produce el efecto que desea explicar.

### **1.5.2. La variable dependiente**

La variable dependiente cambia cuando se modifica la variable independiente, es decir, los cambios de estado en esta dependen de los cambios de estado en la variable independiente.





## 2. CIRCUITOS RESISTIVOS DE CORRIENTE DIRECTA

### 2.1. Ley de Ohm

La ley de Ohm solo se aplica a dispositivos que se comportan como resistores. Describe una posible relación entre voltaje y corriente en un dispositivo, pero existen otras relaciones. Una carga eléctrica  $q_0$  en un campo magnético uniforme, experimenta una fuerza:

$$\vec{F} = q_0 \vec{E} \quad \text{Ec. [2.1]}$$

La carga se mueve de un punto  $P_0$  a un punto  $P$  (un pequeño desplazamiento). El trabajo necesario para mover la carga es:

$$dW = \vec{F} \cdot d\vec{s} \quad \text{Ec. [2.2]}$$

$$\Delta U = - \int_{P_0}^P q_0 \vec{E} \cdot d\vec{s} \quad \text{Ec. [2.3]}$$

Es decir, si la carga se desplaza, experimenta un cambio de energía potencial. El voltaje o diferencia de potencial, medido en voltios, depende solo de la carga fuente.

$$\Delta V = \frac{\Delta U}{q_0} = - \int_{P_0}^P \vec{E} \cdot d\vec{s} \quad \text{Ec. [2.4]}$$

Si se conecta una diferencia de potencial a los extremos de un alambre conductor de longitud  $l$  y área transversal  $A$ , existe flujo de electrones a través del alambre; la corriente medida en amperios es:

$$i = \frac{dq}{dt} \quad \text{Ec. [2.5]}$$

Se define la densidad de corriente, como el flujo de electrones por unidad de área:

$$J = \frac{i}{A} \quad \text{Ec. [2.6]}$$

Se establece también un campo eléctrico y estos se relacionan así:

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad \text{Ec. [2.7]}$$

La conductividad es una propiedad intrínseca del material y señala que si el alambre conductor “deja” pasar electrones fácilmente, la resistividad, se puede escribir como:

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \quad \text{Ec. [2.8]}$$

$$\frac{i}{A} = \frac{1}{\rho} \frac{\Delta V}{l} \quad \text{Ec. [2.9]}$$

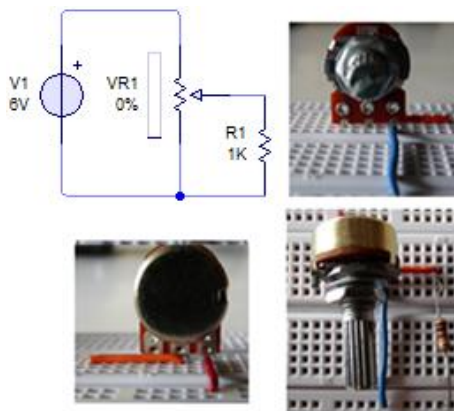
$$\Delta V = \frac{\rho l}{A} i = Ri \rightarrow i = \frac{\Delta V}{R} \quad \text{Ec. [2.10]}$$

Donde  $R$  es la medida de la oposición al paso de la corriente y se mide en ohmios ( $\Omega$ ); un resistor se caracteriza por su resistencia. Para comprobar que la pendiente de la recta que representa la relación corriente contra voltaje de un resistor es igual al inverso de la resistencia, se va a utilizar un potenciómetro conectado en serie con un resistor (ver la figura 7).

Conectar en la entrada del circuito la fuente de voltaje directo con  $6\text{ V}$  (como muestra la figura 8). Colocar uno de los multímetros en la escala de  $20\text{ V}$  (Cambiar la escala si es necesario) y el otro en la escala máxima de  $200\text{ mA}$  (Cambiar la escala, si es posible).

Conectar el voltímetro en paralelo y el amperímetro en serie, con el resistor de  $1\text{ k}\Omega$ . Variar el voltaje entre las terminales del resistor, para cada variación; obtener los pares voltaje-corriente y graficar (ver la figura 9). Comparar la medida de la resistencia obtenida directa e indirectamente. Ver la tabla I y la figura 10.

Figura 7. **Resistor y potenciómetro conectados a una fuente de voltaje**



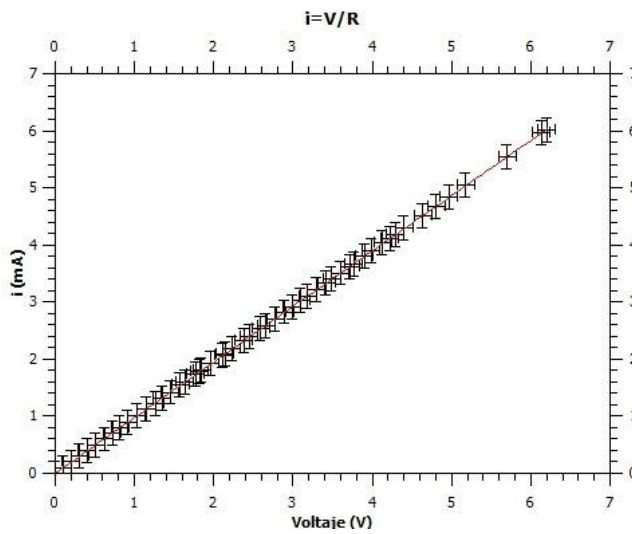
Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

Figura 8. Fuente de voltaje directo, voltímetro y amperímetro



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

Figura 9. Gráfica de corriente contra voltaje



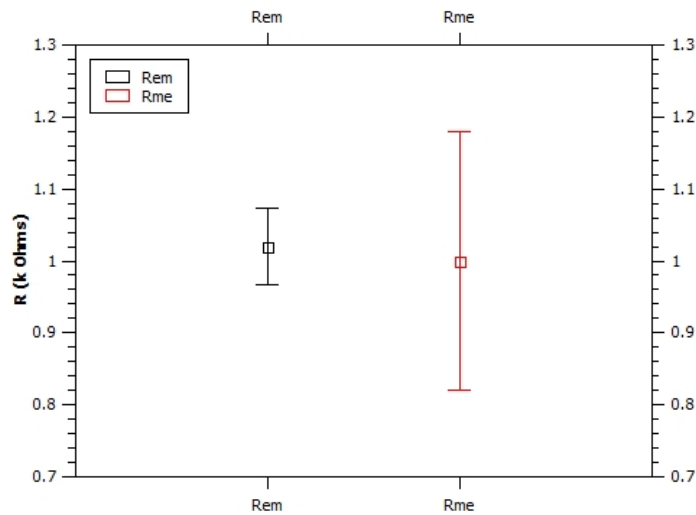
Fuente: elaboración propia, empleando Qtiplot.

Tabla I. **Comparación de resistencias**

$R_{em}$	$R_{me}$
$(1.02 \pm 0.06) k\Omega$	$(1.0 \pm 0.2) k\Omega$

Fuente: elaboración propia.

Figura 10. **Discrepancia de la medida de las resistencias**



Fuente: elaboración propia, empleando Qtiplot.

La resistencia empírica es  $R_{em} = \frac{1}{A_1}$ , donde  $A_1$  es la pendiente de la recta de la figura 9.

## 2.2. Leyes de Kirchhoff

A continuación se describen los experimentos referentes a las leyes de Kirchhoff.

### 2.2.1. Ley de corrientes de Kirchhoff

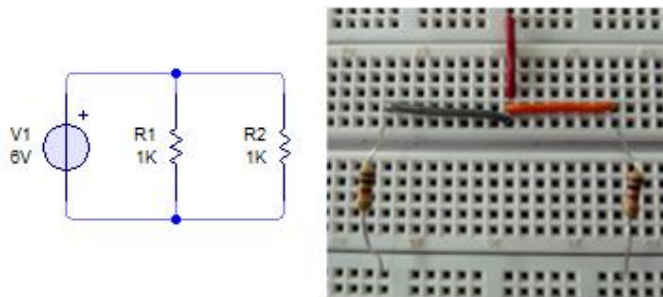
La suma de las corrientes que entran en un nodo es igual a la suma de las corrientes que salen de este (conservación de la carga).

Pasa la misma corriente a través de resistores en serie.

$$\sum i_{entran} = \sum i_{salen} \quad \text{Ec. [2.11]}$$

Se van a medir las corrientes que entran y salen de un nodo del circuito de la figura 11, para comprobar la ley de corrientes de Kirchhoff. Utilizar resistores de  $1\text{ k}\Omega$ .

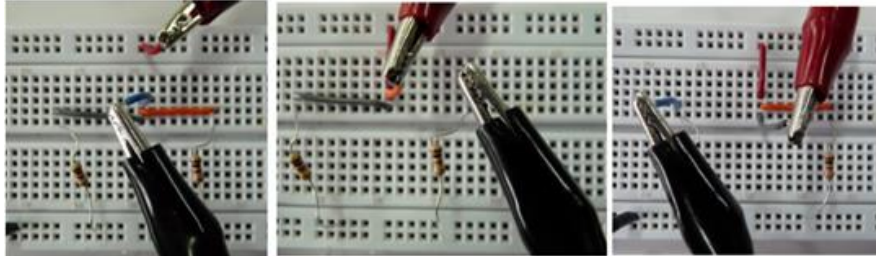
Figura 11. Ley de corrientes Kirchhoff



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

Medir la corriente que entra en el nodo (la corriente total del circuito) y las dos corrientes que salen del nodo (la corriente a través de cada resistor). Comparar la medida de la corriente de entrada obtenida directamente con la medición de corriente obtenida de la sumatoria de las corrientes que salen del nodo. (Ver la tabla II y la figura 13).

Figura 12. **Medición de las corrientes que entran y salen del nodo**



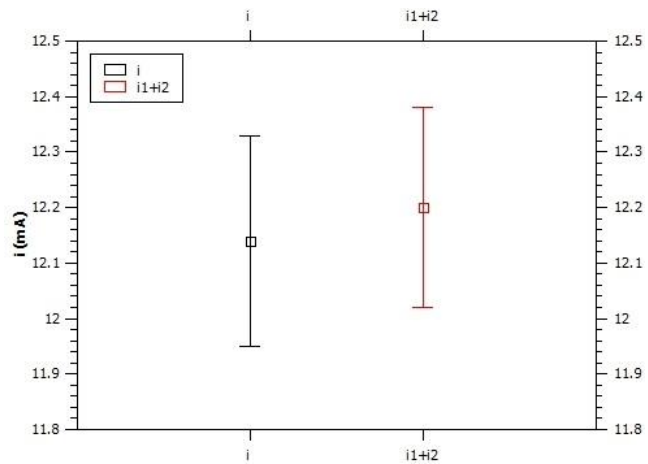
Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

Tabla II. **Comparación de corrientes**

$i_{total}$	$i_1 + i_2$
$(12.14 \pm 0.21) mA$	$(12.2 \pm 0.2) mA$

Fuente: elaboración propia.

Figura 13. **Discrepancia de las medidas de corriente**



Fuente: elaboración propia, empleando Qtiplot.

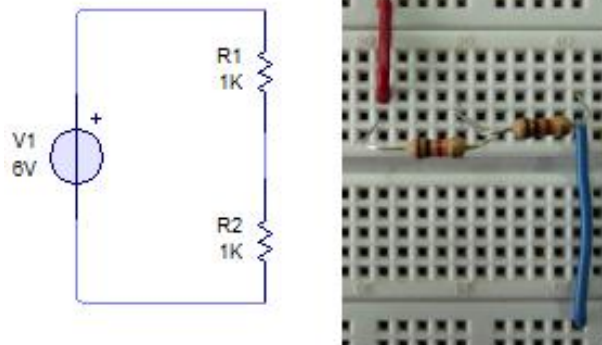
### 2.2.2. Ley de voltajes de Kirchhoff

La suma de caídas de voltaje de un punto A a un punto B es igual al voltaje que hay entre esos puntos. Existe el mismo voltaje entre las terminales de resistores en paralelo.

$$\sum V_{\text{lazo cerrado}} = 0 \quad \text{Ec. [2.12]}$$

Para comprobar la ley de voltaje de Kirchhoff, se van a medir los voltajes en la entrada del circuito de la figura 14 y los voltajes entre las terminales de cada resistor. Utilizar resistores de  $1\text{ k}\Omega$ .

Figura 14. Ley de voltajes Kirchhoff



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

Compare la medida del voltaje de entrada obtenida directamente con la medición de voltaje resultante de la sumatoria de los voltajes en cada resistor. (Ver la tabla III y la figura 15).

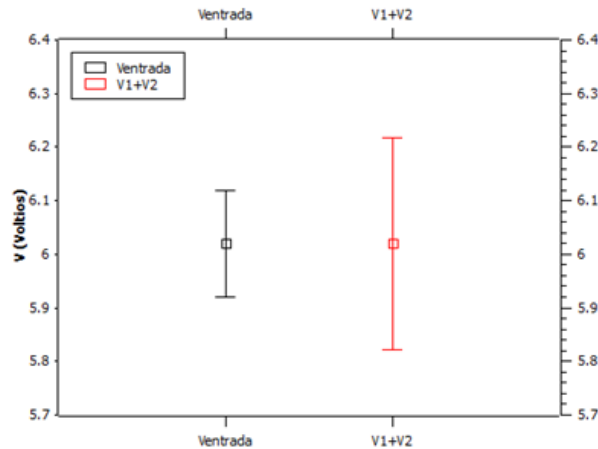


Tabla III. **Comparación de voltajes**

$V_{entrada}$	$V_1 + V_2$
$(6.02 \pm 0.11) V$	$(6.02 \pm 0.22) V$

Fuente: elaboración propia.

Figura 15. **Discrepancia de las medidas de voltaje**



Fuente: elaboración propia, empleando Qtiplot.

### 2.3. Resistores en serie y en paralelo

A continuación se describen los experimentos referentes a los resistores en serie y en paralelo.

#### 2.3.1. Resistores en serie

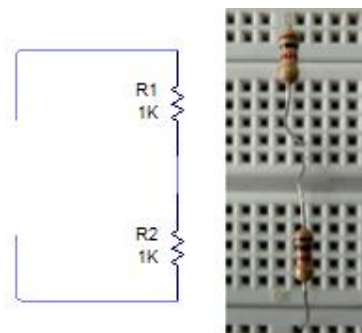
En un circuito serie la resistencia equivalente es la sumatoria de las resistencias conectadas.

La mayor resistencia es dominante.

$$R_{eq} = \sum_{i=1}^n R_n \quad \text{Ec. [2.13]}$$

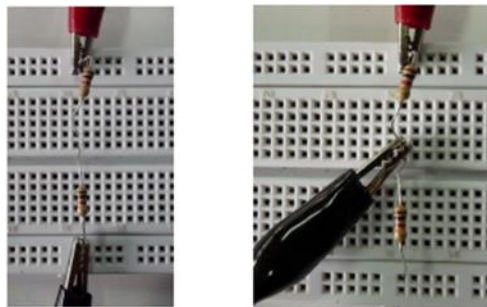
Se va a medir directamente la resistencia equivalente y la resistencia de cada resistor conectado; utilizar resistores de  $1\text{ k}\Omega$ . (Ver las figuras 16 y 17).

Figura 16. **Circuito serie**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

Figura 17. **Medición de resistencias**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

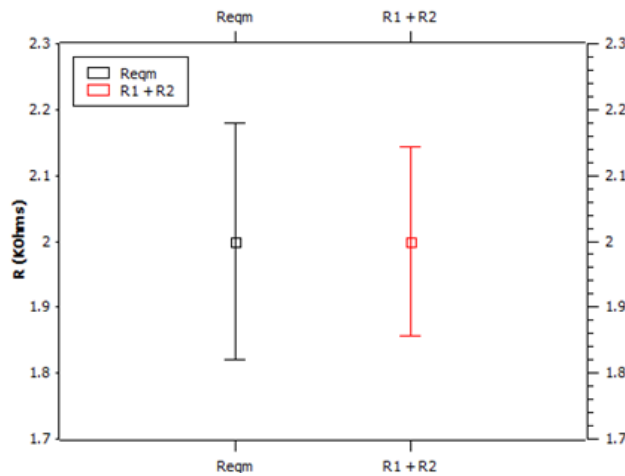
Comparar la resistencia equivalente con la resistencia obtenida de la suma de las resistencias de cada resistor.

Tabla IV. **Comparación de resistencias del circuito serie**

$R_{eqm}$	$R_1 + R_2$
$(2.0 \pm 0.2) k\Omega$	$(2.00 \pm 0.16) k\Omega$

Fuente: elaboración propia.

Figura 18. **Discrepancia de la medida de la resistencia en el circuito serie**



Fuente: elaboración propia, empleando Qtiplot.

### 2.3.2. Resistores en paralelo

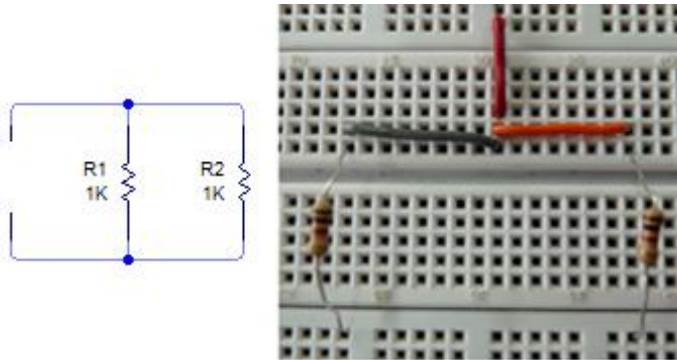
En un circuito paralelo la resistencia equivalente es el inverso de la sumatoria del inverso de las resistencias de cada resistor conectado.

La menor resistencia es dominante.

$$R_{eq} = \left( \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i} \right)^{-1} \quad \text{Ec. [2.14]}$$

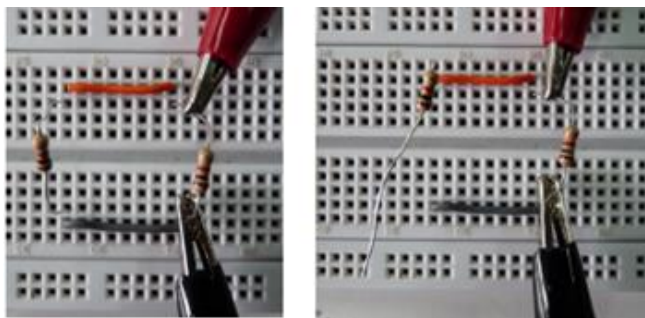
Se mide directamente la resistencia equivalente y la resistencia de cada resistor conectado, utilizar resistores de  $1\text{ k}\Omega$ . Ver las figuras 19 y 20.

Figura 19. **Circuito paralelo**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

Figura 20. **Medición de resistencias**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

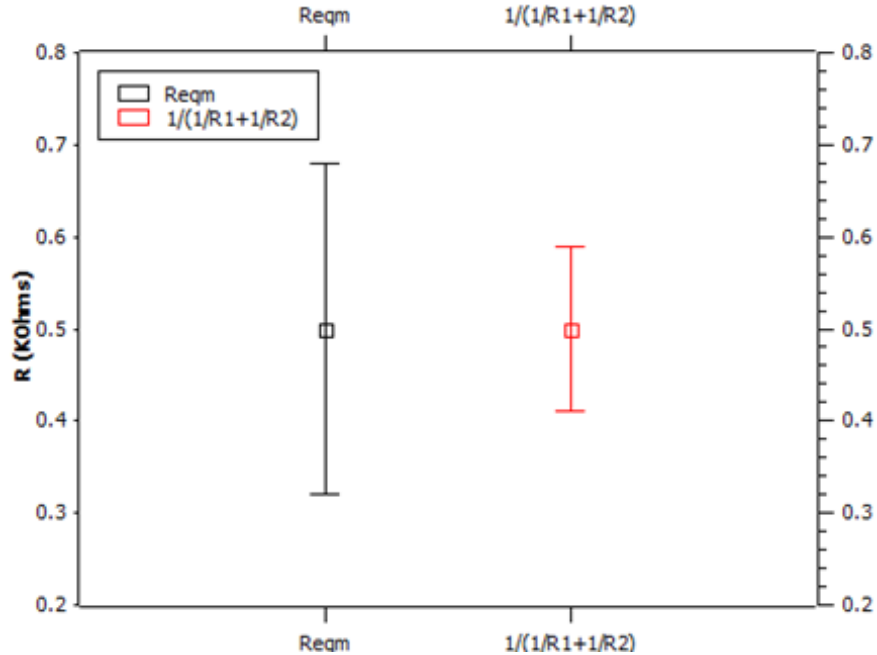
Comparar la resistencia equivalente con la obtenida del inverso de la suma de los inversos de las resistencias.

Tabla V. **Comparación de resistencias del circuito paralelo**

$R_{eqm}$	$\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)^{-1}$
$(0.5 \pm 0.2) k\Omega$	$(0.5 \pm 0.1) k\Omega$

Fuente: elaboración propia.

Figura 21. **Discrepancia de la medida de la resistencia en el circuito paralelo**



Fuente: elaboración propia, empleando Qtiplot.

## 2.4. Divisor de voltaje

El divisor de voltaje es un circuito que produce, en la salida, una fracción predecible del voltaje de entrada aplicado. Para determinar el voltaje de salida:

- Calcular la corriente total de un circuito en serie; usarla para calcular el voltaje de la resistencia inferior del divisor.
- Si la resistencia inferior del divisor constituye la mitad de la resistencia total, va a mostrar la mitad del voltaje total. Si la resistencia inferior, por ejemplo, es 10 veces la resistencia superior, va a mostrar el 90 % del voltaje de entrada  $\frac{10}{11}$ .
- La corriente  $i$  es constante:

$$\frac{V_2}{V_1 + V_2} = \frac{R_2 i}{(R_1 + R_2) i} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad \text{Ec. [2.15]}$$

$$V_{salida} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V \quad \text{Ec. [2.16]}$$

Entonces, el voltaje en la salida siempre es menor o igual que el voltaje en la entrada.

$$V_{salida} = k V_{entrada} \quad \text{Ec. [2.17]}$$

- De la Ley de corrientes de Kirchhoff:

$$i_1 = i_{total} \quad \text{Ec. [2.18]}$$

$$\frac{V_1}{R_1} = \frac{V_{entrada}}{R_{eq}} = \frac{V_{total}}{R_1 + R_2} \quad \text{Ec. [2.19]}$$

$$R_1 i = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} i \quad \text{Ec. [2.20]}$$

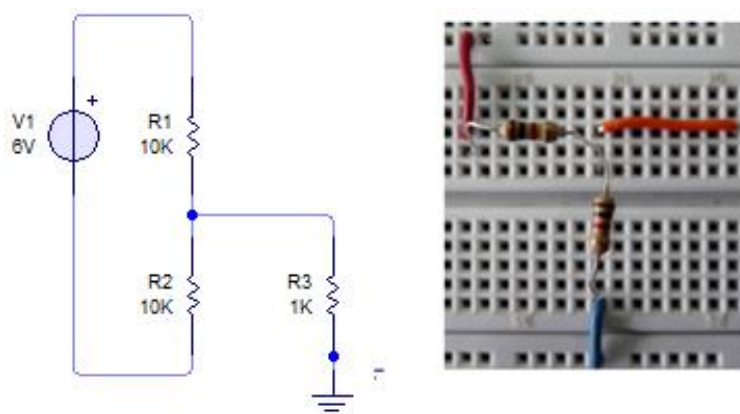
Entonces:

$$V_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{entrada} \quad \text{Ec. [2.21]}$$

$$V_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{entrada} \quad \text{Ec. [2.22]}$$

Se va a medir el voltaje en la entrada y en la salida del divisor de voltaje para comparar la medida directa e indirecta del voltaje de salida. Armar el circuito como lo muestra la figura 22. Utilizar resistores de 1 kΩ.

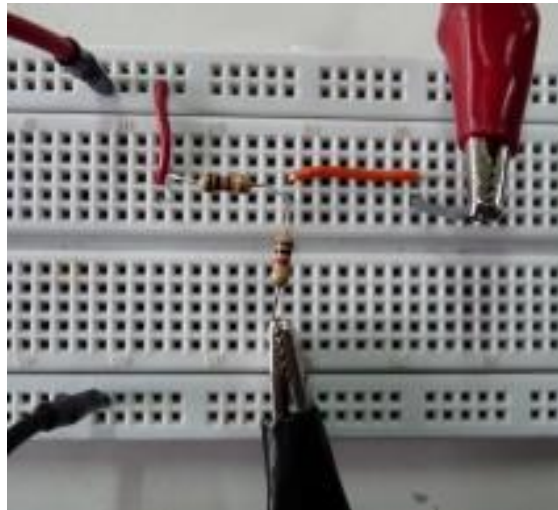
Figura 22. **Divisor de voltaje**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

Medir el voltaje en la salida del divisor, como se muestra la figura 23.

Figura 23. **Medición del voltaje en la salida del divisor de voltaje**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

Comparar las medidas de voltaje de salida obtenidas. Vea la tabla VI y la figura 24.

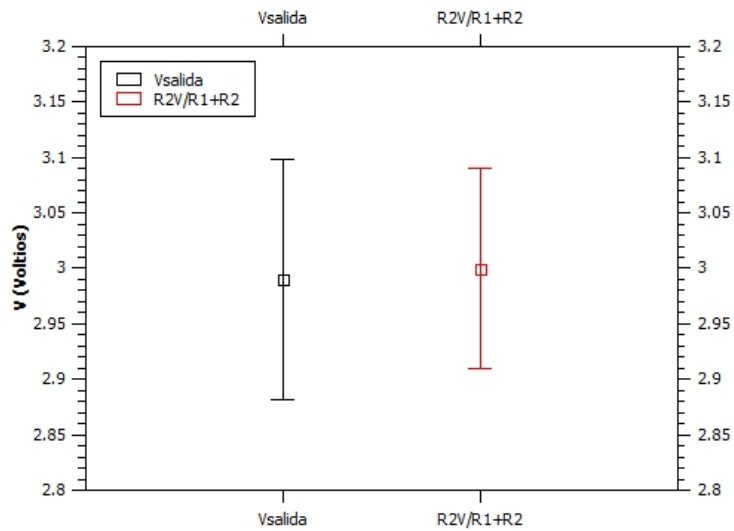
Tabla VI. **Comparación de voltajes en el divisor de voltaje**

$V_{entrada}$	$(6.03 \pm 0.11) V$
$V_{salida} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{entrada}$	$(3,0 \pm 0.1) V$
$V_{salidam}$	$(2.99 \pm 0.12) V$

Fuente: elaboración propia.



Figura 24. **Discrepancia de las medidas de voltaje en el divisor de voltaje**



Fuente: elaboración propia, empleando Qtiplot.

## 2.5. Divisor de corriente

- De la ley de corrientes de Kirchhoff:

$$V_1 = V_{total} \quad \text{Ec. [2.23]}$$

$$R_1 i_1 = R_{eq} i \quad \text{Ec. [2.24]}$$

$$R_1 i_1 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} i \quad \text{Ec. [2.25]}$$

Entonces:

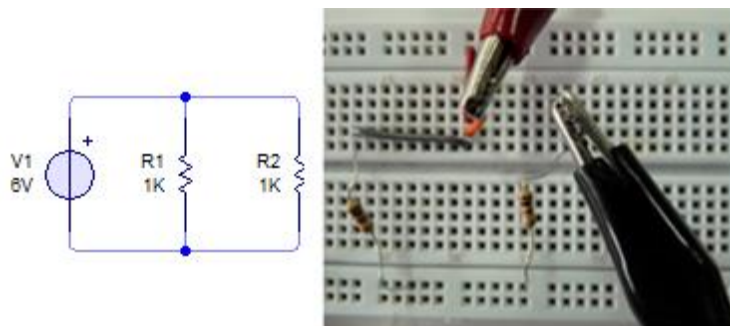
$$i_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} i \quad \text{Ec. [2.26]}$$

$$i_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} i$$

Ec. [2.27]

Se va medir la corriente en la entrada y en la salida del divisor de corriente para comparar la medida directa e indirecta de la corriente de salida. Armar el circuito y medir una de las corrientes de salida, como lo muestra la figura 25. Utilizar resistores de 1 kΩ.

Figura 25. **Divisor de corriente**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

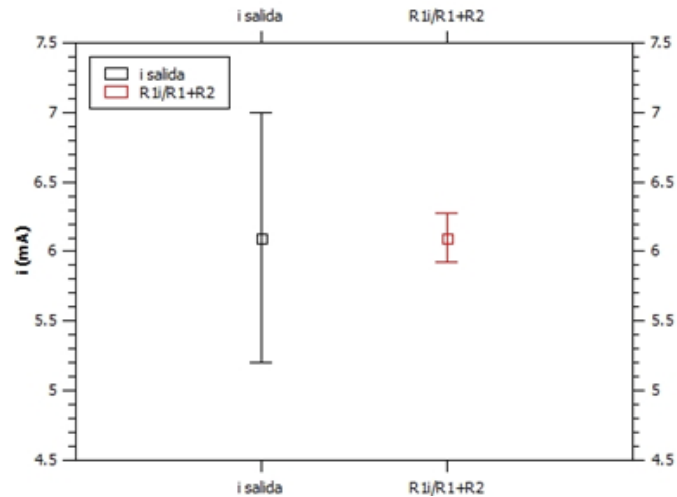
Comparar las medidas de corriente de salida obtenidas. (Ver la tabla VII y la figura 26).

Tabla VII. **Comparación de corrientes en el divisor de corriente**

$i_{2m}$	$i_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} i$
$(6.1 \pm 1.0) \text{ mA}$	$(6.1 \pm 0.2) \text{ mA}$

Fuente: elaboración propia.

Figura 26. **Discrepancia de las medidas de corriente en el divisor de corriente**



Fuente: elaboración propia, empleando Qtiplot.

## 2.6. Circuito equivalente de Thévenin

El teorema de Thévenin dice que cualquier red de resistores y fuentes de voltaje es equivalente a una sola fuente de voltaje en serie con un resistor.

$V_{TH}$  es el voltaje de salida del circuito, cuando no se ha conectado ninguna carga.

- $I_{TH}$  es la corriente que fluye del circuito de salida, cuando se conecta a tierra.
- $R_{TH} = \frac{V_{TH}}{I_{TH}}$ , también se define como la resistencia medida desde la salida, cuando se hace de la fuente un cortocircuito.

$R_{TH}$  también se define como la resistencia medida desde la salida, cuando se hace de la fuente un cortocircuito.

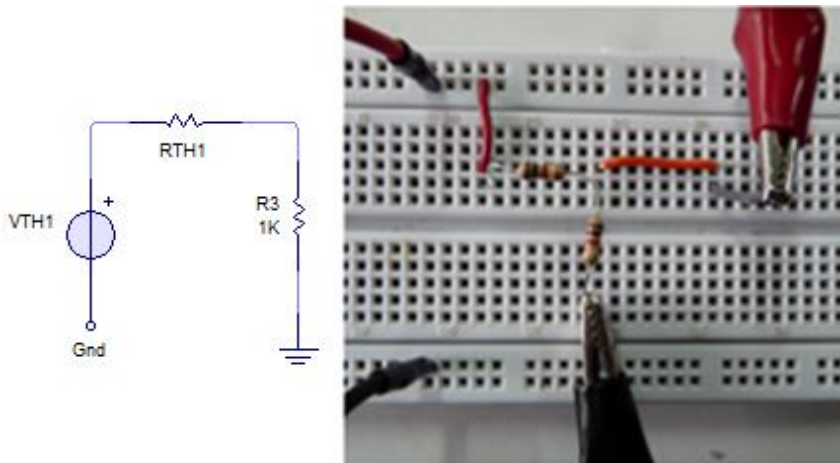
$$R_{TH} = R_1 || R_2 \quad \text{Ec. [2.28]}$$

### 2.6.1. Medida de la resistencia equivalente de Thévenin

Se van a comparar las medidas directa e indirecta de la resistencia equivalente de Thévenin; utilizar resistores de  $10\text{ k}\Omega$ . Armar el circuito como muestra la figura 27.

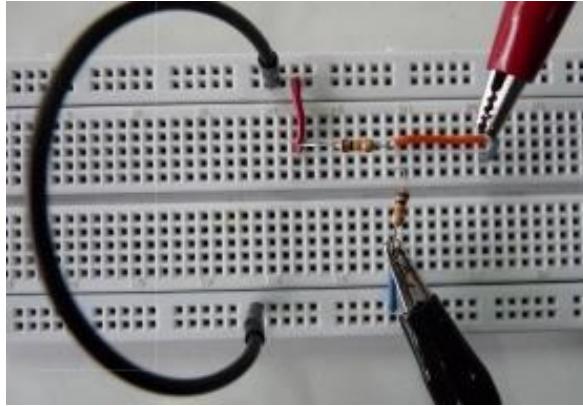
Medir la resistencia equivalente de Thévenin, haciendo corto circuito la fuente de voltaje, como lo muestra la figura 28.

Figura 27. Circuito equivalente de Thévenin



Fuente: Laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

Figura 28. **Resistencia de Thévenin**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

Ahora debe medirse el voltaje (divisor de voltaje) y la corriente de Thévenin, al conectar una resistencia de carga de  $1\text{ k}\Omega$ . Ver la figura 29.

Figura 29. **Corriente de Thévenin**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

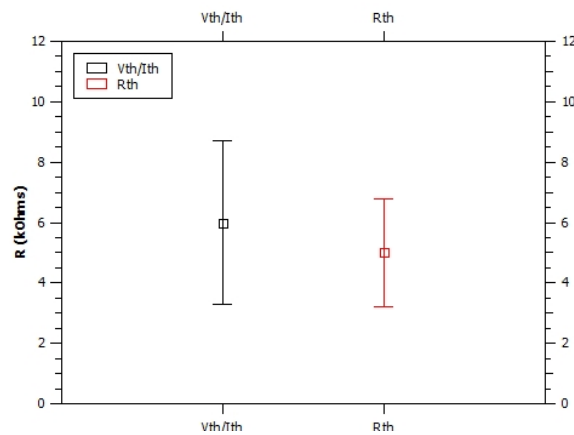
Comparar las resistencias de Thévenin medidas. Ver la tabla VIII y la figura 30.

Tabla VIII. **Comparación de resistencias de Thévenin**

$R_{TH} = \frac{V_{TH}}{I_{TH}}$	$R_{THm}$
$(6 \pm 3) k\Omega$	$(5.0 \pm 2.0) k\Omega$

Fuente: elaboración propia.

Figura 30. **Discrepancia de las medidas directa e indirecta de la resistencia de Thévenin**



Fuente: elaboración propia, empleando Qtiplot.

### 2.6.2. Medida de la resistencia equivalente de Thévenin al variar la corriente

Del circuito de la figura 29, cambiar la resistencia de carga a  $500\Omega$  (una resistencia de carga menor) y medir  $i_{TH}$ .

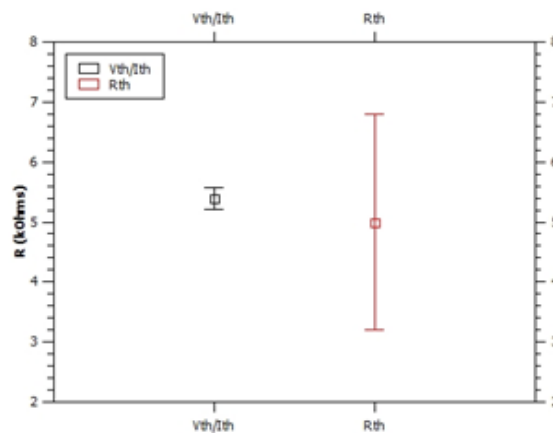
Comparar las resistencias de Thévenin para esta corriente. Ver la tabla IX y la figura 31.

Tabla IX. **Comparación de resistencias de Thévenin cuando la resistencia de carga es menor**

$R_{TH} = \frac{V_{TH}}{I_{TH}}$	$R_{THm}$
$(5.04 \pm 0.2) \text{ k}\Omega$	$(5.0 \pm 2.0) \text{ k}\Omega$

Fuente: elaboración propia.

Figura 31. **Discrepancia de las medidas de la resistencia de Thévenin cuando la resistencia de carga es menor**



Fuente: elaboración propia, empleando Qtiplot.

De los dos experimentos anteriores puede verse que al disminuir la resistencia de carga, la corriente medida en la salida del circuito, se acerca  $I_{TH}$  definida en el teorema de Thévenin.

### 2.6.3. Medidas del voltaje equivalente de Thévenin al variar la resistencia de carga

Medir y comparar los voltajes de Thévenin cuando se conectan diferentes resistencias de carga. Ver la tabla X.

Tabla X. Comparación de voltajes de Thévenin

$(R_{entrada} \pm 0.2) k\Omega$	$(Voltaje \pm 0.11) V$
0.5	0.26
1.0	0.5
20.0	2.40
100.0	2.83
1000.0	2.98
10000.0	2.99

Fuente: elaboración propia.

Para que la caída del voltaje en la salida del circuito de Thévenin no sea significativa  $R_{entrada} \gg R_{salida}$  es decir  $R_{carga} \geq 10 M\Omega$ .

### 2.7. Circuito equivalente de Norton

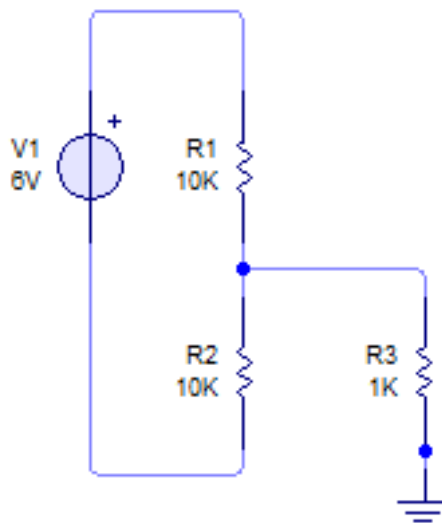
El circuito equivalente de Norton es una analogía del circuito equivalente de Thévenin. El teorema de Norton dice que cualquier circuito lineal se puede sustituir por una fuente equivalente de intensidad en paralelo con una resistencia equivalente.



- $I_{NO} = I_{TH}$
- $R_{NO} = R_{TH}$
- $I_{carga} = \frac{R_{NO} I_{NO}}{R_{NO} + R_{carga}}$

Va a obtenerse el circuito equivalente de Norton a partir del circuito equivalente de Thévenin, como se muestra en la figura 32.

Figura 32. **Circuito equivalente de Norton**



Fuente: elaboración propia, empleando LiveWire.

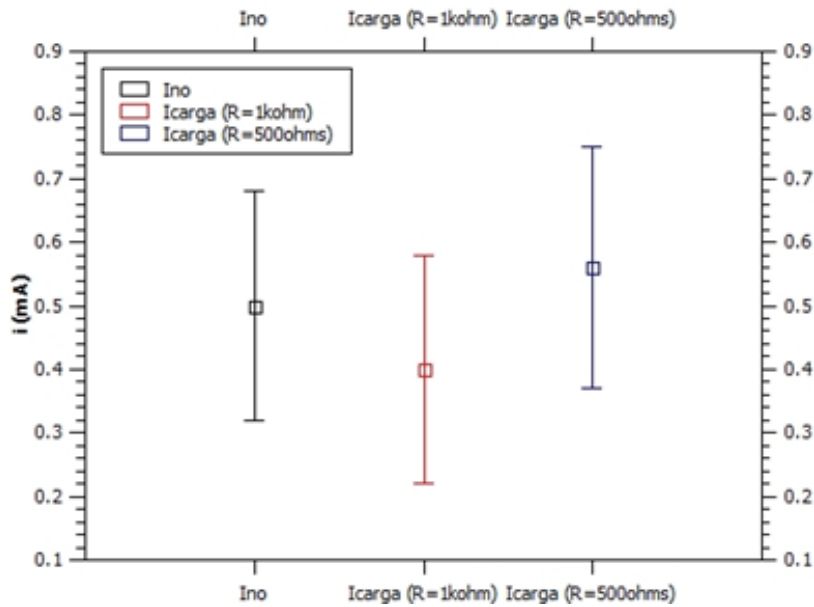
Ahora, se mide la corriente de Norton y se comparan los circuitos de Thévenin y Norton de las figuras 27 y 32; la corriente de Norton se puede medir como lo muestra la figura 29. También debe medirse la corriente de Norton para  $R_{carga} = 500 \Omega$  y compare. Ver la tabla XI y la figura 33.

Tabla XI. **Comparación de corrientes de Norton**

$i_{TH} = i_{NO}$	$(0.5 \pm 0.2) \text{ mA}$
$i_{carga}(R = 1 \text{ k}\Omega) = \frac{R_{carga}}{R_{NO} + R_{carga}} i_{NO}$	$(0.4 \pm 0.2) \text{ mA}$
$i_{carga}(R_{carga} = 500 \Omega)$	$(0.56 \pm 0.21) \text{ mA}$

Fuente: elaboración propia.

Figura 33. **Discrepancia de la corriente par diferentes resistencias de carga**



Fuente: elaboración propia, empleando Qtiplot.

Si la resistencia de carga es menor,  $I_{NO}$  se aproxima a  $I_{TH}$ .

## 2.8. Equipo y materiales para circuitos resistivos de corriente directa

A continuación se muestra una lista de los dispositivos que se utilizan en los experimentos con circuitos resistivos de corriente directa.

Tabla XII. **Equipo y materiales para circuitos en D. C.**

Equipo	Dispositivos	Cantidad
Fuente de voltaje directo		1
Multímetro digital		2
<i>Protoboard</i>		1
Conector banana-lagarto rojo		3
Conector banana-lagarto negro		3
Alambre para conectar en el <i>protoboard</i>		
	Potenciómetro 20 $k\Omega$	1
	Resistor 500 $k\Omega$	1
	Resistor 1 $k\Omega$	3
	Resistor 10 $k\Omega$	2
	Resistor 20 $k\Omega$	1
	Resistor 100 $k\Omega$	2
	Resistor 1000 $k\Omega$	2
	Resistor 1000 $k\Omega$	2

Fuente: elaboración propia.



### 3. SEÑALES EN CIRCUITOS DE CORRIENTE ALTERNA

#### 3.1. El osciloscopio

A continuación se describen las partes de un osciloscopio y cómo se utiliza.

##### 3.1.1. Qué hace un osciloscopio

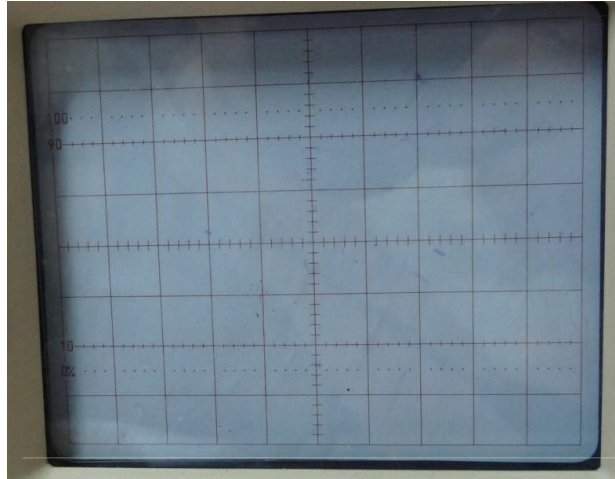
El osciloscopio dibuja una gráfica de voltaje contra tiempo, voltaje en el eje vertical y el tiempo en el eje horizontal. En la figura 34 se muestra un osciloscopio que tiene ocho divisiones en el eje vertical y diez en el eje horizontal; usualmente, estas tienen un área de  $1 \text{ cm}^2$ . Ver la figura 35.

Figura 34. El osciloscopio



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

Figura 35. **Divisiones en la pantalla de un osciloscopio**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

Muchos de los controles del osciloscopio permiten cambiar las escalas horizontales o verticales de la gráfica de voltaje contra tiempo, para que se pueda mostrar una figura clara de la señal que se investiga. Algunos osciloscopios permiten mostrar dos gráficas a la vez, así, dos señales de diferentes bloques del circuito pueden ser comparadas.

### 3.1.2. **Ajuste del osciloscopio**

- Verificar que:
  - Todos los *push button* están en la posición *Out/Off*.
  - Todos los *switch* deslizables están en la posición arriba.
  - Todos los controles que rotan están centrados.
  - Los controles centrales *time/div*, *volt/div* y el control *Hold Off* están en la posición *Cal*. Ver la figura 36.

Figura 36. **Posición adecuada de los controles del osciloscopio antes de medir una señal**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

Colocar los controles *volts/div* a  $1\text{ V/div}$  y el control *time/div* a  $0.2\text{ s/div}$ .  
Ver la figura 37.

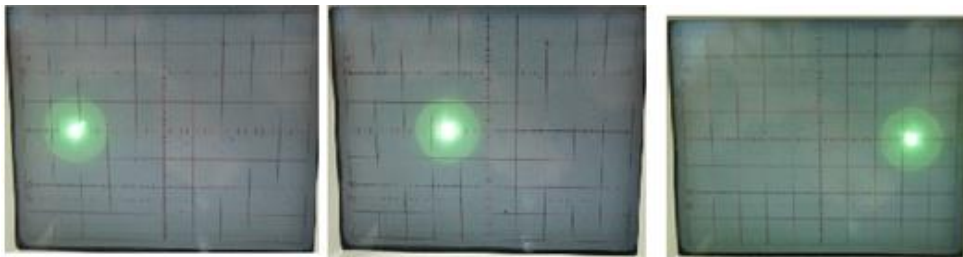
Figura 37. **Posición de los controles de voltios por división y tiempo por división**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

Encender el osciloscopio. El led de encendido se ilumina y luego se puede ver un punto pequeño brillante que se mueve a través de la pantalla. Ver la figura 38.

Figura 38. **Punto brillante a través de la pantalla en instantes de tiempo aleatorio**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

Mover el botón  $\updownarrow$  Pos. Este control permite mover el punto brillante, arriba y abajo en la pantalla. Colocar el punto en el centro de la pantalla. Ver la figura 39.

Figura 39. **Control de posición vertical**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

Mover los controles *Intensity*, *Focus* y  $\leftrightarrow$  Pos. Ver la figura 40.



Figura 40. **Controles de intensidad, *focus* y posición horizontal**



Fuente: laboratorio de Física, S-11, Facultad de Ingeniería.

Cuando estos estén ajustados adecuadamente, el punto estará razonablemente brillante y claramente centrado.

El control *time/div* determina la escala horizontal de la gráfica que aparece en la pantalla del osciloscopio. Con 10 cuadrados a través de la pantalla y el punto moviéndose a 0.2 s/div, el punto tarda 2 s en cruzar la pantalla. Si se rota el control *time/div* en contra de las manecillas del reloj a 0.1 s/div, el punto tardará 1 s en cruzar la pantalla. Ver la figura 41.

Figura 41. **Control de tiempo por división a 0.2 s/div**

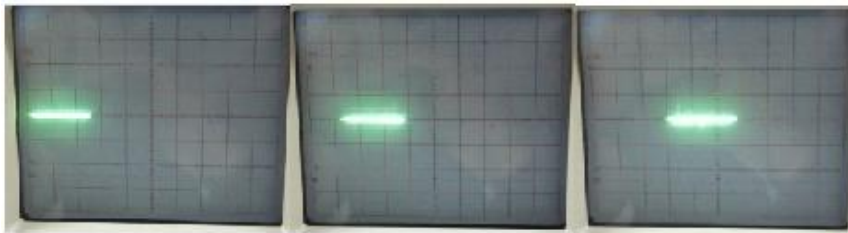


Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

Si se mueve el control a favor de las manecillas del reloj, 10 ms/div aproximadamente, se puede ver una línea brillante a través de la pantalla; esto

se debe a que la pantalla mantiene el brillo por un momento antes de desaparecer. Ver la figura 42.

Figura 42. **Pantalla del osciloscopio cuando el control de tiempo por división está colocado en 0.2 s/div**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

El control *volts/div* determina la escala vertical de la gráfica dibujada en la pantalla del osciloscopio, ver la figura 43. Conectar a la entrada del canal 1 (CH1) el *BNC plug* (puntas de osciloscopio). Ver las figuras 44, 45 y 46. Cuando se conecta el positivo a la calibración, se conecta una señal a la entrada del canal 1 del osciloscopio.

Figura 43. **Control de voltios por división a 1 volt/div**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

Figura 44. **Entrada del osciloscopio y *BNC socket***



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

Figura 45. **Punta de osciloscopio**



Fuente: laboratorio de Física, S-11, Facultad de Ingeniería.

Figura 46. **Conexión de la punta de osciloscopio a la calibración**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

### 3.1.3. Conectando el generador de señales

Un generador estándar tiene controles para *On/Off switching* y para selección de las formas de onda sinusoidal, cuadrada o triangular. Muchos, utilizan una salida de  $600\ \Omega$  que puede ser conectada a cualquier canal. Ver las figuras 47, 48 y 49.

Figura 47. Salida del generador de señal



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

Figura 48. Generador de señal



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

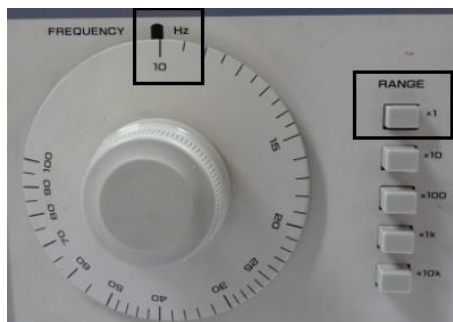
Figura 49. **Conexión con el osciloscopio**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

Hay que ajustar el nivel para producir una señal visible en la pantalla del osciloscopio. El control *Frequency* y el *Switch Range* se utilizan para ajustar la frecuencia de la señal de salida; con los ajustes que se muestran en la figura 50 se obtiene una salida con una frecuencia de 10 Hz.

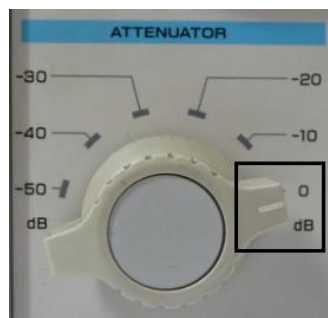
Figura 50. **Ajuste de la frecuencia**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

Para cualquier frecuencia y amplitud de la señal que se elija se debe ajustar el osciloscopio para obtener una gráfica adecuada de voltaje contra tiempo. El nivel del generador; generalmente se ajusta a 0 dB como se muestra en la figura 51, se utiliza el control *Attenuator*.

Figura 51. **Ajuste de nivel del generador**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

### 3.2. Onda sinusoidal

Las señales sinusoidales son las más populares; son las que se obtienen de un tomacorriente. Matemáticamente, lo que se tiene es un voltaje descrito como:

$$V = A \sin(2\pi ft) \quad \text{Ec. [3.1]}$$

Donde  $A$  es la amplitud y  $f$  es la frecuencia en ciclos por segundo. Es importante saber que el valor de señal en que se puede ver una fase es:

$$V = A \sin(2\pi ft + \phi) \quad \text{Ec. [3.2]}$$

Otra variación es el uso de la frecuencia angular, que se vería así:

$$V = A \sin \omega t \quad \text{Ec. [3.3]}$$

Aquí,  $\omega$  es la frecuencia angular en radianes por segundo. Hay que recordar siempre la importante relación.

$$\omega = 2\pi f \quad \text{Ec. [3.4]}$$

Las ondas sinusoidales son la solución de ciertas ecuaciones diferenciales que describen muchos fenómenos, como las propiedades de un circuito lineal.

Un circuito lineal tiene la propiedad de que si en la salida, cuando se suman dos señales, la suma de estas salidas es individual. Es decir, si  $O(A)$  representa la salida obtenida de la señal  $A$ , entonces el circuito es lineal si:

$$O(A + B) = O(A) + O(B) \quad \text{Ec. [3.5]}$$

Un circuito lineal que tiene en la entrada de una señal seno obtiene una señal de salida que es seno; esto es análogo en las señales coseno, en general, la frecuencia y la fase sí cambian.

### 3.2.1. Valor eficaz y RMS

En electricidad y electrónica, corriente alterna, al valor cuadrático medio o RMS, de una corriente (o voltaje) variable se denomina valor eficaz y se define como el valor de una corriente rigurosamente constante (corriente continua) que al circular por una determinada resistencia óhmica pura produce los mismos

efectos caloríficos (igual potencia disipada) que dicha corriente variable (corriente alterna).

De esa forma una corriente eficaz es capaz de producir el mismo trabajo que su valor en corriente directa. El valor eficaz es independiente de la frecuencia o periodo de la señal. Al ser la intensidad de esta corriente variable una función continua  $i(t)$  se puede calcular así:

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} \quad \text{Ec. [3.6]}$$

Donde  $T$  es el periodo de la señal. Esto se puede aplicar a cualquier función.

Se miden a medir los parámetros de varias formas de onda, utilizando el osciloscopio. Colocar el control del generador *wave form* para una onda sinusoidal, como se muestra en la figura 52.

Figura 52. **Elección de la forma de la señal**

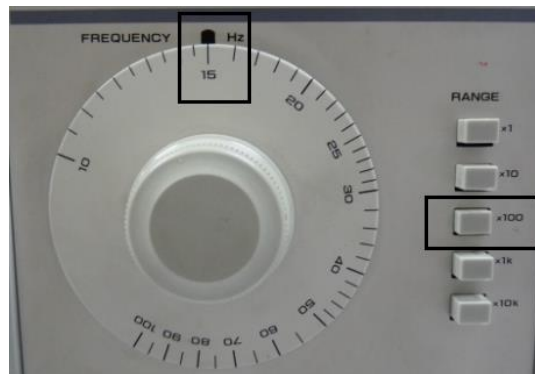


Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.



Colocar los controles *frequency* y *range* en una posición arbitraria, variando ambos controles, como se muestra en la figura 53.

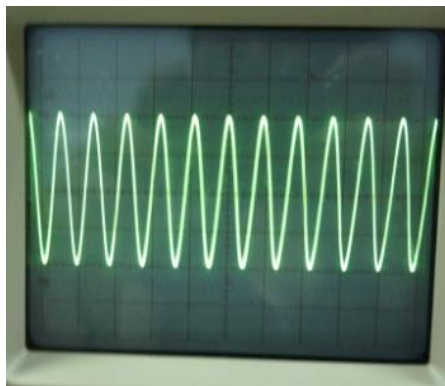
Figura 53. **Elección de la frecuencia y rango**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

Colocar el control de amplitud en una posición arbitraria, medir la amplitud y frecuencia de la señal. Ver la figura 54.

Figura 54. **Señal obtenida**

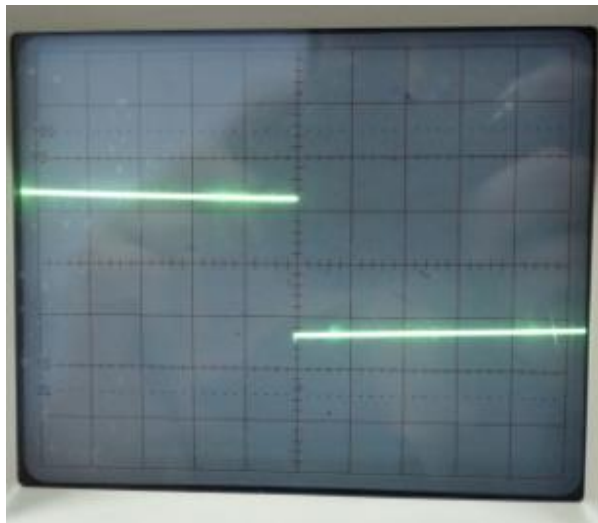


Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

### 3.3. Onda cuadrada

Una onda cuadrada que varía en el tiempo se muestra en la figura 55.

Figura 55. Onda cuadrada

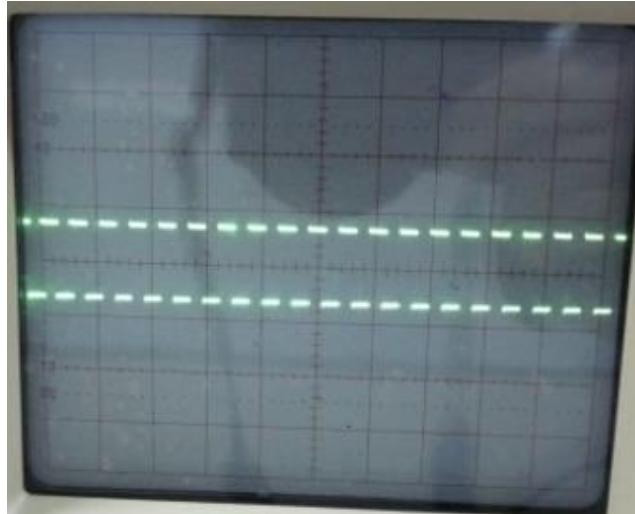


Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

Como la onda sinusoidal, la onda cuadrada se caracteriza por su amplitud y frecuencia. Un circuito lineal que tiene como entrada una onda cuadrada raramente responde con una onda cuadrada y su amplitud RMS es igual a su amplitud. Los bordes de una señal cuadrada no son perfectamente cuadrados; en un circuito electrónico típico, el tiempo de subida  $t_r$  varía de algunos microsegundos a nanosegundos. El tiempo de subida se define como el tiempo que requiere la señal para ir del 10 % al 90 % de su transición total.

Realizar el procedimiento anterior (onda sinusoidal) y medir la señal obtenida. Ver la figura 56.

Figura 56. **Señal obtenida para una onda cuadrada**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

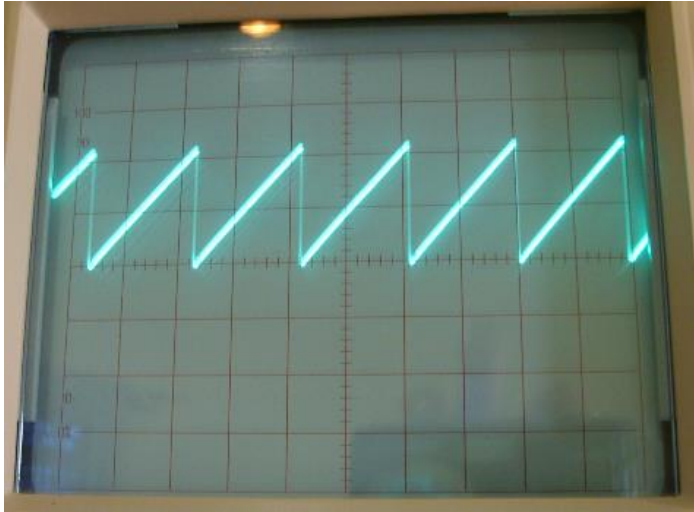
### 3.4. **Onda triangular**

Un tipo de onda no sinusoidal es la onda de sierra. La convención de una onda de sierra es que esta se levanta en forma de rampa y después baja rectamente. Sin embargo también existen ondas de sierra en donde las ondas bajan de forma de rampa y después suben rectamente.

#### 3.4.1. **Rampa**

Una rampa es una señal que representa un voltaje ascendente o descendente a velocidad constante. Puede ser infinito, pero algunas veces se aproxima a una rampa finita o a una rampa periódica o diente de sierra. Un diente de sierra es una rampa simétrica se muestra en la figura 57.

Figura 57. **Diente de sierra**



Fuente: Reparación de fuentes de PC. <http://www.delapc.com>. Consulta: mayo de 2013.

### 3.5. **Equipo y materiales para señales de C.A.**

A continuación se muestra una lista de los dispositivos que se utilizan en los experimentos con señales de corriente alterna.

Tabla XIII. **Equipo y materiales para señales en C.A**

Equipo	Dispositivos	Cantidad
Osciloscopio		1
Generador de señales		1
Puntas de osciloscopio		1
Conector banana-lagarto rojo		1
Conector banana-lagarto negro		1

Fuente: elaboración propia.

## 4. CAPACITORES E INDUCTORES

### 4.1. Capacitores

Un capacitor de  $C$  Faradios con  $V$  voltios entre sus terminales tiene  $Q$  Coulombios de carga almacenada en una de sus placas y  $-Q$  en otra.

$$Q = CV \quad \text{Ec. [4.1]}$$

Los capacitores son dispositivos que se pueden utilizar para construir divisores de voltaje dependientes de la frecuencia. Un capacitor no puede disipar potencia aunque fluya corriente a través de él, porque el voltaje entre sus terminales y la corriente están desfasados  $90^\circ$ . Derivando la ecuación anterior, se tiene:

$$I = C \frac{dV}{dt} \quad \text{Ec. [4.2]}$$

Un capacitor es más complicado que un resistor; la corriente no es proporcional al voltaje.

#### 4.1.1. Capacitores en serie

Para la capacitancia equivalente de varios capacitores en serie, se puede utilizar una forma análoga de la resistencia equivalente de resistores en paralelo.

$$V_{entrada} = V_1 + V_2 + V_3 + \dots \quad \text{Ec. [4.3]}$$

$$\frac{Q}{C_{eq}} = Q\left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots\right) \quad \text{Ec. [4.4]}$$

$$C_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots} \quad \text{Ec. [4.5]}$$

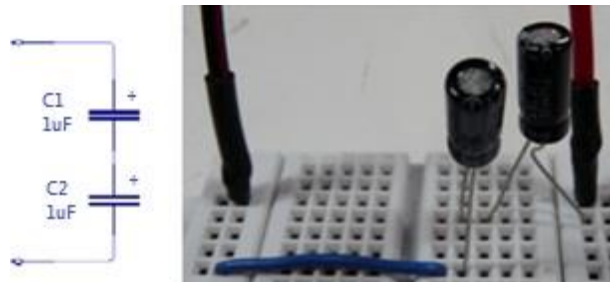
$$C_{eq} = \left(\sum_{k=1}^n C_k^{-1}\right)^{-1} \quad \text{Ec. [4.6]}$$

Para dos capacitores

$$C_{total} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \quad \text{Ec. [4.7]}$$

Se mide la capacitancia equivalente directa e indirectamente; ahora debe armarse el circuito como muestra la figura 58. Verificar que la franja gris del capacitor esté conectada a tierra. Utilizar capacitores de  $1 \mu F$ .

Figura 58. **Capacitores en serie**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

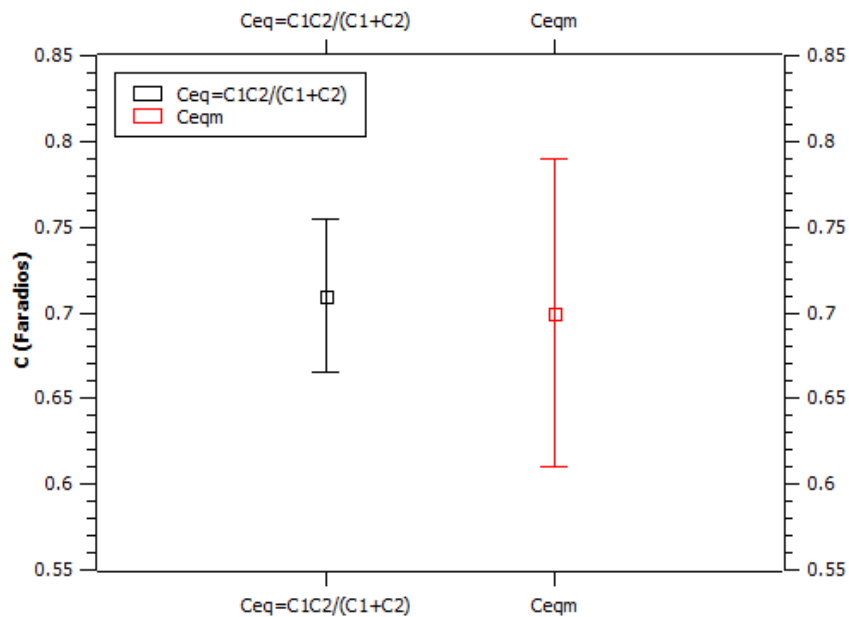
Utilizar un capacitmetro para medir la capacitancia de cada capacitor y la capacitancia equivalente. Para medir la capacitancia se conecta el capacitmetro de manera análoga a la conexión del ohmímetro y una resistencia. Ver la comparación de las capacitancias equivalentes en la tabla XIV y la figura 59.

Tabla XIV. **Capacitancia equivalente en serie**

$C_{eq} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$	$C_{eqm}$
$(0.71 \pm 0.05) \mu F$	$(0.7 \pm 0.1) \mu F$

Fuente: elaboración propia.

Figura 59. **Discrepancia de las capacitancia con circuito serie**



Fuente: elaboración propia, empleando Qtiplot.

### 4.1.2. Capacitores en paralelo

La capacitancia equivalente de muchos capacitores en paralelo es la suma de sus capacitancias individuales:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots \quad \text{Ec. [4.8]}$$

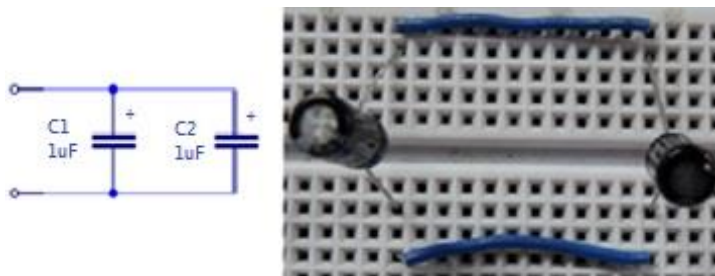
$$C_{eq}V = C_1V + C_2V + C_3V + \dots \quad \text{Ec. [4.9]}$$

$$C_{eq} = C_1 + C_2 + C_3 + \dots \quad \text{Ec. [4.10]}$$

$$C_{eq} = \sum_{k=1}^n C_k \quad \text{Ec. [4.11]}$$

Se va a medir la capacitancia equivalente directa e indirectamente; armar el circuito como se muestra la figura 60. Utilizar capacitores de  $1 \mu F$ .

Figura 60. **Capacitores en paralelo**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

Utilizar un capacitómetro para medir la capacitancia de cada capacitor y la capacitancia equivalente. Ver los resultados en la tabla XV y la figura 61.

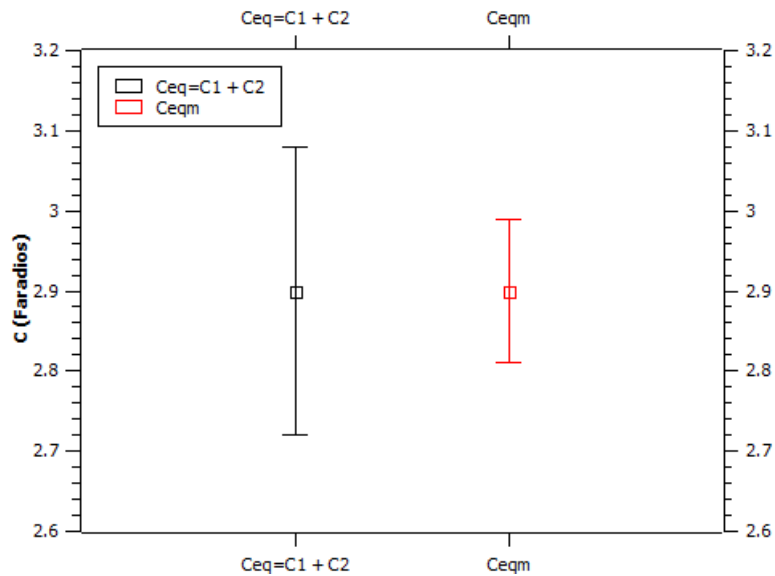


Tabla XV. **Capacitancia equivalente en paralelo**

$C_{eq} = C_1 + C_2$	$C_{eqm}$
$(2.9 \pm 0.2) \mu F$	$(2.9 \pm 0.1) \mu F$

Fuente: elaboración propia.

Figura 61. **Discrepancia de las capacitancias con circuito paralelo**



Fuente: elaboración propia, empleando Qtiplot.

## 4.2. Inductores

Los inductores están muy relacionados con los capacitores; el cambio de la corriente en el inductor depende del voltaje aplicado a través de él.

$$V = L \frac{dI}{dt}$$

Ec. [4.12]

$L$  es la inductancia y se mide en henrios. Colocar un voltaje a través de un inductor provoca que la corriente se eleve como una rampa; 1 voltio a través de 1 henrio produce un corriente que se incrementa a 1 amperio por segundo.

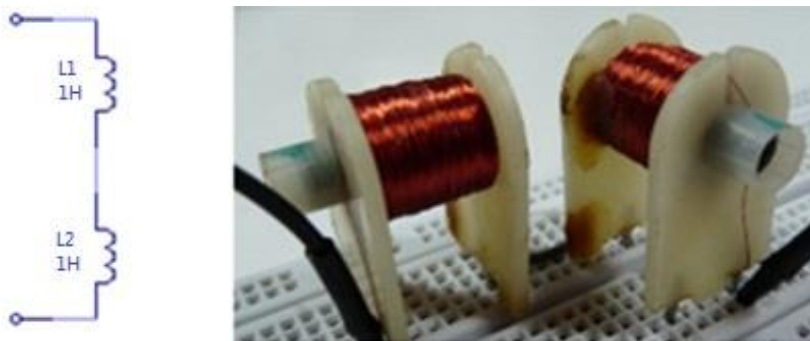
#### 4.2.1. Inductores en serie

La inductancia equivalente de inductores conectados en serie se calcula igual que la resistencia equivalente de resistores en serie:

$$L_{eq} = \sum_{k=1}^n L_k \quad \text{Ec. [4.13]}$$

Se va a medir la inductancia equivalente directa e indirectamente. Conectar el circuito como muestra la figura 62. Comparar las medidas de la inductancia. Ver la tabla XVI y la figura 63.

Figura 62. **Inductores en serie**



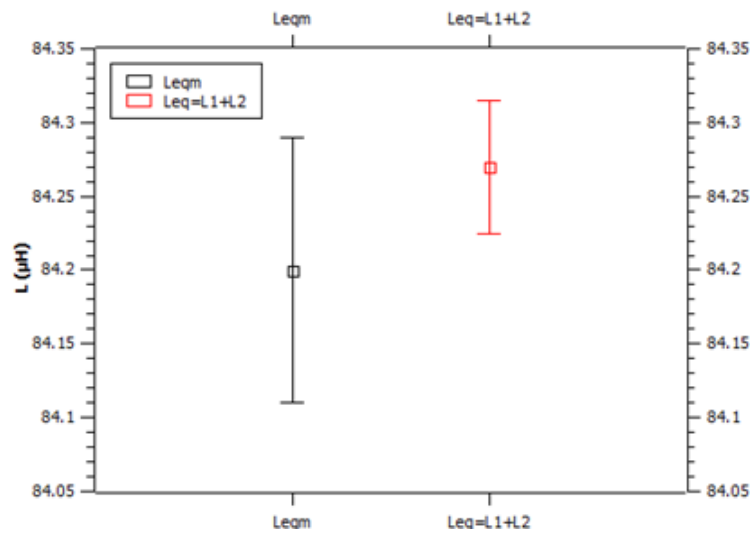
Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

Tabla XVI. **Inductancia equivalente en serie**

$L_{eq} = L_1 + L_2$	$L_{eqm}$
$(84.2 \pm 0.1) \mu H$	$(84.27 \pm 0.05) \mu H$

Fuente: elaboración propia.

Figura 63. **Discrepancia de las inductancias en circuito serie**



Fuente: elaboración propia, empleando Qtiplot.

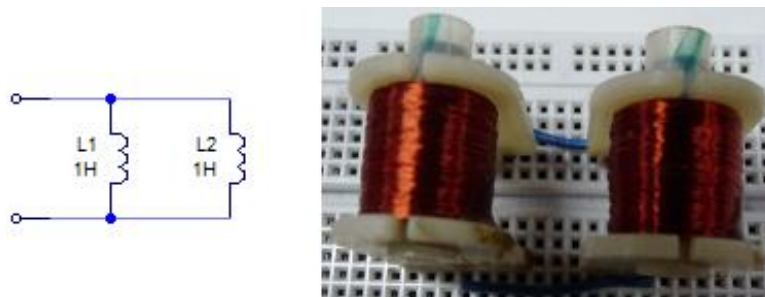
#### 4.2.2. Inductores en paralelo

La inductancia equivalente de inductores conectados en paralelo, se calcula igual que la resistencia equivalente de resistores en paralelo:

$$L_{eq} = \left( \sum_{k=1}^n L_k^{-1} \right)^{-1} \quad \text{Ec. [4.14]}$$

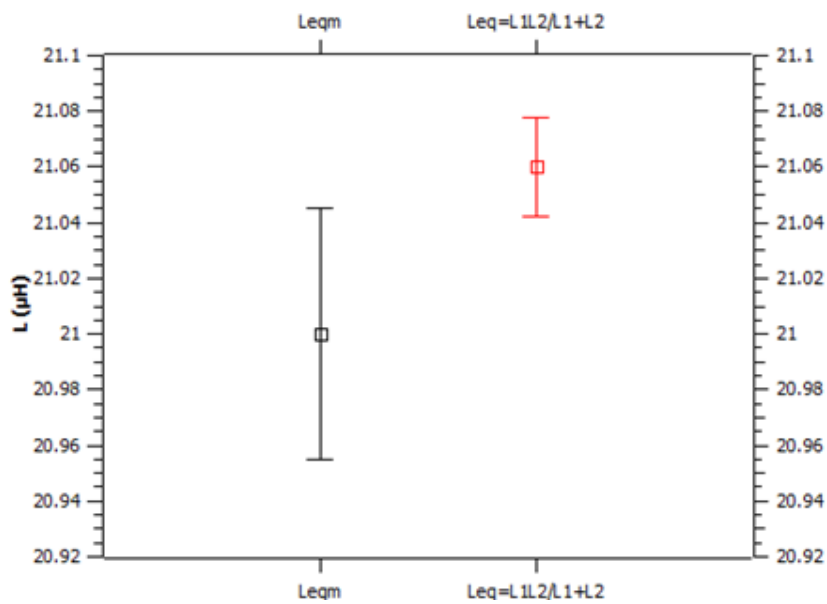
Se mide la inductancia equivalente directa e indirectamente. Conectar el circuito como muestra la figura 64. Comparar las medidas de la inductancia. Ver la tabla XVII y la figura 65

Figura 64. **Inductores en paralelo**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

Figura 65. **Discrepancia de las inductancias en circuito paralelo**



Fuente: elaboración propia, empleando Qtiplot.

Tabla XVII. **Inductancia equivalente en paralelo**

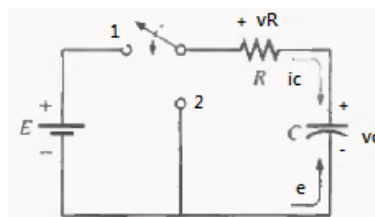
$L_{eq} = \frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2}$	$L_{eqm}$
$(21.06 \pm 0.02) \mu H$	$(21.00 \pm 0.05) \mu H$

Fuente: elaboración propia.

### 4.3. Medida experimental de la capacitancia

Una red básica de carga es un circuito formado por un resistor conectado en serie con un capacitor; al circuito se le aplica un voltaje de entrada. La red básica de carga se muestra en la figura 66, cuando se cierra el interruptor fluyen electrones de la placa superior a la placa inferior del capacitor. La transferencia de electrones es muy rápida al principio; disminuye su velocidad a medida que el voltaje del capacitor se aproxima a su voltaje máximo.

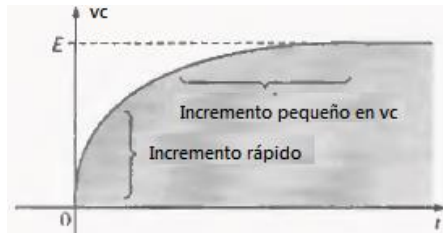
Figura 66. **Red básica de carga**



Fuente: BOYESTAD, Robert. *Introducción al análisis de circuitos*. p. 390.

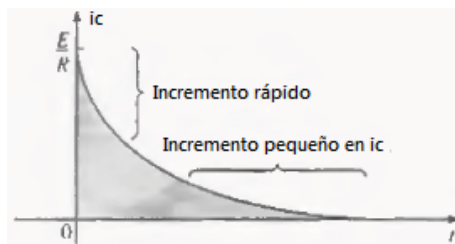
Cuando el voltaje del capacitor es igual a su voltaje máximo, la carga neta está determinada por la ecuación [4.1]. El cambio en la corriente y el voltaje en el capacitor se muestran en las figuras 67 y 68.

Figura 67.  $v_c$  durante la fase de carga



Fuente: BOYLESTAD, Robert. *Introducción al análisis de circuitos*. p. 390.

Figura 68.  $i_c$  durante la fase de carga



Fuente: BOYLESTAD, Robert. *Introducción al análisis de circuitos*. p. 390.

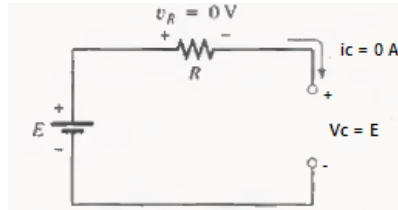
A medida que la velocidad de la corriente disminuye, actuará de la misma forma la carga y el voltaje. Eventualmente no habrá flujo de cargas a través del capacitor y el voltaje no cambiará en amplitud (voltaje máximo). En este punto el capacitor adquiere las propiedades de un circuito abierto. Ver la figura 69.

En el momento en que se cierra el interruptor, el capacitor se comporta como un cortocircuito, como muestra la figura 70. La corriente y el voltaje en el capacitor se pueden representar de la siguiente forma:

$$v_c = v_{\max}(1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \quad \text{Ec. [4.15]}$$

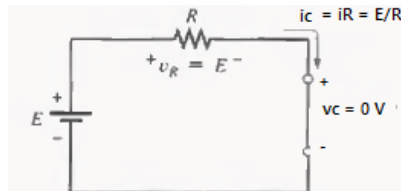
$$i_c = i_{max} e^{-\frac{t}{RC}} \quad \text{Ec. [4.16]}$$

Figura 69. **Equivalente de circuito abierto para un capacitor**



Fuente: BOYLESTAD, Robert. *Introducción al análisis de circuitos*. p. 390.

Figura 70. **Equivalente de cortocircuito para un capacitor**



Fuente: BOYLESTAD, Robert. *Introducción al análisis de circuitos*. p. 390.

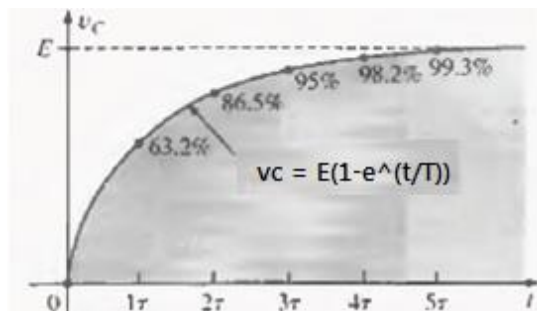
El factor  $RC$  se representa por la letra tau y se denomina constante de tiempo. Si el capacitor está cargado cuando  $v_c = v_{max}$ , se puede decir que el factor  $1 - e^{-\frac{t}{T}}$  es aproximadamente igual a 1, entonces el tiempo de carga es cinco veces tau:

$$\tau = RC \quad \text{Ec. [4.17]}$$

$$t_{carga} \cong 5\tau \quad \text{Ec. [4.18]}$$

La figura 71 muestra  $v_c$  en función del tiempo, durante la fase de carga, la red de la figura 66 está diseñada para cargar y descargar el capacitor.

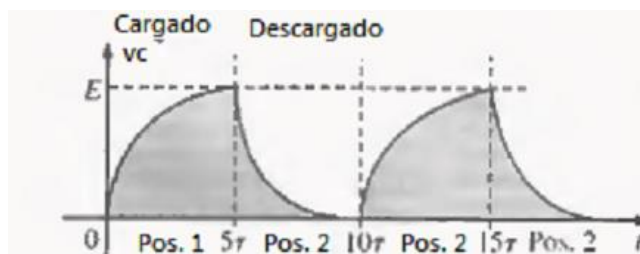
Figura 71.  $v_c$  durante la fase de carga



Fuente: BOYLESTAD, Robert. *Introducción al análisis de circuitos*. p. 393.

El capacitor se descarga también después de cinco constantes de tiempo, la polaridad de  $v_c$  es la misma en ambas fases; la curva completa se sitúa por encima del eje. A este régimen de funcionamiento se le llama transitorio. Ver la figura 72. Se puede a ver en el osciloscopio el transitorio del capacitor y luego se compara con la función en la entrada de la red básica de carga.

Figura 72.  $v_c(t)$  para los ciclos de carga y descarga



Fuente: BOYLESTAD, Robert. *Introducción al análisis de circuitos*. p. 395.



Calcular el tiempo de carga del capacitor para medir indirectamente su capacitancia, para esto se aplica en la entrada un voltaje directo.

Armar el circuito como muestra la figura 73, utilizar un capacitor de  $1 \mu F$  (u otro valor de capacitancia), un resistor de  $1 k\Omega$  y una señal cuadrada arbitraria en la entrada, variar la frecuencia si es necesario.

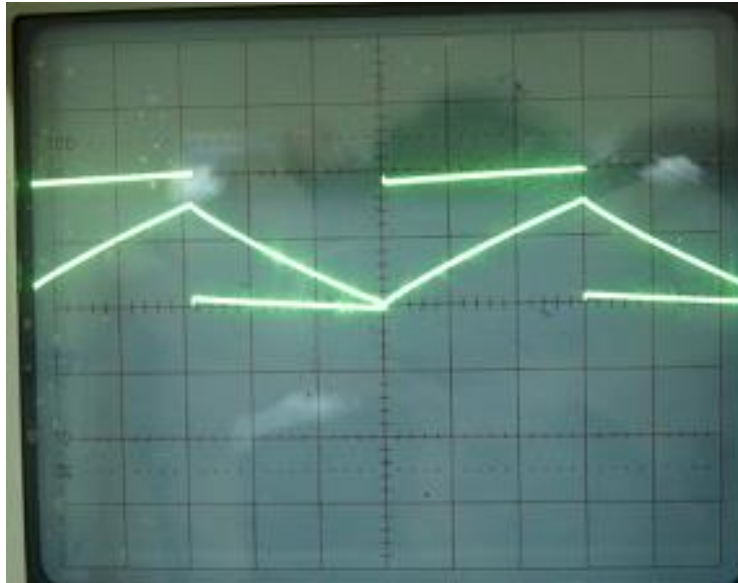
Figura 73. **Red básica de carga con capacitor de  $1 \mu F$**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

Colocar el selector de canales de osciloscopio en dual para comparar las señales de entrada y salida. (Ver la figura 74).

Figura 74. **Comparación de señales de entrada y salida en la red básica de carga**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

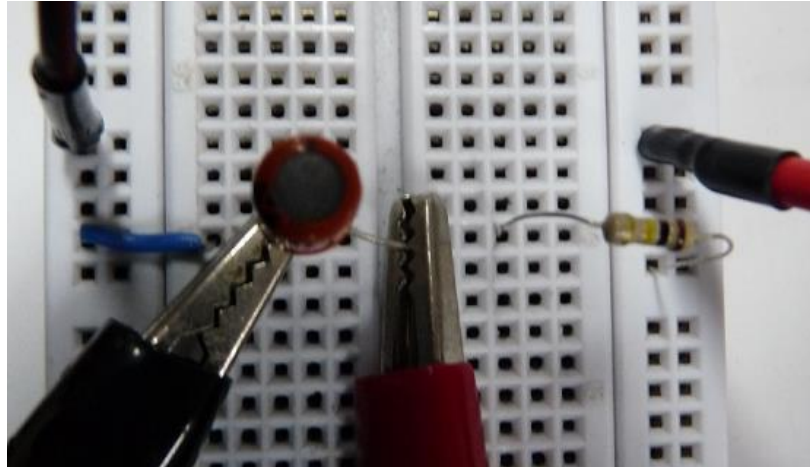
En el siguiente experimento se va a medir el tiempo de carga del capacitor para calcular su capacitancia, utilizando la siguiente ecuación:

$$C = \frac{t_{carga}}{5R} \quad \text{Ec. [4.19]}$$

Debe utilizarse un capacitor de  $100 \mu F$  y una resistencia de  $100 k\Omega$ . Aplicar 6 V en la entrada del circuito con una fuente de voltaje directo.

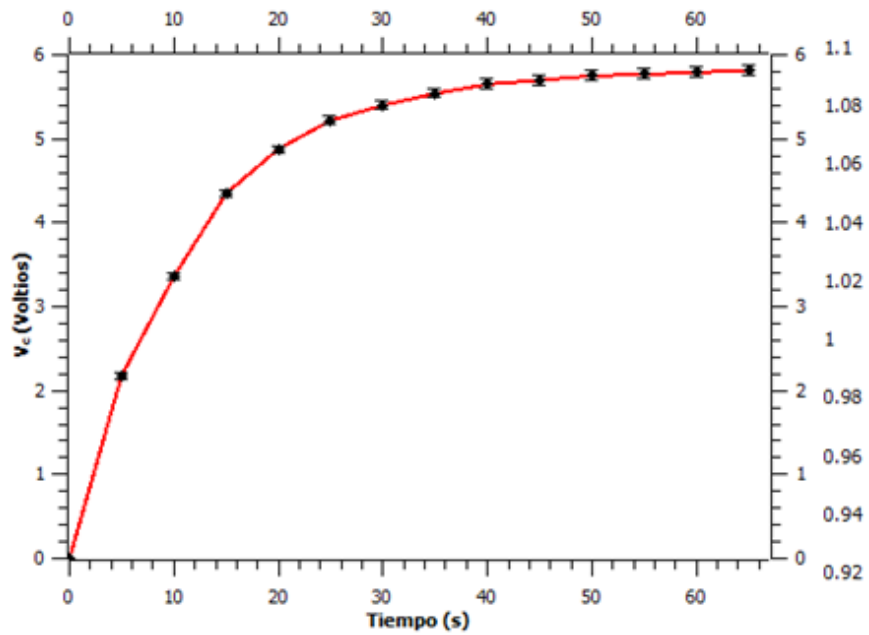
Medir la resistencia, el voltaje de entrada y del capacitor para varios instantes de tiempo arbitrarios y graficar  $v_c$  en función de  $t$ . Ver las figuras 75 y 76.

Figura 75. Red básica de carga con  $100\ \mu\text{F}$



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

Figura 76.  $v_c$  en función del tiempo



Fuente: elaboración propia, empleando Qtiplot.

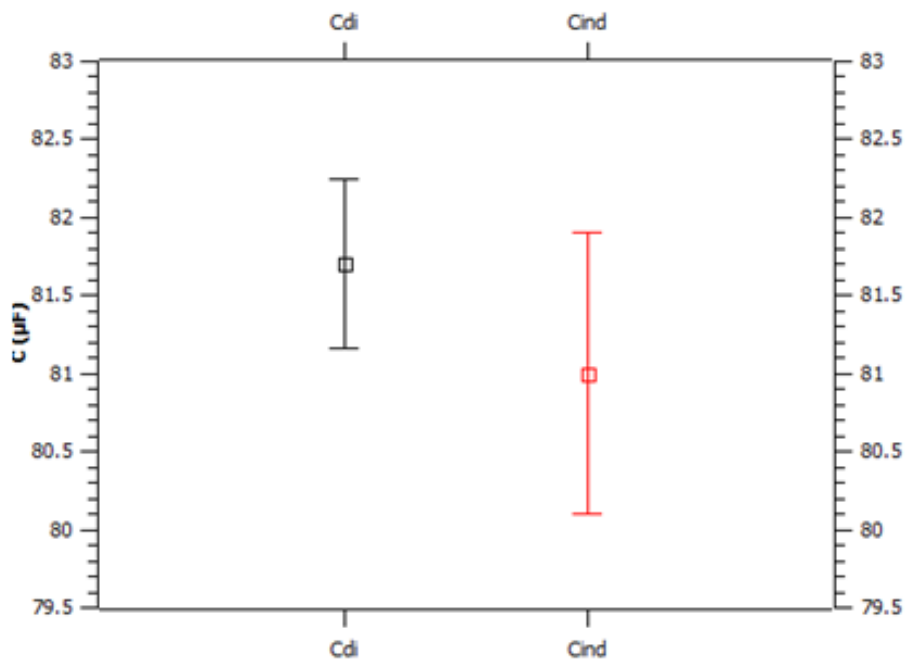
Medir el tiempo para el 90 % (en realidad el capacitor nunca va a tener un voltaje máximo igual al de la fuente) del voltaje máximo y utilizar la ecuación [4.17] para calcular C; comparar las medidas directa e indirecta. Ver la tabla XVIII y la figura 77.

Tabla XVIII. **Comparación de la medida de la capacitancia**

$C_{di}$	$C_{ind}$
$(81.7 \pm 0.6) \mu F$	$(81 \pm 1) \mu F$

Fuente: elaboración propia.

Figura 77. **Discrepancia de la medida de la capacitancia**

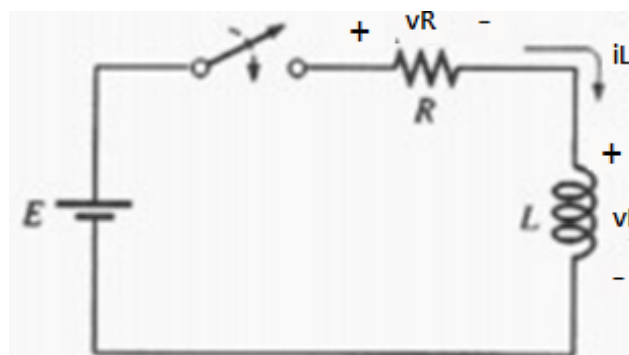


Fuente: elaboración propia, empleando Qtiplot.

#### 4.4. Medida experimental de la inductancia

El ciclo de almacenamiento de energía de un inductor se puede describir con una red básica RL transitoria; figura 78.

Figura 78. Red básica RL



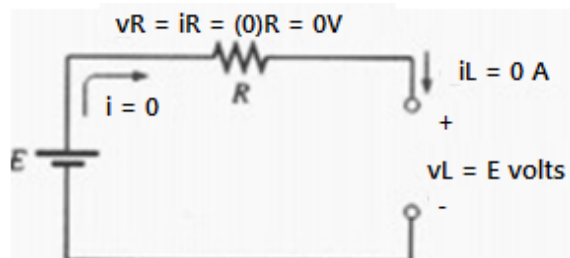
Fuente: BOYLESTAD, Robert. *Introducción al análisis de circuitos*. p. 381.

En el instante en el que el interruptor se cierra, la inductancia de la bobina impedirá un cambio instantáneo de corriente a través de esta. La caída de potencial  $v_L$  será igual al voltaje aplicado.

La corriente  $i_L$  crecerá desde cero, estableciendo una caída de voltaje en el resistor y una correspondiente caída en  $v_L$ . La corriente aumenta hasta que el voltaje en el resistor sea el mismo que el de la fuente.

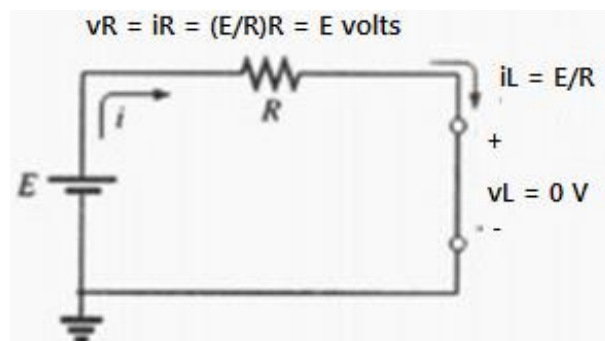
El inductor se comporta de manera opuesta al capacitor en cada etapa; un cortocircuito abierto cuando el interruptor se cierra y un cortocircuito en estado estable. Ver las figuras 79 y 80.

Figura 79. **El inductor en el instante en que se cierra el interruptor**



Fuente: BOYLESTAD, Robert. *Introducción al análisis de circuitos*. p. 381.

Figura 80. **El inductor en estado estable**



Fuente: BOYLESTAD, Robert. *Introducción al análisis de circuitos*. p. 381.

Las ecuaciones matemáticas para los voltajes y la corriente para la fase de almacenamiento son similares a las de la red RC.

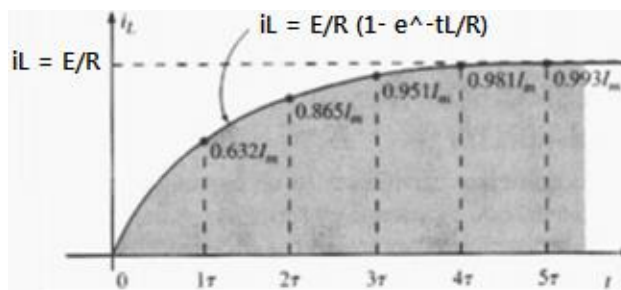
$$i_L = i_{max}(1 - e^{-\frac{t}{T}}) \quad \text{Ec. [4.20]}$$

$$\tau = \frac{L}{R} \quad \text{Ec. [4.21]}$$

$$v_L = v_{max} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad \text{Ec. [4.22]}$$

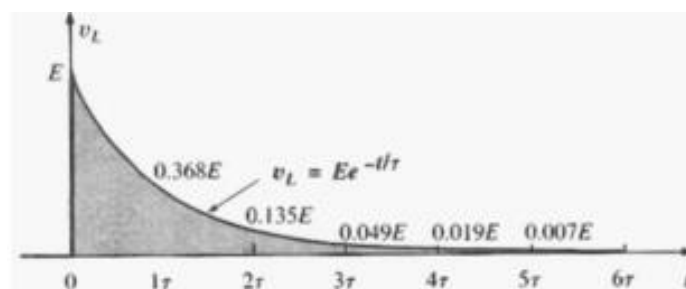
La gráficas de las ecuaciones (figuras 81 y 82) muestran que para la corriente, la razón de cambio disminuye en el tiempo y que el voltaje en el inductor disminuirá a cero voltios a la misma razón que la corriente se dirige a su valor máximo; esto también es  $5\tau$  igual que en el capacitor. La fase de decaimiento es opuesta a la de almacenamiento y es análoga a la de descarga en el capacitor.

Figura 81.  $i_L$  en función del tiempo



Fuente: BOYLESTAD, Robert. *Introducción al análisis de circuitos*. p. 382.

Figura 82.  $v_L$  en función del tiempo



Fuente: BOYLESTAD, Robert. *Introducción al análisis de circuitos*. p. 384.

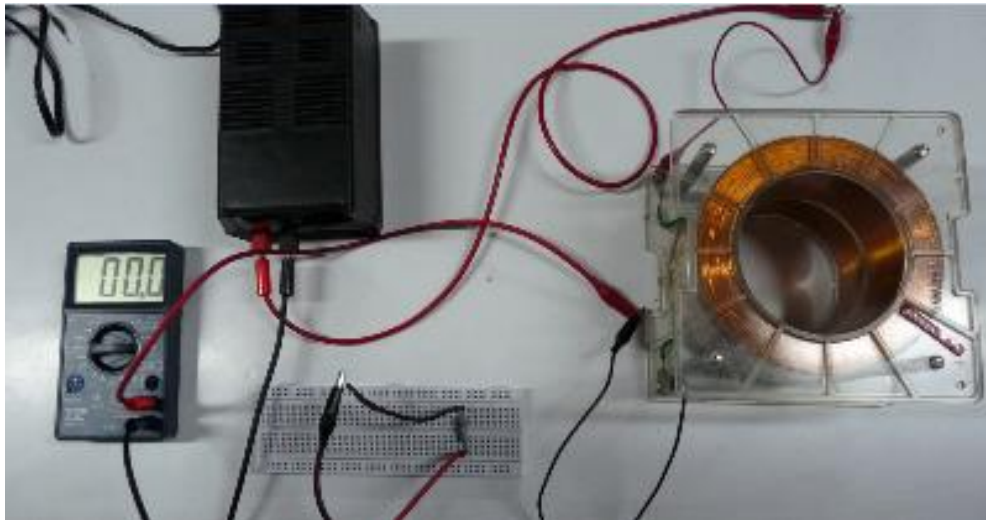
En el siguiente experimento se va a medir el tiempo de fase de almacenamiento del inductor para calcular su inductancia; utilizando la siguiente ecuación:

$$L = \frac{R t_{al}}{5} \quad \text{Ec. [4.23]}$$

Utilizar un capacitor con inductancia pequeña y una resistencia de menos de  $1 \Omega$ . Aplicar 3 V en la entrada del circuito con una fuente de voltaje directo.

Medir la resistencia y la corriente a través del inductor para varios instantes de tiempos arbitrarios y graficar  $i_L$  en función de  $t$ . Ver las figuras 83 y 84.

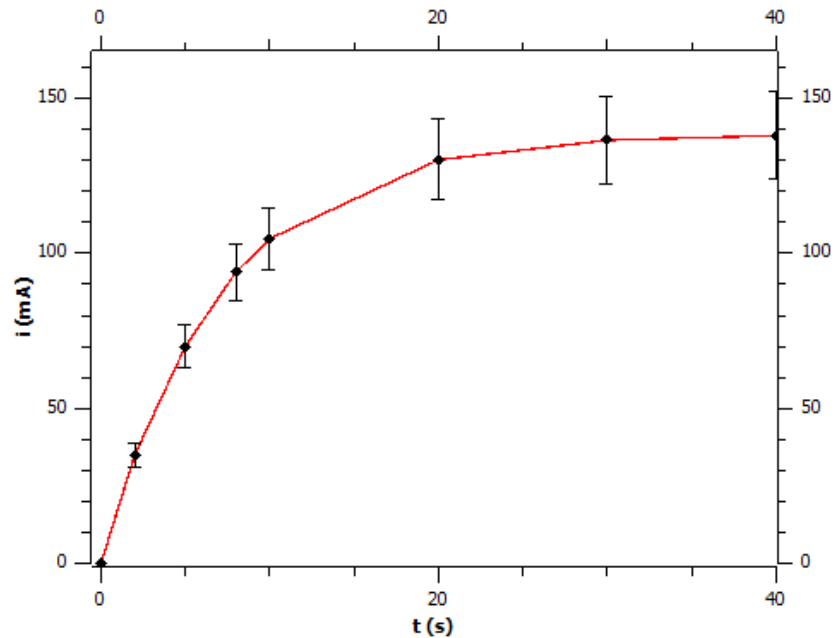
Figura 83. **Red básica de carga con L = 1H**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.



Figura 84.  $i_L$  en función del tiempo



Fuente: elaboración propia, empleando Qtiplot.

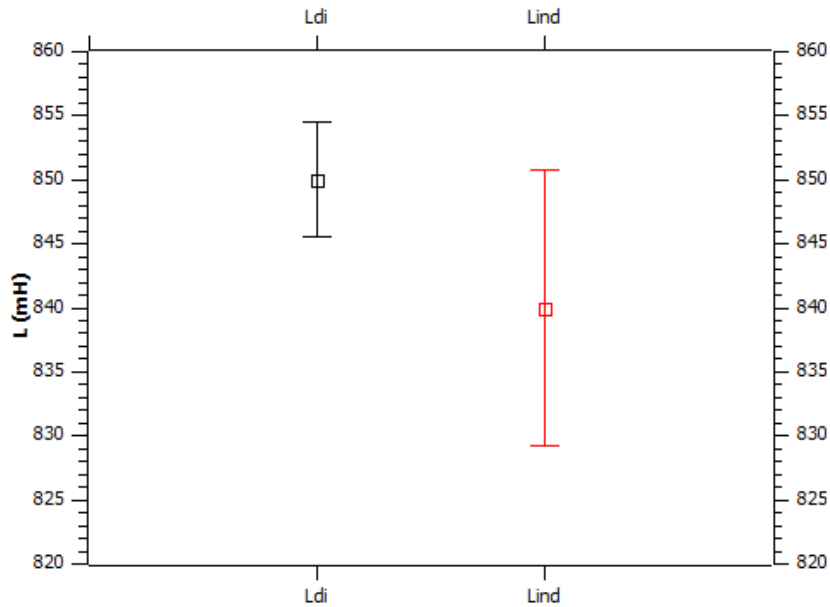
Medir el tiempo para el 90 % de la corriente máxima y utilizar la ecuación [4.21] para calcular  $L$ ; comparar las medidas directa e indirecta. Ver la tabla XIX y la figura 85.

Tabla XIX. **Comparación de la medida de la capacitancia**

$L_{di}$	$L_{ind}$
$(850 \pm 5) \text{ mH}$	$(840 \pm 12) \text{ mH}$

Fuente: elaboración propia.

Figura 85. **Discrepancia de la medida de la inductancia**



Fuente: elaboración propia, empleando Qtiplot.

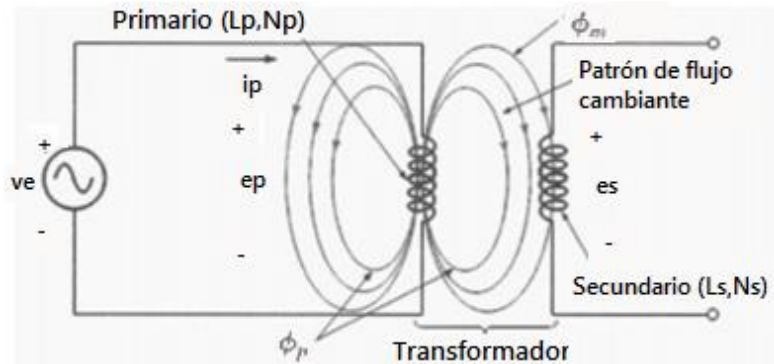
#### 4.5. Transformadores

Un transformador se construye con dos bobinas, colocadas de manera que el flujo variable desarrollado por una bobina enlazará a otra, como se muestra la figura 86.

Esto resultará en un voltaje inducido en cada bobina; se le llama primario a la bobina donde se aplica la fuente, y la bobina donde es aplicada la carga se denomina secundario.

Tienen dos funciones importantes: cambiar la línea de voltaje alterno a un voltaje que pueda ser usado en un circuito y aísla el dispositivo electrónico de la conexión a la línea de poder.

Figura 86. Transformador



Fuente: BOYLESTAD, Robert. *Introducción al análisis de circuitos*. p. 935.

De la ley de Faraday se tiene que el voltaje inducido en el primario está directamente relacionado con el número de vueltas en este y con la razón de cambio de flujo magnético.

$$e_p = N_p \frac{d\phi_p}{dt} \quad \text{Ec. [4.24]}$$

El voltaje inducido en el secundario se determina mediante la ecuación [4.23], donde  $N_s$  es el número de vueltas en el devanado secundario y  $\phi_m$  es la parte del flujo magnético que enlaza al devanado secundario. Si el flujo total que enlaza al primario enlaza al secundario, entonces lo representa la ecuación [4.26]:

$$e_s = N_s \frac{d\phi_m}{dt} \quad \text{Ec. [4.25]}$$

$$e_s = N_s \frac{d\phi_p}{dt} \quad \text{Ec. [4.26]}$$

El coeficiente de acoplamiento ( $k$ ) entre dos bobinas está determinado por:

$$k = \frac{\phi_m}{\phi_p} \quad \text{Ec. [4.27]}$$

Cuando la corriente  $i_p$  a través del circuito primario del transformador con núcleo de hierro es máxima, el flujo que enlaza a las dos bobinas también es máximo. La magnitud del flujo es directamente proporcional a la corriente a través de los devanados del primario. Por lo tanto ambos están en fase, y para entradas sinusoidales, la magnitud resulta también como una senoide.

$$i_p = \sqrt{2}I_p \sin \omega t \quad \text{Ec. [4.28]}$$

$$\phi_m = \sin \omega t \quad \text{Ec. [4.29]}$$

El voltaje inducido adelanta a la corriente en la bobina del primario por  $90^\circ$ .

$$e_p = \omega N_p \phi_m \sin(\omega t + 90) \quad \text{Ec. [4.30]}$$

Su valor eficaz es:

$$E_p = \frac{\omega N_p \phi_m}{\sqrt{2}} = 4.44f N_p \phi_m \quad \text{Ec. [4.31]}$$

El valor eficaz del voltaje en el secundario es:

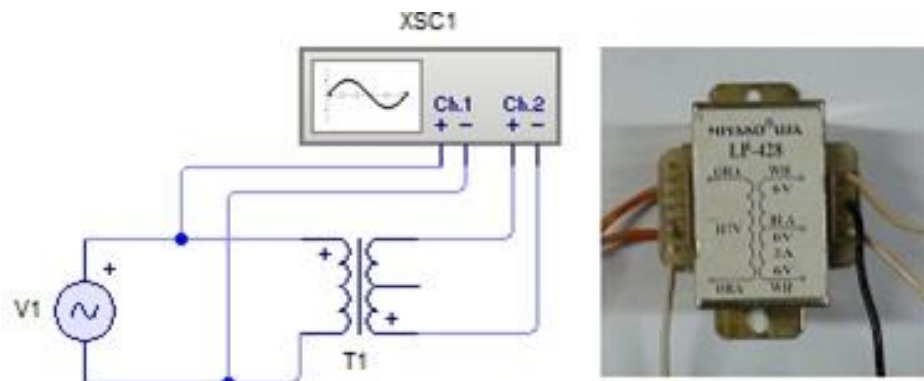
$$E_s = 4.44f N_s \phi_m \quad \text{Ec. [4.32]}$$

La razón de las magnitudes de los voltajes inducidos es igual a la razón del número de vueltas correspondientes; se denomina razón de transformación y se representa por la letra  $a$  minúscula. Si  $a < 1$ , el transformador se denomina de elevación y si  $a > 1$ , se llama transformador de disminución:

$$a = \frac{E_p}{E_s} = \frac{N_p}{N_s} \quad \text{Ec. [4.33]}$$

En el siguiente experimento se va a medir  $E_s$  para encontrar la razón de transformación de un transformador; dependiendo de  $a$  va a saberse si es un transformador de elevación o de disminución. Conectar el circuito como se muestra en la figura 87.

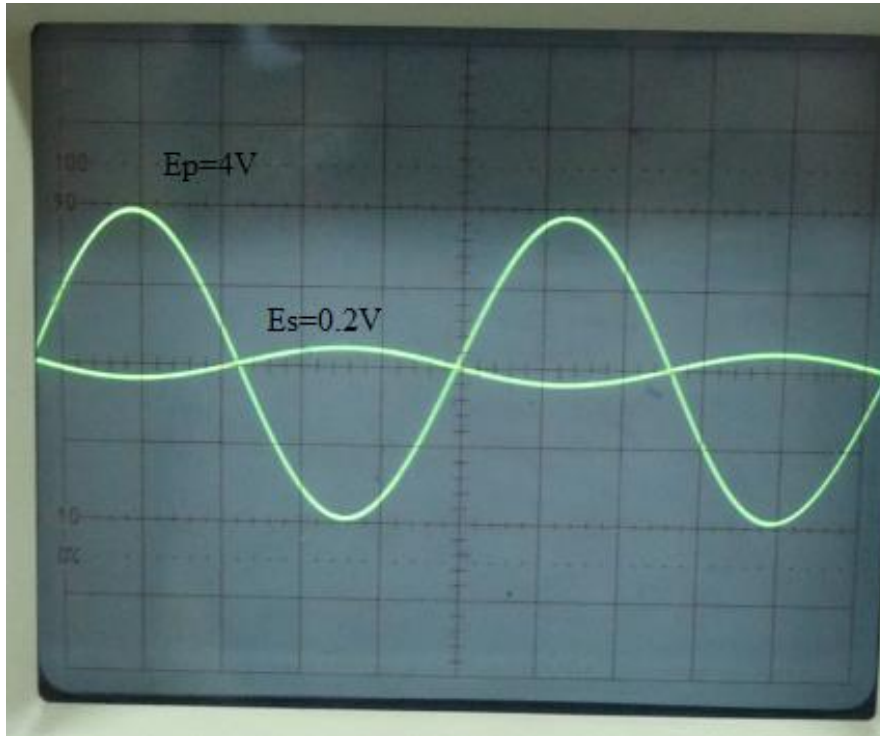
Figura 87. **Medición del voltaje de entrada y salida de un transformador**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

Medir los voltajes de entrada y salida y compararlos utilizando el dual del osciloscopio. (Ver la figura 88).

Figura 88. **Media de los voltajes de entra y salida con el osciloscopio**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

Con la ecuación [4.31] se determina que  $a = 20$ ; como  $a > 1$  se está utilizando un transformador de disminución; por lo tanto  $E_s < E_p$ . Además, el transformador produce una diferencia de fase entre las señales de entrada y salida.

#### 4.6. **Equipo y materiales para capacitores e inductores**

A continuación se muestra una lista de los dispositivos que se utilizan en los experimentos con capacitores e inductores.

Tabla XX. **Equipo y materiales para capacitores e inductores**

Equipo	Dispositivos	Cantidad
Fuente de voltaje directo		1
Multímetro digital		2
<i>Protoboard</i>		1
Osciloscopio		1
Generador de señales		1
Cronómetro		1
Medidor de inductancia y capacitancia		1
Conector banana-lagarto rojo		4
Conector banana-lagarto negro		4
Conector lagarto-lagarto rojo		3
Conector lagarto-lagarto negro		3
Punta para osciloscopio		2
Alambre para conectar en el <i>protoboard</i>		
	Capacitor $1 \mu F$	2
	Capacitor $100 \mu F$	1
	Inductor $100 mH$	2
	Inductor $1 H$	1
	Resistor $100 k\Omega$	1
	Resistor $0.1 \Omega$	1
	Resistor $1 k\Omega$	1

Fuente: elaboración propia.



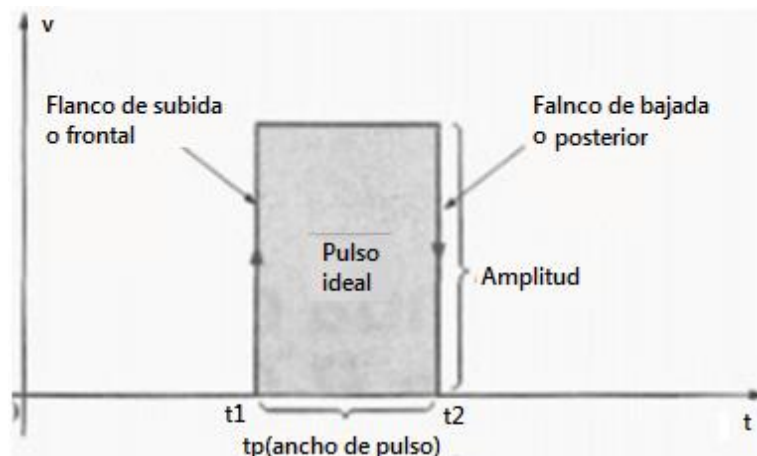


## 5. CIRCUITOS DE CORRIENTE ALTERNA

### 5.1. Forma de onda de pulso

Una forma de onda de pulso ideal tiene las características que se muestra en la figura 89.

Figura 89. Forma de onda de pulso ideal

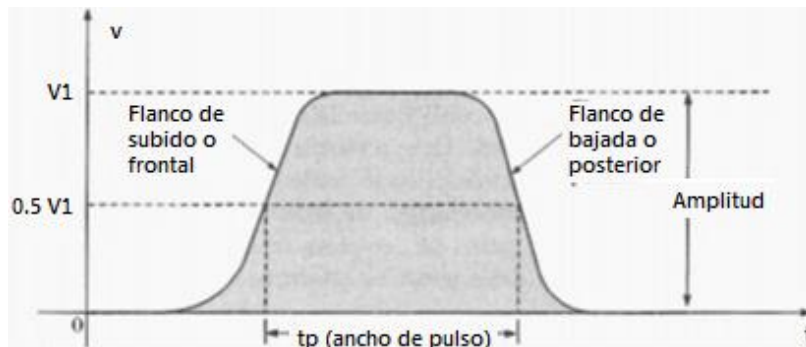


Fuente: BOYLESTAD, Robert. *Introducción al análisis de circuitos*. p. 1094.

Los elementos reactivos de una red se utilizan para prevenir cambios instantáneos en el voltaje y la corriente; estos se establecen en una pendiente a ambos flancos de la forma de onda; el flanco de subida y el de bajada, como se muestra en la figura 90.

Un pulso está definido por su amplitud y ancho de pulso, se puede generar un tren de pulsos en cuyo caso se habla de la frecuencia.

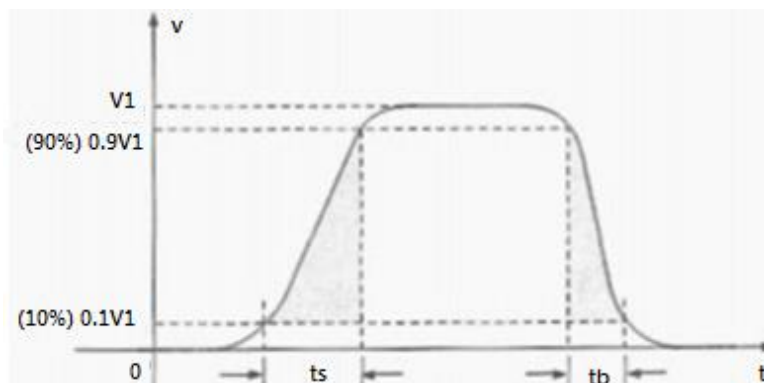
Figura 90. **Forma de onda de pulso real**



Fuente: BOYLESTAD, Robert. *Introducción al análisis de circuitos*. p. 1094.

El tiempo requerido para que el pulso se desplace es importante; el tiempo de subida ( $t_r$ ) y el tiempo de bajada ( $t_f$ ) se definen por los niveles del 10 % y el 90 %, como lo muestra la figura 91.

Figura 91. **Definición de  $t_r$  y  $t_f$**

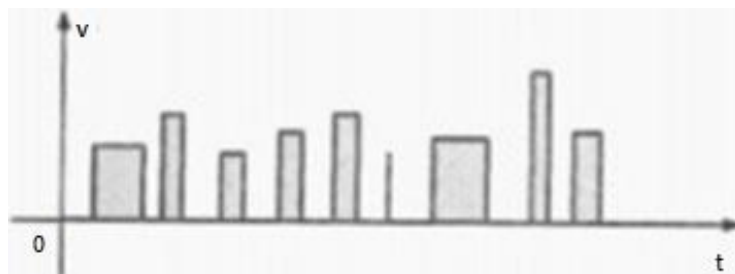


Fuente: BOYLESTAD, Robert. *Introducción al análisis de circuitos*. p. 1096.

Una serie de pulsos como los de la figura 92, se denomina tren de pulsos. Los anchos y las alturas variables contienen información que puede ser

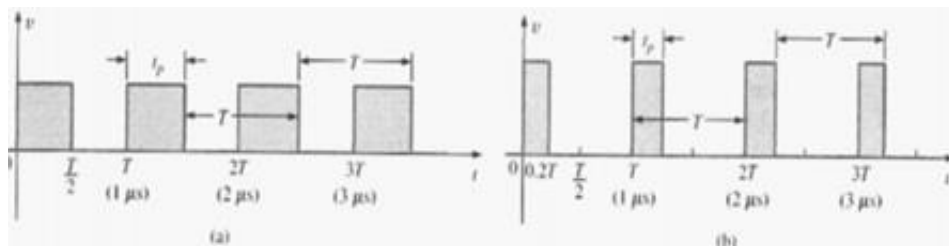
descifrada en el receptor. Si el patrón se repite de manera periódica, como se muestra en la figura 93, el resultado se llama tren de pulsos periódico. El período ( $T$ ) del tren de pulsos se define como la diferencia de tiempo entre dos puntos cualesquiera sobre el tren de pulsos.

Figura 92. **Tren de pulsos**



Fuente: BOYLESTAD, Robert. *Introducción al análisis de circuitos*. p. 1098.

Figura 93. **Trenes de pulsos periódicos**

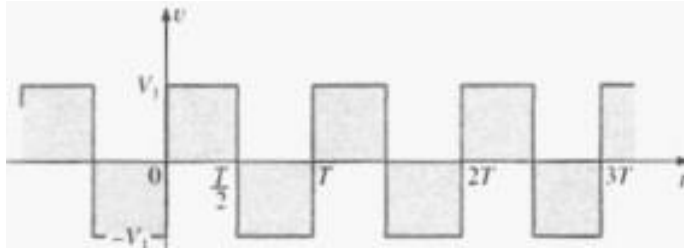


Fuente: BOYLESTAD, Robert. *Introducción al análisis de circuitos*. p. 1096.

## 5.2. Circuito RC

La onda cuadrada es una forma de onda de pulso; ver la figura 94. Es una señal que varía en el tiempo, como una sinusoidal, y se caracteriza por su amplitud y frecuencia.

Figura 94. **Onda cuadrada periódica**

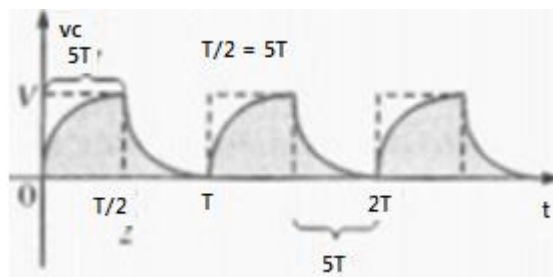


Fuente: BOYLESTAD, Robert. *Introducción al análisis de circuitos*. p. 1104.

Si esta forma de onda cuadrada se aplica a un circuito RC, el período de la onda cuadrada puede tener un efecto pronunciado sobre la forma de onda resultante  $v_c$ . Se supone se han establecido condiciones de estado estable después de que ha pasado un período de cinco constantes de tiempo. Las formas de onda desarrolladas en el capacitor pueden ser clasificadas en tres tipos fundamentales que se presentan en las siguientes figuras:

$$\frac{T}{2} > 5\tau \quad \text{Ec. [5.1]}$$

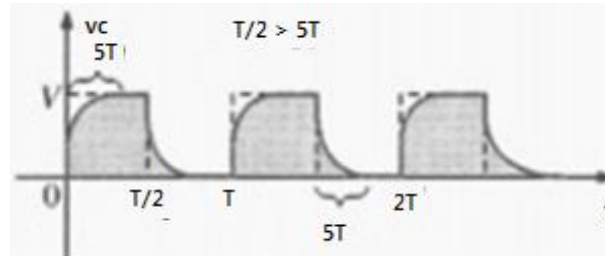
Figura 95.  **$v_c$  para  $t/2 = 5\tau$**



Fuente: BOYLESTAD, Robert. *Introducción al análisis de circuitos*. p. 1106.

$$\frac{T}{2} = 5\tau \quad \text{Ec. [5.2]}$$

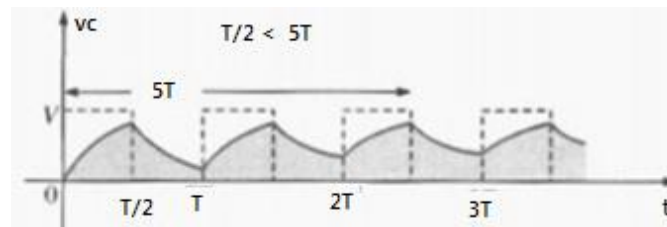
Figura 96.  $v_c$  para  $T/2 > 5\tau$



Fuente: BOYLESTAD, Robert. *Introducción al análisis de circuitos*. p. 1105.

$$\frac{T}{2} < 5\tau \quad \text{Ec. [5.3]}$$

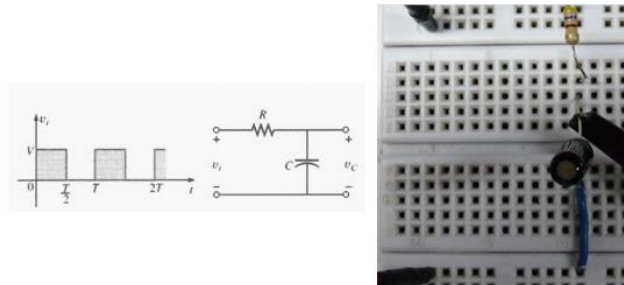
Figura 97.  $v_c$  para  $T/2 < 5\tau$



Fuente: BOYLESTAD, Robert. *Introducción al análisis de circuitos*. p. 1106.

Armar el circuito y aplicar una onda cuadrada en la entrada, según las tres condiciones anteriores, como se muestra en la figura 98. Utilizar  $C = 1 \mu F$  y  $R = 470 \Omega$ , asegurarse de conectar la pata del capacitor con la franja negativa a tierra.

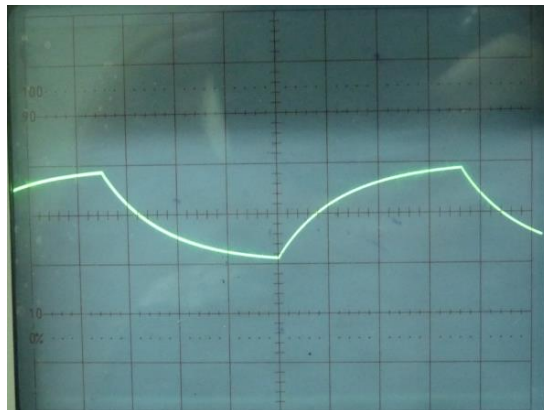
Figura 98. **Aplicación de una onda cuadrada a la red RC**



Fuente: BOYLESTAD, Robert. *Introducción al análisis de circuitos*. p. 1105.

Para  $T = 10 \tau$  el voltaje  $v_c$  alcanza su valor máximo justo antes del principio de la fase de descarga.

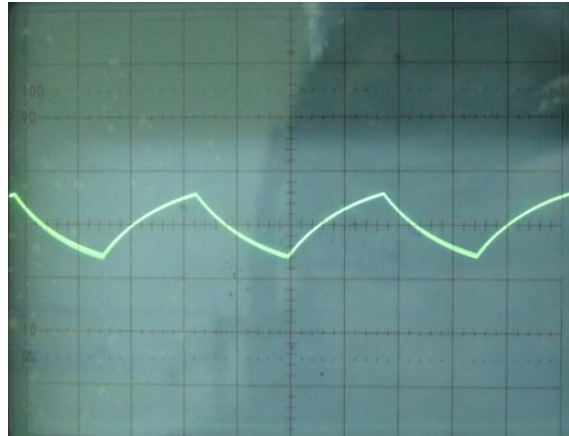
Figura 99. **Respuesta de una red RC a una onda cuadrada**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

Observar la respuesta transitoria para  $T < 10 \tau$  y  $T > 10 \tau$ . Para el primer caso  $v_c$  no alcanza su valor máximo en el primer pulso y la fase de descarga no regresa a cero voltios. Ver la figura 100.

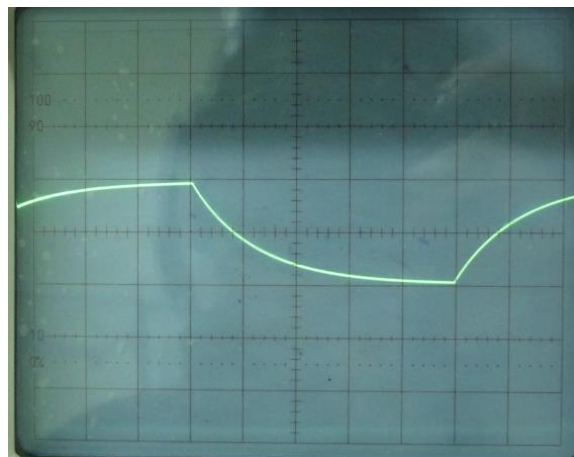
Figura 100. **Respuesta de la red RC para  $T < 10\tau$**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

En el último segundo caso el capacitor puede cargarse a su valor de estado estable antes de  $t = \frac{T}{2}$ . Ver la figura 101.

Figura 101. **Respuesta de la red RC para  $T > 10\tau$**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

### 5.3. Circuito RL

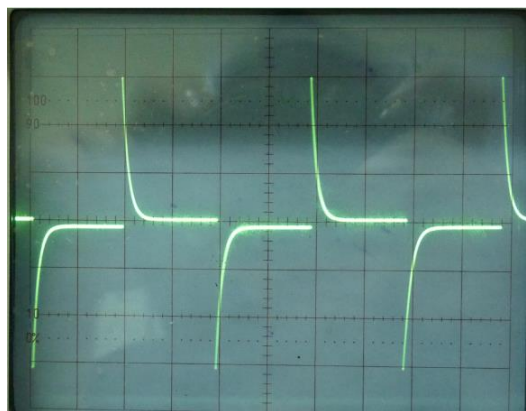
La respuesta de una red RL a una onda cuadrada es análoga a la respuesta de un circuito RC; armar el circuito que muestra la figura 102; utilizar  $L = 10 \text{ mH}$  y  $R = 470 \Omega$ . Observar la respuesta ( $v_L$ ); utilizar la ecuación 4.19 para elegir la frecuencia de la onda cuadrada. Ver las figuras 103,104 y 105.

Figura 102. Red RL



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

Figura 103. Respuesta de la red RL para  $T = 10\tau$



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

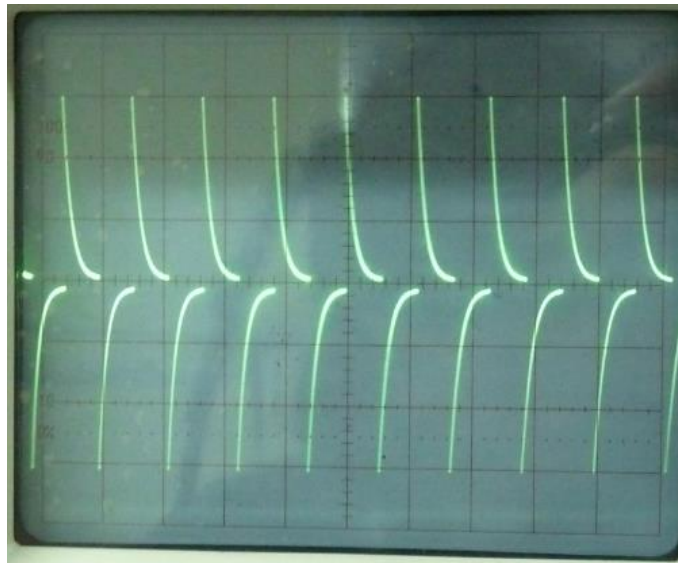


Figura 104. **Respuesta de la red RL para  $T < 10\tau$**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

Figura 105. **Respuesta de la red RL para  $T > 10\tau$**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

## 5.4. Circuito RLC

A continuación se describen algunos experimentos sobre circuitos RLC.

### 5.4.1. Impedancia y reactancia

El comportamiento de circuitos con capacitores e inductores depende de la frecuencia; sin embargo son dispositivos lineales; esto significa que la amplitud de la onda de salida (sin importar su forma), se incrementa en proporción con la amplitud de onda de entrada.

Es posible generalizar la Ley de Ohm utilizando el concepto de impedancia para describir cualquier circuito que contenga, además de resistores, capacitores e inductores.

La impedancia es la resistencia generalizada; los inductores y capacitores tienen reactancia, los resistores tienen resistencia. En otras palabras la impedancia es igual a la resistencia más la reactancia.

La reactancia de un capacitor a una frecuencia  $\omega$  es:

$$X_C = \frac{-j}{\omega C} \quad \text{Ec. [5.4]}$$

Y la de un inductor:

$$X_L = j\omega L \quad \text{Ec. [5.5]}$$

### 5.4.2. Factor de calidad

El factor Q, también llamado factor de selectividad, es un parámetro que mide la relación entre la energía reactiva y la energía que se disipa durante un ciclo completo de la señal.

$$Q = \frac{\text{potencia reactiva}}{\text{potencia disipada}} \quad \text{Ec. [5.6]}$$

El factor Q aplicado a solo un dispositivo sirve para caracterizar sus componentes no ideales; por ejemplo, un valor alto de Q en una bobina significa una resistencia pequeña y por tanto, un comportamiento parecido al de una bobina ideal.

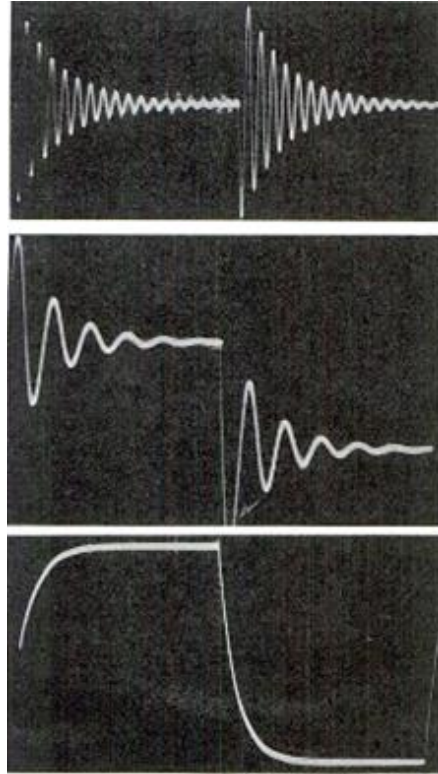
Como los capacitores se oponen a la variación brusca de voltaje y los inductores a la variación brusca de corriente, la respuesta de un circuito RLC a la onda cuadrada de entrada produce un transitorio, que es una oscilación amortiguada de frecuencia igual a la propia.

### 5.4.3. Respuesta de un circuito RLC a una onda cuadrada

Hay circuitos RLC serie y paralelo; el circuito RLC serie es el más sencillo para analizar la oscilación amortiguada. Las formas de oscilaciones pueden ser de amortiguamiento débil, fuerte y crítico, como lo muestra la figura 106.

Debe armarse el circuito como muestra la figura 107; utilizar un potenciómetro *B5K*, un capacitor de  $100 \mu F$  y una bobina  $10 mH$  (Q grande).

Figura 106. **Formas de oscilaciones amortiguadas**



Fuente: HIGGINS, Richard. *Electrónica experimental*. p. 35.

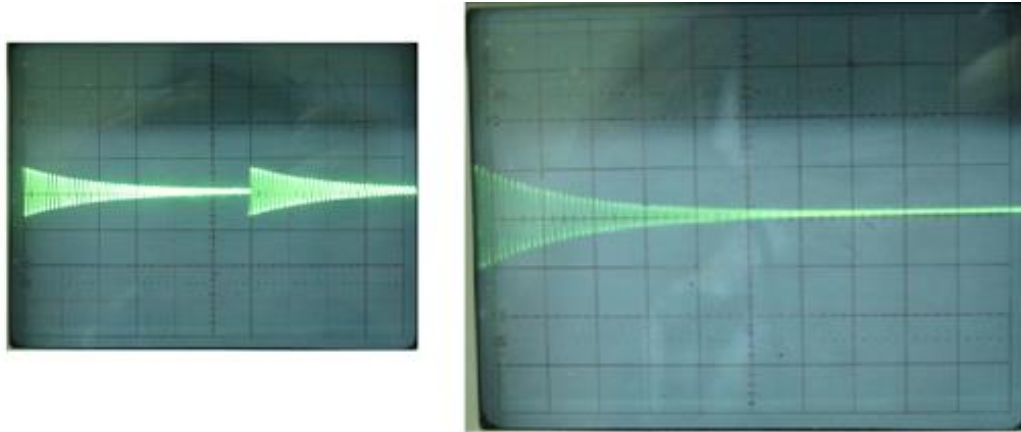
Figura 107. **Circuito RLC**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

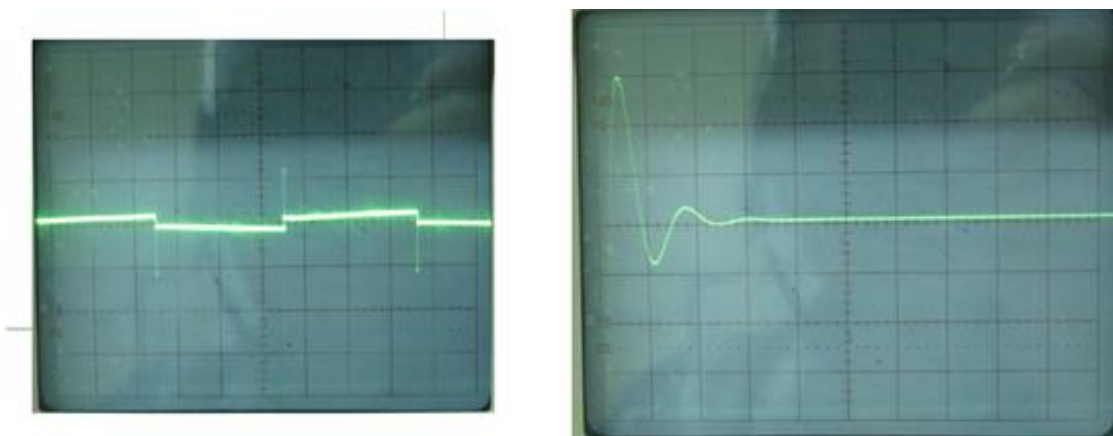
Girar el potenciómetro para observar en el osciloscopio las formas de onda de amortiguamiento (figuras 108, 109 y 110).

Figura 108. **Amortiguamiento débil**



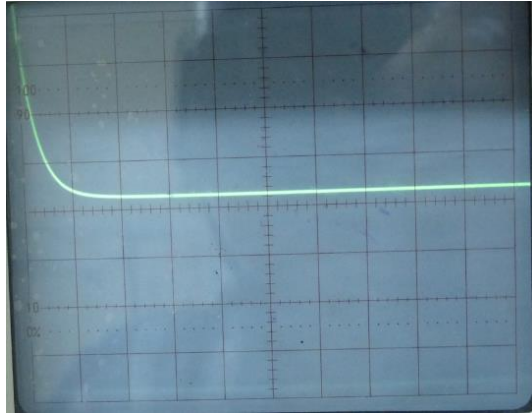
Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

Figura 109. **Amortiguamiento fuerte**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

Figura 110. **Amortiguamiento crítico**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

## 5.5. **Circuito resonante**

A continuación se describen algunos experimentos con circuitos resonantes.

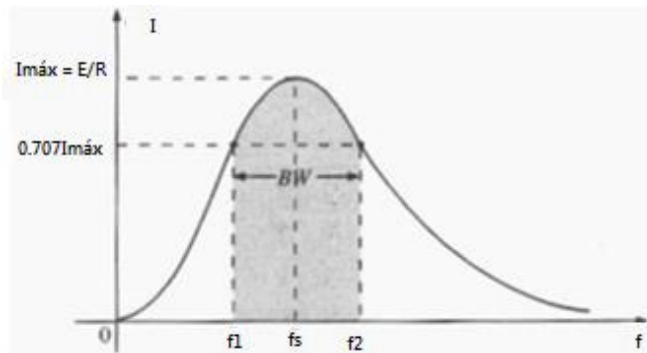
### 5.5.1. **Selectividad**

Al graficar la corriente (o voltaje) en función de la frecuencia de un circuito resonante, se obtiene una curva que se eleva desde cero hasta un valor máximo y luego desciende hacia cero; a una razón más lenta que la de elevación hasta su valor pico.

Existe un intervalo de frecuencias definido en el que la corriente está cerca de su valor máximo. Tales frecuencias corresponden a 70 % de la corriente máxima y son llamadas frecuencias de banda o de potencia media. El intervalo de frecuencias entre las dos se denomina ancho de banda (BW) del circuito

resonante. Como un circuito resonante se ajusta para seleccionar una banda de frecuencias, a la curva de la figura 111 se le denomina curva de selectividad.

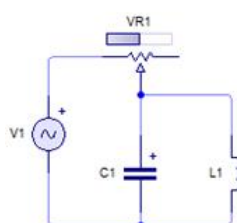
Figura 111.  **$i$  en función de la frecuencia para un circuito resonante**



Fuente: BOYLESTAD, Robert. *Introducción al análisis de circuitos*. p. 894.

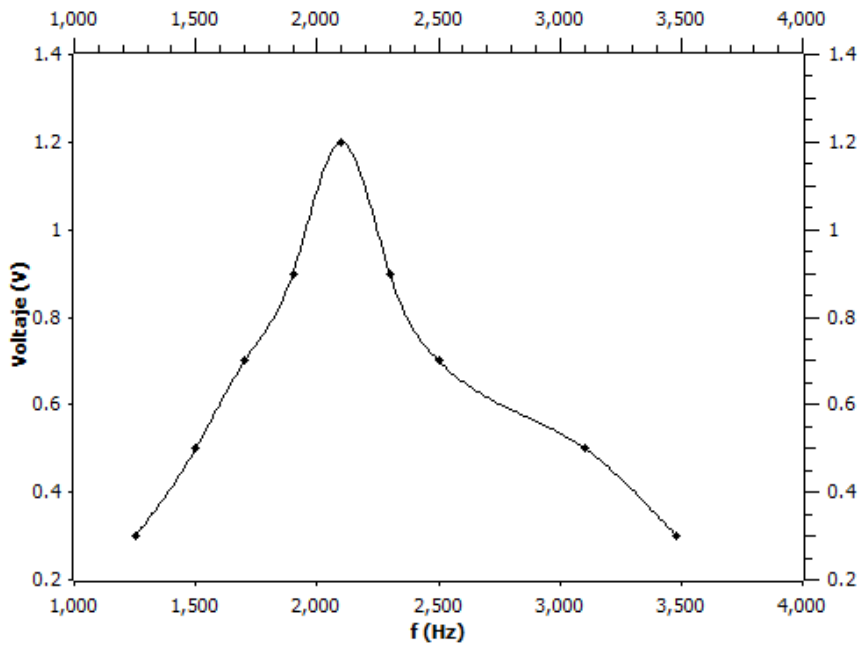
Armar el circuito como muestra la figura 112; utilizar  $L = 10\text{ mH}$  con  $Q$  alta,  $C = 1\mu\text{F}$  y un potenciómetro B5K. Medir el voltaje (voltaje alterno con el multímetro) en el inductor mientras varía la frecuencia de la señal cuadrada de entrada. Graficar el voltaje en función de la frecuencia.

Figura 112. **Circuito RLC paralelo**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

Figura 113. **Voltaje contra frecuencia en un circuito RLC paralelo**



Fuente: elaboración propia, empleando Qtiplot.

Encontrar las frecuencias para las que el voltaje es 0.707 del voltaje máximo y el ancho de banda.

Tabla XXI. **Frecuencias y ancho de banda**

$f_1$	$f_2$	$BW$
1900 Hz	2300 Hz	400 Hz

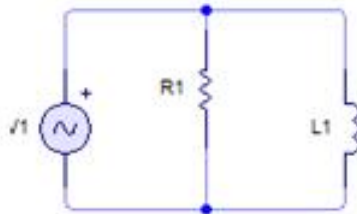
Fuente: elaboración propia.



### 5.5.2. Medida indirecta de la inductancia, utilizando un circuito resonante

Armar el RL paralelo, utilice  $L$  con  $Q$  alta y  $R = 1\text{ K}\Omega$ . Variar la frecuencia de la señal de entrada en el generador de señales y encontrar la curva de selectividad. Ver la figura 114.

Figura 114. Circuito RL paralelo



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

La condición de resonancia ocurre cuando:

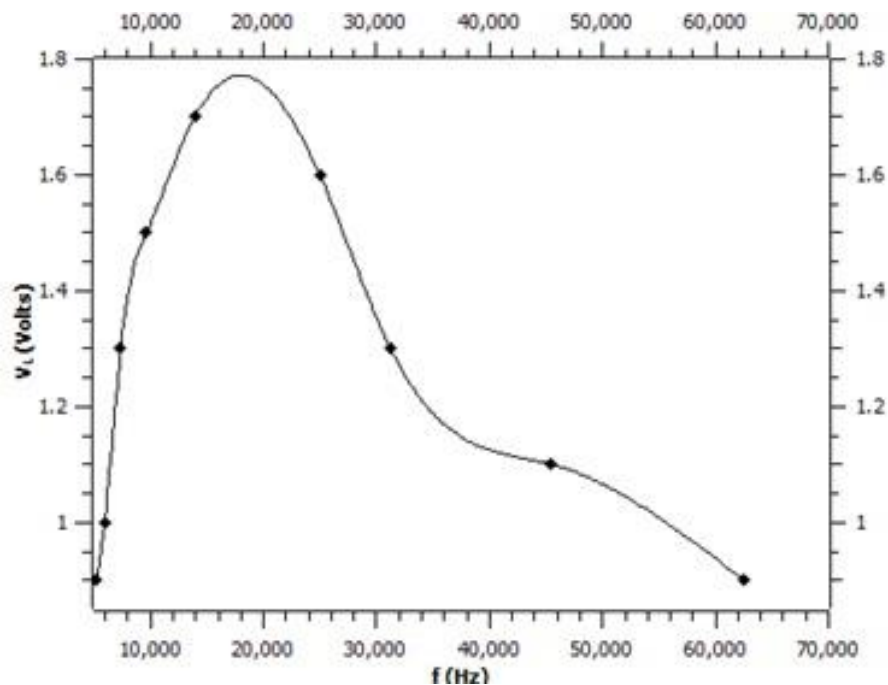
$$Z_{Total} = R \quad \text{Ec. [5.7]}$$

$$2\pi fL = R \quad \text{Ec. [5.8]}$$

$$L = \frac{R}{2\pi f} \quad \text{Ec. [5.9]}$$

Medir la inductancia directamente, y  $L$  indirectamente, utilizando la curva de selectividad (figura 115); luego comparar las medidas. Ver tabla XXII y figura 116.

Figura 115. **Voltaje en el inductor contra frecuencia**



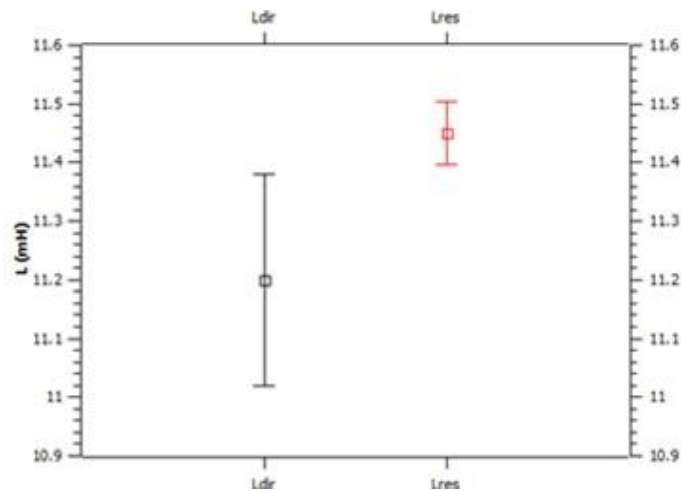
Fuente: elaboración propia, empleando Qtiplot.

Tabla XXII. **Medidas directa e indirecta de inductancia con frecuencia de resonancia**

$L_{di}$	$L_{ind}$
$(11.2 \pm 0.2) \text{ mH}$	$(11.45 \pm 0.06) \text{ mH}$

Fuente: elaboración propia.

Figura 116. **Discrepancia de las medidas de inductancia con frecuencia de resonancia**



Fuente: elaboración propia, empleando Qtiplot.

### 5.6. **Equipo y materiales para circuitos de C. A.**

A continuación se muestra una lista de los dispositivos que se utilizan en los experimentos con circuitos de corriente alterna.

Tabla XXIII. **Equipo y materiales para capacitores e inductores**

Equipo	Dispositivos	Cantidad
Fuente de voltaje directo		1
Multímetro digital		2
<i>Protoboard</i>		1
Osciloscopio		1
Generador de señales		1
Medidor de inductancia y capacitancia		1

Continuación de la tabla XXIII.

Medidor de inductancia y capacitancia		1
Conectores banana-lagarto		6
Conector banana-lagarto rojo		4
Punta para osciloscopio		2
Conector lagarto-lagarto rojo		3
Alambre para conectar en el <i>protoboard</i>		3
	Capacitores	2
	Inductores	
	Potenciómetro <i>B5K</i>	1

Fuente: elaboración propia.

## 6. DIODOS

El diodo es un dispositivo de dos terminales (figura 117), pasivo y no lineal; tiene la curva de voltaje contra corriente que muestra la figura 118. La flecha del diodo, el ánodo, apunta en la dirección del flujo de la corriente. Por ejemplo, si el diodo está en un circuito en el que una corriente de  $10\text{ mA}$  fluye del ánodo al cátodo, entonces el ánodo es aproximadamente  $0.5\text{ V}$  más positivo que el cátodo; esto se llama caída de voltaje directo.

La corriente inversa, que es medida en el rango de nanoamperios para diodos de propósito general, casi nunca tiene consecuencias hasta que se alcanza el voltaje de ruptura inverso (también llamado voltaje de pico inverso, PIV) que es generalmente de  $75\text{ V}$  para diodos de propósito general.

Frecuentemente, también la caída de voltaje directo, de entre  $0,5\text{ V}$  a  $0.8\text{ V}$ , es de poca importancia y puede ser tratado como un conductor ideal de una dirección.

Hay dos cosas importantes acerca de los circuitos con diodos: un diodo no tiene resistencia, no obedece a la ley de Ohm y si se colocan varios diodos en un circuito, no tiene un circuito equivalente de Thévenin.

Figura 117. **Diodos**



Fuente: HOROWITZ, Paul; HILL, Windfield. *The art of electronics*. p. 44.

Figura 118. **Curva V-I del diodo**

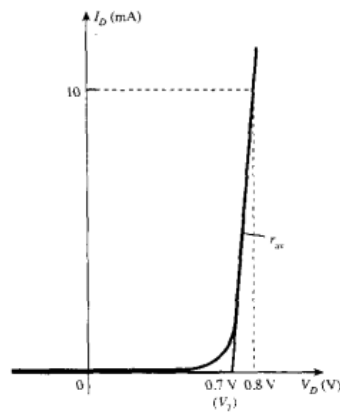


Fuente: HOROWITZ, Paul; HILL, Windfield. *The art of electronics*. p. 44.

### 6.1. Rectificador de propósito general

El circuito equivalente para un diodo rectificador se puede obtener aproximando las características del dispositivo mediante segmentos lineales, como se muestra en la figura 119.

Figura 119. **Aproximación de la curva característica**



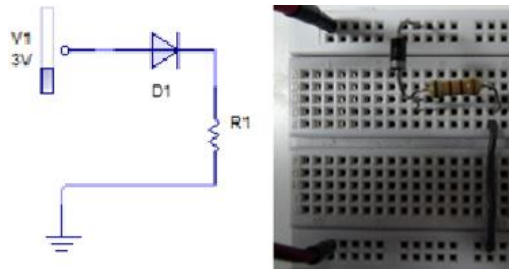
Fuente: BOYLESTAD, Robert. *Electrónica: teoría de circuitos*. p. 28.

Los segmentos lineales no son una duplicación exacta de las características reales, sobre todo en la parte de inflexión de la curva de respuesta.

El diodo semiconductor de silicio no alcanza el estado de conducción hasta aproximadamente  $0.7\text{ V}$ ; debe aparecer una batería de oposición  $V_T$  de este valor en el circuito equivalente. Esto indica que el voltaje directo total  $V_D$  a través del diodo debe ser mayor que  $V_T$ , antes de que el diodo ideal en el circuito equivalente se polarice directamente.

Hay que recordar que  $V_T$  no es una fuente independiente de energía en un sistema. No se medirá este voltaje a través de un diodo de silicio aislado empleando simplemente un voltímetro. Armar el circuito como en la figura 120.

Figura 120. **Diodo rectificador**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

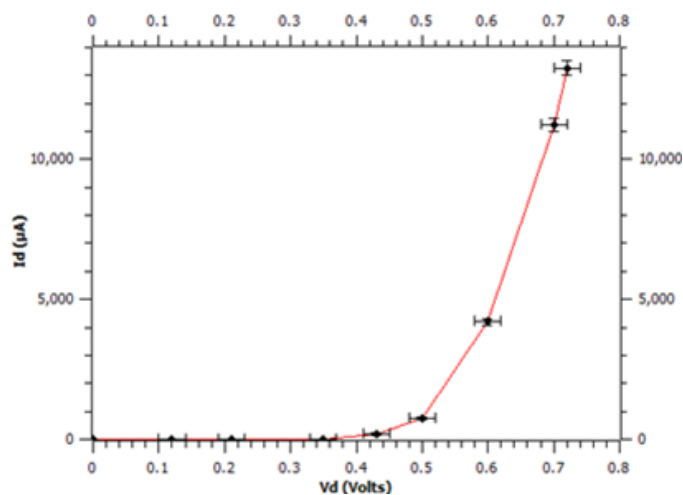
Utilizar una fuente de voltaje directo variable. Calcular  $R_D$  según la ecuación (6.1) y una corriente de al menos  $10\text{ mA}$ .

$$R_D = \frac{V_D}{I_D}$$

Ec. [6.1]

Variar el voltaje proporcionado por la fuente de voltaje, medir el voltaje entre las terminales del diodo. Medir el voltaje entre las terminales del resistor y dividir entre la resistencia que es un valor contante. Graficar la corriente contra el voltaje del diodo. (figura 121).

Figura 121. **Curva de corriente contra voltaje de un diodo de silicio**



Fuente: elaboración propia, empleando Qtiplot.

Para este diodo se requiere un corrimiento de  $0.4\text{ V}$  antes del quiebre de la característica y  $R_D = 500\ \Omega$ . Para la mayoría de las aplicaciones  $R_D$  es lo suficientemente pequeña como para ignorarla si se compara con otros elementos de la red.

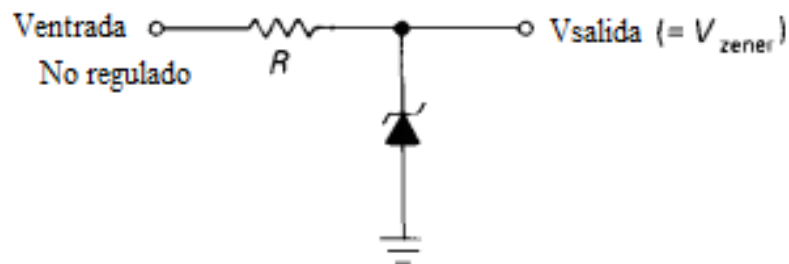
## 6.2. Diodo Zener

El Zener es un diodo que se encuentra en estado de conducción a algunos voltajes inversos; si se coloca en un circuito divisor se puede formar un



circuito que tiene una salida de voltaje casi constante a pesar de la variación en la entrada o en la carga. Ver la figura 122.

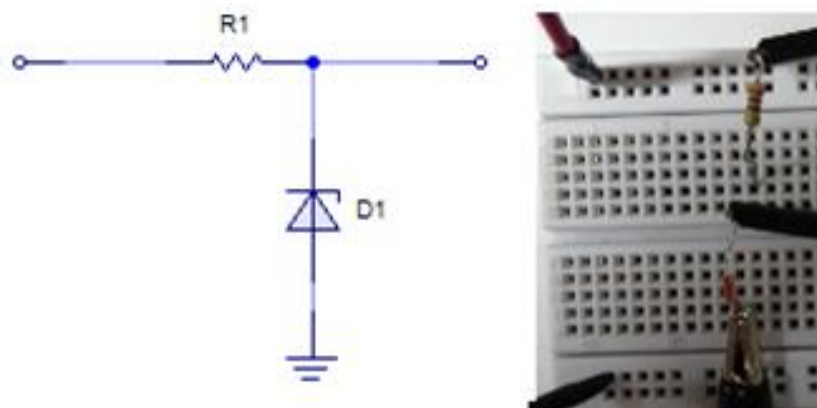
Figura 122. **Regulador simple de diodo Zener**



Fuente: HOROWITZ, Paul; HILL, Windfield. *The art of electronics*. p. 68.

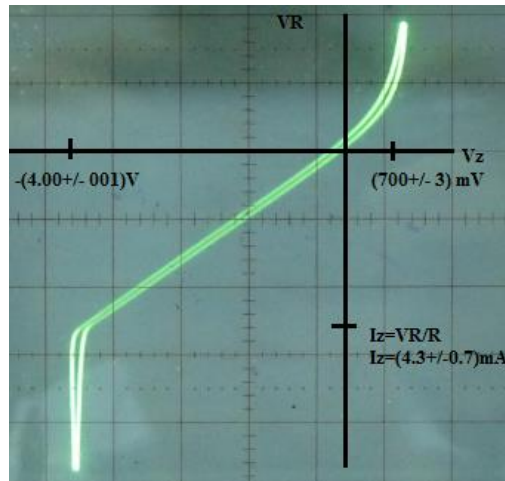
Utilizar el osciloscopio para ver la curva característica del diodo Zener (figura 124), colocar el canal uno (x) entre las terminales del diodo y el canal 2 (y) entre las terminales del resistor, como se muestra en la figura 123.

Figura 123. **Circuito regulador con diodo Zener**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

Figura 124. Características del diodo Zener bajo prueba



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

Comparar los valores medidos de  $V_z$  e  $I_z$  con los valores ideales propuestos en la hoja de datos del dispositivo; ver la tabla XXIV.

Tabla XXIV. Características del diodo Zener

TYPE	Nominal Zener		Test Current $I_{ZT}$	Maximum Zener Impedance		$I_{ZK}$	Maximum Reverse Leakage Current		Maximum Surge Current	Maximum Regulation Current $I_{ZM}$
				$Z_{ZT} @ I_{ZT}$	$Z_{ZT} @ I_{ZK}$		$I_R$	@ $V_R$		
	Min	Max		mA	Ohms		Ohms	mA		
BZX55C2V4	2.28	2.56	5.0	85	600	1.0	50	1.0	-0.085	155
BZX55C2V7	2.50	2.90	5.0	85	600	1.0	10	1.0	-0.080	135
BZX55C3V0	2.80	3.20	5.0	85	600	1.0	4.0	1.0	-0.075	125
BZX55C3V3	3.10	3.50	5.0	85	600	1.0	2.0	1.0	-0.070	115
BZX55C3V6	3.40	3.80	5.0	85	600	1.0	2.0	1.0	-0.065	105
BZX55C3V9	3.70	4.10	5.0	85	600	1.0	2.0	1.0	-0.060	95
BZX55C4V3	4.00	4.60	5.0	75	600	1.0	1.0	1.0	$\pm 0.055$	90
BZX55C4V7	4.40	5.00	5.0	60	600	1.0	0.5	1.0	$\pm 0.030$	85
BZX55C5V1	4.80	5.40	5.0	35	550	1.0	0.1	1.0	$\pm 0.030$	80

Fuente: VISHAY SEMICONDUCTORS. Datasheet BZXEEC series. p. 1.

### 6.3. Diodo emisor de luz (led)

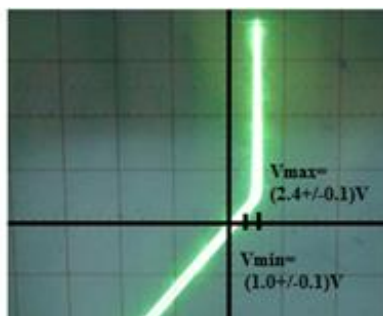
Un diodo emisor de luz producirá luz visible cuando se encuentre energizado. Como el led tiene una característica de polarización directa similar a las curvas de respuesta del diodo. Armar el circuito como se muestra la figura 125; mostrar la curva del led con el osciloscopio para comprobar que es similar a la curva del diodo (figura 126). Utilizar  $R = 1000 \Omega$  y comparar con la hoja de datos (tabla XXV).

Figura 125. **Circuito con diodo emisor de luz**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

Figura 126. **Respuesta del circuito con diodo emisor de luz**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

Tabla XXV. **Características del diodo emisor de luz rojo**

■ **Typical Electrical & Optical Characteristics ( Ta = 25°C)**

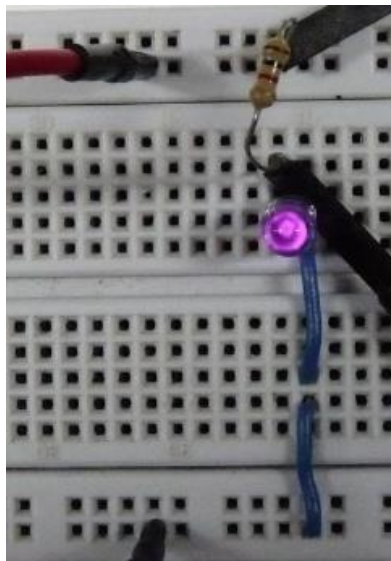
Items	Symbol	Condition	Min.	Typ.	Max.	Unit
Forward Voltage	$V_F$	$I_F = 20\text{mA}$	1.8	---	2.4	V

Fuente: ZHONGZHOU. *Specification for led lamp*. p. 1.

#### 6.4. Diodo infrarrojo (IR)

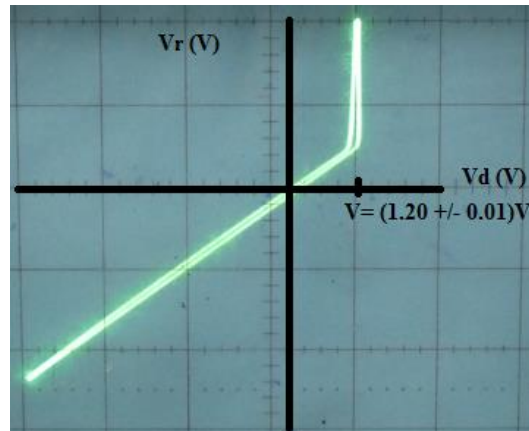
Los diodos infrarrojos emiten luz infrarroja de la misma forma que un diodo emisor de luz visible. Armar el circuito como se muestra en la figura 127 y verificar la curva de corriente contra voltaje del diodo infrarrojo.

Figura 127. **Circuito con diodo emisor de luz infrarroja**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

Figura 128. **Respuesta del circuito con diodo emisor de luz infrarroja**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

#### 6.4.1. **Fotodiodo**

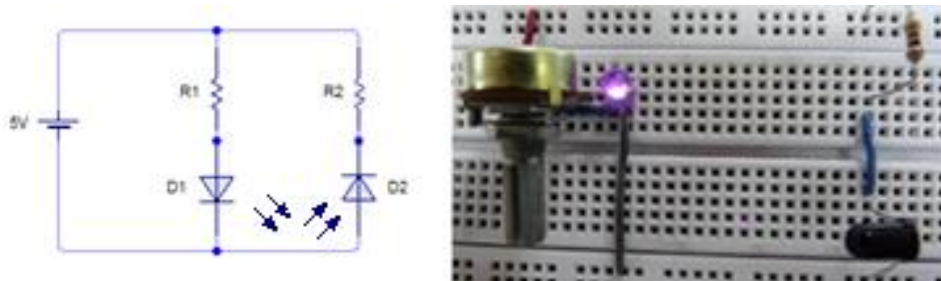
Es un dispositivo semiconductor sensible a la luz que tiene una región limitada a la polarización inversa. La corriente de saturación inversa se encuentra normalmente limitada debido únicamente a los portadores minoritarios térmicamente generados en los materiales tipo n y p.

La aplicación de la luz a la unión ocasionará una transferencia de energía de las ondas de luz incidentes que ocasionará un aumento en el número de portadores minoritarios y mayor nivel de corriente inversa.

#### 6.4.2. **Comparación entre la intensidad radiante de un diodo emisor de luz infrarroja y la detectada por un fotodiodo infrarrojo**

Armar el circuito que muestra la figura 129.

Figura 129. **Diodo emisor de luz infrarroja y fotodiodo infrarrojo**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

Figura 130. **Alineación de emisor y receptor infrarrojo**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

Primero hay que calcular el valor  $R_{Led}$  para el valor de corriente adecuado. De la hoja de datos del led se sabe que para  $i = 20 \text{ mA}$  el voltaje entre las terminales es  $V = 1.5 \text{ V}$ , se necesita  $R_{LED} = 70 \Omega$ . También se sabe que su longitud de onda pico es  $\lambda = 950 \text{ nm}$ .

Para calcular la potencia emitida por el led en el ángulo sólido abarcado por el fotodiodo (intensidad radiante) son necesarios los siguientes datos (obtenidos de las hojas de datos de ambos dispositivos):

- El área sensitiva del fotodiodo:  $A = 0.78 \text{ mm}^2$
- La distancia entre el led y el fotodiodo:  $d = 1 \text{ cm} = 10 \text{ mm}$
- La intensidad radiante relativa frente a corriente de polarización del led ( $\lambda = 950 \text{ nm}$ ):  $45 \frac{\text{mW}}{\text{sr}}$  esto quiere decir que el diodo emite al menos  $45 \text{ mW}$  de potencia luminosa por estereorradián cuando circula una corriente de  $1 \text{ A}$ . Para  $20 \text{ mA}$  la intensidad radiante relativa es  $I = 10 \frac{\text{mW}}{\text{sr}}$

De toda la potencia emitida por unidad de ángulo sólido el fotodiodo va a captar:

$$P = 10 \frac{\text{mW}}{\text{sr}} * \text{sr} \quad \text{Ec. [6.2]}$$

$$\text{sr} = \frac{A}{d^2} \quad \text{Ec. [6.3]}$$

$P_{LED} = 78 \text{ mW}$  son captados por el fotodiodo. Para hacer el análisis desde el punto de vista del fotodiodo, hay que colocar alineados los diodos a una distancia arbitraria (figura 130), se necesita:

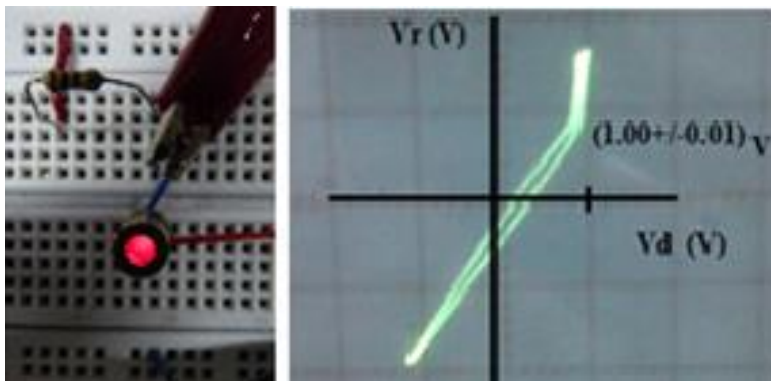
- La sensibilidad espectral ( $\lambda = 950 \text{ nm}$ ) :  $1 \frac{\text{A}}{\text{W}}$  . El fotodiodo genera  $1 \text{ A}$  de corriente cuando detecta  $1 \text{ W}$  de luz con  $\lambda = 950 \text{ nm}$ .

- La fotocorriente generada con  $d = 10\text{mm}$ :  $i = 10\text{ mA}$ . De la potencia emitida por el led IR, el fotodiodo solo capta  $P_{\text{fotodiodo}} = 10\text{ mW}$  de potencia.

## 6.5. Diodo Laser (LD)

El diodo láser es similar al diodo emisor de luz. La diferencia radica en que no hay aberración cromática ya que existe solo una longitud de onda; también toda la energía de la fuente de luz se concentra en un punto muy pequeño de la luz. La figura 131 muestra el circuito y la curva característica del diodo láser.

Figura 131. **Curva de voltaje contra corriente del diodo láser**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

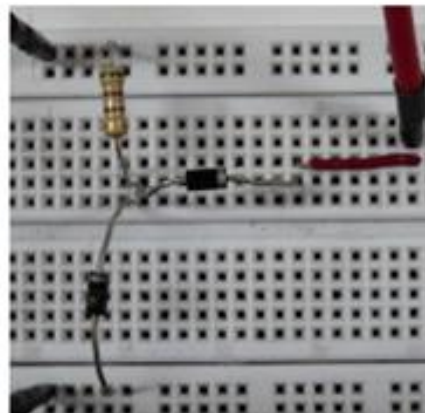
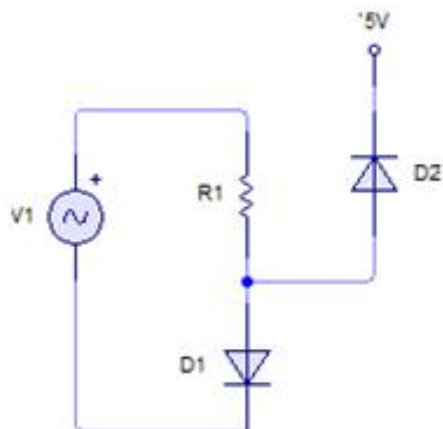
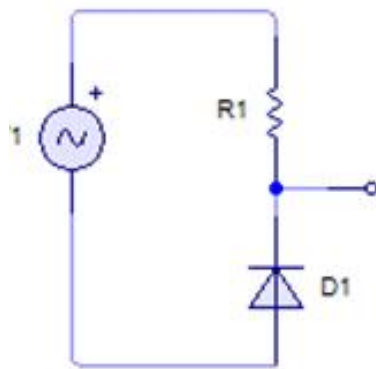
## 6.6. Circuitos con diodos

Al elaborar una serie de divisores y ver cómo es su salida, deben armarse los circuitos que se muestran en las figura 132. Colocar en la entrada una sinusoidal y medir con el osciloscopio el voltaje en el resistor ( $500\ \Omega$ ).



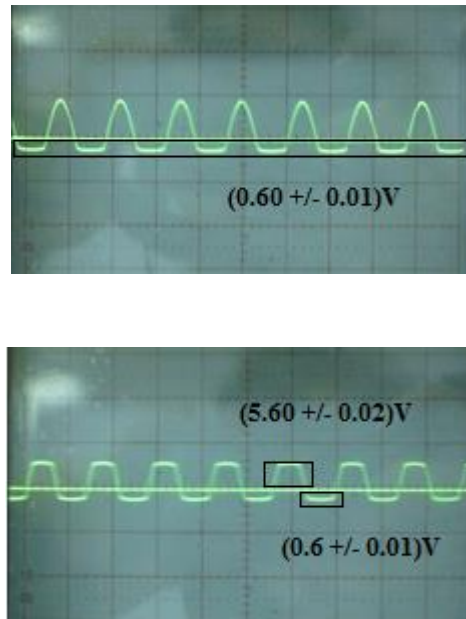
Ambos circuitos son fijadores de nivel; estos añaden un nivel de corriente continua.

Figura 132. Diodos fijadores de nivel



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

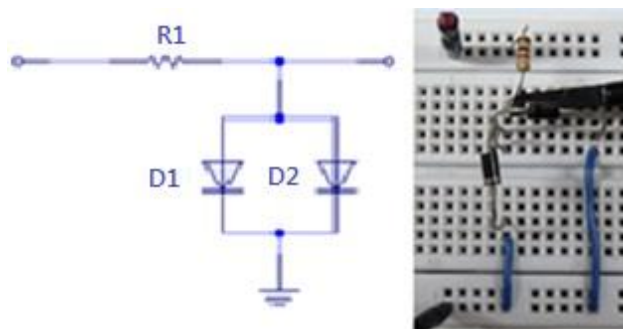
Figura 133. **Salidas respectivas de los circuitos fijadores de voltaje**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

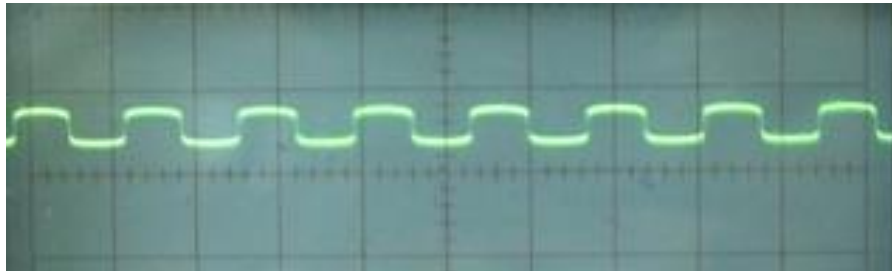
Armar un diodo limitador simple como muestra en la figura 134; su salida se muestra en la figura 135.

Figura 134. **Diodo delimitador**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

Figura 135. **Salida de un diodo delimitador**

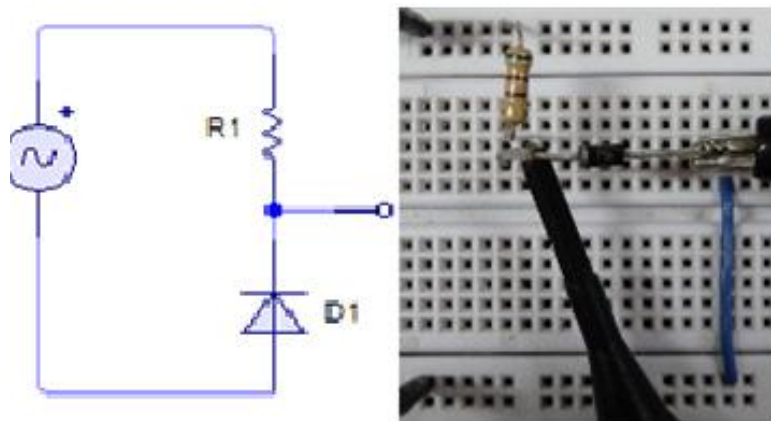


Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

### 6.6.1. **Rectificador de media onda**

Armar el circuito como se muestra en la figura 136. Ver su salida en la figura 137 y la comparación de la entrada y salida del circuito (figura 138).

Figura 136. **Circuito rectificador de media onda**



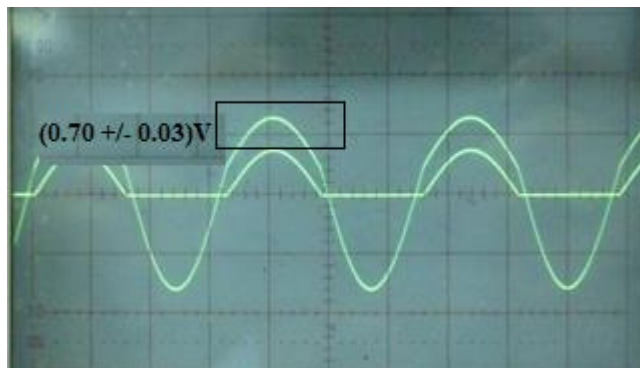
Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

Figura 137. **Salida de un circuito rectificador de media onda**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

Figura 138. **Comparación de la señal de entrada con la salida de un circuito rectificador de media onda**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

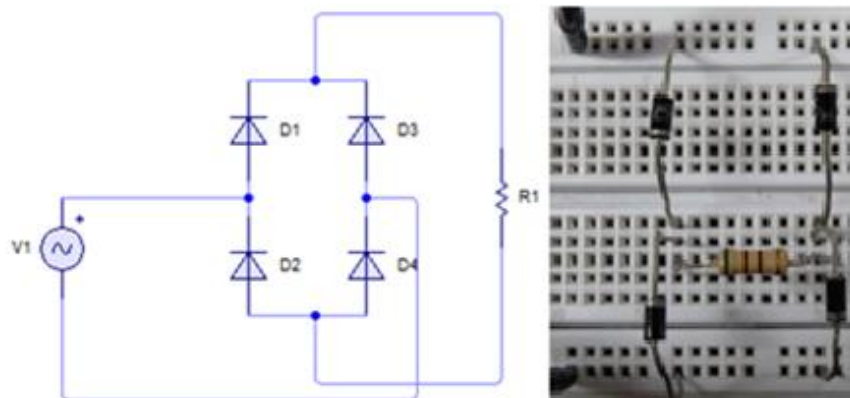
Aunque la salida de un rectificador de media onda es muy parecida a la salida de un fijador de voltaje, solo este se utiliza en fuentes de voltaje directo.

Debe notarse que es una salida desigual; una mejor versión de este rectificador es el de onda completa.

### 6.6.2. Rectificador de onda completa

Este circuito proporciona un segundo pico en el período negativo del voltaje de entrada. Armar el circuito como se muestra en la figura 139; su salida se muestra en la figura 140. Sustituir el generador de señales por una fuente de voltaje AC para este experimento.

Figura 139. **Circuito rectificador de onda completa**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

Figura 140. **Salida de un circuito rectificador onda completa**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

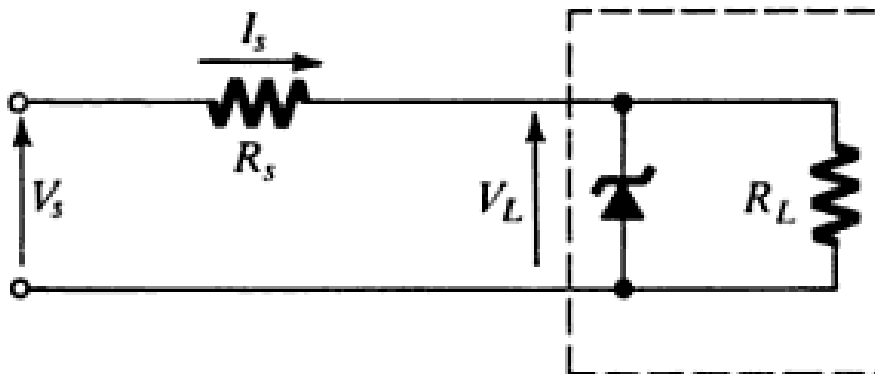
### 6.6.3. Regulador de diodo Zener

El método gráfico de solución por la recta de carga constituye un procedimiento claro de diseño de un regulador de Zener. Considerar el circuito de la figura 141. En la figura 142(a) se muestra la curva I-V del Zener. Si se coloca una carga  $R_L$  en paralelo con este, se crea un elemento de circuito compuesto cuya curva I-V es la de la figura 142 (b).

El elemento compuesto se comporta como una resistencia para  $V < V_Z$  y como un diodo Zener para  $V \geq V_Z$ . Si se quiere saber cómo tomar  $R_s$  hay que trazar en la misma gráfica una recta generador (figura 142 (c)).

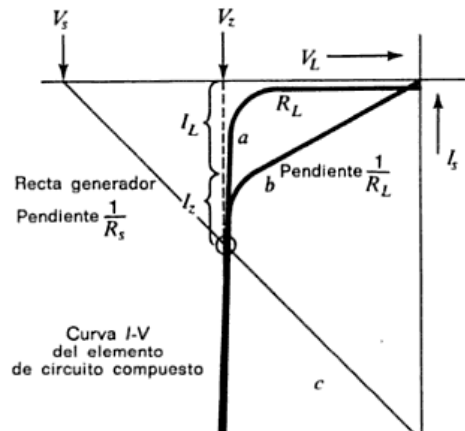
$$IR_s = V_s - V_L \quad \text{Ec. [6.4]}$$

Figura 141. Regulador de Zener con elemento de circuito compuesto



Fuente: HIGGINS, Richard. *Electrónica experimental*. p. 51.

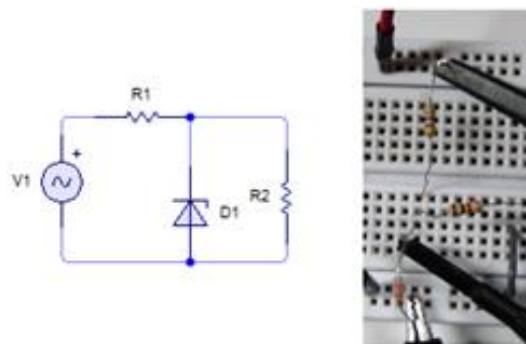
Figura 142. **Solución gráfica del circuito regulador de Zener**



Fuente: HIGGINS, Richard. *Electrónica experimental*. p. 52

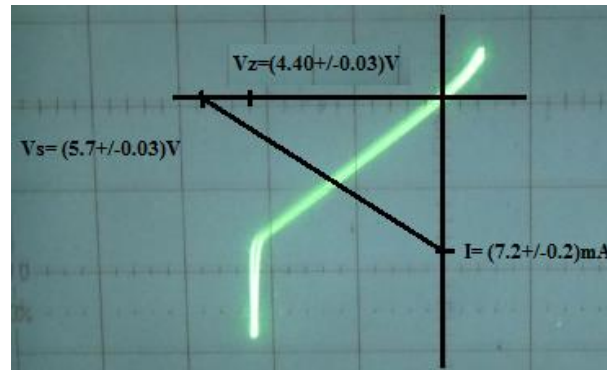
Armar el circuito como se muestra en la figura 143 (utilizar  $R_S$  arbitraria y en la entrada del circuito una onda sinusoidal arbitraria). Medir la respuesta del circuito con un osciloscopio (coloque el osciloscopio en el control X-Y). Conectar el canal 1 (X) entre las terminales del Zener y el canal 2 (Y) entre las del resistor. Trazar la recta generador.

Figura 143. **Circuito regulador de Zener**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

Figura 144. **Curva característica con elemento resistivo**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

En este caso, la intersección de la recta generador y la curva del diodo Zener no está en la región deseada. Si la intersección de (b) y (c) en la figura 142 se hallan en la parte casi vertical de curva (b), el circuito regulará al variar la resistencia de carga. Utilizar el circuito de la figura 143 para repetir el experimento anterior, tomando en cuenta que:

$$I_{carga} = \frac{V_{entrada} - V_{salida}}{R_s} \quad \text{Ec. [6.5]}$$

En el peor de los casos,  $V_{entrada}$  es máximo e  $I_{salida}$  es mínima, también:

$$P_z = I_z V_z \quad \text{Ec. [6.6]}$$

$$P_z = \left( \frac{V_{entrada} - V_{salida}}{R_s} - I_{salida} \right) V_z \quad \text{Ec. [6.7]}$$

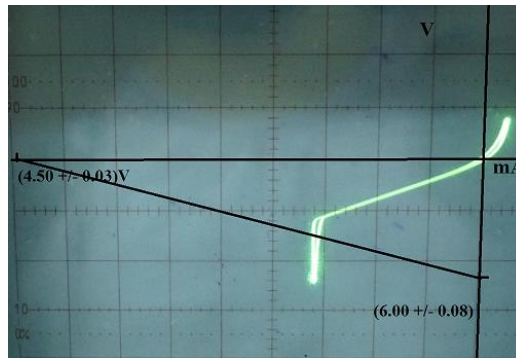
$$R_s = \frac{V_{salida} - V_{entrada}}{I_z + I_{salida}} \quad \text{Ec. [6.8]}$$



En el peor de los casos:

$$R = \frac{V_{R_s}}{I_z} \quad \text{Ec. [6.9]}$$

Figura 145. **Intersección de la curva característica del Zener y la recta generador**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

## 6.7. Equipo y materiales para diodos

A continuación se muestra una lista de los dispositivos que se utilizan en los experimentos con diodos.

Tabla XXVI. **Equipo y materiales para diodos**

Equipo	Dispositivos	Cantidad
Fuente de voltaje directo		1
Fuente de voltaje alterno		1
<i>Protoboard</i>		1

Continuación de la tabla XXVI.

Osciloscopio		1
Generador de señales		1
Multímetro digital		1
Conectores banana-lagarto rojo		3
Conector banana-lagarto negro		3
Punta para osciloscopio		2
	Potenciómetros 20 k $\Omega$	
	Resistores	
	Diodo 1N4004	
	Diodo láser	

Fuente: elaboración propia.

## 7. TRANSISTORES

### 7.1. Transistores de unión bipolar (BJT)

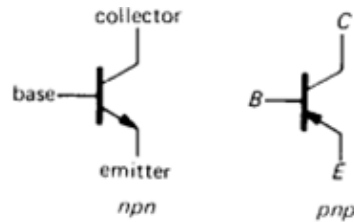
Un transistor es un dispositivo de tres terminales y de dos tipos; ver la figura 146. Las propiedades para un transistor npn son (para pnp invertir todas las polaridades):

- El colector debe ser más positivo que el emisor.
- Los circuitos base-emisor y base-colector se comportan como diodos (figura 147). Normalmente, el diodo base-emisor está conduciendo y el diodo base-colector está polarizado inversamente; es decir, el voltaje aplicado está en la dirección opuesta al flujo de corriente.
- Cualquier transistor tiene valores máximos de  $I_C, I_B$  y  $V_{CE}$  que no se pueden exceder. También hay otros valores límite como disipación de potencia ( $I_C V_{CE}$ ), temperatura,  $V_{BE}$ .
- Si se obedecen las reglas 1-3,  $I_C$  es aproximadamente proporcional a  $I_B$  y se puede escribir como:

$$I_C = h_{FE} I_B = \beta I_B \quad \text{Ec. [7.1]}$$

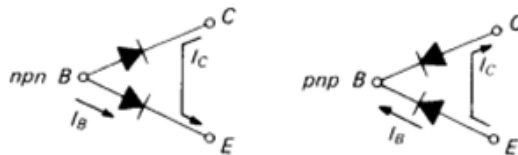
Donde  $h_{FE}$ , la ganancia de corriente (también llamada beta), es típicamente alrededor de 100. Ambas  $I_C$  e  $I_B$  fluyen al emisor. La corriente de colector no se debe a la conducción del diodo base-colector.

Figura 146. **Símbolo del transistor**



Fuente: HOROWITZ, Paul; HILL, Windfield. *The art of electronics*. p. 62.

Figura 147. **Las terminales de un transistor según el ohmímetro**



Fuente: HOROWITZ, Paul; HILL, Windfield. *The art of electronics*. p. 62.

La propiedad 4 da al transistor su utilidad; una corriente pequeña que fluye a la base controla el flujo de una corriente más grande hacia el colector. La propiedad 2 significa que un transistor operando tiene  $V_B \approx V_E + 0.7$ , hay que enfatizar que no se debe pensar en la corriente de colector como conducción de diodo porque el diodo colector-base normalmente necesita voltajes aplicados en la dirección inversa.

La corriente de colector varía muy poco con el voltaje de colector al contrario de un diodo en estado de conducción en donde se incrementa rápidamente la corriente con el voltaje aplicado. Para un transistor npn:

$$V_C > V_E$$

Ec. [7.2]

$$V_B - V_E = 0.7 \quad \text{Ec. [7.3]}$$

$$I_C = \beta I_B \quad \text{Ec. [7.4]}$$

$$I_E = I_C + I_B = (1 + \beta)I_B \quad \text{Ec. [7.5]}$$

### 7.1.1. Regiones del transistor y punto de operación

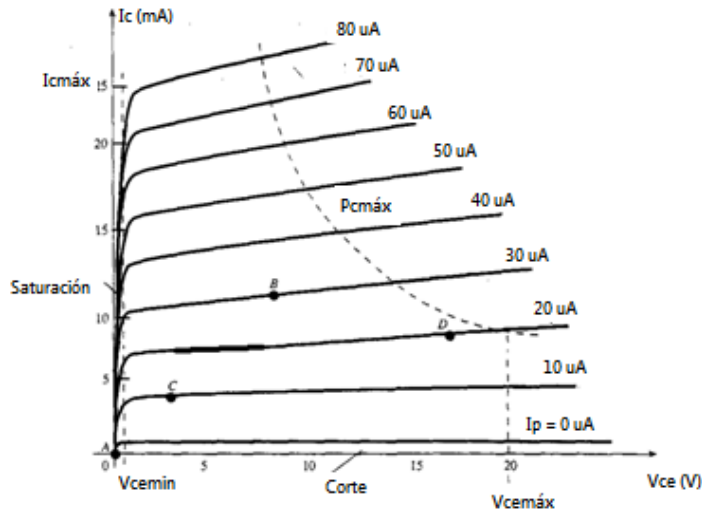
La polarización de un transistor es la aplicación de voltajes de DC que establecen un nivel fijo de corriente y voltaje. Las características de salida de un transistor muestran tres regiones; ver la figura 148.

En la parte inferior de las escalas se encuentra la región de corte, donde  $i_C$  no es afectada por la corriente de los portadores minoritarios. La región de saturación se refiere a la parte no lineal de las características del transistor, donde  $V_{CE} < V_{CEsat}$ .

La región activa está delimitada por  $V_{CEsat}$  que es el voltaje mínimo antes de caer en la región de saturación y  $V_{CEmáx}$  que es el voltaje máximo de colector-emisor que puede soportar el transistor,  $I_{Cmín}$  antes de caer en la región de corte e  $i_{cmáx}$ , que es el valor máximo de corriente que puede soportar el transistor.

Se puede pensar en el transistor como un amplificador de corriente con una entrada que se comporta como un diodo pero si se quiere entender el concepto de amplificador operacional, convertidores logarítmicos o compensadores de temperatura y otras aplicaciones; es necesario pensar en el transistor como un dispositivo de transconductancia, la corriente de colector se determina por el voltaje de base a emisor.

Figura 148. **Características de salida de un transistor**



Fuente: BOYESTAD, R; NASHELSKY, L. *Electrónica: teoría de circuitos*. p. 145.

### 7.1.2. Nivel de potencia máximo de disipación y recta de carga

La curva de potencia muestra que en cualquier punto sobre las características del transistor:

$$P_{cm\acute{a}x} = V_{CE} I_C \quad \text{Ec. [7.6]}$$

Entonces, para  $i_{cm\acute{a}x}$ :

$$V_{CE} = \frac{P_{Cm\acute{a}x}}{i_{cm\acute{a}x}} \quad \text{Ec. [7.7]}$$

La curva de potencia es la que se muestra punteada en la figura anterior.

Y para  $V_{CEm\acute{a}x}$ :

$$i_c = \frac{P_{cm\acute{a}x}}{V_{CEm\acute{a}x}} \quad \text{Ec. [7.8]}$$

Para  $i_c$  en un rango medio

$$V_{CE} = \frac{P_{Cm\acute{a}x}}{i_{cpromedio}} \quad \text{Ec. [7.9]}$$

La recta de carga del transistor está representada por:

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C \quad \text{Ec. [7.10]}$$

Generalmente el punto de operación  $Q$  se encuentra en el centro:

$$V_{CE} = \frac{V_{CC}}{2}, I_C \quad \text{Ec. [7.11]}$$

Otros puntos de la recta son:

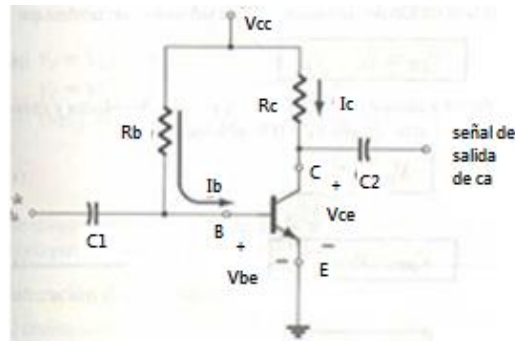
$$0, I_{Csat} = \frac{V_{CC}}{R_C} \quad \text{Ec. [7.12]}$$

$$V_{CEcorte} = V_{CC}, 0 \quad \text{Ec. [7.13]}$$

### 7.1.3. Circuito de polarización fija

Es posible considerar la polarización de un BJT, analizando en forma separada las mallas de polarización de CD de base a emisor y de base a colector.

Figura 149. **Circuito de polarización fija**



Fuente: BOYLESTAD R, NASHELSKY, L. *Electrónica: teoría de circuitos*. p. 194.

De la polarización directa de base emisor se obtiene:

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} \quad \text{Ec. [7.14]}$$

De la polarización inversa de base colector se obtiene:

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C \quad \text{Ec. [7.15]}$$

Armar el circuito que se muestra en la figura 149. Utilizar  $V_{CC} = 12 \text{ V}$ ,  $R_B = 500 \text{ K}\Omega$  (medir  $\beta$  con el multímetro) para obtener  $I_B \cong 23 \mu\text{A}$ ,  $I_C \cong 1.16 \text{ mA}$  y  $V_{CE} \cong 11 \text{ V}$  según las ecuaciones 7.4, 7.6, 7.9 y 7.10.

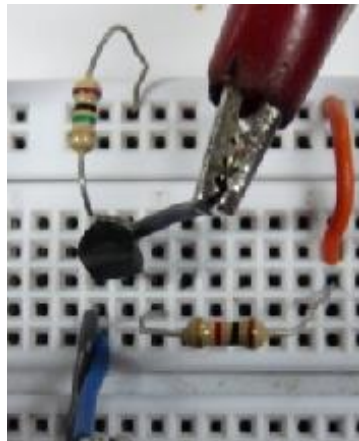
Si se va a utilizar otro circuito con transistor debe hacerse lo siguiente:

- Elegir el tipo de transistor.
- Indicar la polaridad directa en la región activa.
- Colocar las fuentes que proporcionan las direcciones resultantes.



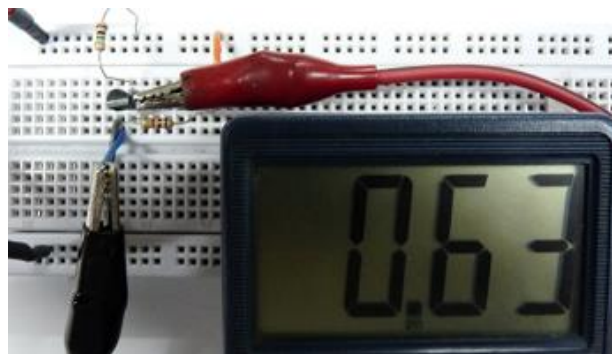
Para que el transistor (npn) funcione adecuadamente, el diodo base-emisor debe estar polarizado directamente y el de base-colector polarizado inversamente; verificar que  $V_{BE} \cong 0.7 V$ ; conectando el multímetro como muestra la figura 150.

Figura 150. **Transistor polarizado**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

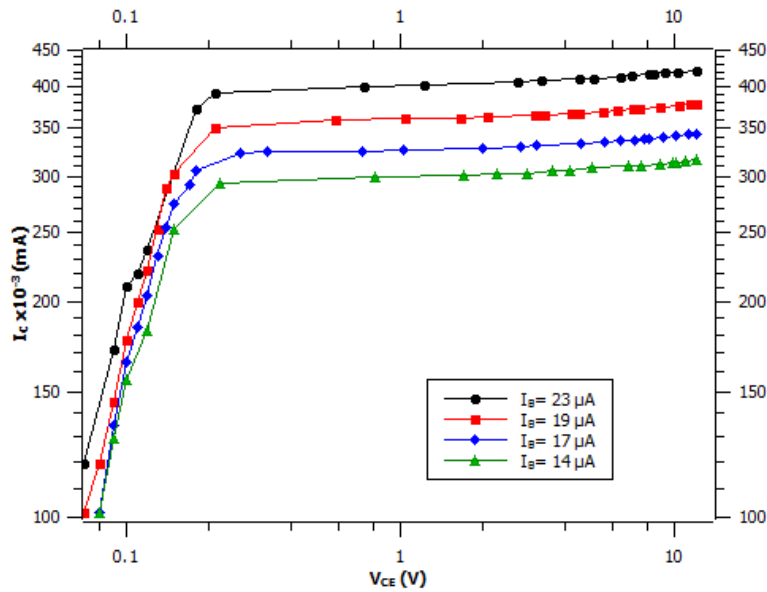
Figura 151. **Comprobación de la polarización directa del transistor base-emisor**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

Desconectar la resistencia de base y conectar en su lugar un potenciómetro en serie (100 K) variar la corriente de base y medir el voltaje de colector. Graficar la corriente de colector contra el voltaje de colector emisor, variar la resistencia de base en intervalos de 100 K $\Omega$  y repetir el procedimiento anterior (figura 152 para cuatro corrientes de base).

Figura 152. **Características de salida del transistor con polarización fija**



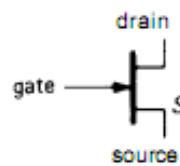
Fuente: elaboración propia, empleando Qtiplot.

## 7.2. Transistores de efecto de campo (FET)

Los transistores de efecto de campo son parecidos a los de unión bipolar; son dispositivos de tres terminales, con una terminal (la compuerta) que controla el flujo de corriente entre las otras dos terminales (el drenaje y la fuente).

La diferencia es que la corriente no fluye a través de la compuerta. El transistor BJT es un dispositivo controlado por corriente y el JFET es controlado por voltaje. Hay muchos tipo de FET; en este experimento se va a usar uno de canal n; ver la figura 153.

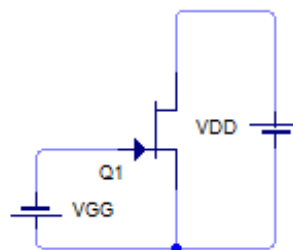
Figura 153. **Simbología del transistor de efecto de campo de canal n**



Fuente: HOROWITZ, Paul; HILL, Windfield. *The art of electronics*. p. 118.

El FET debe estar en la región de agotamiento para funcionar correctamente (al igual que el diodo cuando conduce corriente, se ha disminuido la región entre los materiales n y p) pero, al contrario que el diodo, la polarización entre la compuerta y la fuente debe ser inversa; el voltaje negativo de la compuerta controla el flujo de corriente entre el drenaje y la fuente; ver figura 154.

Figura 154. **Circuito con FET**

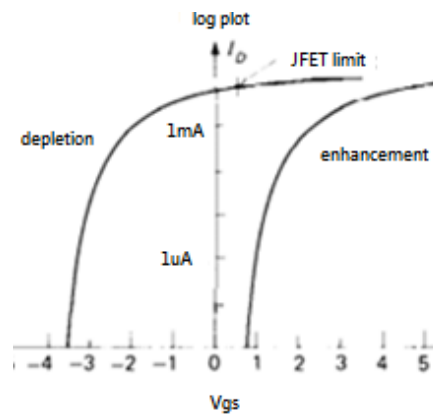


Fuente: elaboración propia.

El negativo de  $V_{GG}$  está conectado a la compuerta y el positivo de  $V_{DD}$  al drenaje. Se va a graficar la curva  $I_D - V_{DS}$  ( $V_{DD} = V_{GS} = 0$ ) que muestra la figura 155, y a comparar el voltaje en el que  $I_D$  es contante en la gráfica con el valor que especifica el fabricante en la hoja de datos; ver la tabla XXVII (utilizar un JFET de canal n, MPF102).

Hay que tomar en cuenta el voltaje máximo entre el drenaje y la fuente; la corriente de drenaje varía al cambiar el voltaje de drenaje-fuente. Armar el circuito que muestra la figura 156.

Figura 155. **Características generales de un FET**



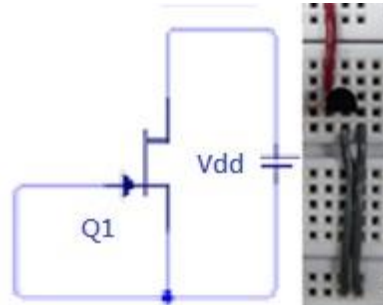
Fuente: HOROWITZ, Paul; HILL, Windfield. *The art of electronics*. p. 115.

Tabla XXVII. **Hoja de datos del FET MPF102**

MAXIMUM RATINGS			
Rating	Symbol	Value	Unit
Drain-Source Voltage	$V_{DS}$	25	Vdc
Gate-Source Cutoff Voltage ( $V_{DS} = 15$ Vdc, $I_D = 2.0$ nAdc)	$V_{GS(off)}$	-	-8.0 Vdc

Fuente: MOTOROLA. *Semiconductor technical data MPF/102*. p. 1.

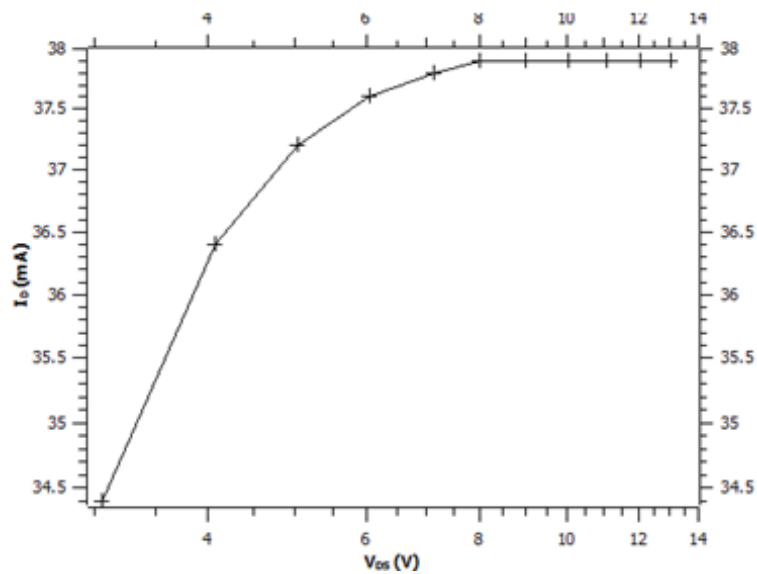
Figura 156. **Circuito FET con la compuerta conectada a tierra**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

Puede verse en la figura 157 que a partir de  $V_p \cong 8$  V la corriente de drenaje es constante; esto coincide con el voltaje inverso de compuerta-fuente en el que el FET deja de conducir corriente, según la hoja de datos.

Figura 157. **Corriente de drenaje contra voltaje de drenaje-fuente**



Fuente: elaboración propia, empleando Qtiplot.

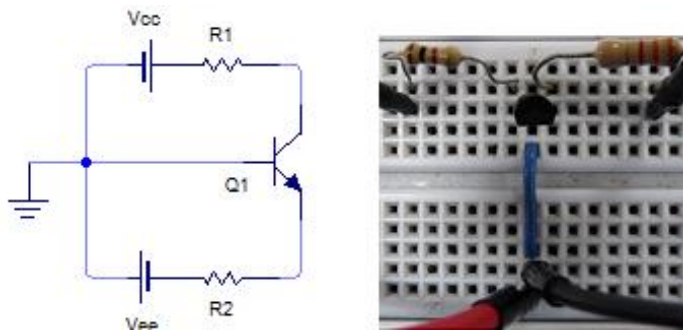
### 7.3. Circuitos con transistores

Hay otras configuraciones del transistor BJT además de la mencionada anteriormente, algunos circuitos de polarización se escriben a continuación:

#### 7.3.1. Configuración de base común

En la configuración base común (figura 158) la base es común a la entrada y la salida del circuito, la entrada se conecta al emisor y la salida al colector, la corriente de control es  $I_B$ . En esta configuración se tiene solo ganancia de voltaje, la impedancia de entrada es baja. Utilizar  $V_{CC} = 9\text{ V}$ ,  $V_{EE} = 3\text{ V}$  (verifique los voltajes midiendo directamente en el circuito),  $R_C = 3\text{ K}\Omega$  y  $R_E = 1\text{ K}\Omega$ .

Figura 158. Circuito con transistor BJT de base común



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

Para la configuración base común se obtiene:

$$I_E = \frac{V_{EE} - V_{BE}}{R_E} \quad \text{Ec. [7.16]}$$

$$V_{CB} = V_{CC} - I_C R_C \quad \text{Ec. [7.17]}$$

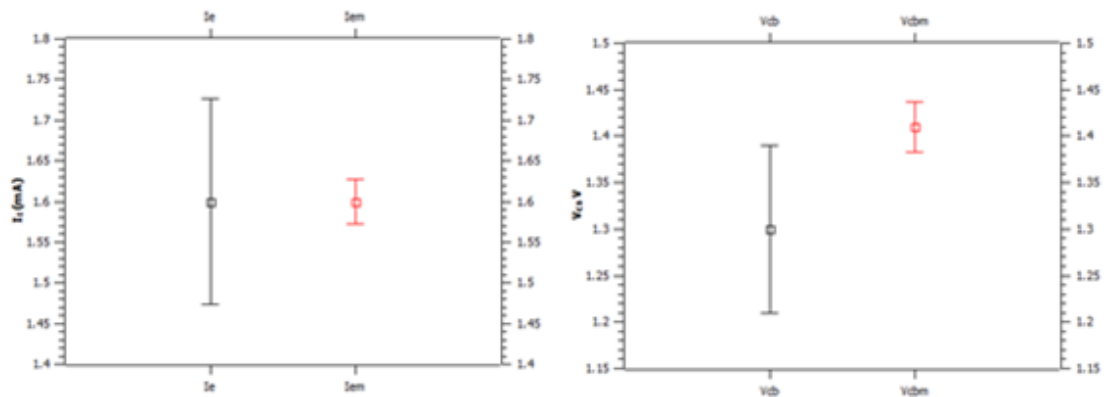
Donde  $I_B = \frac{I_C}{\beta}$ . Ver la comparación de las medidas en la tabla XXVIII y la figura 159.

Tabla XXVIII. **Comparación de corriente de emisor y voltaje colector-base para la configuración emisor común**

$I_E$	$I_{EM}$
$(1.60 \pm 0.14) \text{ mA}$	$(1.60 \pm 0.03) \text{ mA}$
$V_{CB}$	$V_{CBM}$
$(1.3 \pm 0.1) \text{ V}$	$(1.42 \pm 0.03) \text{ V}$

Fuente: elaboración propia.

Figura 159. **Discrepancia de medidas para la configuración base común**



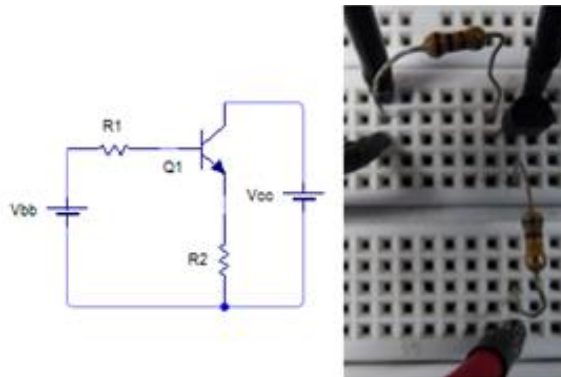
Fuente: elaboración propia, empleando Qtiplot.

### 7.3.2. Configuración de colector común

En esta configuración el colector es común a la entrada y la salida del circuito; la entrada se conecta a la base y la salida al emisor. En esta configuración se obtiene solo ganancia de corriente, la impedancia de entrada es alta y la de salida es baja.

Utilizar  $V_{CC} = 9\text{ V}$ ,  $V_{BB} = 3\text{ V}$  (verificar los voltajes midiendo directamente en el circuito),  $R_B = 501\text{ K}\Omega$  y  $R_E = 1\text{ K}\Omega$ .

Figura 160. Circuito con transistor BJT de colector común



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

Para la configuración colector común de la figura 160 se obtiene:

$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B + (\beta + 1)R_E} \quad \text{Ec. [7.18]}$$

Ver la comparación de medidas de colector común en la tabla XXIX y la figura 161.

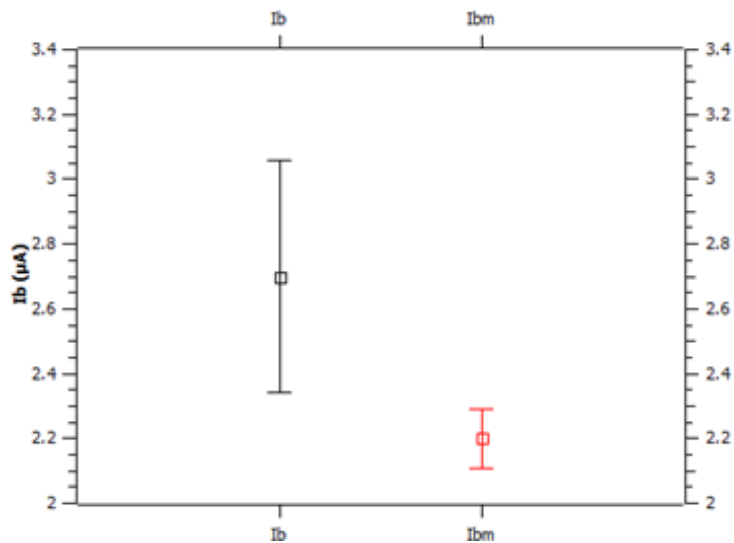


Tabla XXIX. **Comparación de corriente de base para la configuración colector común**

$I_B$	$I_{BM}$
$(2.7 \pm 0.3) \mu A$	$(11.95 \pm 0.05) \mu A$

Fuente: elaboración propia.

Figura 161. **Discrepancia de medidas para la configuración colector común**

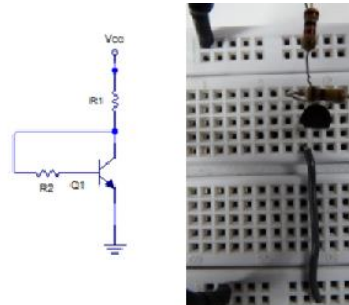


Fuente: elaboración propia, empleando Qtiplot.

### 7.3.3. Configuración de emisor común

En esta configuración la señal se aplica a la base de transistor y la salida en el colector; hay ganancia de corriente y de voltaje y alta impedancia de entrada.

Figura 162. **Circuito con transistor BJT de emisor común**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

De las redes de entrada y salida de la figura 162 se obtiene:

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + \beta R_C} \quad \text{Ec. [7.19]}$$

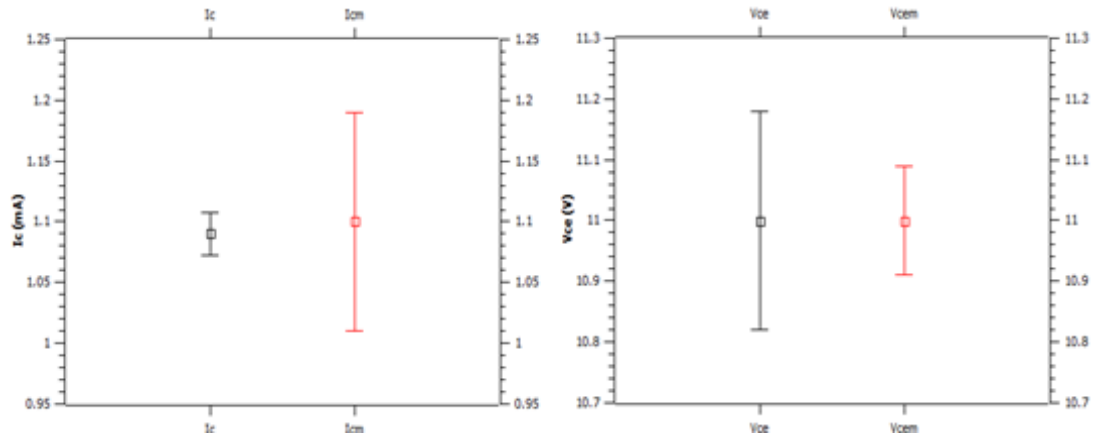
De [7.4] se obtiene  $I_C$  y el voltaje entre colector y emisor lo describe la ecuación [7.11]. Armar el circuito de la figura 161 y medir la corriente de colector, el voltaje base-emisor y el voltaje colector-emisor. Comparar con los valores obtenidos de las ecuaciones 7.4, 7.11 y 7.12. (tabla XXX, figura 163).

Tabla XXX. **Comparación de corriente de colector y voltaje colector-emisor para la configuración emisor común**

$I_C$	$I_{Cm}$
$(1.09 \pm 0.02) \text{ m A}$	$(1.1 \pm 0.3) \text{ m A}$
$V_{CE}$	$V_{CEM}$
$(11.0 \pm 0.2) \text{ V}$	$(11.0 \pm 0.1) \text{ V}$

Fuente: elaboración propia.

Figura 163. **Discrepancia de medidas para la configuración emisor común**



Fuente: elaboración propia, empleando Qtiplot.

#### 7.4. Equipo y materiales para transistores

A continuación se muestra una lista de los dispositivos que se utilizan en los experimentos con diodos.

Tabla XXXI. **Equipo y materiales para transistores**

Equipo	Dispositivos	Cantidad
Fuente de voltaje directo		1
Multímetro digital		2
<i>Protoboard</i>		1
Fuente de voltaje directo variable		1
Conectores banana-lagarto		4
Alambres para conectar en el <i>protoboard</i>		1
	Resistores	

Continuación de la tabla XXXI.

	Potenciómetro <i>B5K</i>	1
	Potenciómetro <i>B100K</i>	1
	Transistor BJT 2N3904	1
	Transistor FET MPF102	1

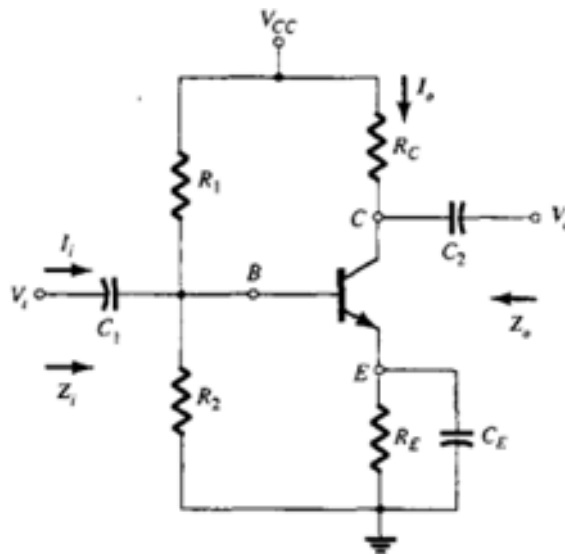
Fuente: elaboración propia.

## 8. AMPLIFICADORES

### 8.1. Amplificador de pequeña señal

Para utilizar el transistor BJT como amplificador es necesario analizar el circuito de polarización en corriente directa y alterna. Para cada análisis el circuito y sus componentes se ven de manera diferente. El circuito de polarización en directa por divisor de voltaje es el que se muestra en la figura 164. Esta configuración permite que el punto de operación  $Q$  no sea afectado por el cambio de  $\beta$ .

Figura 164. Configuración de polarización por divisor de voltaje



Fuente: BOYLESTAD, R; NASHELSKY, L. *Electrónica: teoría de circuitos*. p. 350.

Idealmente no debe circular corriente en la base, la resistencia de emisor  $R_E$  debe ser mayor que  $R_2$ , entonces se debe cumplir que:

$$\beta R_E \geq 10R_2 \quad \text{Ec. [8.1]}$$

El voltaje en la base se puede expresar utilizando un divisor de voltaje [8.2] y de la malla colector emisor se obtiene [8.3]. También serán necesarias las expresiones conocidas [8.4] y [8.5] y [8.6].

$$V_B = \frac{R_2 V_{CC}}{R_1 + R_2} \quad \text{Ec. [8.2]}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C(R_C + R_E) \quad \text{Ec. [8.3]}$$

$$I_C \simeq I_E \quad \text{Ec. [8.4]}$$

$$I_E = \frac{V_E}{R_E} \quad \text{Ec. [8.5]}$$

$$V_E = V_B - V_{BE} \quad \text{Ec. [8.6]}$$

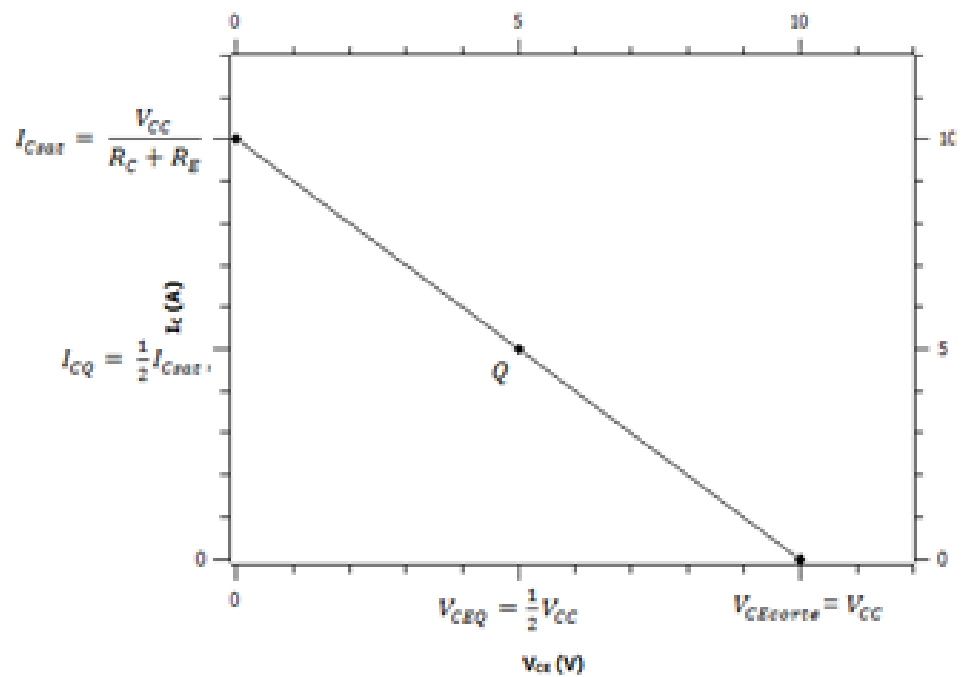
Para encontrar la recta de carga (figura 165) se necesita  $I_{Csat}$  y  $V_{CEcorte}$ ; se espera que  $Q$  esté en el centro de la recta para que opere en la región activa. Se elige un valor arbitrario de  $I_C$  que no sobrepase  $I_{Cm\acute{a}x} = 600 \text{ mA}$  según la hoja de datos, se tiene:

$$I_{Csat} = \frac{V_{CC}}{R_C + R_E} \quad \text{Ec. [8.7]}$$

$$V_{CE\text{corte}} = V_{CC} \quad \text{Ec. [8.8]}$$

$$I_{CQ} = \frac{1}{2} I_{Csat}, V_{CEQ} = \frac{1}{2} V_{CC} \quad \text{Ec. [8.9]}$$

Figura 165. Recta de carga

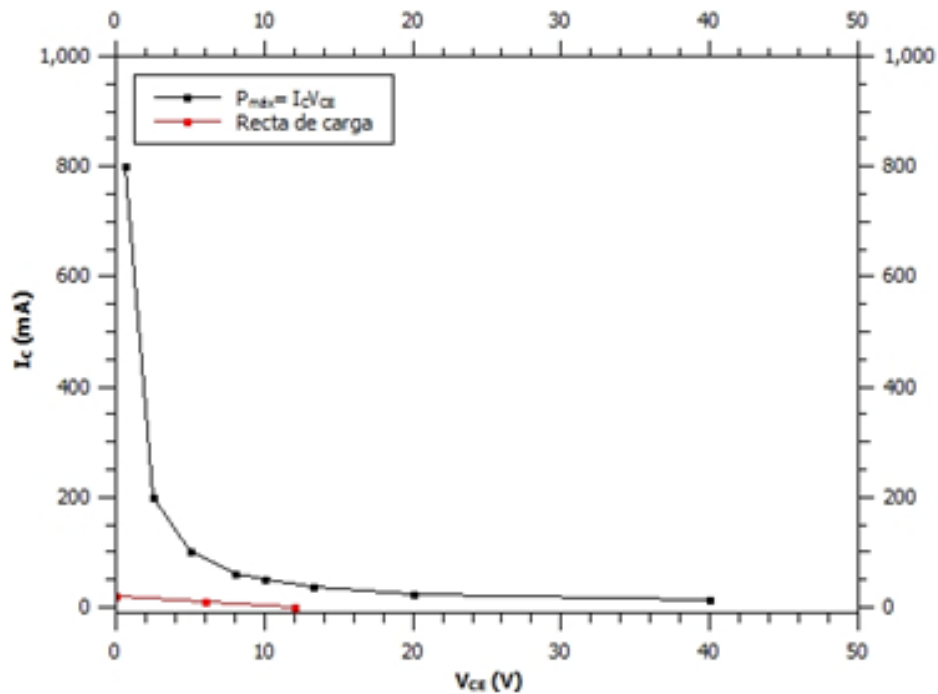


Fuente: elaboración propia, empleando Qtiplot.

Va a graficarse la recta de carga y el nivel de potencia máximo (sección 7.1.2) para el transistor 2N222A. Obtener de la hoja de datos los valores máximos de voltaje colector-emisor, corriente de colector y potencia.

Encontrar varios puntos de la curva de potencia, ecuaciones 7.6 a 7.9. Para la recta de carga utilizar  $I_{Csat} = 20 \text{ mA}$  y  $V_{CC} = 12 \text{ V}$ , entonces se tiene:  $I_{CQ} = 10 \text{ mA}$  y  $V_{CEQ} = 6 \text{ V}$ .

Figura 166. **Recta de carga y potencia máxima para el transistor 2N2222A**



Fuente: elaboración propia, empleando Qtiplot.

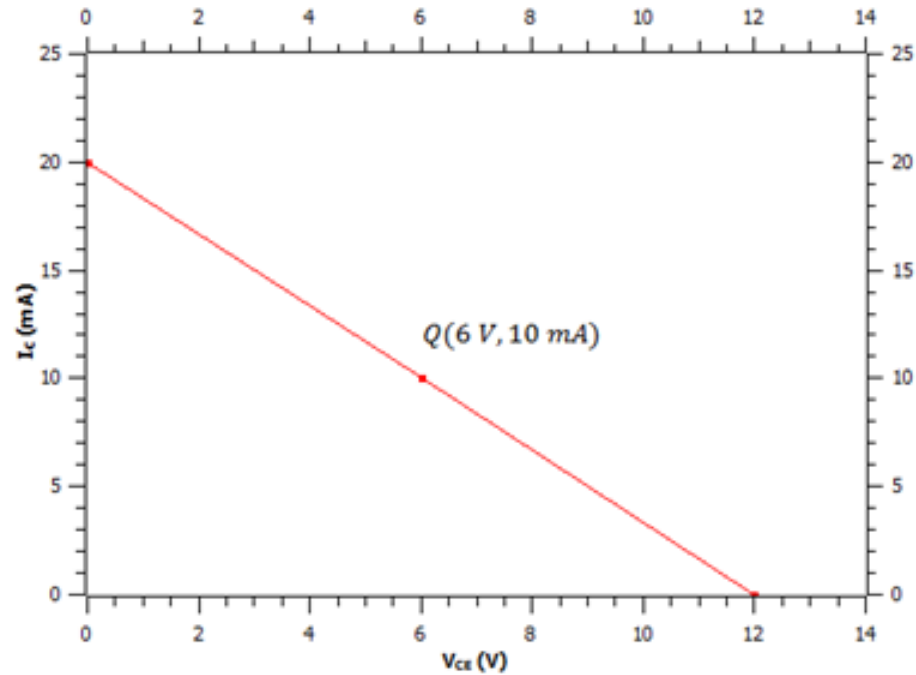
La figura 166 muestra que para los valores que se van a utilizar de corriente de colector y voltaje de colector emisor, el transistor no sobrepasa su valor máximo de potencia.

La figura 167 muestra solo la recta de carga que va a utilizarse para encontrar los valores de las resistencias en el circuito de polarización por divisor de voltaje.

Las curva de potencia y la recta de carga son necesarias para encontrar el punto óptimo de funcionamiento del transistor.



Figura 167. Recta de carga para el transistor 2N2222A



Fuente: elaboración propia, empleando Qtiplot.

De la ecuación 8.7 se obtiene:

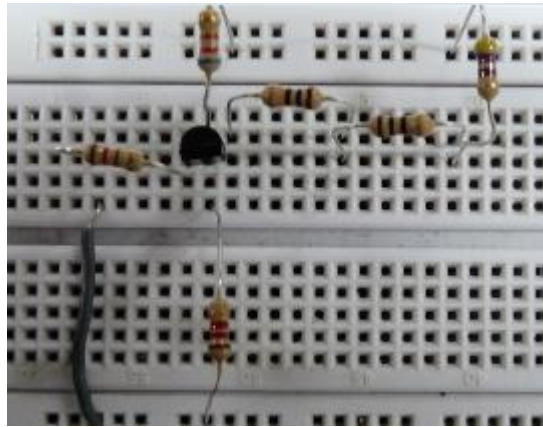
$$R_C + R_E = \frac{V_{CC}}{I_{Csat}} \quad \text{Ec. [8.10]}$$

De las ecuaciones 8.5 y 8.6 se obtiene  $R_E$  y sustituye este valor en [8.10] para obtener  $R_C$  y en [8.1] para encontrar  $R_2$ . Es recomendable que:

$$V_E = \frac{1}{10} V_{CC} \quad \text{Ec. [8.11]}$$

Para encontrar  $R_1$  se utiliza la ecuación [8.2]. Armar el circuito de la figura 164 sin los capacitores y verifique que el transistor esté en su región activa. Utilizar  $V_{CC} = 12\text{ V}$ ,  $R_1 = 6.2\text{ K}\Omega$ ,  $R_2 \leq 1.5\text{ K}\Omega$ ,  $R_C = 480\ \Omega$  y  $R_E = 120\ \Omega$  o valores cercanos. Ver la figura 168, y medir el voltaje entre base y emisor.

Figura 168. **Circuito de polarización por divisor de voltaje utilizando los valores de resistencias encontrados**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

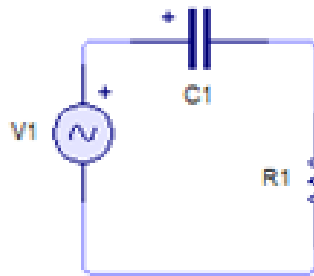
El análisis del circuito en corriente alterna se hace para encontrar el valor de impedancia de entrada y salida (cuando hay corriente alterna). De la figura 164, los capacitores  $C_1, C_2$  son capacitores de acoplo; estos se comportan como un cortocircuito en alterna, la impedancia del capacitor es la oposición al paso de la corriente alterna:

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C}$$

Ec. [8.12]

Si la impedancia es mucho más pequeña que la resistencia de carga  $R_L$ , la mayor parte de la tensión de entrada cae sobre esta resistencia. Considerar el circuito equivalente de la figura 169.

Figura 169. **Circuito con condensador de acoplo**



Fuente: elaboración propia, empleando LiveWire.

Se quiere que pase al transistor la mayor parte de la corriente alterna, por eso se necesita que la impedancia sea pequeña entonces:

$$R_L \gg X_C \quad \text{Ec. [8.13]}$$

$$X_C = \frac{R_L}{10} \quad \text{Ec. [8.14]}$$

$$C = \frac{10}{2\pi f R_L} \quad \text{Ec. [8.15]}$$

De la misma forma, el capacitor de desacoplo  $C_E$  provoca una tierra en el emisor para corriente alterna y su capacitancia se puede calcular utilizando [8.15]. La diferencia entre la capacitancia de los capacitores de acoplo y desacoplo es que dependen de distintos valores de  $R_L$ .

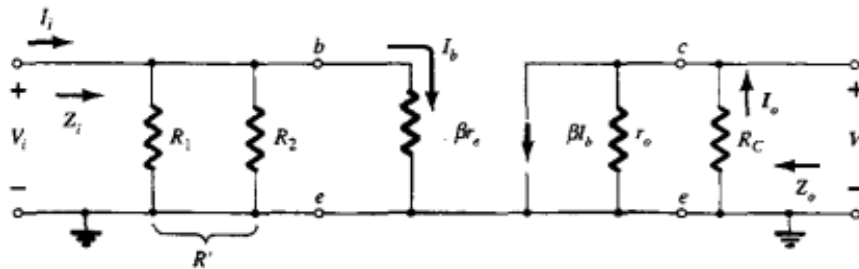
La señal en corriente alterna entra por la base y sale por el emisor; si aumenta la corriente de base, aumentan la corriente de colector y el voltaje de la resistencia de colector; si la señal de entrada es muy grande o muy pequeña va a llegar a la saturación o al corte y la salida disminuye o se distorsiona (por eso se coloca  $Q$  en medio de la recta de carga, para que pueda variar sin llegar a la saturación o al corte).

El diodo base-emisor tiene una resistencia dinámica  $r'_e$  en alterna:

$$r'_e = \frac{25 \text{ mV}}{I_{EQ}} = \frac{25 \text{ mV}}{I_{CQ}} \quad \text{Ec. [8.16]}$$

El circuito equivalente al de la figura 164 en corriente alterna es el que se muestra en la figura 170.

Figura 170. **Circuito equivalente para corriente alterna**



Fuente: BOYLESTAD, R. NASHELSKY, L. *Electrónica: teoría de circuitos*. p. 350.

La resistencia de entrada a la base es:

$$r_{bentrada} = \frac{V_B}{i_B} = \frac{i_c r'_e}{i_b} = \frac{\beta i_b r'_e}{i_b}$$

$$r_{bent} = \beta r'_e \quad \text{Ec. [8.17]}$$

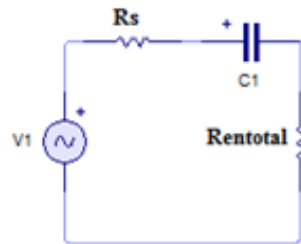
Entonces la resistencia de entrada total vista desde la fuente, si se considera que la fuente tiene una resistencia interna  $R_s$  es igual a [8.18] y el voltaje en la base es igual a [8.19], la resistencia de entrada deber ser  $R_{entotal} \cong 10 R_s$  :

$$R_{entotal} = R_1 || R_2 || \beta r'_e \quad \text{Ec. [8.18]}$$

$$V_B = \frac{R_{entotal} V_s}{R_s + R_{entotal}} \quad \text{Ec. [8.19]}$$

Se va a encontrar la capacitancia que debe tener el capacitor de acoplo  $C_1$ , vea la figura 171.

Figura 171. **Circuito para el cálculo de la capacitancia de acoplo**



Fuente: elaboración propia, empleando LiveWire.

La resistencia total vista por la fuente es  $R = R_s + R_{entotal}$  lo que se quiere es que  $X_{c\ entrada} \ll R$  (cortocircuito) entonces:

$$X_C = \frac{1}{10} (R_s + R_{entotal}) \quad \text{Ec. [8.20]}$$

$$C_1 > \frac{1}{2\pi f(R_s + R_1 || R_2 || \beta r_e')} \quad \text{Ec. [8.21]}$$

Donde  $f$  es la frecuencia mínima de la señal de entrada. Para el condensador de acoplo  $C_2$ , si se considera que hay una carga conectada al amplificador, se tiene que la resistencia de salida es igual a [8.22] y la capacitancia de acoplo en el colector es igual a [8.23].

$$R_{sal} = R_c || R_L \quad \text{Ec. [8.22]}$$

$$C_2 > \frac{1}{2\pi f R_{sal}} \quad \text{Ec. [8.23]}$$

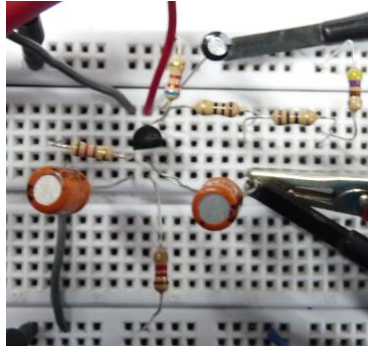
Donde  $R_L$  es la resistencia conectada en la salida del amplificador; utilizar una resistencia del orden de los  $K\Omega$ . La capacitancia de desacoplo simplemente es:

$$C_E > \frac{1}{2\pi f R_E} \quad \text{Ec. [8.24]}$$

Se va a amplificar una señal de  $V_{entrada} = 0.1 V_{rms}$  (la señal de entrada debe ser pequeña, verificar que el voltaje base-emisor no cambie al aumentar la amplitud de la señal de entrada) con  $f = 100 \text{ Hz}$ , agregar al circuito de la figura 168 los capacitores encontrados o mayores,  $C_1 = C_E = 100 \mu F$  y  $C_2 = 10 \mu F$ .

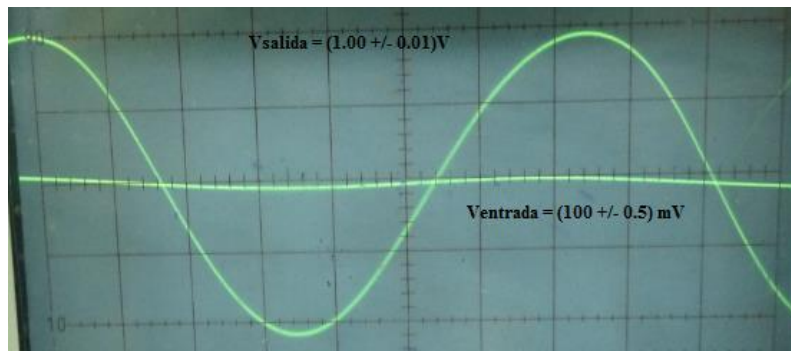
Conectar la señal en corriente alterna a la entrada del circuito; ver la figura 172, verificar el voltaje base-emisor. Medir las señales entrada y salida con el osciloscopio, figura 173.

Figura 172. **Circuito completo de amplificador con transistor**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

Figura 173. **Señales de entrada y salida del amplificador**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

Para calcular la ganancia de voltaje de transistor se tiene:

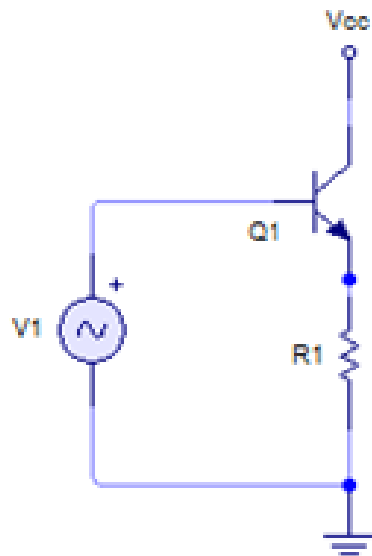
$$A_v = \frac{V_{salida}}{V_{entrada}}$$
$$A_v = 10$$

Ec. [8.25]

## 8.2. Amplificadores de potencia

Cuando se amplifica una señal es conveniente que entregue la potencia necesaria a un dispositivo externo. Un amplificador de potencia tiene, idealmente una ganancia de voltaje  $A_v = 1$  y alta ganancia de corriente

Figura 174. **Amplificador de potencia de clase A para medio ciclo**



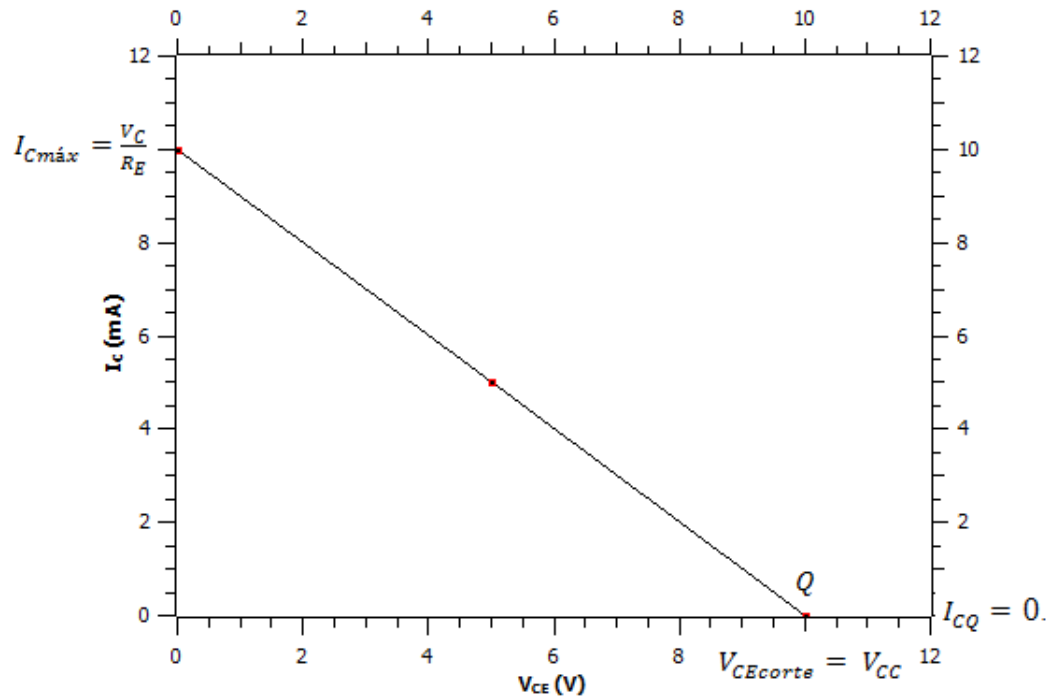
Fuente: elaboración propia, empleando LiveWire.

Hay varios tipos de amplificadores de potencia, el circuito de la figura 174 muestra la base de estos amplificadores.

Para que un amplificador de clase A funcione adecuadamente, el transistor tiene que estar en la región de corte, es decir,  $V_{CEQ} = V_{CC}$  y la corriente de colector en el punto Q debe ser  $I_{CQ} = 0$ . La recta de carga de este circuito se muestra en la figura 175.



Figura 175. **Recta de carga para el circuito amplificador de potencia**



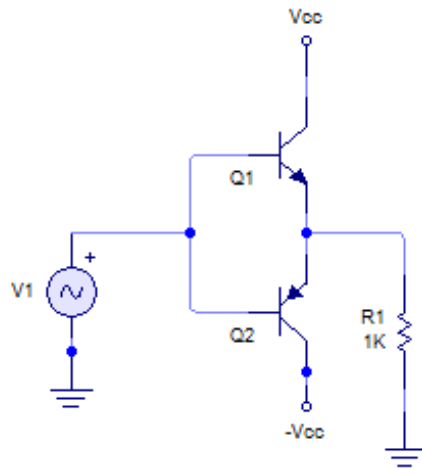
Fuente: elaboración propia, empleando Qtiplot.

La señal de entrada polariza en directa el diodo del emisor y el transistor está activo únicamente en el ciclo positivo y si la señal es mayor a  $0.7\text{ V}$ . Para corregir esto se utiliza un transistor pnp y una fuente simétrica negativa.

El amplificador de potencia clase B es una modificación del amplificador de la figura 176, la figura 177 muestra el circuito para un amplificador de potencia clase B, con una fuente de voltaje directo.

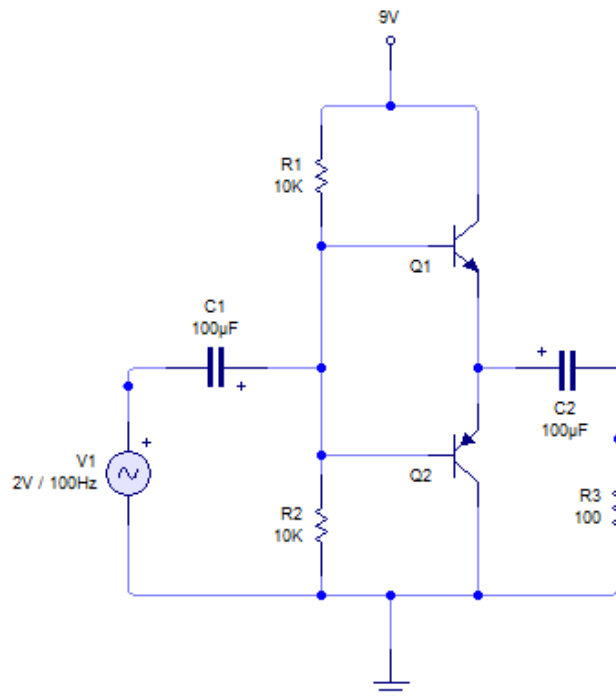
Los diferentes tipos de amplificadores con transistores se utilizan de acuerdo a la necesidad de ganancia que se tenga, además se pueden clasificar detalladamente de acuerdo con la estabilidad que proporcionan o el *feedback*.

Figura 176. **Amplificador de potencia clase A**



Fuente: elaboración propia, empleando LiveWire.

Figura 177. **Amplificador de potencia clase B**

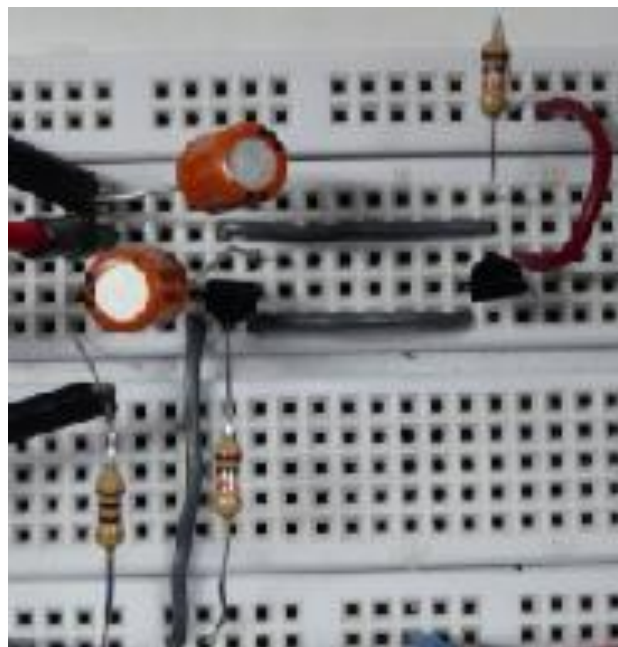


Fuente: elaboración propia, empleando LiveWire.

Hay que tomar en cuenta que los transistores no se polarizan si no hay señal en alterna, se coloca  $R_E = 100 \Omega$ , la corriente máxima de colector debe ser  $I_{Cm\acute{a}x} = \frac{V_{CE}}{100}$ ,  $V_{CE} = \frac{V_{CC}}{2}$  para cada transistor. La corriente a través de cada resistencia de transistor debe ser mucho menor que la del colector. En este caso se toma  $I_R = 0.01 I_C$ .

Armar el circuito de la figura 177, utilizar  $R_1 = R_2 = 10K\Omega$  y  $C_1 = C_2 = 100 \mu F$  para una señal de entrada  $V_{entrada} = 2 V$ ,  $f = 100 Hz$ . Ver la figura 178.

Figura 178. **Circuito de amplificador de potencia clase B**

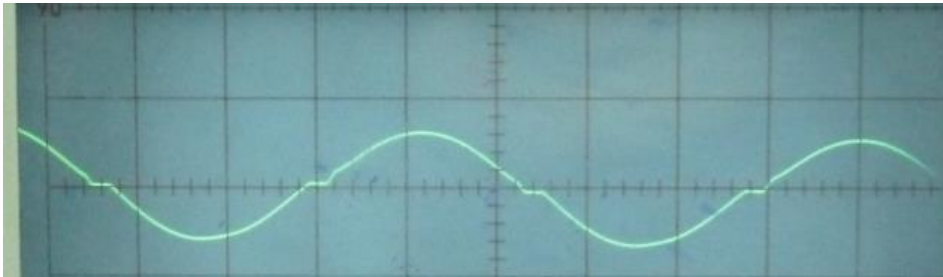


Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

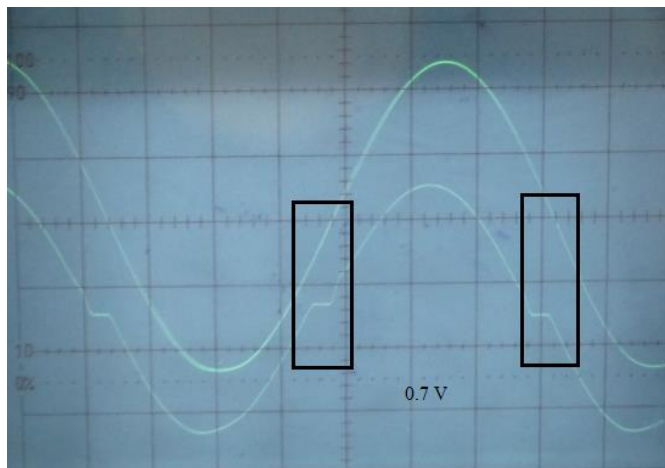
La figura 179 muestra la salida del amplificador, el voltaje de salida es menor que el de entrada, por lo que no hay ganancia de voltaje; también

muestra que los transistores no conducen mientras los semiciclos de la señal no estén en al menos  $0.7\text{ V}$ . La ganancia de corriente  $A_i = \frac{i_{salida}}{i_{entrada}} = 10$ .

Figura 179. **Circuito amplificador clase B**



(a) salida



(b) comparación con la señal de entrada

Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

### 8.3. **Amplificadores operacionales**

A continuación se describen algunos experimentos con amplificadores operacionales.

### 8.3.1. Concepto de amplificador diferencial y operacional

El amplificador diferencial es una configuración comúnmente utilizada para amplificar la diferencia de potencial entre dos puntos de una señal. En el caso ideal la salida es completamente independiente de los niveles individuales de la señal de entrada.

Los amplificadores diferenciales son importantes en aplicaciones donde la señal débil está contaminada con ruido, son utilizados en amplificadores operacionales y muy importantes en el diseño de amplificadores D.C.

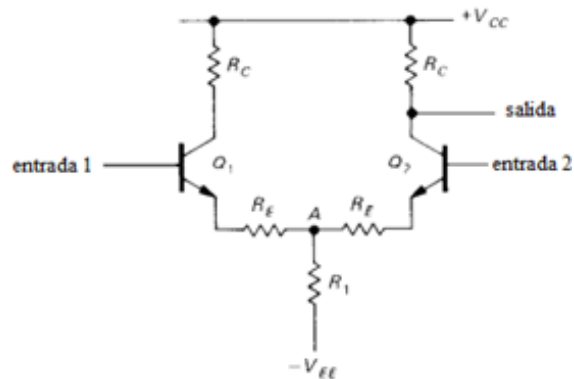
La figura 180 muestra el circuito básico; la salida se toma desde un colector respecto a tierra; esto se llama salida de un solo extremo y es la configuración más común.

En sistemas de control el *feedback* consiste en comparar la salida del sistema con la deseada y hacer una corrección al respecto. En circuitos amplificadores la salida debería ser un múltiplo de la entrada; en amplificadores con *feedback* la entrada se compara con una versión atenuada de la salida.

Los amplificadores operacionales están relacionados con el *feedback*; estos son amplificadores diferenciales de muy alta ganancia y acople dc, los amplificadores operacionales tienen baja impedancia de salida y alta impedancia de entrada, su símbolo es el que muestra la figura 181.

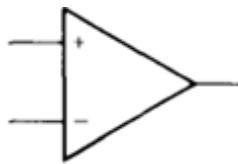
Ejemplos de amplificadores diferenciales incluyen transferencia de señales digitales a través de cables largos, señales de audio, radiofrecuencia, voltajes de electrocardiograma; esencialmente se utilizan en amplificadores operacionales.

Figura 180. **Amplificador diferencial clásico con transistores**



Fuente: HOROWITZ, Paul; HILL, Windfield. *The art of electronics*. p. 98.

Figura 181. **Símbolo del amplificador operacional**



Fuente: HOROWITZ, Paul; HILL, Windfield. *The art of electronics*. p. 176.

Las reglas básicas para el funcionamiento correcto del amplificador operacional con *feedback* externo, son las siguientes:

- Primero, la ganancia de voltaje del op-amp es tan alta que un milivoltio entre las terminales de entrada va a cambiar la salida a su rango máximo. Segundo, los op-amps extraen muy poca corriente de entrada;
- La salida hará lo que sea necesario para mantener la diferencia de voltajes entre las entradas sea cero;

- No hay corriente en las entradas del amplificador operacional.

Estas dos reglas pueden explicar el concepto de tierra virtual, al ser la diferencia de potencial entre las entradas muy pequeña comparada con la salida, puede ser considerada como  $0\text{ V}$  pero al ser un cortocircuito virtual, no circula corriente a tierra, solo a través de las resistencias del circuito.

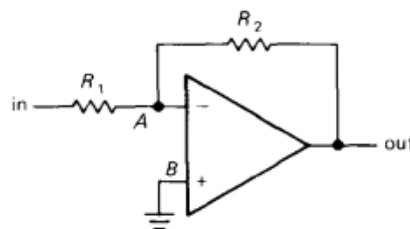
### 8.3.2. Amplificador inversor

El amplificador inversor es uno de los circuitos básico de amplificadores operacionales. Al aplicar las reglas anteriores al circuito de la figura 182, el punto B está conectado a tierra, según la regla 1 también A está conectado a tierra. Según la regla 2 el voltaje a través de  $R_2$  es  $V_{salida}$  y el voltaje a través de  $R_1$  es  $V_{entrada}$ . Entonces:

$$\frac{V_{salida}}{R_2} = \frac{-V_{entrada}}{R_1} \quad \text{Ec. [8.26]}$$

$$\frac{V_{salida}}{V_{entrada}} = -\frac{R_2}{R_1} \quad \text{Ec. [8.27]}$$

Figura 182. Amplificador inversor



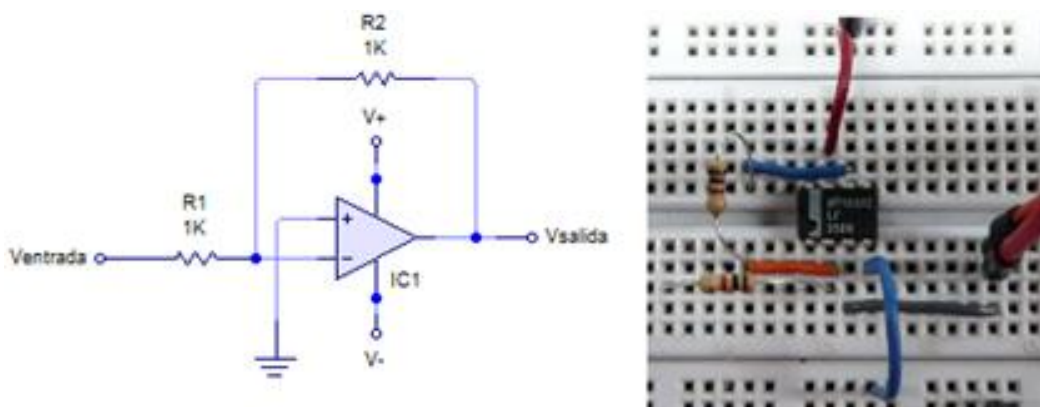
Fuente: HOROWITZ, Paul; HILL, Windfield. The art of electronics. p. 178.

Al considerar que el punto  $A$  siempre es cero voltios,  $Z_{entrada} = R_1$ . Esta configuración tiene como inconveniente su pequeña impedancia de entrada, particularmente la de los amplificadores con ganancias muy altas donde, según [8.27]  $R_1$  debe ser pequeña. Esto se puede arreglar utilizando el circuito de la figura 187.

Armar el circuito como muestra la figura 183. Utilizar un amplificador operacional LF356N (la figura 184 muestra el diagrama de conexión del integrado) y  $R_1 = 1\text{ K}\Omega$  en la entrada inversora.

Colocar  $R_2 = 1\text{ K}\Omega$  como resistencia de retroalimentación y comparar la entrada y la salida del circuito; repetir el procedimiento anterior para cualquier valor de  $R_2$  mayor que  $R_1 = 1\text{ K}\Omega$ . Utilizar el circuito mostrado en la figura 185 como fuente simétrica y una onda sinusoidal arbitraria como voltaje de entrada. La figura 186 muestra las entradas y las salidas de las configuraciones anteriores.

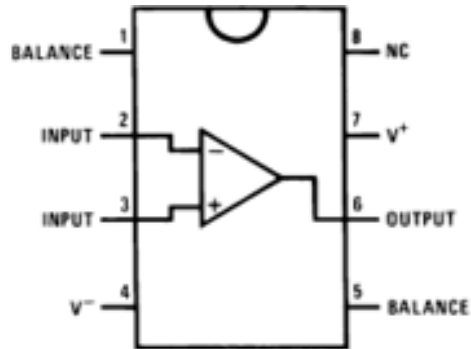
Figura 183. **Amplificador inversor con LF356N**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

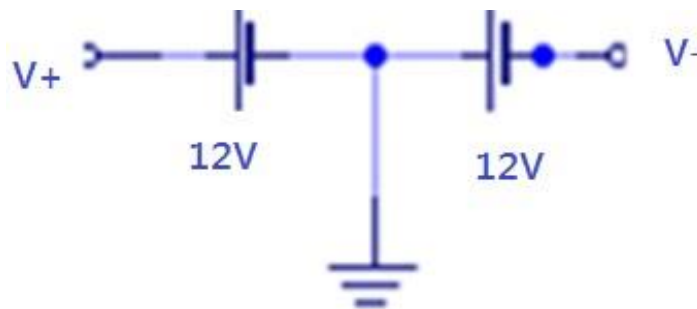


Figura 184. **Diagrama de conexión LF356N**



Fuente: NATIONAL SEMICONDUCTOR. *JFET input operational amplifiers datasheet*. p.10.

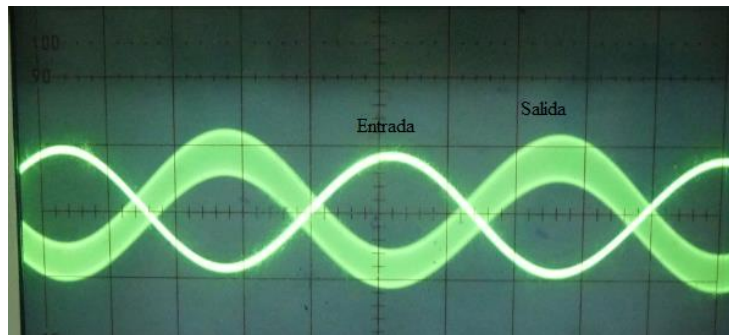
Figura 185. **Fuente simétrica**



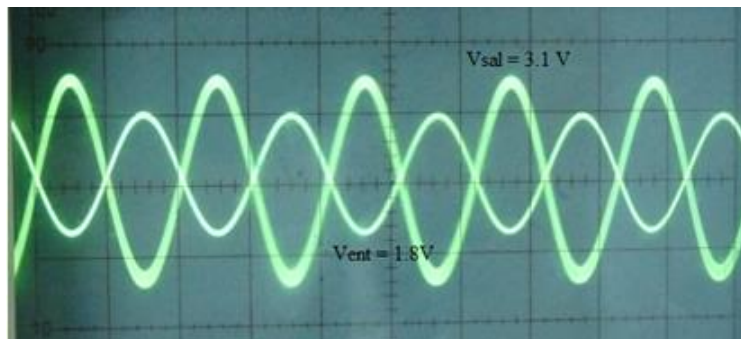
Fuente: elaboración propia, empleando LiveWire.

Las fuentes simétricas o duales se utilizan para alimentar circuitos que necesitan voltajes positivos y negativos, como en este caso que se utilizan amplificadores operacionales. La fuente simétrica de la figura anterior suministra dos voltajes fijos, uno negativo de 12 voltios y otro positivo, también de 12 voltios.

Figura 186. **Comparación de los voltajes de entrada y salida del amplificador inversor**



(a)  $R_2 = 1\text{ K}\Omega$



(b)  $R_2 = 3.3\text{ K}\Omega$

Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

Cuando  $R_1 = R_2$  la ganancia de voltaje  $A_v \cong 1$  (la distorsión de la señal de salida se debe a que la fuente simétrica no es ideal) como muestra la figura 186(a).

La ganancia ideal cuando  $R_2 = 3.3\text{ K}\Omega$  es  $A_v = -3$ , según 186(b)  $A_v \cong -2$  (ecuación 8.26). La señal de salida está invertida respecto de la entrada.

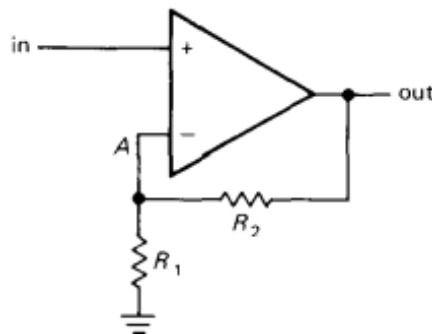
### 8.3.3. Amplificador no inversor

El amplificador no inversor tiene una impedancia de entrada infinita; la impedancia de salida sigue siendo pequeña. En este circuito  $V_A = V_{entrada}$ , pero  $V_A$  viene de un divisor de voltaje, entonces:

$$V_A = \frac{V_{salida} R_1}{R_1 + R_2} \quad \text{Ec. [8.28]}$$

$$\frac{V_{salida}}{V_{entrada}} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad \text{Ec. [8.29]}$$

Figura 187. Amplificador no inversor

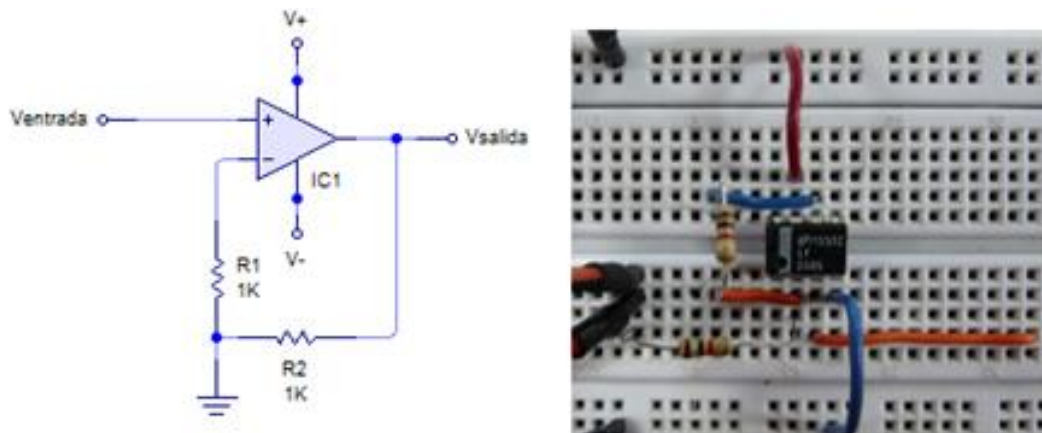


Fuente: HOROWITZ, Paul; HILL, Windfield. *The art of electronics*. p. 178.

Armar el circuito como muestra la figura 188. Colocar  $R_1 = R_2 = 1K\Omega$  y comparar la entrada y salida del circuito, repetir el procedimiento anterior para cualquier valor de  $R_2$  mayor que  $R_1 = 1K\Omega$ , utilizar el circuito mostrado en la figura 185 como fuente simétrica y una onda sinusoidal arbitraria como voltaje de entrada.

La figura 189 muestra las entradas y salidas de las configuraciones anteriores.

Figura 188. **Amplificador no inversor con LF356N**



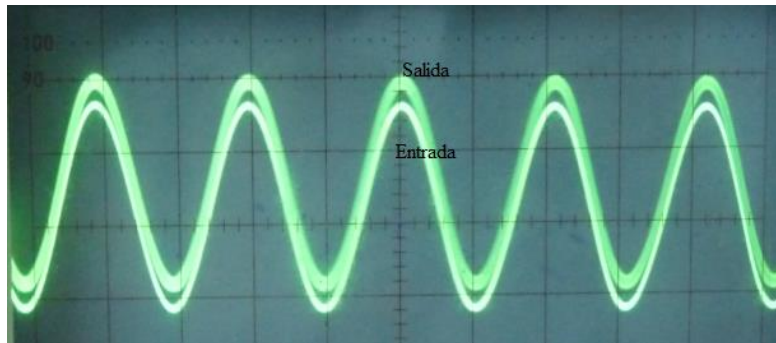
Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

Cuando  $R_1 = R_2$  la ganancia de voltaje  $A_v \cong 1$  como lo muestra la figura 189(a), la ganancia ideal cuando  $R_2 = 2.1 K\Omega$  es  $A_v = 2$ , según 189(b)  $A_v \cong 3$  (ecuación 8.28). La señal de salida no está invertida respecto de la entrada.

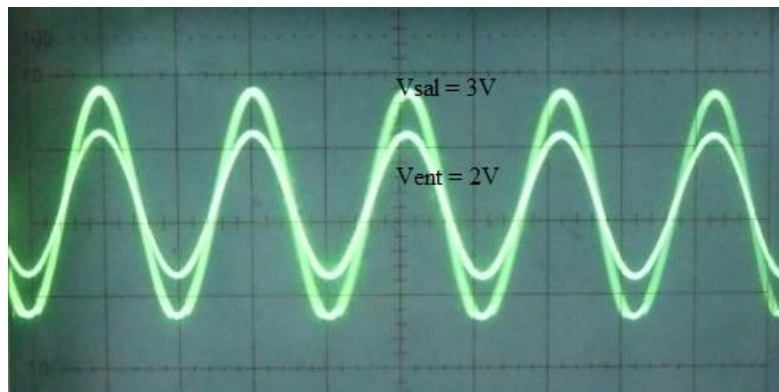
Todos los parámetros de un amplificador operacional tienen dependencia de la temperatura aunque no hacen mucha diferencia debido a que las pequeñas variaciones de voltaje son compensadas casi completamente por el *feedback*.

Las limitaciones de un amplificador operaciones se vuelven significativas solo en conexiones con circuitos de precisión, circuitos de ruido de entrada y salida y amplificador de ruido bajo.

Figura 189. **Comparación de los voltajes de entrada y salida del amplificador no inversor**



(a)  $R_2 = 1K\Omega$



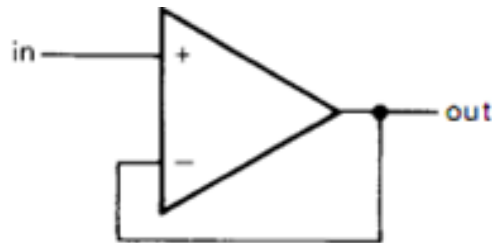
(b)  $R_2 = 2.1 K\Omega$

Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

#### 8.3.4. Seguidor

El amplificador seguidor es un amplificador no inversor con  $R_1$  infinita y  $R_2$  cero (ganancia = 1) (figura 190).

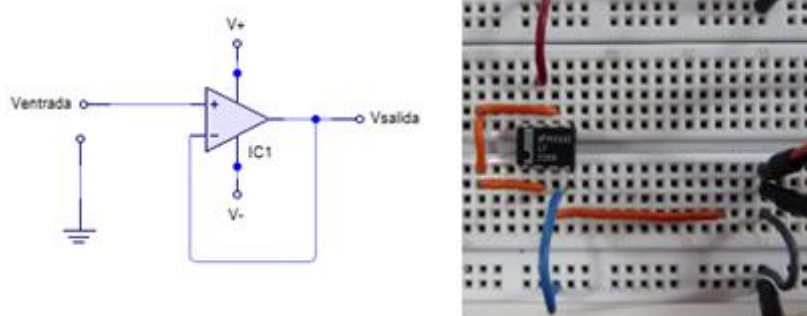
Figura 190. **Seguidor**



Fuente: HOROWITZ, Paul; HILL, Windfield. *The art of electronics*. p. 179.

Un amplificador con ganancia unitaria es llamado *buffer* por sus propiedades aislantes. Armar el circuito que muestra la figura 191 y comparar la entrada y la salida del circuito (figura 192).

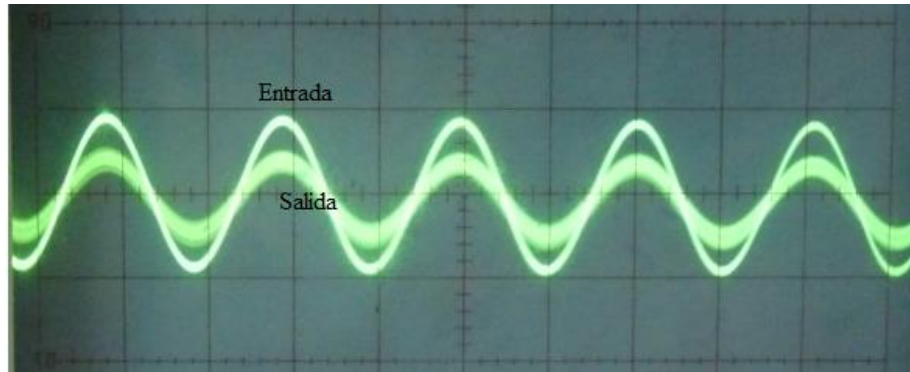
Figura 191. **Amplificador no inversor con LF356N**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

Existen amplificadores operacionales que se utilizan únicamente como seguidores con características definidas como alta velocidad o con conexiones simplificadas. Se pueden utilizar para construir fuentes de corriente; son útiles para generar corrientes en una carga que está conectada a tierra.

Figura 192. **Comparación de los voltajes de entrada y salida del seguidor**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

La ganancia ideal de un seguidor es  $A_v = 1$ , la salida del circuito muestra que la ganancia de salida es menor que 1 y no está invertida respecto de la entrada.

#### **8.4. Acoplamiento de impedancias**

El acoplamiento de impedancias se refiere al diseño de la impedancia de entrada de una carga eléctrica (o la impedancia de salida de la etapa anterior) para maximizar la transferencia de potencia.

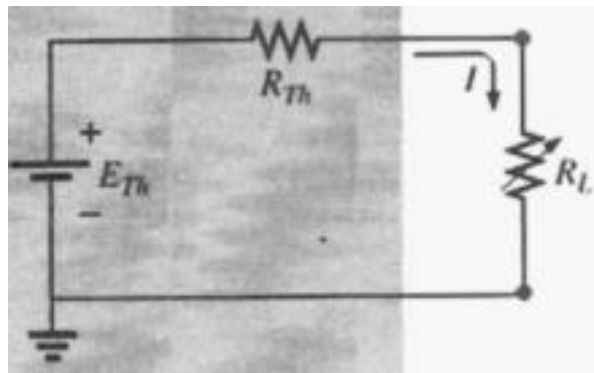
##### **8.4.1. Teorema de máxima transferencia de potencia**

Una carga recibirá potencia máxima de una red cuando su valor resistivo total sea exactamente igual a la resistencia de Thévenin (o Norton) de la red como es “vista” por la carga; ver la figura 193.

La potencia máxima será entregada cuando:

$$R_L = R_{TH} = R_N \quad \text{Ec. [8.30]}$$

Figura 193. **Circuito equivalente de Thévenin para las condiciones de máxima transferencia de potencia**



Fuente: BOYLESTAD, Robert. *Introducción al análisis de circuitos*. p. 342.

La corriente del circuito se puede describir la siguiente ecuación [8.31] y la potencia en la carga según la ecuación [8.33] es:

$$I = \frac{E_{TH}}{R_{TH} + R_L} \quad \text{Ec. [8.31]}$$

$$P_L = I^2 R_L \quad \text{Ec. [8.32]}$$

$$P_L = \frac{E_{TH}^2 R_L}{(R_{TH} + R_L)^2} \quad \text{Ec. [8.33]}$$



De la ecuación (8.29) se obtiene:

$$P_{Lm\acute{a}x} = \frac{E_{TH}^2}{4R_{TH}} \quad \text{Ec. [8.34]}$$

En corriente alterna, se entregará máxima potencia a la carga cuando la impedancia de carga es el conjugado de la impedancia de Thévenin a través de sus terminales. Estas condiciones harán que la impedancia total del circuito aparezca como puramente resistiva y la máxima potencia también se puede expresar según la ecuación [8.34].

$$Z_T = (R \pm jX) + (R \mp jX) \quad \text{Ec. [8.35]}$$

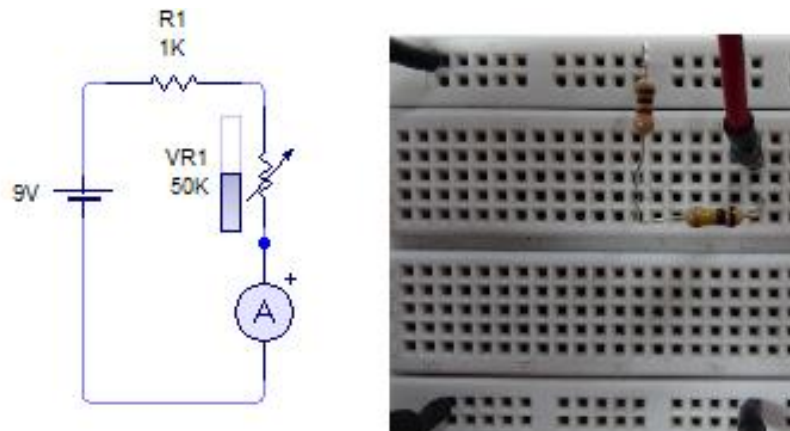
$$Z_T = 2R \quad \text{Ec. [8.36]}$$

Armar el circuito que muestra la figura 194, utilizar  $1\text{ K}\Omega$  en la resistencia de salida, medir la corriente al variar  $R_L$ , graficar la potencia en la carga contra la resistencia de carga.

La figura 195 muestra que al variar  $R_L$  (impedancia de entrada) en valores menores que  $R_s$  (impedancia de salida) la potencia en la carga varía considerablemente y no varía tanto cuando las resistencias de carga son mayores y cercanas a  $R_s$ . La potencia es máxima cuando  $R_s = R_L$ .

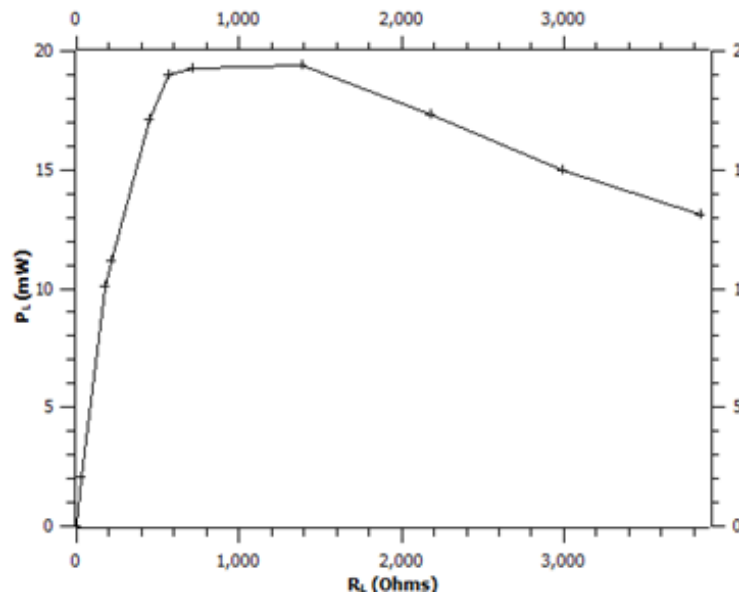
El problema se puede resumir en encontrar la resistencia de carga que de cómo resultado la máxima potencia que se transfiere a la carga, a través de una resistencia de fuente.

Figura 194. **Circuito equivalente para máxima transferencia de potencia**



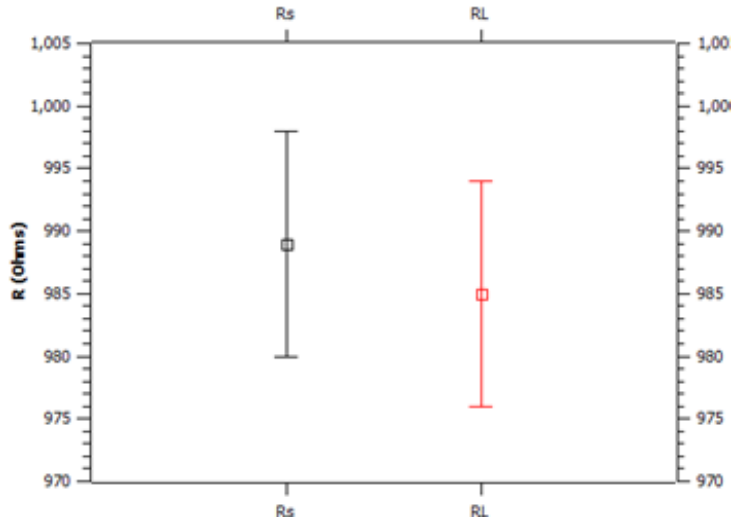
Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

Figura 195. **Potencia en la carga contra la resistencia de carga**



Fuente: elaboración propia, empleando Qtiplot.

Figura 196. **Comparación de resistencia de entrada y salida**



Fuente: elaboración propia, empleando LiveWire.

### 8.5. Equipo y materiales para amplificadores

A continuación se muestra una lista de los dispositivos que se utilizan en los experimentos con amplificadores

Tabla XXXII. **Equipo y materiales para amplificadores**

Equipo	Dispositivos	Cantidad
Fuente de voltaje directo		2
Generador de señales		1
Osciloscopio		1
Multímetro digital		3
<i>Protoboard</i>		1
Conector banana-lagarto rojo		6

Continuación de la tabla XXXII.

Conector banana-lagarto negro		6
Punta para osciloscopio		2
Alambre para conectar en el protoboard		
	Potenciómetro 20 k $\Omega$	
	Resistores	
	Transistor 2N3904	
	Transistor 2N3906	
	Transistor MPF102	
	Amplificador operacional LF356N	

Fuente: elaboración propia.

## 9. FILTROS

Al combinar capacitores con resistores es posible hacer divisores de voltaje debido a la dependencia de la frecuencia de la impedancia del capacitor  $X_c = \frac{-j}{\omega C}$ . Estos circuitos tiene la propiedad de dejar pasar señales a frecuencias específicas.

Generalmente se habla de las frecuencias de corte como frecuencias a los  $3\text{ dB}$ ; estas son las mínimas o máximas que va a dejar pasar el filtro y se escriben como  $f_{3dB}$ . Un decibel es una de las escalas de la razón entre una intensidad de energía y una referencia, es una escala logarítmica que muestra convenientemente puntos muy próximos o muy lejanos.

La potencia y la intensidad (voltaje o corriente) en decibeles se pueden escribir como [9.1] y [9.2];  $f_{3dB}$  significa que la señal de salida se atenuó o se amplificó a  $\frac{1}{2}$  o 2 veces la potencia de la señal de entrada respectivamente, o que la salida es el 70 % o 141 % de la intensidad de entrada.

$$P_{dB} = 10 \log_{10} \frac{P}{P_0} \quad \text{Ec. [9.1]}$$

$$I_{dB} = 10 \log \left( \frac{I}{I_0} \right)^2 \quad \text{Ec. [9.2]}$$

### 9.1. Filtros pasivos

A continuación se muestran algunos experimentos con filtros pasivos.

### 9.1.1. Pasa altas

La figura 197 muestra un divisor de voltaje hecho con un capacitor y un resistor. De la ley de Ohm compleja se obtienen las ecuaciones 9.1 y 9.2.; donde  $Z_{total} = R - j \frac{1}{\omega C}$ .

$$I = \frac{V_{entrada}}{Z_{total}} \quad \text{Ec. [9.3]}$$

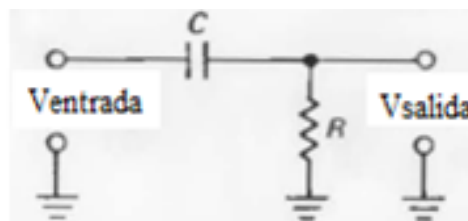
$$V_{salida} = IR \quad \text{Ec. [9.4]}$$

En este caso, no interesa la fase del voltaje de salida solo su amplitud [9.3], el voltaje de salida lo describe la ecuación 9.4:

$$V_{salida} = (V_{salida} V_{salida}^*)^{1/2} \quad \text{Ec. [9.5]}$$

$$V_{salida} = \frac{R}{(R^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2})^{1/2}} V_{entrada} \quad \text{Ec. [9.6]}$$

Figura 197. **Divisor de voltaje con capacitor y resistor (filtro pasa altas)**



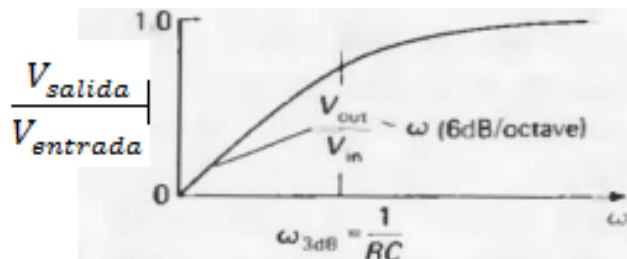
Fuente: HOROWITZ, Paul; HILL, Windfield. The art of electronics. p. 36.

La respuesta del circuito, ignorando el cambio de fase al tomar solo las amplitudes de las cantidades complejas, se muestra en la figura 198. La salida es aproximadamente igual a la entrada para frecuencias altas ( $f \geq \frac{1}{RC}$ ) y va a ser cero a frecuencias menores. El punto de corte del filtro está dado por [9.5]; siempre se elige  $R$  y  $C$  de manera que pasen las frecuencias de interés sin atenuación.

$$f_{3dB} = \frac{1}{2\pi RC}$$

Ec. [9.7]

Figura 198. **Respuesta en frecuencia de filtros pasa altas**

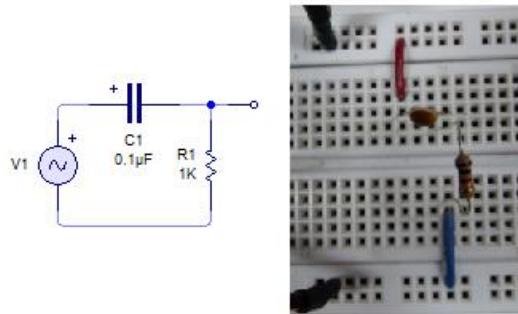


Fuente: HOROWITZ, Paul; HILL, Windfield. *The art of electronics*. p. 36.

Suponiendo que se necesita un filtro para pasar señales con  $f \geq 1.6 \text{ KHz}$ , es decir, un filtro pasa altas con  $f_{3dB} = 1.6 \text{ KHz}$ . La impedancia de entrada y salida de los filtros es importante, pero basta con saber su comportamiento; en el peor de los casos para conocer sus impedancias, cuando el capacitor es un cortocircuito o un circuito abierto, lo que dice que  $Z_{entrada} = Z_{salida} = R$ .

En este caso se coloca  $R = 1 \text{ K}\Omega$ , y se puede saber que  $C = 0.1 \mu\text{F}$  utilizando la ecuación [9.5].

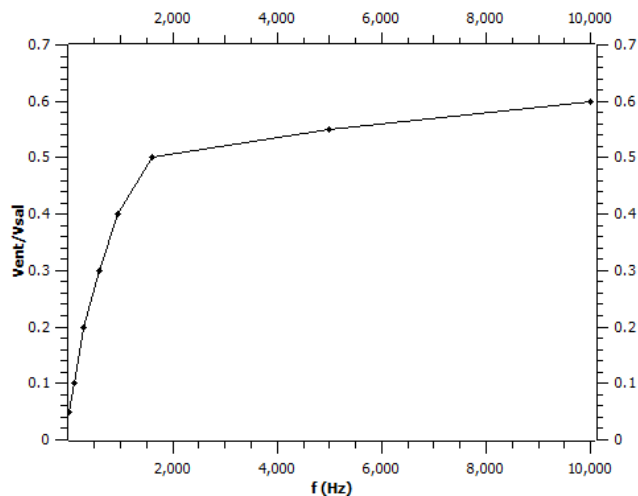
Figura 199. **Filtro pasa altas con  $f_{3dB} = 1.6 \text{ KHz}$**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

Armar el circuito de la figura 199, utilizar  $V_{entrada} = 1 \text{ V}$  y variar la frecuencia. Para cada frecuencia medir  $V_{salida}$ ; graficar  $\frac{V_{salida}}{V_{entrada}}$  contra la frecuencia (figura 200); verificar la frecuencia de corte en la gráfica.

Figura 200. **Ganancia contra frecuencia del filtro pasa altas**



Fuente: elaboración propia, empleando Qtiplot.

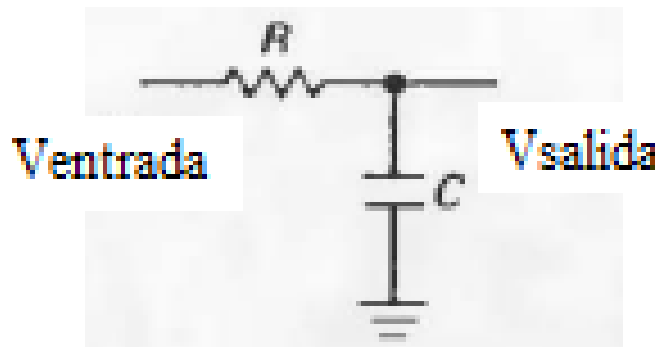


### 9.1.2. Pasa bajas

Se puede obtener el comportamiento opuesto del filtro anterior, intercambiando  $R$  y  $C$  como lo muestra la figura 201.

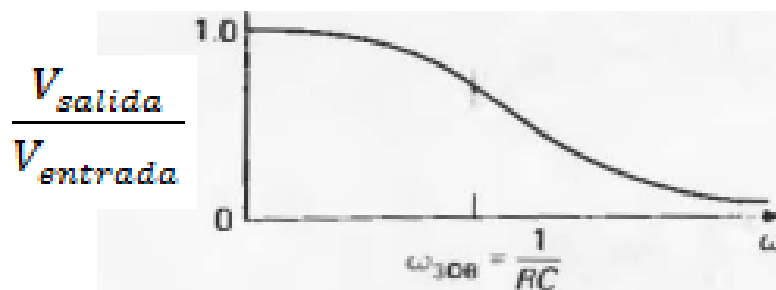
La respuesta de este filtro (figura 202) se asemeja a la entrada para frecuencias menores a la frecuencia de corte.

Figura 201. Filtro pasa bajas



Fuente: HOROWITZ, Paul; HILL, Windfield. *The art of electronics*. p. 37.

Figura 202. Respuesta en frecuencia de filtros pasa bajas



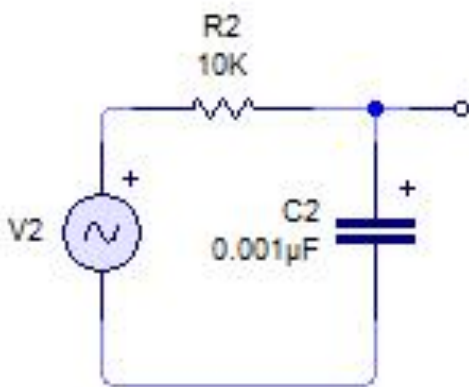
Fuente: HOROWITZ, Paul; HILL, Windfield. *The art of electronics*. p. 38.

El voltaje de salida lo describe la ecuación [9.6] y la frecuencia de corte se puede encontrar utilizando la ecuación [9.5]:

$$V_{salida} = \frac{1}{(1 + \omega^2 R^2 C^2)^{\frac{1}{2}}} V_{entrada} \quad \text{Ec. [9.8]}$$

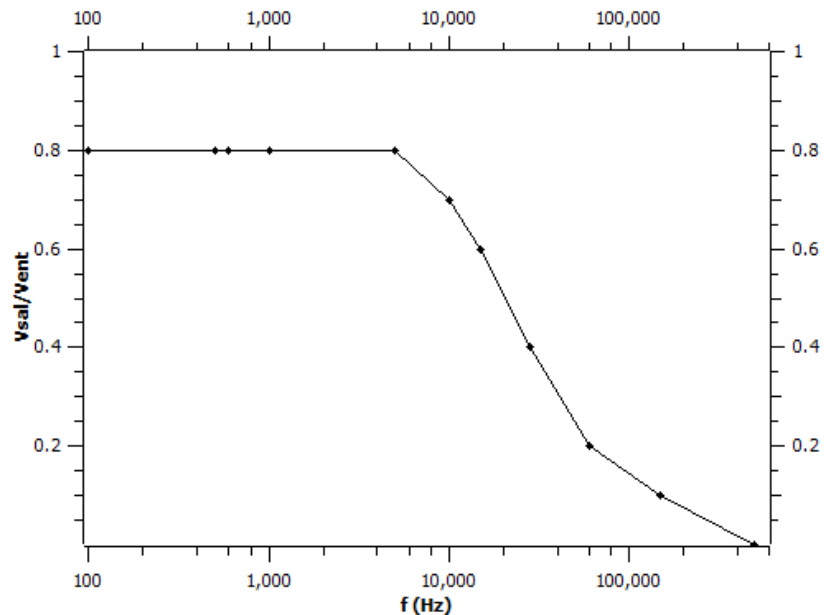
Armar el circuito que muestra la figura 203. Suponiendo que ahora se quiere que pasen las señales con  $f \leq 16\text{KHz}$ , graficar la ganancia contra la frecuencia del filtro pasa bajos (figura 204) y comparar su frecuencia de corte. Utilizar  $R = 10\text{K}\Omega$ ,  $C = 0.001\ \mu\text{F}$  y  $V_{entrada} = 1\text{V}$ .

Figura 203. **Filtro pasa altas con  $f_{3dB} = 16\text{KHz}$**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

Figura 204. **Ganancia contra frecuencia del filtro pasa altas**



Fuente: elaboración propia, empleando Qtiplot.

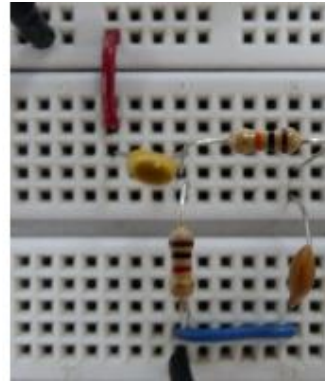
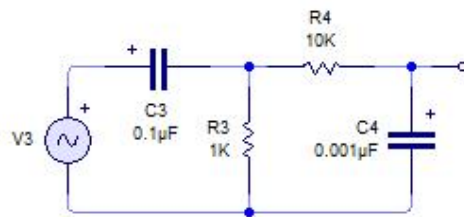
### 9.1.3. **Pasa banda**

Se puede diseñar un filtro pasa banda conectando un filtro pasa bajas en serie con un filtro pasa altas (y al revés).

Ver el circuito de la figura 205, es la conexión en serie de los dos filtros anteriores. Conectar los filtros en serie y graficar la ganancia contra la frecuencia del filtro pasa banda; utilizar la misma señal de entrada (figura 206).

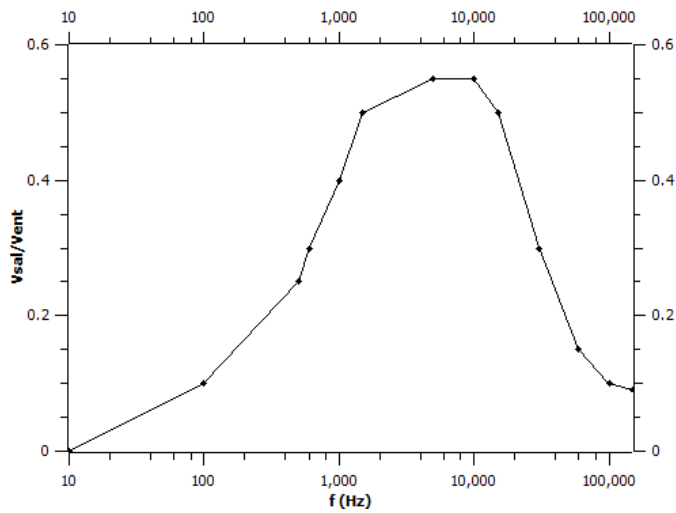
Otras aplicaciones de los capacitores pueden ser, circuitos resonantes, diferenciadores e integradores. Los capacitores se necesitan para otras aplicaciones importantes como generadores de onda, circuitos de acoplo y rectificadores.

Figura 205. **Filtro pasa banda con  $f_{3dB} = 1.6 \text{ KHz}, 16 \text{ KHz}$**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

Figura 206. **Ganancia contra frecuencia del filtro pasa banda**



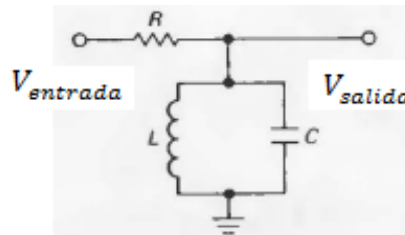
Fuente: elaboración propia, empleando Qtiplot.

Cuando se combinan capacitores con inductores, es posible hacer circuitos que tienen características sutiles de frecuencia.

Ver el circuito que muestra la figura 207, la reactancia de la combinación  $LC$  a una frecuencia  $f$  es:

$$Z_{LC} = \frac{j}{\frac{1}{\omega L} - \omega C} \quad \text{Ec. [9.9]}$$

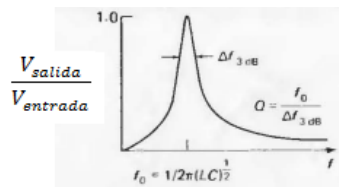
Figura 207. **Circuito resonante RC: filtro pasa banda**



Fuente: HOROWITZ, Paul; HILL, Windfield. *The art of electronics*. p. 41.

En combinación con  $R$ ,  $Z_{LC}$  forma un divisor de voltaje; debido al comportamiento opuesto entre capacitores e inductores, la impedancia del paralelo  $LC$  se va a infinito en la frecuencia resonante  $f_0 = 1/2\pi\sqrt{LC}$ , dando ahí un pico de respuesta. La respuesta en frecuencia se muestra en la figura 208.

Figura 208. **Respuesta en frecuencia del filtro pasa banda**



Fuente: HOROWITZ, Paul; HILL, Windfield. *The art of electronics*. p. 41.

Se va a utilizar un circuito resonante como filtro; ya se hizo referencia a la curva de selectividad del circuito resonante, el circuito debe ser selectivo al elegir las frecuencias que están dentro del ancho de banda.

Entre menor es el ancho de banda, mayor es la selectividad. La forma de la curva de selectividad (vea la figura 113) depende de cada elemento del circuito *RLC*.  $Q$  es el factor de calidad que se utiliza para medir la agudeza del filtro y es igual a la resonancia dividida por el ancho en los puntos a 3 *dB*. Para el circuito *RLC* paralelo:

$$Q = \omega_o RC \quad \text{Ec. [9.10]}$$

Para un circuito *RLC* serie:

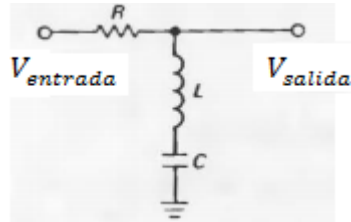
$$Q = \omega_o \frac{L}{R} \quad \text{Ec. [9.11]}$$

Un factor  $Q$  pequeño está asociado con una curva resonante que tiene un ancho de banda grande y selectividad pequeña, un factor  $Q$  grande indica lo opuesto. Entonces el factor de selectividad del circuito resonante que se arma en la sección 5.5.1 es  $Q = 12$  según la ecuación [9.10].

#### **9.1.4. Rechaza banda**

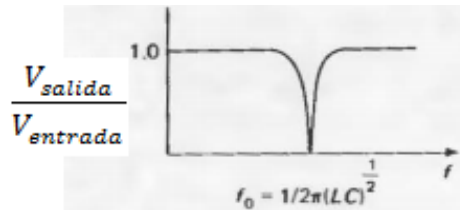
Otra variedad del circuito *LC* es el circuito rechaza banda (figura 209). Este envía a tierra la frecuencia de resonancia y las frecuencias cercanas (figura 210).

Figura 209. **Filtro LC rechaza banda**



Fuente: HOROWITZ, Paul; HILL, Windfield. *The art of electronics*. p. 42.

Figura 210. **Respuesta en frecuencia del filtro LC rechaza banda**



Fuente: HOROWITZ, Paul; HILL, Windfield. *The art of electronics*. p. 42.

Se quiere que  $f_0 = 16K\Omega$  y un ancho de banda de  $400\text{ Hz}$ , el factor de selectividad, en general, se escribir expresar como:

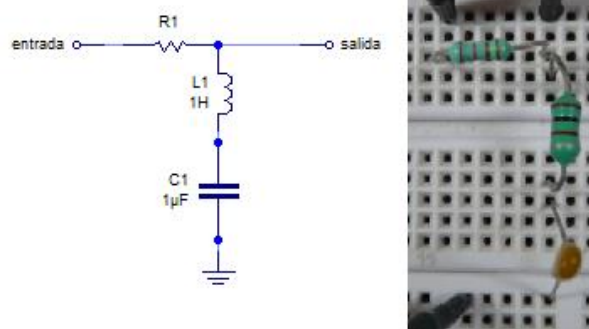
$$Q = \frac{f_0}{\Delta f_{3dB}} \quad \text{Ec. [9.12]}$$

Utilizando las ecuaciones [9.9] y [9.10] se puede calcular la resistencia necesaria para las condiciones del filtro:

$$R = 2\pi\Delta f_{3dB} \quad \text{Ec. [9.13]}$$

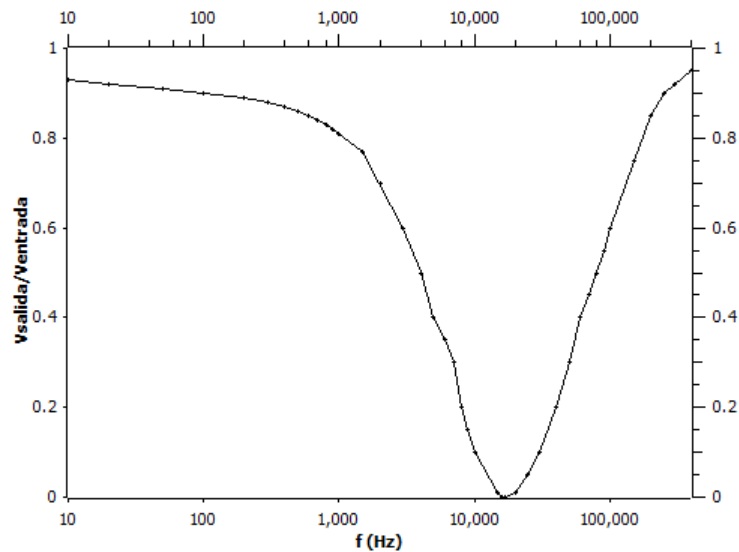
Armar el circuito que muestra la figura 211. Utilizar  $V_{entrada} = 1\text{ V}$ ,  $L = 1\text{ mH}$  y  $C = 0.1\ \mu\text{F}$ , variar la frecuencia y medir el voltaje de salida del circuito. Graficar  $\frac{V_{salida}}{V_{entrada}}$  contra la frecuencia. Ver la figura 212.

Figura 211. **Filtro rechaza banda con  $\Delta_{3\text{dB}} = 400\text{ Hz}$**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

Figura 212. **Ganancia contra frecuencia del filtro rechaza banda**



Fuente: elaboración propia, empleando Qtiplot.



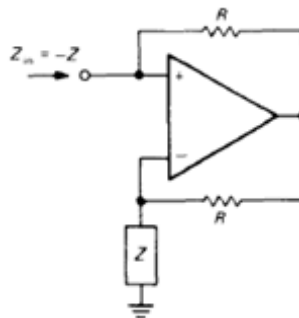
Las curvas que muestran las figuras 197, 201, 205 (filtros *RC*) y 209 (filtro *RLC*) no son ideales, se necesitan filtros con bandas de paso más planas y picos más agudos. De los filtros *RC* se puede obtener respuestas planas y al agregar inductores obtener agudeza, pero se alejan de la respuesta ideal debido a las pérdidas por las altas impedancias.

## 9.2. Filtros activos

Si se utilizan amplificadores operacionales en el diseño de filtros, se pueden obtener las características de un *RLC* sin utilizar inductores. Los convertidores de impedancia negativa (NIC de sus siglas en inglés) pueden imitar las propiedades de un inductor y convierten una impedancia a su negativo. El NIC convierte un capacitor en un inductor de atraso, en el sentido que genera una corriente que atrasa el voltaje aplicado:

$$Z_C = \frac{1}{j\omega C} \rightarrow Z_{in} = \frac{j}{\omega C} \quad \text{Ec. [9.14]}$$

Figura 213. **Convertidor a impedancia negativa**



Fuente: HOROWITZ, Paul; HILL, Windfield. *The art of electronics*. p. 266.

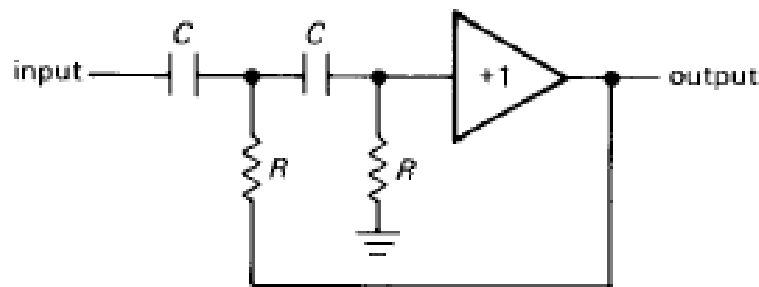
El filtro Sallen-and-Key (por sus inventores) es amplificador de ganancia unitaria conectado como un seguidor. Es un filtro de dos polos simple e intuitivo; ver la figura 214, notar que hay dos filtros  $RC$  en cascada.

Además de la respuesta en frecuencia de la ganancia de filtros, también interesa el cambio de fase en frecuencia de la señal de salida respecto de la señal de entrada. En otras palabras se tiene el interés en la respuesta compleja del filtro  $H(s)$ , y  $s = j\omega$ , donde  $H, s$  y  $\omega$ , son todos complejos.

La fase es importante debido a que una señal a través de la banda de paso de un filtro puede salir distorsionada, si el tiempo de retardo de diferentes frecuencias no es constante, un tiempo de retardo constante corresponde a un cambio de fase lineal en la frecuencia.

En el dominio del tiempo hay características importantes, como el tiempo de subida, especialmente cuando se utilizan pasos o pulsos.

Figura 214. **Filtro Sallen-and-Key**



Fuente: HOROWITZ, Paul; HILL, Windfield. *The art of electronics*. p. 267.

## 9.2.1. Filtros con amplificadores operacionales

Existen diseños de filtros que optimizan algunas de sus características; se puede elegir el mejor diseño según lo que se necesita. Todos estos tipos incluyen filtros pasa bajas, pasa altas y pasa banda.

### 9.2.1.1. Filtros Butterworth, Chebyshev y Bessel

El filtro Butterworth produce una respuesta plana en la banda de paso y la pérdida de la pendiente en la región de la banda de paso a la banda de paro, pero es deficiente en respuesta de fase; su respuesta de amplitud está dada por [9.13] donde  $n$  es el orden del filtro.

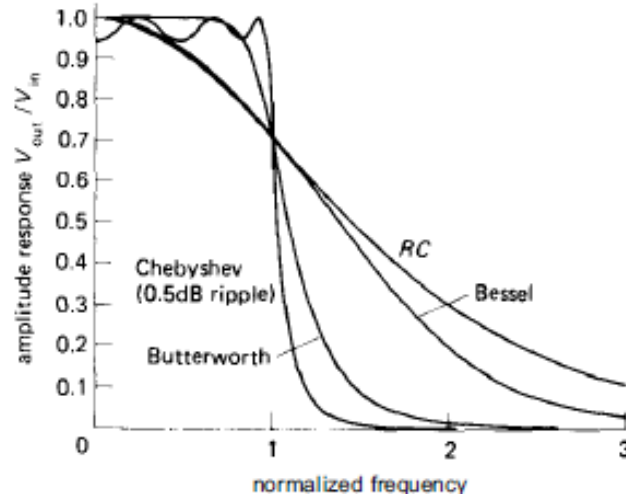
$$\frac{V_{salida}}{V_{entrada}} = \frac{1}{(1 + (f/f_0)^{2n})^{1/2}} \quad \text{Ec. [9.15]}$$

El filtro Chebyshev proporciona mucha agudeza en la rodilla de la respuesta, pero permite algunas ondas en la banda de paso, su amplitud está dada por [9.14], donde  $C_n$  es el polinomio de Chebyshev de grado  $n$  de primer orden y  $\epsilon$  es una constante que fija las ondas de la banda de paso.

$$\frac{V_{salida}}{V_{entrada}} = \frac{1}{(1 + \epsilon^2 C_n^2(\frac{f}{f_0}))^{1/2}} \quad \text{Ec. [9.16]}$$

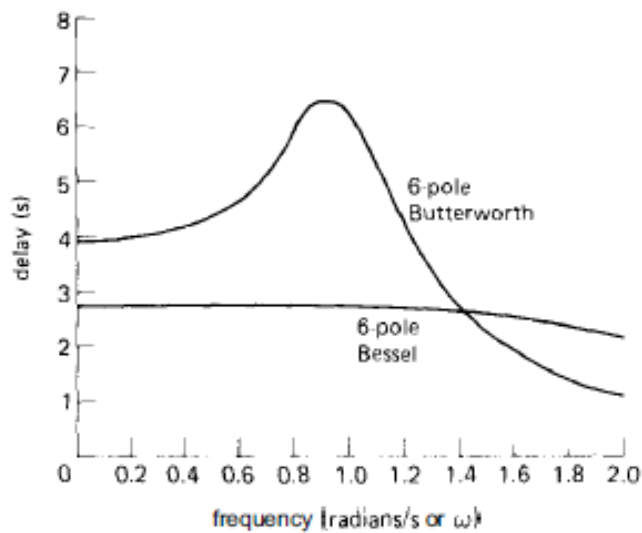
El filtro Bessel maximiza la linealidad en la variación del cambio de fase en frecuencia; vea la figuras 215 y 216.

Figura 215. **Comparación de la respuesta en amplitud de varios filtros**



Fuente: HOROWITZ, Paul; HILL, Windfield. *The art of electronics*. p. 270.

Figura 216. **Comparación de la respuesta en fase de un filtro butterworth y un filtro bessel**

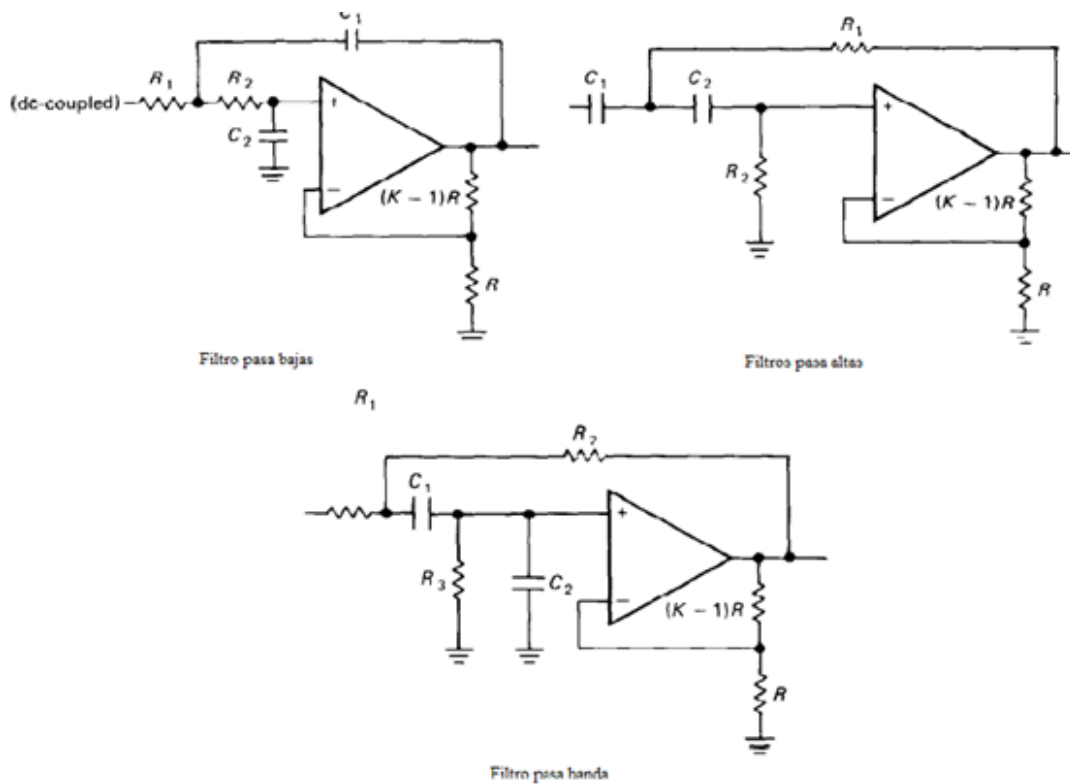


Fuente: HOROWITZ, Paul; HILL, Windfield. *The art of electronics*. p. 270.

### 9.2.1.1.1. Circuitos VCVS

El filtro VCVS (voltaje-controlado voltaje-source de sus siglas en inglés) es una variación del filtro Sallen-and-Key, reemplaza el filtro de ganancia unitaria por un no inversor de ganancia mayor que 1. Ver la figura 217.

Figura 217. Circuito VCVS



Fuente: HOROWITZ, Paul; HILL, Windfield. *The art of electronics*. p. 274.

Hay tablas y ecuaciones para las respuestas estándar de los filtros activos. Para diseñar filtros VCVS se utiliza la tabla XXXIII, se toma  $R_1 = R_2 = R$  ( $R$  típicamente se escoge en el rango de 10 K y 100 K) y  $C_1 = C_2 = C$ ; se elige el tipo de filtro, los polos y la ganancia  $K$ , según el filtro que se necesite.

Tabla XXXIII. Filtros VCVS pasa-bajos

TABLE 5.2. VCVS LOW-PASS FILTERS							
Poles	Butterworth K	Bessel		Chebyshev (0.5dB)		Chebyshev (2.0dB)	
		$f_n$	K	$f_n$	K	$f_n$	K
2	1.586	1.272	1.268	1.231	1.842	0.907	2.114
4	1.152	1.432	1.084	0.597	1.582	0.471	1.924
	2.235	1.606	1.759	1.031	2.660	0.964	2.782
6	1.068	1.607	1.040	0.396	1.537	0.316	1.891
	1.586	1.692	1.364	0.768	2.448	0.730	2.648
	2.483	1.908	2.023	1.011	2.846	0.983	2.904
8	1.038	1.781	1.024	0.297	1.522	0.238	1.879
	1.337	1.835	1.213	0.599	2.379	0.572	2.605
	1.889	1.956	1.593	0.861	2.711	0.842	2.821
	2.610	2.192	2.184	1.006	2.913	0.990	2.946

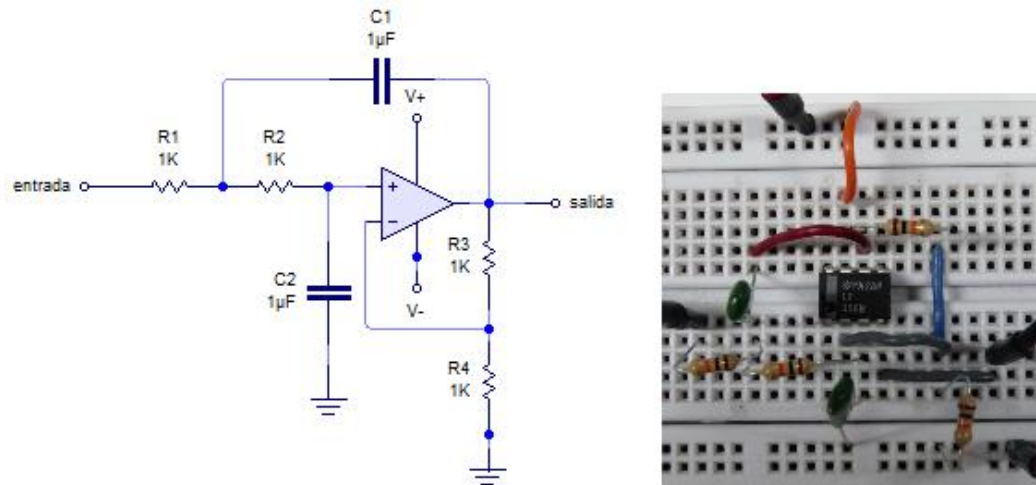
Fuente: HOROWITZ, Paul; HILL, Windfield. *The art of electronics*. p. 274.

Armar el circuito de la figura 218, utilice  $R = 10\text{ K}\Omega$ ,  $C = 0.001\ \mu\text{F}$  y un amplificador operacional LF356N. Ver la respuesta del filtro en la figura 219.

Para este filtro  $f_0 = \frac{1}{2\pi RC} = 15\text{ KHz}$ .

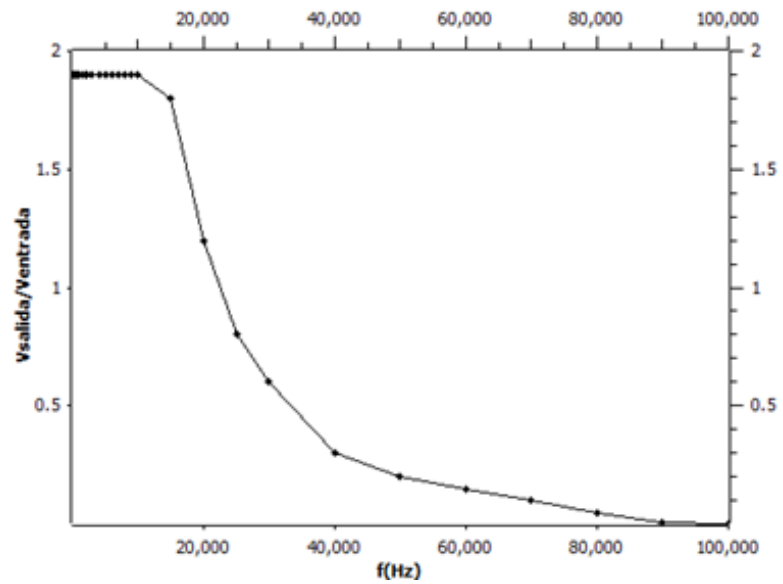
Como en los circuitos usuales de amplificadores operacionales, R se escoge entre los rangos de de 10k a 100k, luego se fija la ganancia K de acuerdo a cada etapa. Para un filtro n-polar se necesitan n/2 entradas (n par).

Figura 218. **Filtro Butterworth pasa bajas de dos polos**



Fuente: elaboración propia.

Figura 219. **Respuesta en frecuencia del filtro Butterworth pasa bajas**



Fuente: elaboración propia, empleando Qtiplot.

### 9.3. Equipo y materiales para filtros

A continuación se muestra una lista de los dispositivos que se utilizan en los experimentos con filtros.

Tabla XXXIV. **Equipo y materiales para filtros**

Equipo	Dispositivos	Cantidad
Fuente de voltaje directo		2
Generador de señales		1
Osciloscopio		1
Multímetro digital		3
<i>Protoboard</i>		1
Conector banana-lagarto rojo		6
Conector banana-lagarto negro		6
Punta para osciloscopio		2
Alambre para conectar en el <i>protoboard</i>		
	Resistores	
	Capacitores	
	Inductores	
	Amplificador operacional LF356N	

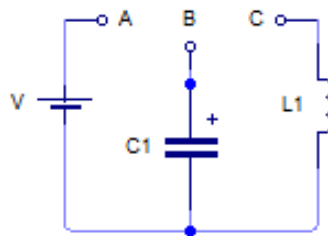
Fuente: elaboración propia.



## 10. OSCILADORES

Casi cualquier instrumento electrónico tiene algún tipo de oscilador, son necesarios en instrumentos de medida cíclicos, que inician alguna medida o proceso y en instrumentos que involucran estados periódicos o formas de onda periódica. Los dispositivos sin oscilador no hacen nada o esperan que los controle otro dispositivo; el oscilador es esencial en electrónica. La base de un oscilador es el circuito tanque LC (figura 220):

Figura 220. **Circuito tanque LC**



Fuente: elaboración propia, empleando LiveWire.

Cuando se conectan *A* y *B* el capacitor se carga al voltaje de la fuente (idealmente). Si luego se conecta *B* y *C* el capacitor se descarga a través de *L*, el campo producido por el inductor se incrementa a medida que se incrementa la corriente. Al descargarse el capacitor la corriente disminuye y el inductor se opone al cambio, reduciendo el campo y produciendo una corriente en sentido opuesto, que carga el capacitor.

La cantidad de resistencia interna determina la calidad del circuito. Es necesaria una señal regenerativa para obtener un oscilador estable; el circuito

de la figura 220 tiene una salida parecida a la de la figura 108, debido a las pérdidas de energía. Un oscilador estable debe tener una amplitud constante y comportarse con frecuencia estable; todos los osciladores tiene en básicamente lo siguiente:

- Fuente DC
- Dispositivo que determine la frecuencia de oscilación
- *Feedback* (retroalimentación)
- Amplificador

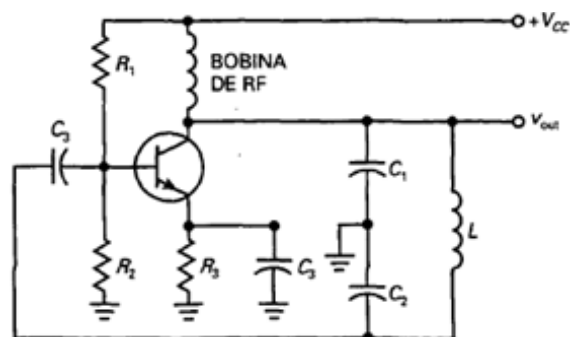
### 10.1. Osciladores LC

A continuación se muestran algunos experimentos con osciladores LC.

#### 10.1.1. Osciladores Colpitts y Hartley

El oscilador Colpitts opera a frecuencias altas entre 1 y 500 MHz.

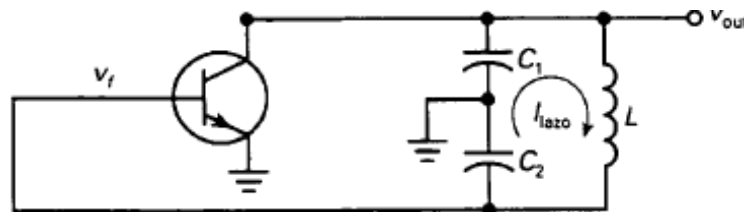
Figura 221. **Oscilador Colpitts**



Fuente: MALVINO, Albert Paul. *Principios de electrónica*. p. 851.

El oscilador está compuesto generalmente por un amplificador de BJT o FET y un tanque LC. El oscilador Colpitts de la figura 221 tiene una ganancia de voltaje a baja frecuencia de  $A_v = \frac{r_c}{r_e}$  donde  $r_c$  es la resistencia de corriente alterna vista por el colector y la ganancia a baja frecuencia  $A_v < \frac{r_c}{r_e}$ . El circuito equivalente en corriente alterna lo muestra la figura 222.

Figura 222. **Oscilador Colpitts (circuito equivalente en corriente alterna)**



Fuente: MALVINO, Albert Paul. *Principios de electrónica*. p. 851.

La corriente fluye por ambos capacitores; el voltaje de salida es el voltaje en  $C_1$  y el voltaje de retroalimentación  $v_f$  es el voltaje a través de  $C_2$ . La frecuencia de resonancia se puede aproximar a [10.1],  $C$  es la capacitancia equivalente del circuito (ecuación 10.2).

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad \text{Ec. [10.1]}$$

$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \quad \text{Ec. [10.2]}$$

El circuito oscilador también debe tener las siguientes condiciones de arranque:

$$A_v A_i > 1 \quad \text{Ec. [10.3]}$$

$A_v$  es la ganancia de voltaje a la frecuencia de oscilación  $A_v = \frac{C_1}{C_2}$  entonces:

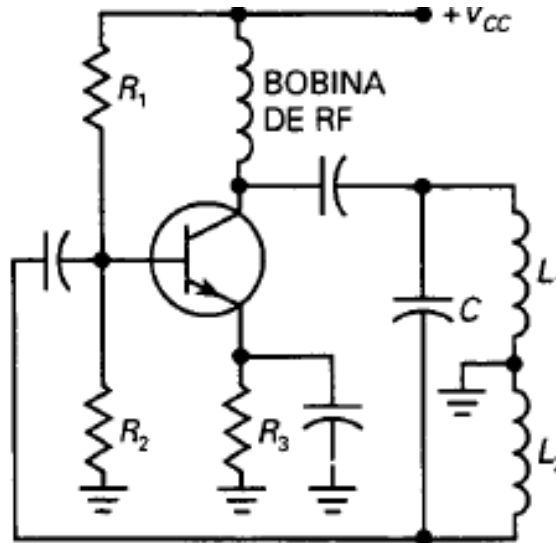
$$A_i > \frac{C_2}{C_1} \quad \text{Ec. [10.4]}$$

La retroalimentación de la salida del voltaje también es importante si la retroalimentación es débil;  $A_i$  es ligeramente mayor que  $\frac{1}{A_v}$  y  $AB$  puede reducirse a 1 fácilmente. Si la retroalimentación es fuerte, se lleva la base a corte y saturación; esto inmediatamente ajusta el valor de  $A_v A_i$  a 1.

El oscilador *Hartley* se diferencia del oscilador *Colpitts* en el circuito tanque; ver la figura 223, pero se analiza de la misma forma.

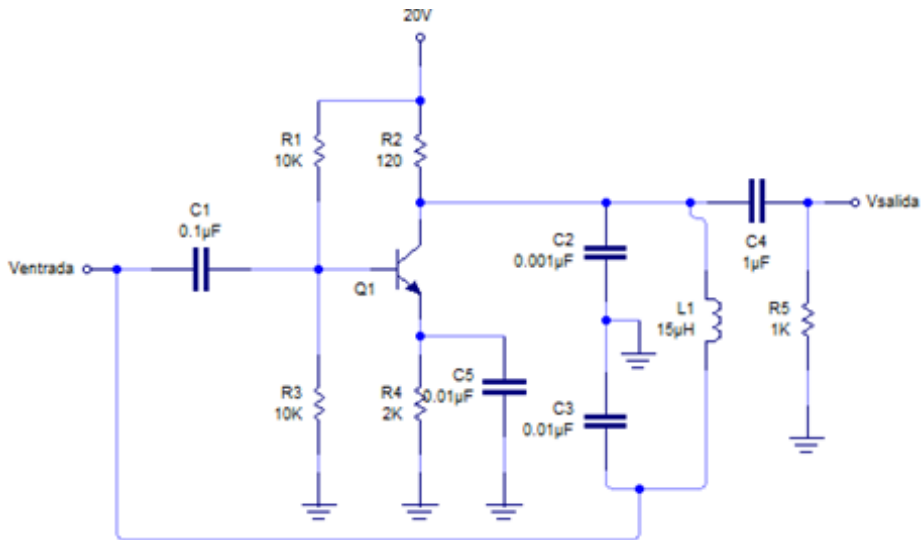
Aquí  $L = L_1 + L_2$ . Va a verse la respuesta en el tiempo de un oscilador Colpitts, armar el circuito utilizando los valores que indican las figuras 224 y 225. Conectar en la entrada una onda cuadrada pequeña; ver la respuesta del circuito en el osciloscopio. Repetir el experimento conectado en la entrada una onda sinusoidal pequeña.

Figura 223. **Oscilador Hartley**



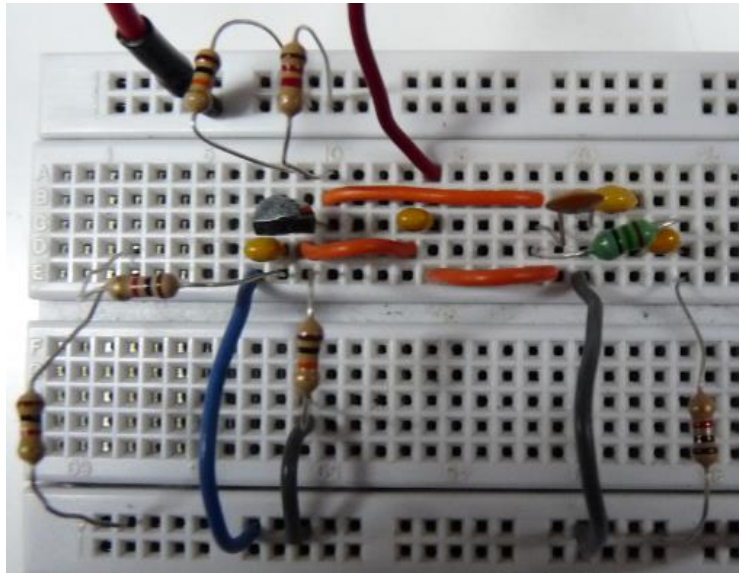
Fuente: MALVINO, Albert Paul. *Principios de electrónica*. p. 851.

Figura 224. **Diagrama de oscilador Colpitts experimental**



Fuente: elaboración propia, empleando LiveWire.

Figura 225. **Oscilador Colpitts experimental**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

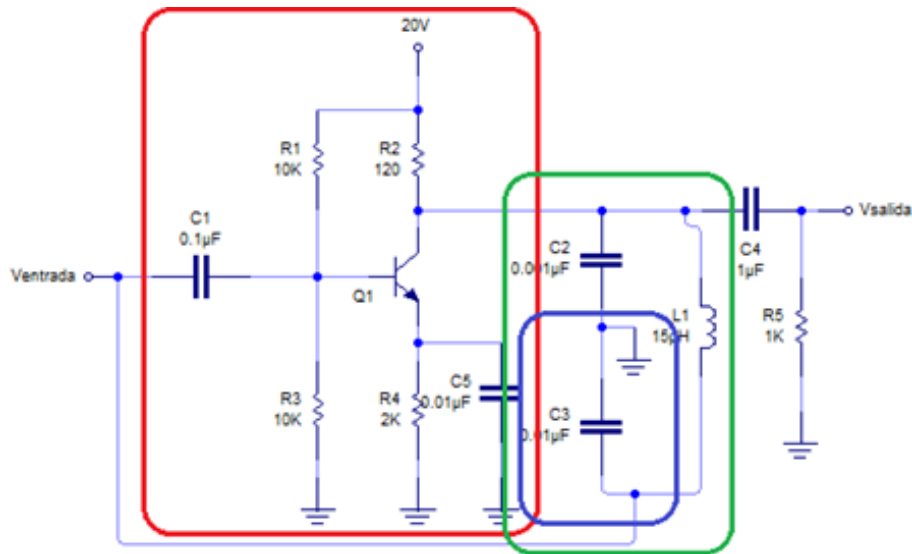
Observar la figura 226, la sección del circuito que tiene un borde rojo es el amplificador con transistor. Los valores de resistencias y capacitancias se calcularon de la misma manera que en el capítulo 8.

Como elegir los capacitores e inductores de los circuitos tanque (borde verde) depende de la frecuencia de oscilación; según las ecuaciones [10.1] y [10.2], la frecuencia teórica de oscilación para este circuito es  $f_r = 1.36 \text{ MHz}$ .

Al conocer los valores de capacitancia se pueden saber las ganancias de voltaje y corriente para garantizar el arranque del circuito.

También se pueden mencionar los osciladores *tuning-fork*, se encuentran frecuentemente en estándar de baja frecuencia y fueron suprimidos por los osciladores de cuarzo.

Figura 226. Partes del oscilador Colpitts experimental



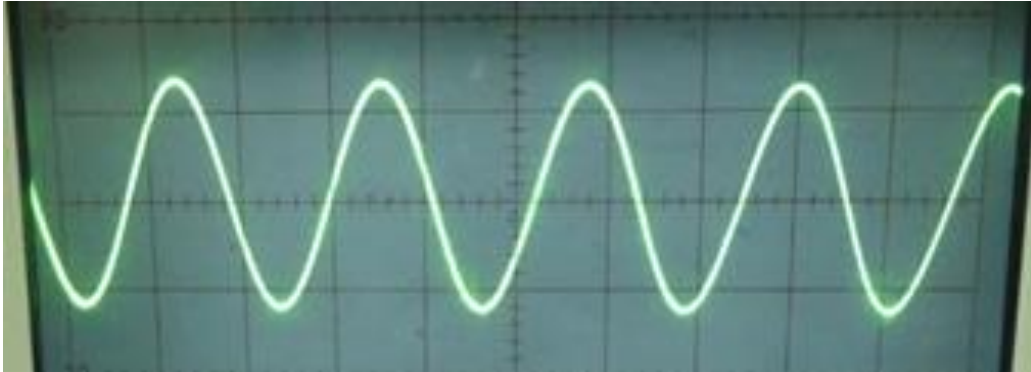
Fuente: elaboración propia, empleando LiveWire.

La figura 227 muestra la salida del circuito para ambas formas de onda de entrada. Al conectar el voltaje DC al circuito amplificador verificar que  $V_{BE} \cong 0.7 V$ .

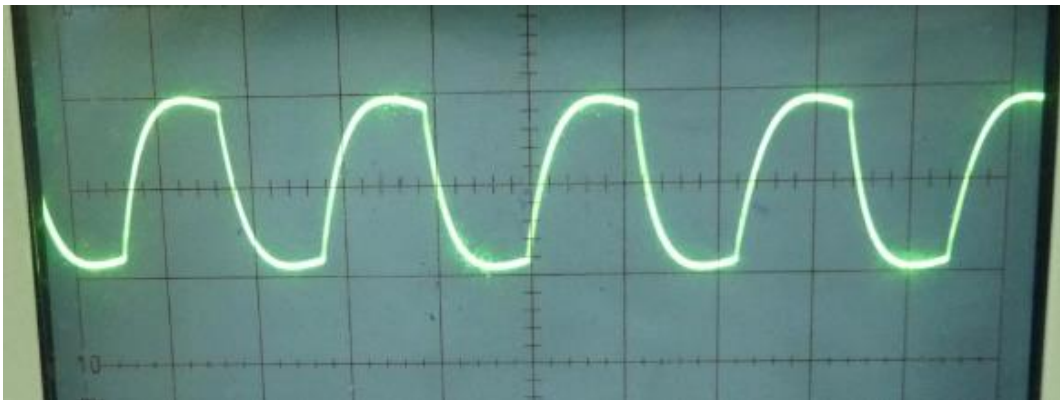
Notar que el circuito es inestable; en este caso se obtiene en la salida una respuesta estable cuando  $f_r \cong 10 KHz$ ; es evidente que esta frecuencia está muy alejada del valor teórico. Esto se debe al efecto Miller (incremento en la capacitancia equivalente de entrada debido a la ampliación de la capacitancia entre las terminales entrada y salida).

Para corregir el efecto *Miller* se conecta la retroalimentación al emisor (figura 228). Ahora se tiene  $f_r \cong 83 KHz$ , aún así la señal de salida no es una onda sin distorsión (figura 229).

Figura 227. **Respuesta en el tiempo del oscilador Colpitts experimental, con forma de onda en la entrada**



(a) sinusoidal

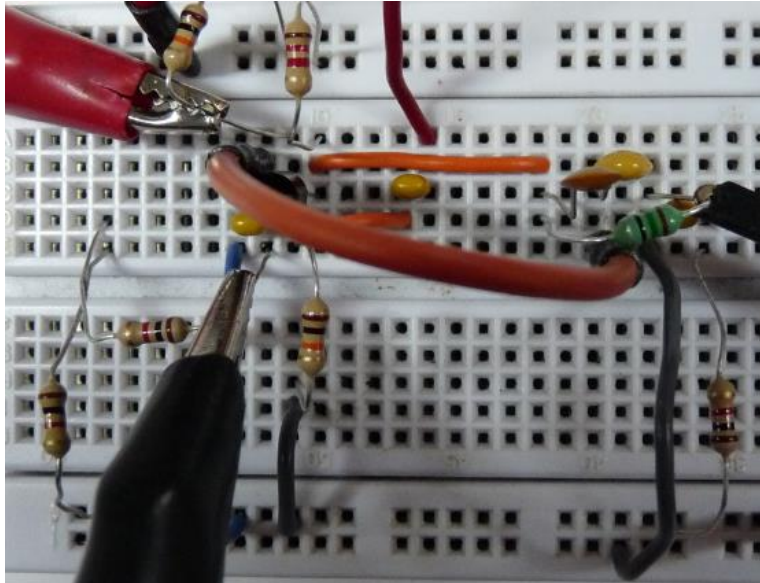


(b) cuadrada

Fuente: laboratorio de Física, S-11, Facultad de Ingeniería.

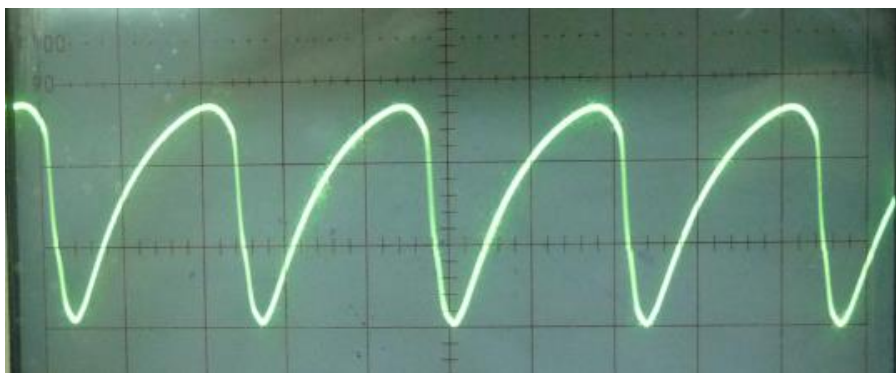


Figura 228. **Conexión del oscilador Colpitts para corregir el efecto Miller**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

Figura 229. **Respuesta del oscilador Colpitts con la retroalimentación conectada a emisor**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

## 10.2. Osciladores con amplificadores operacionales

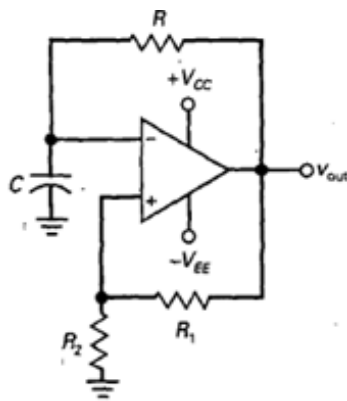
Con la retroalimentación positiva en amplificadores operacionales se pueden construir circuitos que generan una señal de salida no sinusoidal, sin ninguna señal de entrada externa.

### 10.2.1. Oscilador de relajación

Es un tipo de oscilador muy simple que puede hacerse cargando un capacitor a través de un resistor, después descargándolo rápidamente cuando el voltaje alcanza algún tipo de umbral, iniciando de nuevo el ciclo (figura 230). Este circuito genera una salida cuadrada; se puede obtener del análisis de carga y descarga exponencial del capacitor la frecuencia de oscilación a través del período:

$$\tau = 2RC \ln \frac{1 + A_V}{1 - A_V} \quad \text{Ec. [10.5]}$$

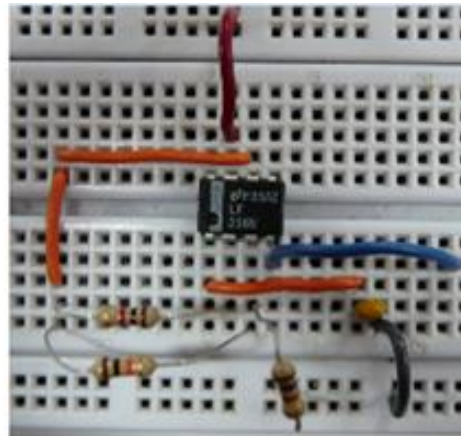
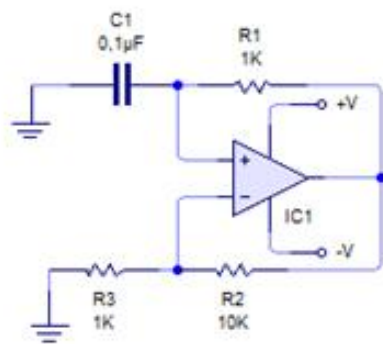
Figura 230. Oscilador de relajación



Fuente: MALVINO, Albert Paul. *Principios de electrónica*. p. 820.

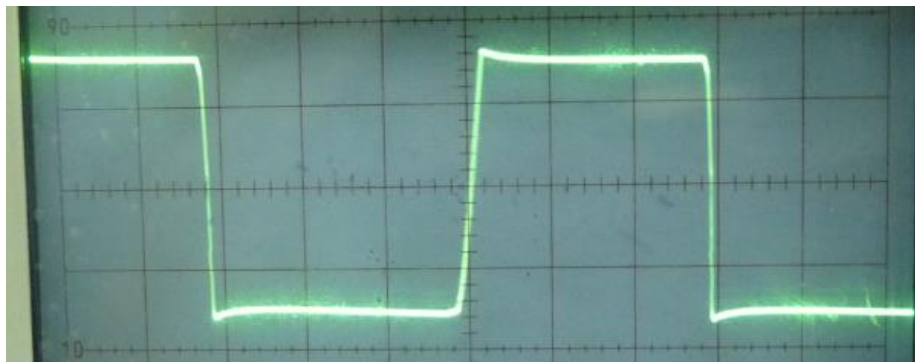
Armar el circuito que muestra la figura 231. Ver la salida del circuito en el osciloscopio (figura 232). Determinar la frecuencia de oscilación; en este caso se obtuvo  $f_{r\ te\acute{o}tica} = 25KHz$  y  $f_{r\ exp} = 33KHz$ .

Figura 231. **Oscilador de relajaci3n experimental**



Fuente: laboratorio de F3sica, edificio S-11, Facultad de Ingenier3a.

Figura 232. **Respuesta en el tiempo del oscilador de relajaci3n experimental**



Fuente: laboratorio de F3sica, edificio S-11, Facultad de Ingenier3a.

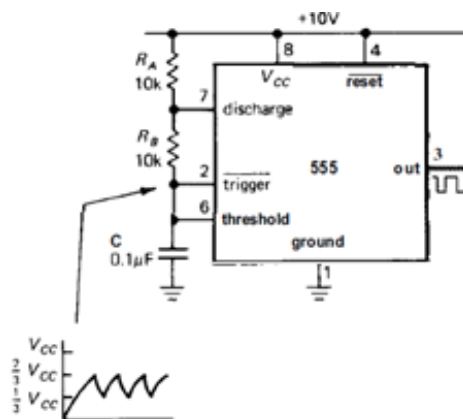
### 10.3. Osciladores con circuitos integrados

A continuación se muestran algunos experimentos con osciladores, utilizando circuitos integrados.

#### 10.3.1. CI 555 como oscilador

Uno de los circuitos integrados temporizadores o generadores de función más conocidos es el 555; su funcionamiento es simple. La salida se va a alto (cerca de  $V_{cc}$ ); cuando recibe una señal de disparo, se mantiene allí hasta que la señal de umbral sea accionada y la señal se va a bajo (cerca de tierra), el capacitor de descarga se enciende. La señal de disparo se activa por un nivel de entrada debajo de  $\frac{1}{3}V_{cc}$  y la señal de umbral se activa por un nivel de entrada arriba de  $\frac{2}{3}V_{cc}$ . La figura 233 muestra el esquema simplificado del 555.

Figura 233. CI 555 conectado como oscilador



Fuente: HOROWITZ, Paul; HILL, Windfield. *The art of electronics*. p. 287.

La frecuencia de oscilación (ecuación 10.6) depende del ajuste del capacitor en el circuito. La señal de salida tiene un nivel alto en un tiempo  $t_1$  y un nivel bajo en un tiempo  $t_2$  [10.7-10.8].

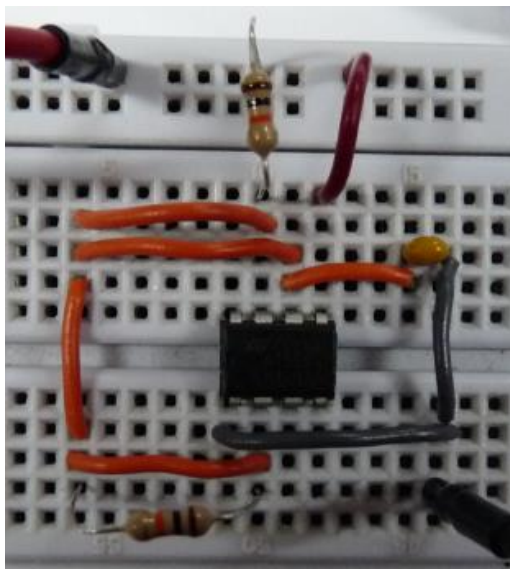
$$f = \frac{1}{\ln(2) (R_1 + 2R_2)} \quad \text{Ec. [10.6]}$$

$$t_1 = \ln(2) (R_1 + R_2)C \quad \text{Ec. [10.7]}$$

$$t_2 = \ln(2)R_2C \quad \text{Ec. [10.8]}$$

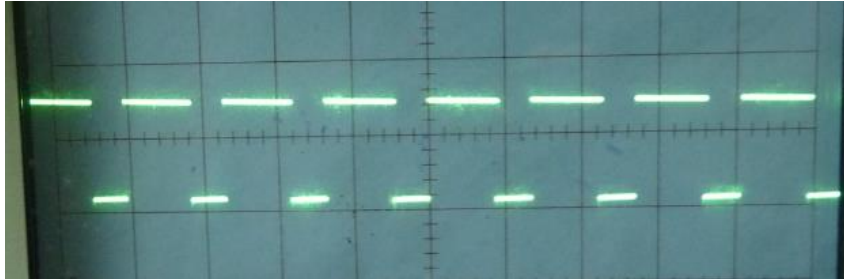
Armar el circuito de la figura 234. Ver la señal de salida del circuito en el osciloscopio (figura 235).

Figura 234. **CI 555 como oscilador experimental**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

Figura 235. **Salida del circuito integrado 555 como oscilador**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

### 10.3.2. Oscilador controlado por voltaje (VCO)

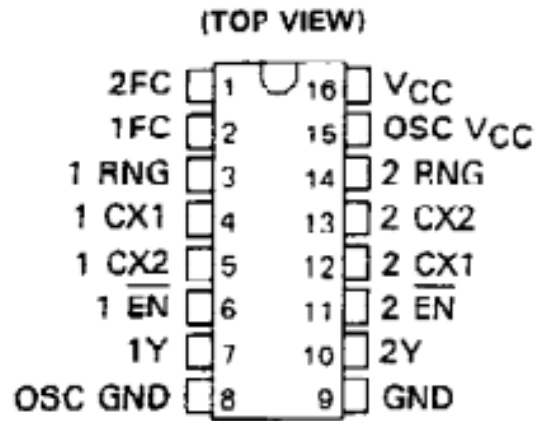
Otros circuitos integrados osciladores son los VCO, estos tienen una velocidad de salida variable en algún rango de acuerdo con la entrada de control de voltaje.

El 74s124 (figura 236) tiene dos osciladores independientes controlados por voltaje; la frecuencia de salida de cada VCO es fijada por la capacitancia externa  $C_{ext}$  en combinación con dos entradas sensitivas de voltaje, una para rango de frecuencia y otra para control de la misma. Estas entradas pueden ser usadas para variar el rango de frecuencia; este oscilador puede operar entre  $0.12 \text{ Hz}$  y  $85 \text{ MHz}$ . La salida de frecuencia puede aproximarse a:

$$f = \frac{5 \times 10^{-2}}{C_{ext}} \quad \text{Ec. [10.9]}$$

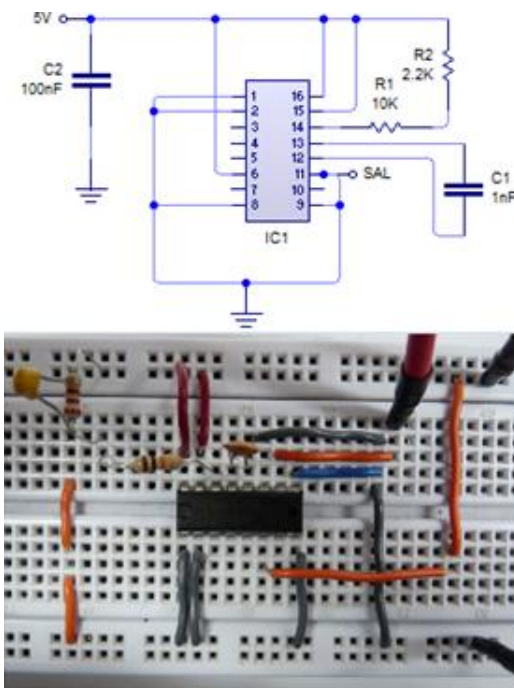
Armar el circuito que muestra la figura 237; ver la salida del circuito en la figura 238. Puede variarse la frecuencia utilizando un potenciómetro en pin 14.

Figura 236. **74s124**



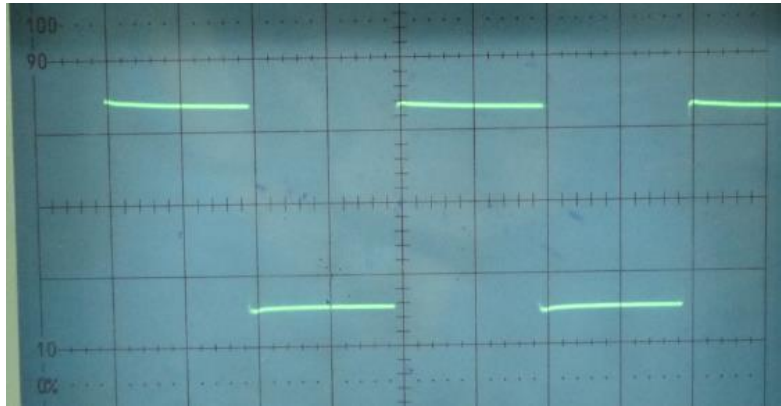
Fuente: TEXAS INSTRUMENTS. *SN54S124, SN74S124 datasheet*. p. 1.

Figura 237. **Conexión del 74s124**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

Figura 238. **Salida del VCO 74s124**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

#### 10.4. **Equipo y materiales para osciladores**

A continuación se muestra una lista de los dispositivos que se utilizan en los experimentos con osciladores.

Tabla XXXV. **Equipo y materiales osciladores**

Equipo	Dispositivos	Cantidad
Fuente de voltaje directo		2
Generador de señales		1
Osciloscopio		1
Multímetro digital		3
<i>Protoboard</i>		1
Conector banana-lagarto rojo		6
Conector banana-lagarto negro		6
Punta para osciloscopio		2



Continuación de la tabla XXXV.

Alambre para conectar en el <i>protoboard</i>		
	Resistores	
	Capacitores	
	Transistor NTE3906	
	Amplificador operacional LF356N	
	CI NE555	
	CI NE74s124N	

Fuente: elaboración propia.

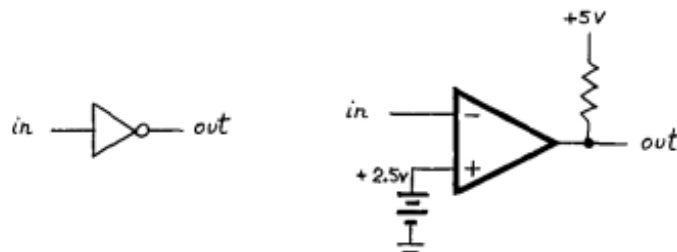


## 11. ELECTRÓNICA DIGITAL

En electrónica digital se estudian circuitos en donde hay solo dos estados posibles: ALTO y BAJO y representan el verdadero y falso en álgebra booleana; estos niveles de voltaje pueden estar dentro de un rango de voltajes, generalmente entre 0 y +5 voltios. El dispositivo que recibe la señal decide si es ALTO o BAJO.

La figura 239 muestra una compuerta y un comparador con amplificador operacional. Los dos son comparadores; la salida y la entrada de una compuerta se diferencian de las de un comparador ordinario en la rapidez de respuesta (la compuerta es unas 20 veces más rápida), no requiere partes externas. Las desventajas del circuito digital es que se necesita más líneas para transmitir alguna información y requiere más tiempo para procesar los números que codifican la información.

Figura 239. **Comparación de circuitos análogos y digitales**



Fuente: HOROWITZ, Paul; HILL, Windfield. *The art of electronics: student manual*. p. 283.

La ventaja de los circuitos digitales es la inmunidad al ruido. No se pueden obtener señales sin atenuación en la salida de un circuito digital, pero sí se

pueden reducir las pérdidas utilizando muchas líneas; además, el procesamiento digital es más sentido si la información que se va a procesar también es digital, como los números y palabras.

### 11.1. Códigos numéricos

Un número decimal (base 10) es una cadena de enteros que se multiplican sucesivamente por potencias de 10 y los productos individuales se suman. Por ejemplo:

$$137.06 = 1 \times 10^2 + 3 \times 10^1 + 7 \times 10^0 + 0 \times 10^{-1} + 6 \times 10^{-2}$$

Se necesitan los símbolos del 0 al 9 y la potencia de 10 que se multiplica por cada símbolo; esta se determina por su posición relativa al punto decimal. Si se requiere representar números utilizando solo los símbolos 0 y 1, se usa el sistema de base 2 o binario. Cada 0 o 1 se multiplican por potencias sucesivas de 2.

$$1101_2 = 1 \times 2^3 + 1 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 1 \times 2^0 = 13_{10}$$

Si se quiere convertir un número decimal a binario, se divide entre 2 y se escriben los residuos:

$$13/2 = 6 \text{ residuo } 1$$

$$6/2 = 3 \text{ residuo } 0$$

$$3/2 = 1 \text{ residuo } 1$$

$$1/2 = 0 \text{ residuo } 1$$

$$13_{10} = 1101_2$$

El esquema más utilizado para representar números negativos en binario es el complemento de 2. Un número negativo es representado como el binario que se suma a un número positivo de la misma magnitud para obtener cero.

Para formar un número negativo hay que complementar cada bit del número positivo, es decir, escribir 1 para cada 0 y viceversa (complemento 1), luego sumar 1 (complemento 2). Ver la tabla XXXVI.

Tabla XXXVI. **Enteros de 4-bits en tres sistemas de representación**

Integer	Sign- magnitude	Offset binary	2's comp
+7	0111	1111	0111
+6	0110	1110	0110
+5	0101	1101	0101
+4	0100	1100	0100
+3	0011	1011	0011
+2	0010	1010	0010
+1	0001	1001	0001
0	0000	1000	0000
-1	1001	0111	1111
-2	1010	0110	1110
-3	1011	0101	1101
-4	1100	0100	1100
-5	1101	0011	1011
-6	1110	0010	1010
-7	1111	0001	1001
-8	-	0000	1000
(-0)	1000	-	-

Fuente: HOROWITZ, Paul; HILL, Windfield. *The art of electronics*. p. 477.

## 11.2. Circuitos integrados digitales

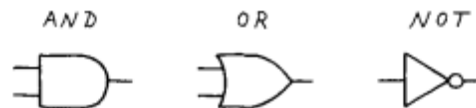
Pueden ser desde compuertas lógicas básicas hasta complicados microprocesadores o microcontroladores. Algunos son diseñados y fabricados

para cumplir una función específica. Permiten grandes simplificaciones de los circuitos analógicos y un montaje más eficaz y rápido. Por ejemplo el integrado que muestra la figura 241 es un decodificador integrado con las salidas negadas. En los próximos experimentos se va a ver cómo se construye un decodificador con compuertas *AND*, *OR* y *NOT* y otras funciones lógicas.

### 11.3. Compuertas lógicas

Para construir cualquier dispositivo digital se necesitan sólo tres funciones lógicas *AND*, *OR* y *NOT*. La figura 240 muestra las tres funciones lógicas fundamentales.

Figura 240. **Funciones lógicas fundamentales**



Fuente: HOROWITZ, Paul; HILL, Windfield. *The art of electronics*: student manual. p. 287.

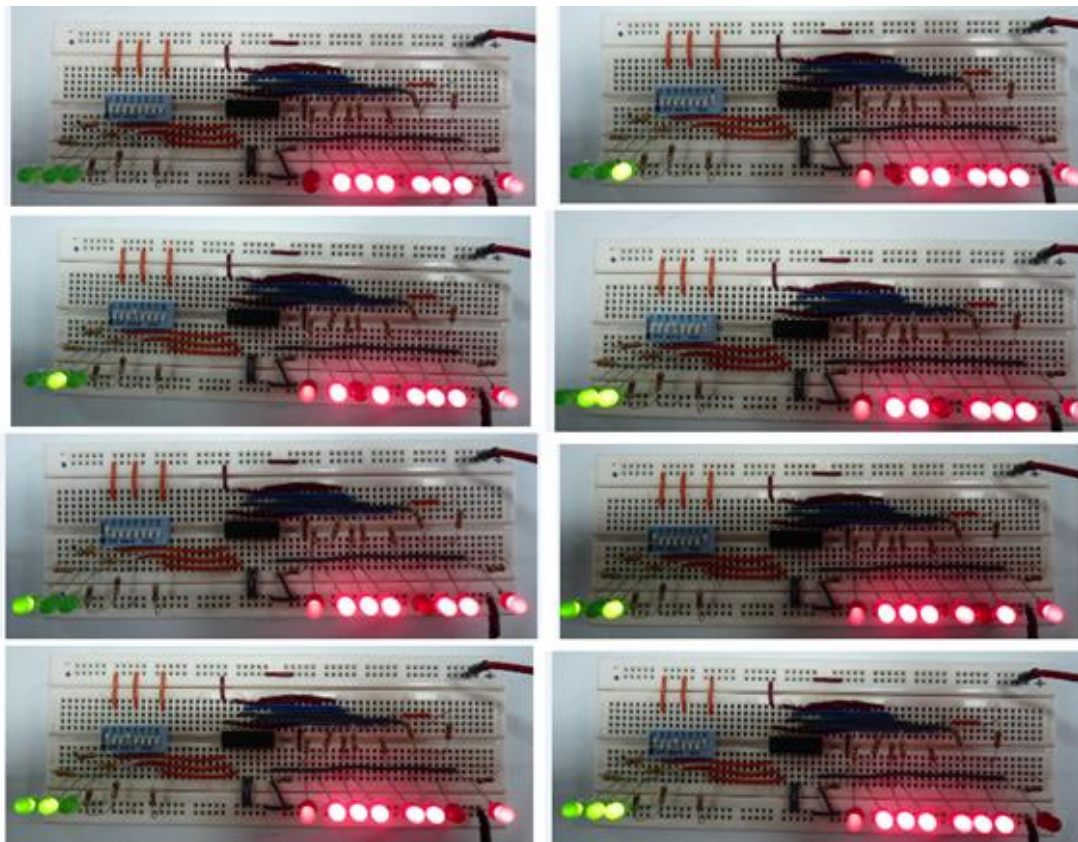
Cuando se utilizan técnicas digitales en el tratamiento de señales, los sistemas se vuelven más inmunes al ruido debido a que el ruido es aditivo, es decir, es más fácil de controlar en cada etapa del proceso digital. Cuando se utilizan técnicas análogas, el ruido es multiplicativo; si se quiere amplificar una señal en cierta etapa del proceso, el ruido también se amplifica.

Además, si se convierte una señal en series de números que representan su amplitud en sucesivos instantes de tiempo y se transmiten como señales digitales, la señal análoga que se reconstruye no tendrá error. El ruido de canal

será lo suficientemente pequeño para prevenir que no se reconozcan adecuadamente los 1's y 0's de la señal.

Esta técnica se conoce como PCM y se utiliza cuando la señal necesita atravesar una serie de repetidores como llamadas telefónicas de larga distancia. Por esta razón, el hardware digital se ha vuelto más poderoso en la resolución de problemas que se podían resolver bien con técnicas analógicas.

Figura 241. **Decodificador integrado**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

Aunque solo es suficiente un tipo de compuerta para construir un dispositivo digital (compuertas universales), *NAND* o *NOR*.

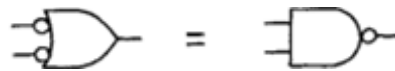
Figura 242. **Compuertas universales**



Fuente: HOROWITZ, Paul; HILL, Windfield. *The art of electronics: student manual*. p. 287.

Las compuertas universales las explica el Teorema de DeMorgan; se puede cambiar la forma de una compuerta si al mismo tiempo se invierten las entradas y salidas. Esto no cambia la lógica, solo la forma de representar las compuertas (ver la figura 243).

Figura 243. **Teorema de DeMorgan**



Fuente: HOROWITZ Paul; HILL, Windfield. *The art of electronics: student manual*. p. 287.


En electrónica digital existen dos tipos de señales: las ALTO activas y las BAJO activas. Por ejemplo, cuando se escribe lo que hace una *AND* se dice que la salida es verdadera si las entradas son verdaderas, pero si en realidad interesan los ceros más que los unos, la compuerta hace algo diferente; ver la figura 244.

En lógica combinacional se utilizan identidades lógicas, la mayoría son obvias. Las dos identidades más importantes para el diseño de circuitos digitales componen el teorema de DeMorgan.



Figura 244. **AND** trabajando como **OR-bajo**

<u>A</u>	<u>B</u>	<u>A · B</u>	<u>A</u>	<u>B</u>	<u>A · B</u>
0	0	0	T	T	T
0	1	0	T	F	T
1	0	0	F	T	T
1	1	1	F	F	F



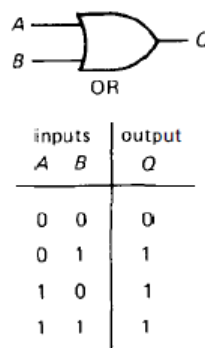
Fuente: HOROWITZ, PAUL; HILL, Windfield. *The art of electronics: student manual*. p. 287.

En general, hay que generar señales digitales de salida para entradas digitales. Los circuitos combinatoriales se pueden construir utilizando las compuertas lógicas que realizan las operaciones del álgebra booleana aplicada a sistemas de dos estados.

### 11.3.1. Compuerta OR

La salida de una OR es alta si cualquier entrada (o las dos) es alta; la figura 245 muestra la tabla de verdad. El símbolo booleano para OR se escribe  $X = A + B$ .

Figura 245. **Compuerta OR**

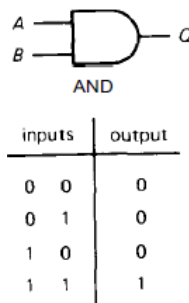


Fuente: HOROWITZ, Paul; HILL, Windfield. *The art of electronics*. p. 479.

### 11.3.2. Compuerta AND

La salida de una AND es alta solo si las dos entradas son altas; ver la figura 246. La expresión booleana para AND es  $X = A \cdot B$ .

Figura 246. Compuerta AND

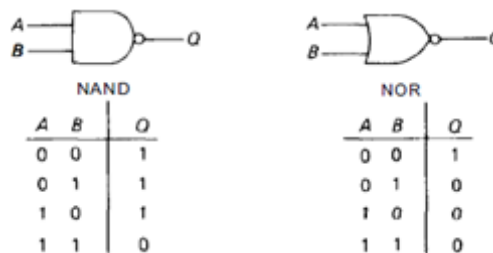


Fuente: HOROWITZ, Paul; HILL, Windfield. *The art of electronics*. p. 479.

### 11.3.3. NAND y NOR

El inversor puede ser combinado con las compuertas para formar los complementos de AND y OR:

Figura 247. NAND y OR

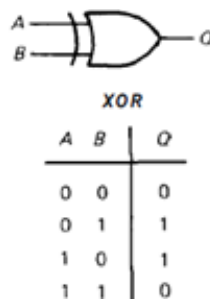


Fuente: HOROWITZ, Paul; HILL, Windfield. *The art of electronics*. p. 479.

### 11.3.4. OR exclusiva

La salida de una compuerta OR exclusiva es alta si una de sus entradas o la otra (pero no ambas) es alta.

Figura 248. OR exclusiva



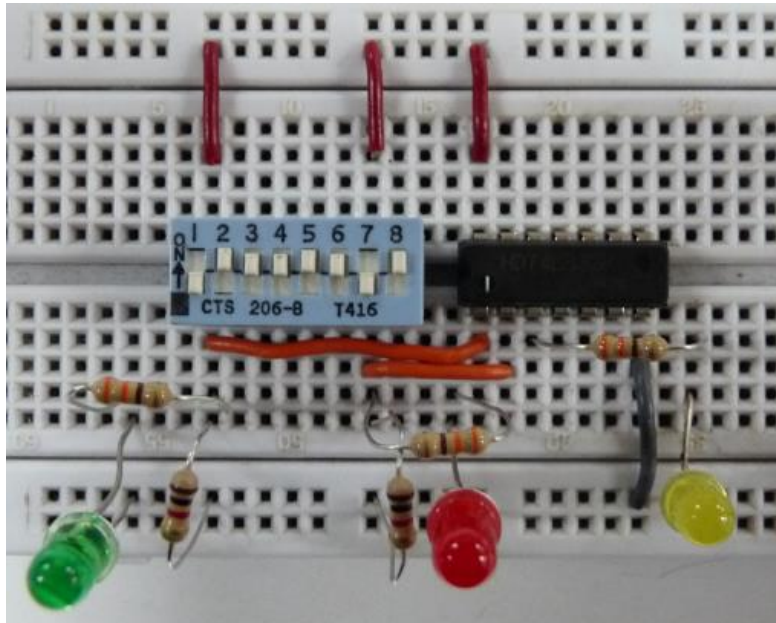
Fuente: HOROWITZ, Paul; HILL, Windfield. *The art of electronics*. p. 480.

Armar el circuito que se muestra en la figura 249; utilizar  $R = 330 \Omega$  para los led,  $R = 1 K\Omega$  para las entradas 1 y 2 y  $V_{cc} = 5$ . La configuración de pines se encuentra en la figura 250. Utilizar un *DIP switch*.

Utilizar el mismo circuito para comprobar el funcionamiento de cualquiera de las compuertas; por ejemplo las figuras 251, 252, 253 muestran el funcionamiento de las compuertas *OR*(74ls32), *NAND* (74ls00) y *XOR*(74ls86), respectivamente.

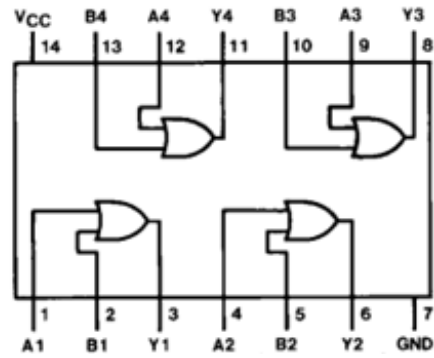
La compuerta OR exclusiva puede explicar muy bien las identidades lógicas, analizándola con compuertas ordinarias y el teorema de DeMorgan o por manipulación lógica.

Figura 249. **Circuito para compuertas lógicas**

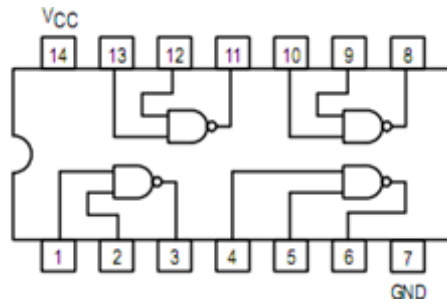


Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

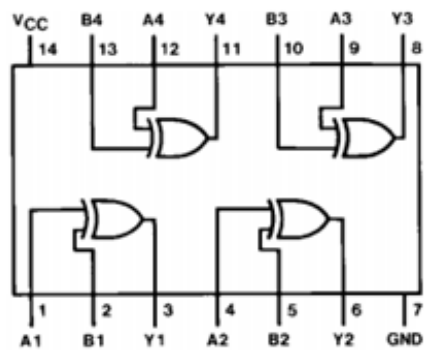
Figura 250. Diagrama de configuración de pines



(a) OR



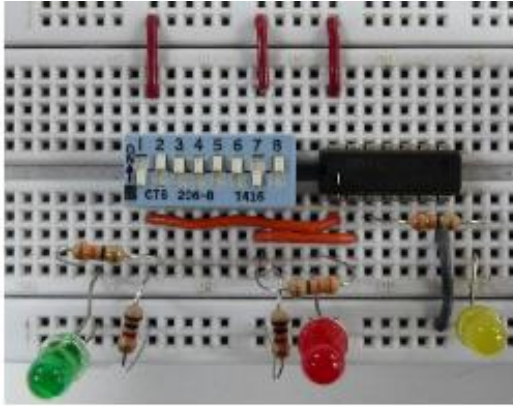
(b) NAND



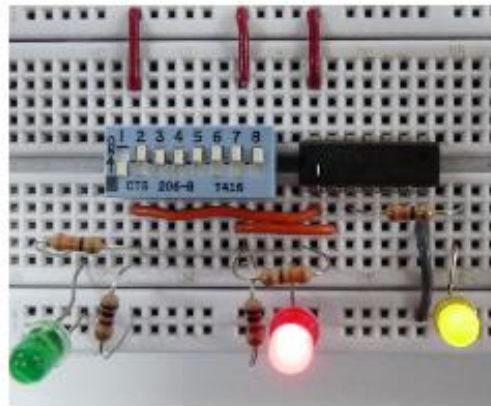
(c) XOR

Fuente: MOTOROLA. *74lsXX series datasheet*. p. 1.

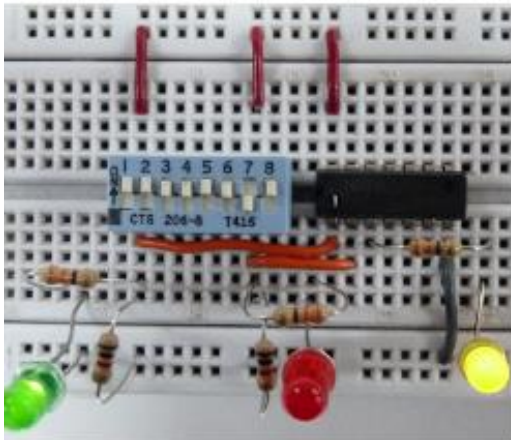
Figura 251. Comportamiento de la compuerta lógica OR



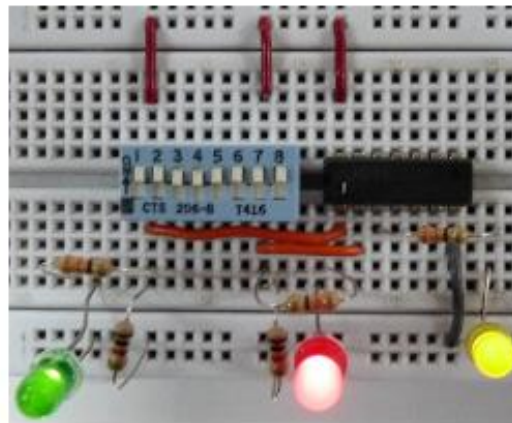
A=0 B=0 |X=0



A=0 B=1 |X=1



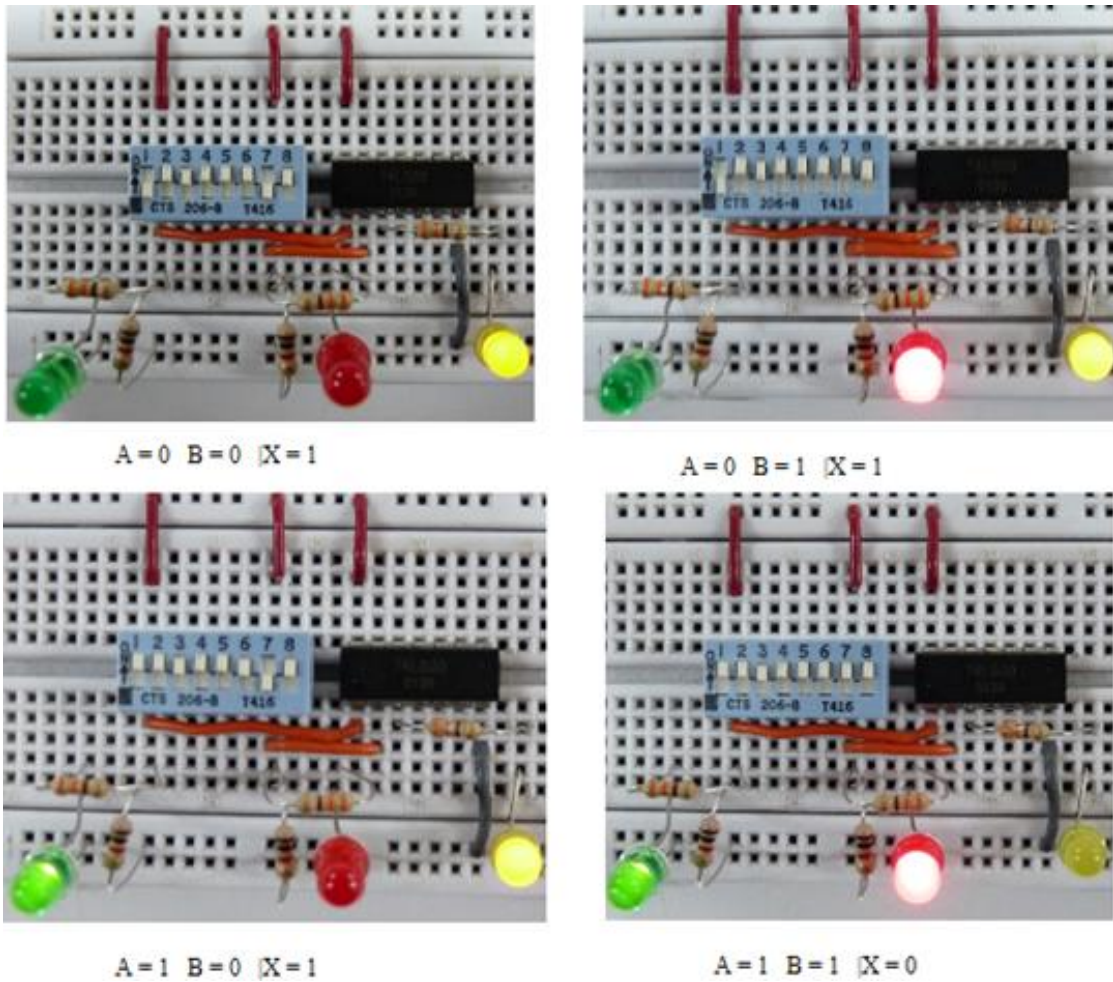
A=1 B=0 |X=1



A=1 B=1 |X=1

Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

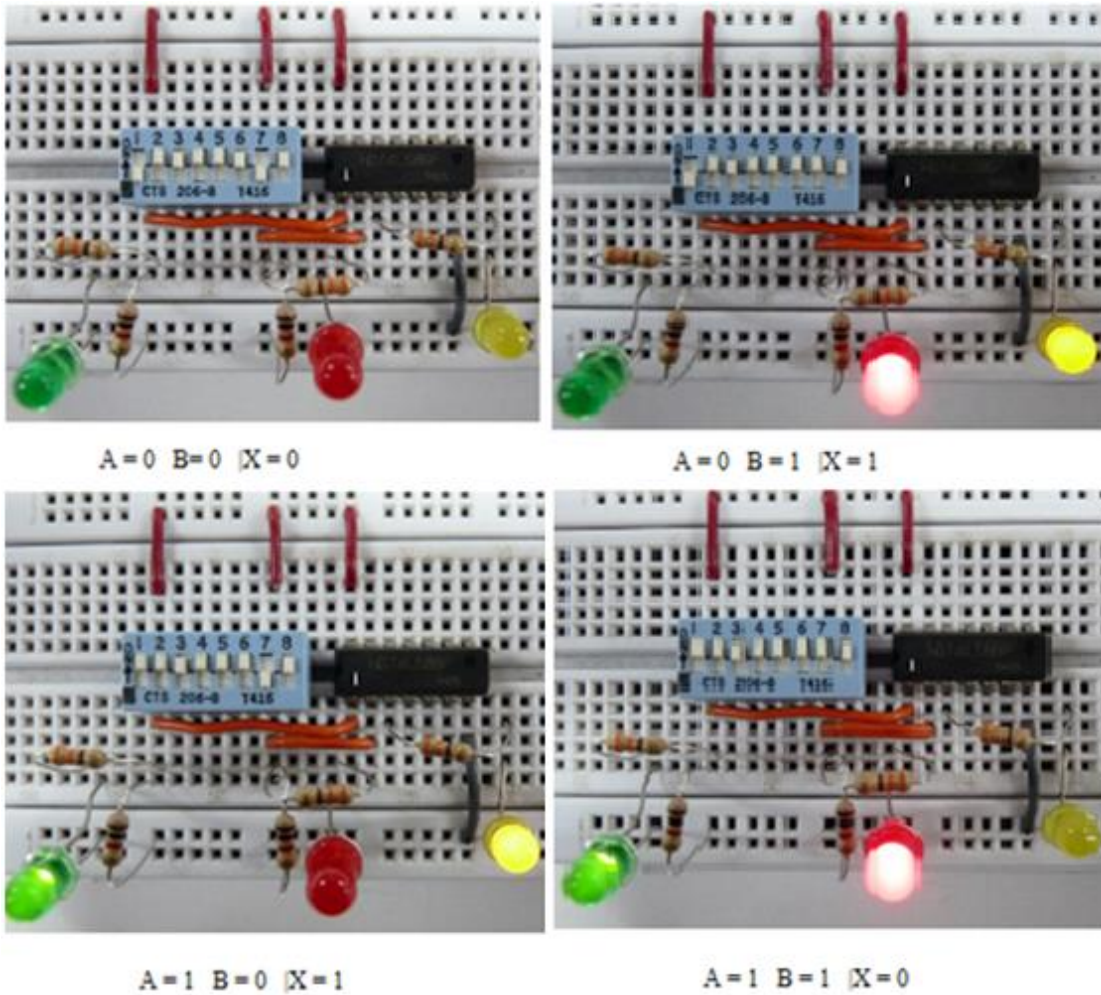
Figura 252. Comportamiento de la compuerta lógica NAND



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.



Figura 253. Comportamiento de la compuerta lógica XOR



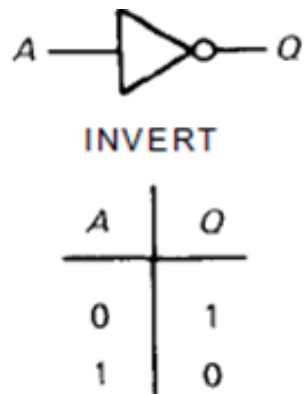
Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería



### 11.3.5. Inversor (*NOT*)

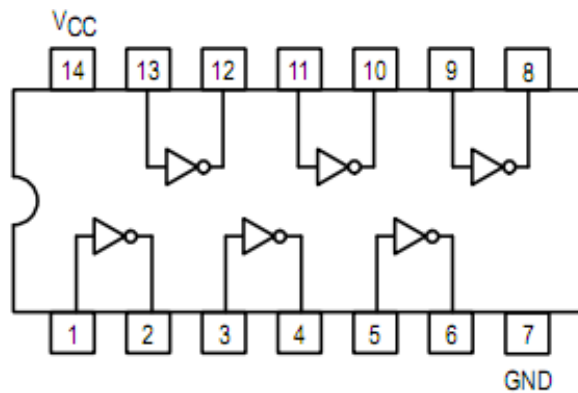
“*NOT A*” se escribe  $\bar{A}$  y es el complemento de un nivel lógico; ver la figura 254. Comprobar el comportamiento del inversor (74ls04), ver la figura 256. El diagrama de pines se muestra en la figura 255.

Figura 254. ***NOT***



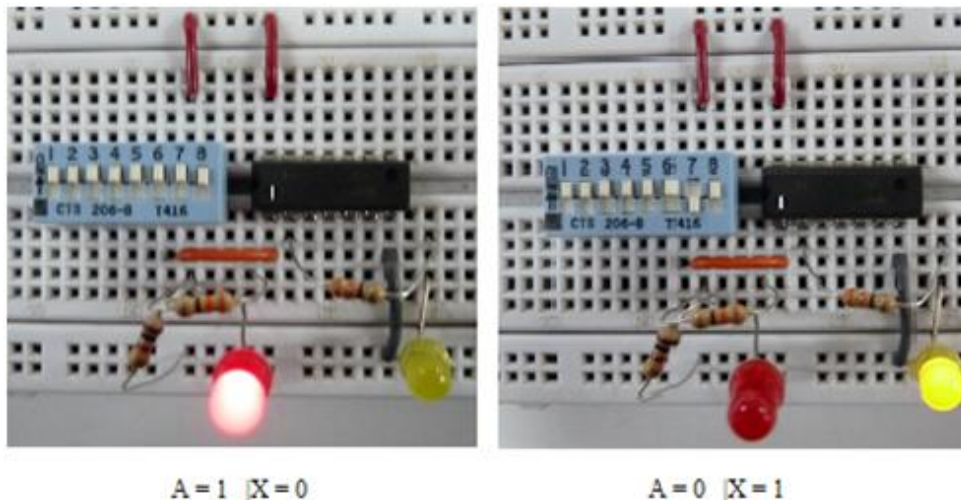
Fuente: HOROWITZ, Paul; HILL, Windfield. *The art of electronics*. p. 479.

Figura 255. **Inversor**



Fuente: MOTOROLA. *74lsXX series datasheet*. p. 1.

Figura 256. **Comportamiento del inversor**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

#### 11.4. **Lógica combinacional**

En circuitos combinacionales el estado de la salida depende solo del estado presente de la señal de entrada. Para construir circuitos combinacionales son necesarias algunas identidades lógicas como lo muestra la tabla XXXVII.

Utilizando los mapas de Karnaugh se puede construir la lógica que realice funciones complicadas como adición binaria, comparación de magnitudes, chequeo de paridad, multiplexación.

Las funciones complejas más usadas están disponibles en funciones MSI (*médium scale integration*). Algunas de las funciones MSI envuelven *flip-flops*, mucho de ellos son funciones combinacionales que envuelven solo compuertas.

Tabla XXXVII.      **Identidades lógicas**

$ABC = (AB)C = A(BC)$
$AB = BA$
$AA = A$
$A1 = A$
$A0 = 0$
$A(B+C) = AB + AC$
$A + AB = A$
$A + BC = (A + B)(A + C)$
$A + B + C = (A + B) + C = A + (B + C)$
$A + B = B + A$
$A + A = A$
$A + 1 = 1$
$A + 0 = A$
$1' = 0$
$0' = 1$
$A + A' = 1$
$AA' = 0$
$(A')' = A$
$A + A'B = A + B$
$(A + B)' = A'B'$
$(AB)' = A' + B'$

Fuente: HOROWITZ, Paul; HILL, Windfield. *The art of electronics*. p. 491.

Se pueden construir funciones combinatoriales utilizando compuertas lógicas.

#### 11.4.1.      **Decodificador**

Un decodificador activa la salida en decimal que indican sus entradas en binario,  $N$  líneas de entrada implican  $2^N$  posibles entradas; por ejemplo si se quiere un decodificador de dos entradas y cuatro salidas, dos entradas significan que se puede tener  $2^2 = 4$  posibles entradas (0 a 3), que son:

$$00_2 = 0_{10}$$

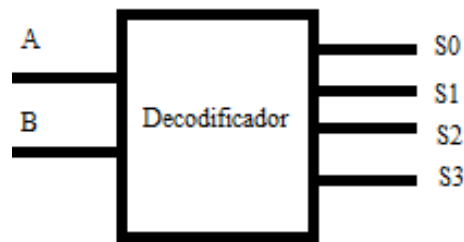
$$01_2 = 1_{10}$$

$$10_2 = 2_{10}$$

$$11_2 = 3_{10}$$

Si en las entradas se tiene 00 en la salida se tendrá 1000; si en las entradas se tiene 01 en las salidas se tendrá 0100; si en las entradas se tiene 10 en las salidas se tendrá 0010 y si se tiene en las entradas 11, en la salida se tendrá 0001 (figura 257). Para diseñar este circuito digital se necesita álgebra booleana y las identidades de la tabla XXXVII. Ver la tabla XXXVIII.

Figura 257. **Diagrama de decodificador de 2 X 4**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVIII. **Entradas y salidas del decodificador de 2 X 4**

Decimal	A	B	$S_0$	$S_1$	$S_2$	$S_3$
0	0	0	1	0	0	0
1	0	1	0	1	0	0
2	1	0	0	0	1	0
3	1	1	0	0	0	1

Fuente: elaboración propia.

Para encontrar las salidas se utiliza la suma de productos, se obtienen las ecuaciones (11.1) a (11.4) y el circuito de la figura 258. Conectar el circuito y comprobar su comportamiento (figuras 259 y 260).

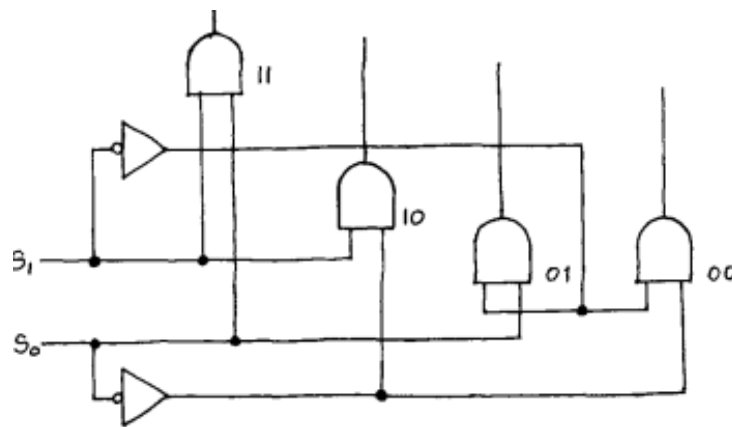
$$S_0 = \bar{A}\bar{B} \quad \text{Ec. [11.1]}$$

$$S_1 = \bar{A}B \quad \text{Ec. [11.2]}$$

$$S_2 = A\bar{B} \quad \text{Ec. [11.3]}$$

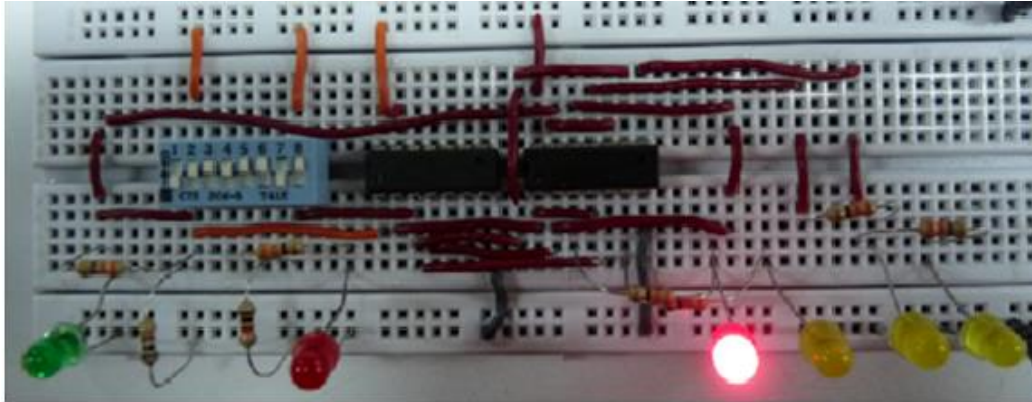
$$S_3 = AB \quad \text{Ec. [11.4]}$$

Figura 258. **Decodificador con compuertas AND**

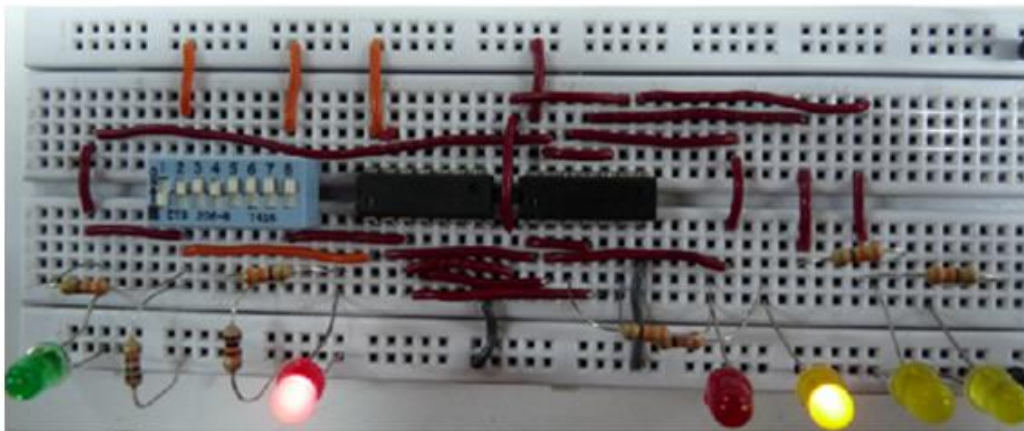


Fuente: HOROWITZ, Paul; HILL, Windfield. *The art of electronics: student manual*. p. 298.

Figura 259. Comportamiento del decodificador de 2 X 4 entradas 00 y 01



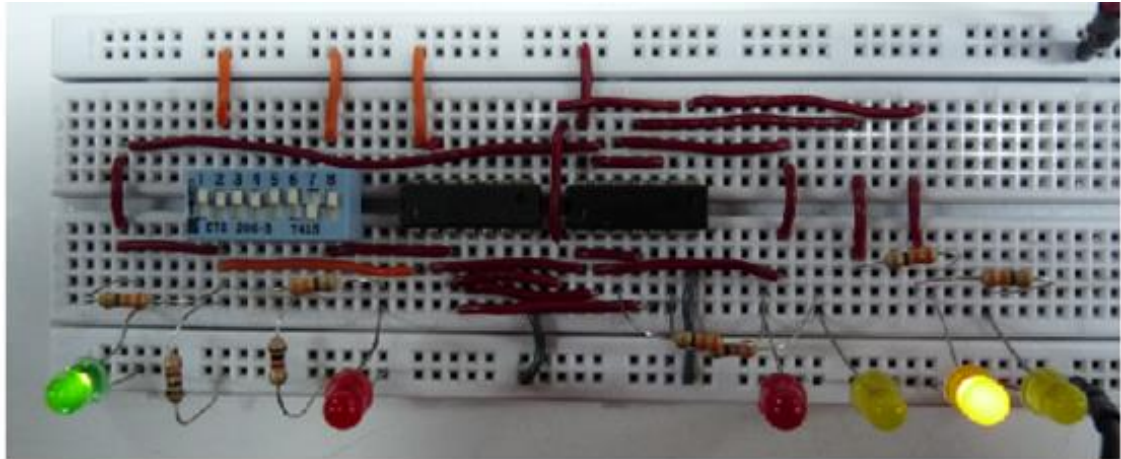
A=0 B=0 |X=1000



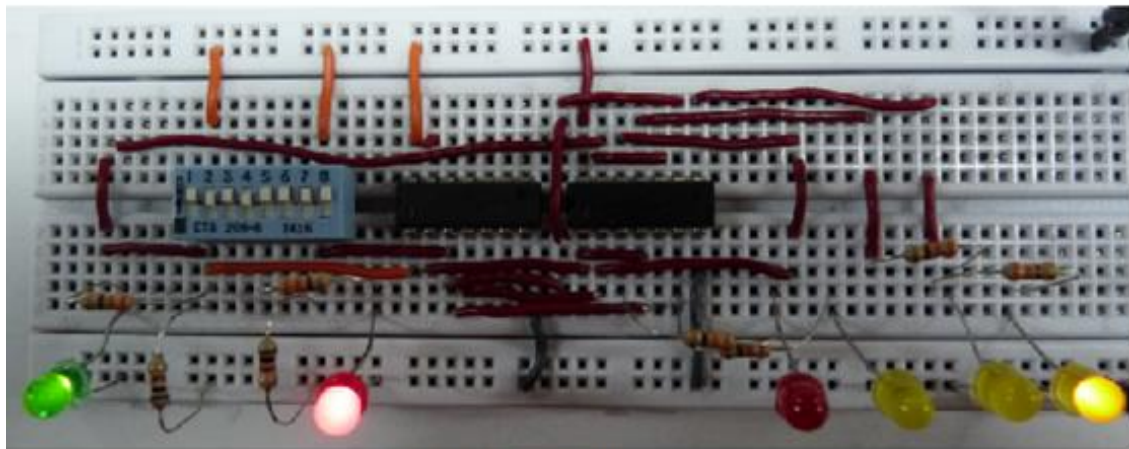
A=0 B=1 |X=0100

Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

Figura 260. Comportamiento del decodificador de 2 X 4 entradas 10 y 11



A = 1 B = 0 | X = 0010



A = 1 B = 1 | X = 0001

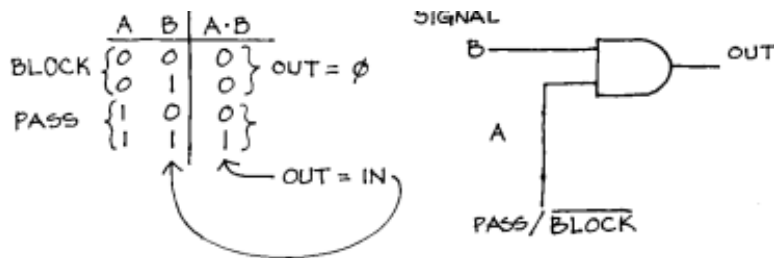
Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

### 11.4.2. Multiplexor

La noción de multiplexación, en su forma mecánica es un *switch* que debe elegir entre varias fuentes; el motivo de la multiplexación es limitar el número de líneas necesarias para transmitir información. Un multiplexor está formado por dos elementos: el circuito *pass/block* análogo al *switch* abierto/cerrado y el decodificador que cierra solo uno de los elementos *pass/block* a la vez.

Una compuerta *AND* hace el trabajo del primero; si se mantiene una entrada alta la salida sigue o es igual a la otra entrada; para bloquear una señal hay que mantener una de las entradas baja. Ver la figura 261.

Figura 261. **AND como circuito PASS/BLOCK**



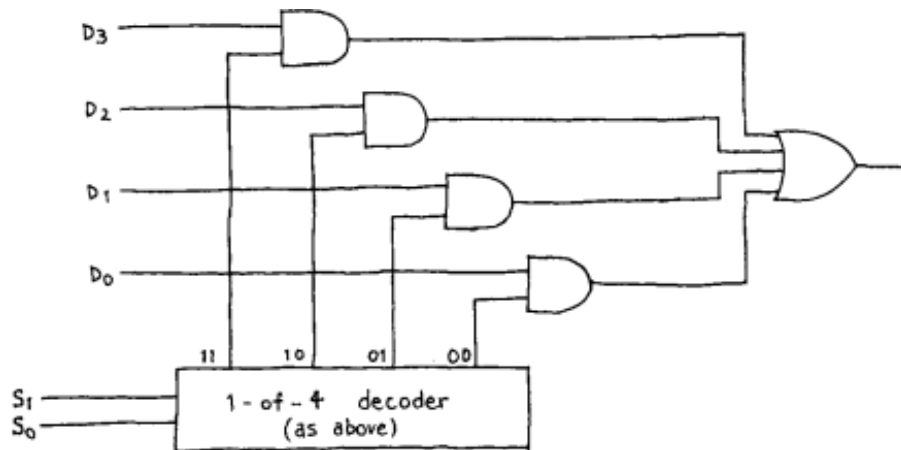
Fuente: HOROWITZ, Paul; HILL, Windfield. *The art of electronics: student manual*. p. 298.

Se unen los dos circuitos a través de una compuerta *OR* para ignorar los bajos y pasar cualquier alto. Armar el circuito de la figura 262 y comprobar su comportamiento.

En la entrada al multiplexor están 4 bits de información de  $D_0$  a  $D_3$  y  $S_0, S_1$ ; son los *switches* de selección. Si se elige que pase solo la información en la línea  $D_0$  se va a repetir en la salida del multiplexor, lo que hay en esa entrada.



Figura 262. **Multiplexor de 4 a 1**



Fuente: HOROWITZ, Paul; HILL, Windfield. *The art of electronics: student manual*. p. 298.

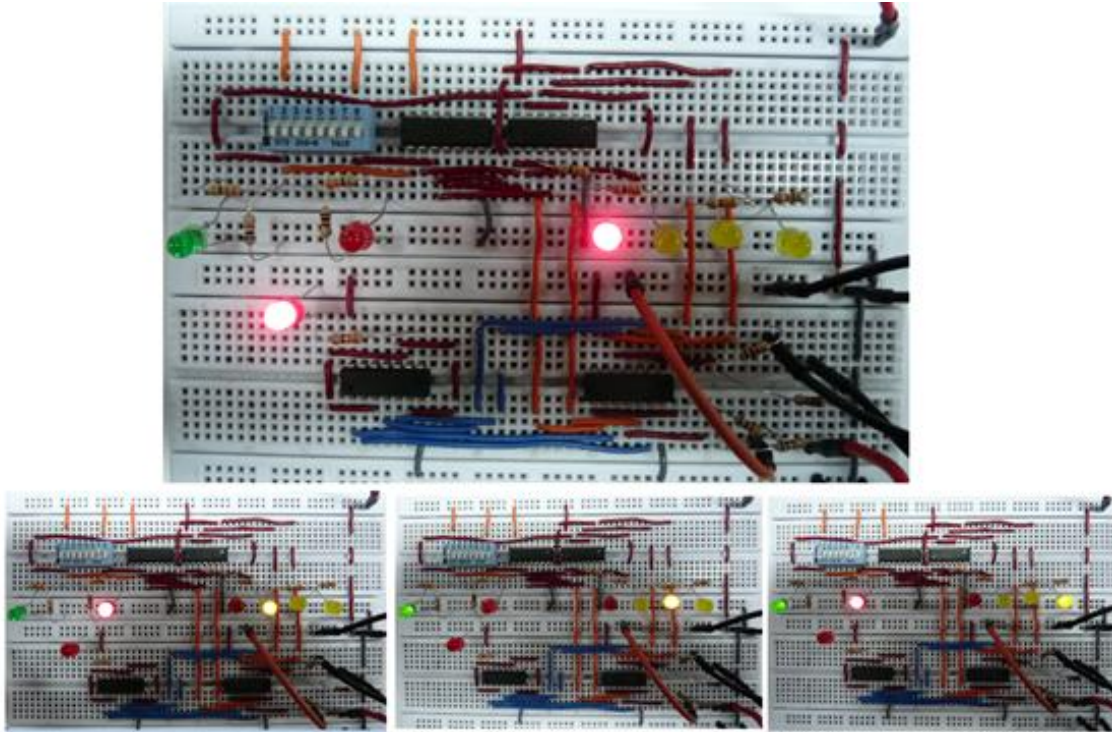
La figura 263 muestra la salida del multiplexor cuando se ha elegido  $D_0$ ; la salida debe ser ALTA si  $D_0$  es ALTA. Para todas las demás opciones,  $D_0$  debe ser BAJA.

La figura 264 muestra la salida del multiplexor cuando se ha elegido  $D_1$ ; la salida debe ser ALTA si  $D_1$  es ALTA. Para todas las demás opciones,  $D_1$  debe ser BAJA.

La figura 265 muestra la salida del multiplexor cuando se ha elegido  $D_2$ ; la salida debe ser ALTA si  $D_2$  es ALTA. Para todas las demás opciones,  $D_2$  debe ser BAJA.

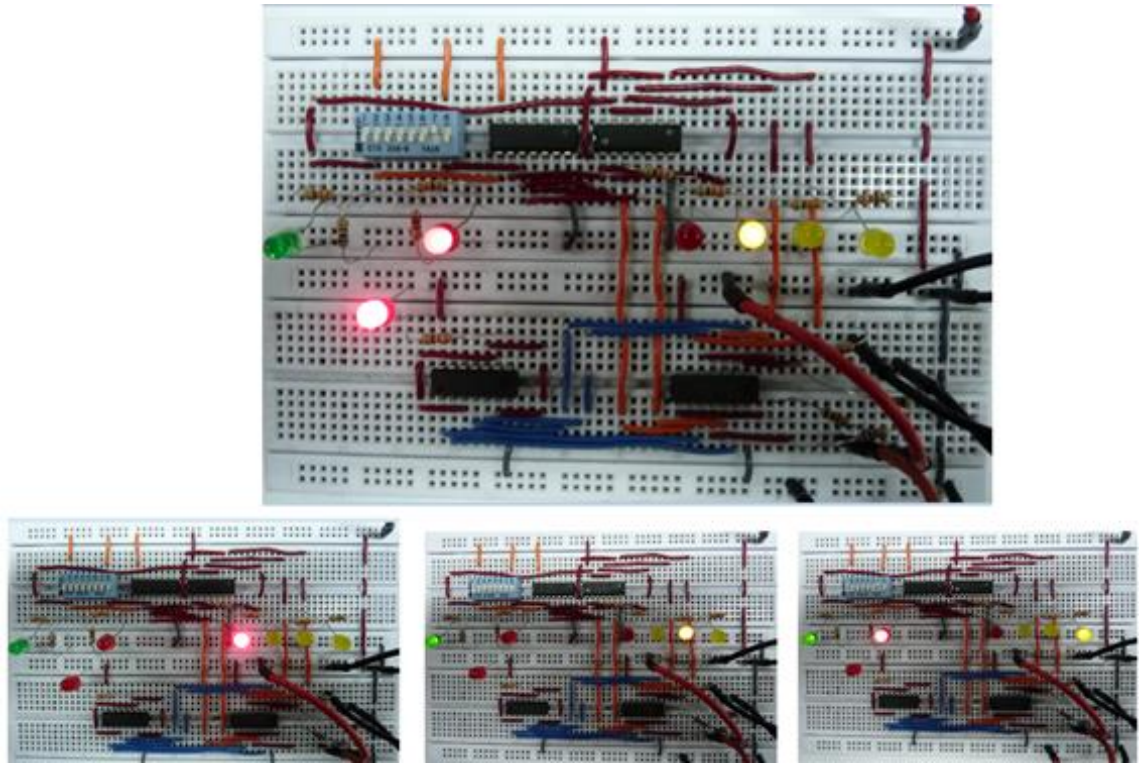
La figura 266 muestra la salida del multiplexor cuando se ha elegido  $D_3$ ; la salida debe ser ALTA si  $D_3$  es ALTA. Para todas las demás opciones,  $D_3$  debe ser BAJA.

Figura 263. Multiplexor  $D_0$  ALTA



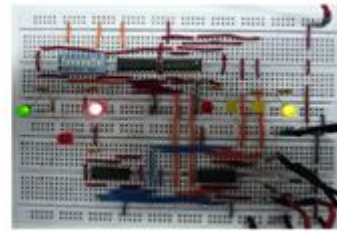
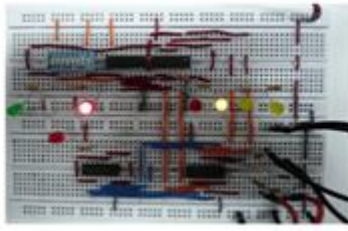
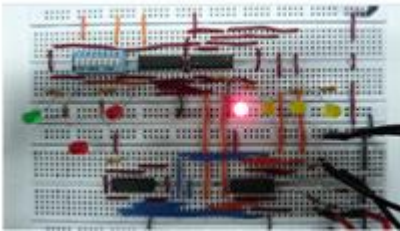
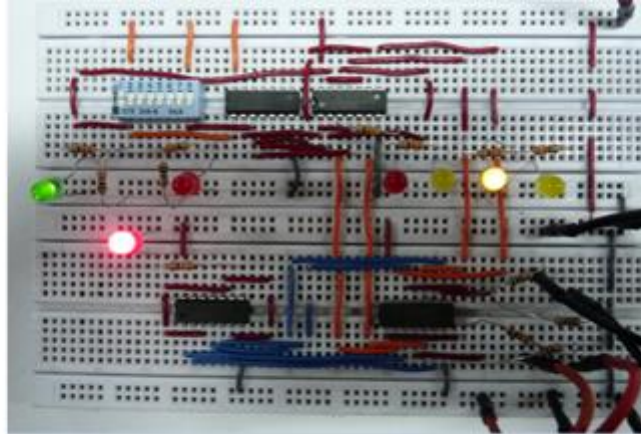
Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

Figura 264. Multiplexor  $D_1$  ALTA



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

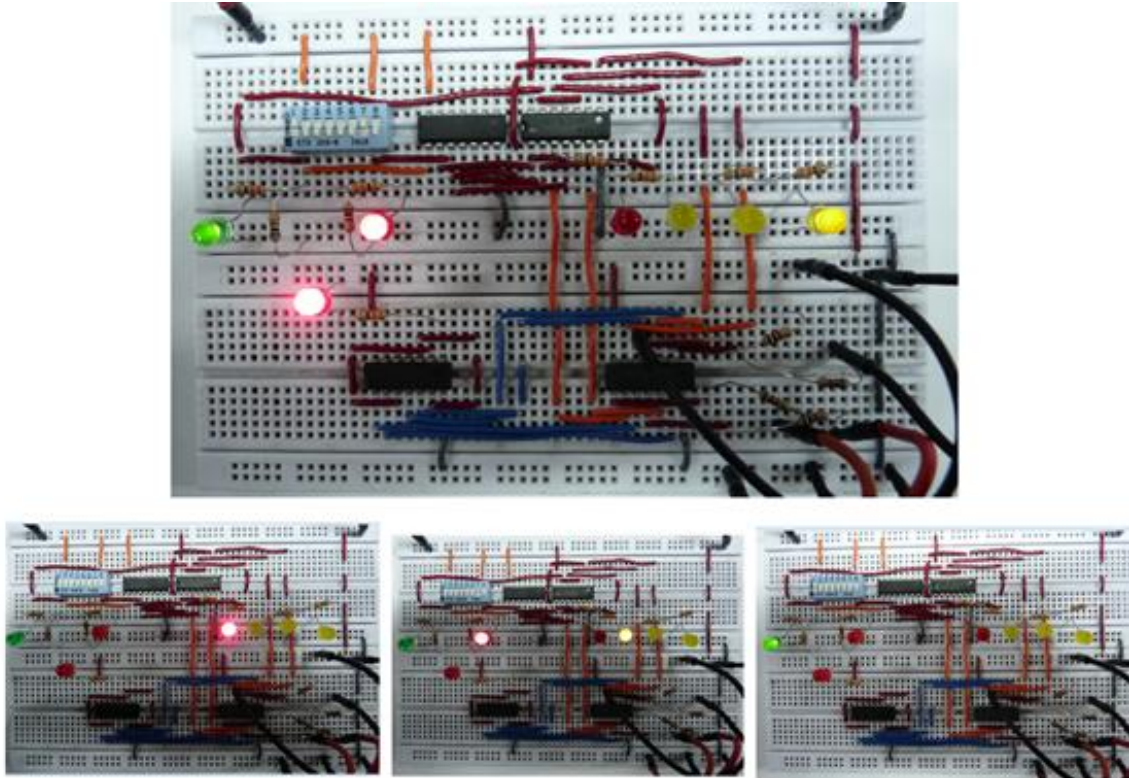
Figura 265. Multiplexor  $D_2$  ALTA



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.



Figura 266. Multiplexor  $D_3$  ALTA



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

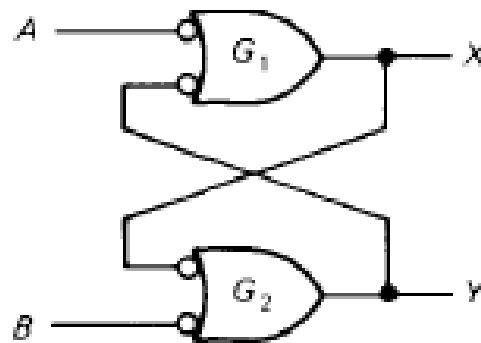
### 11.5. Lógica secuencial

En lógica combinacional no hay registro de los eventos pasados durante el desempeño de los circuitos; las salidas dependen del estado presente de las entradas; los circuitos secuenciales se interesan por su pasado y esto se debe al *feedback*.

Existen dispositivos digitales con memoria; el *flip-flop* es la unidad básica, ver la figura 267 (*flip*, set: envía la salida a alta y *flop*, reset: envía la salida a baja). Suponiendo que  $A$  y  $B$  son altas, si  $X$  es alta las dos entradas de  $G_2$  son

altas, haciendo  $Y$  baja. Como el circuito es simétrico, si  $X$  es baja,  $Y$  es alta. No es posible que ambas sean altas o bajas entonces el *flip-flop* tiene dos estados estables.

Figura 267. **Flip-flop tipo set-reset**



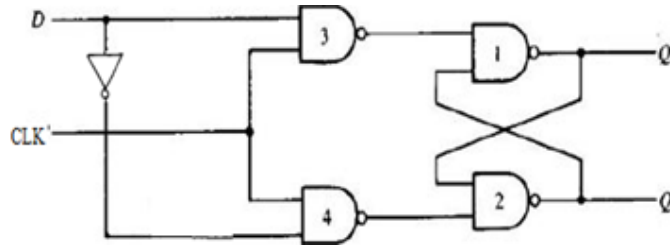
Fuente: HOROWITZ, Paul; HILL, Windfield. *The art of electronics*. p. 506.

### 11.5.1. **Flip-flop D**

El flip-flop tipo D lleva a la salida  $Q$  lo que tenga en la entrada cuando  $CLK = 1$ . Ver la figura 268. Su tabla de verdad la muestra la tabla XXXIX.

Utilizar un 74LS74; el diagrama de pines se encuentra en la figura 269, utilizar un DIP *switch* para simular la entrada D y el reloj. Iniciar con  $Q = 0$ . Ver la figura 270. Cada cambio en el reloj se especifica con CC. D es el led rojo en el DIPS, el reloj es el led amarillo y Q es el led verde.

Figura 268. **Flip-flop tipo D**



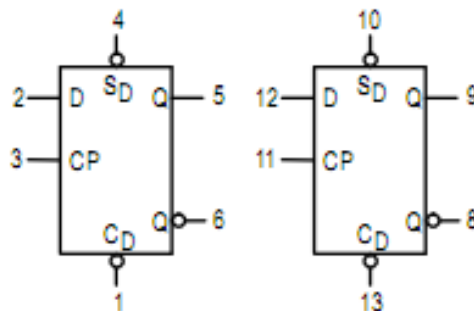
Fuente: D type Flip Flop. <http://www.brighthubengineering.com>. Consulta: junio de 2013.

Tabla XXXIX. **Tabla de verdad del flip-flop tipo D**

Q	D	Q(t+1)
0	0	0
0	1	1
1	0	0
1	1	1

Fuente: elaboración propia.

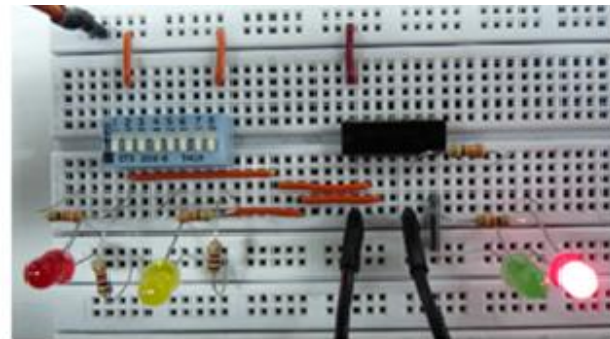
Figura 269. **74LS74**



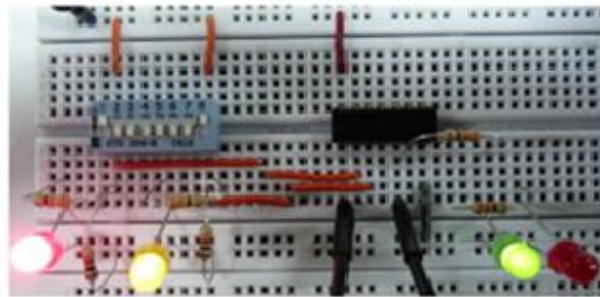
V<sub>CC</sub> = PIN 14  
GND = PIN 7

Fuente: MOTOROLA. 74LSXX series datasheet. p. 1.

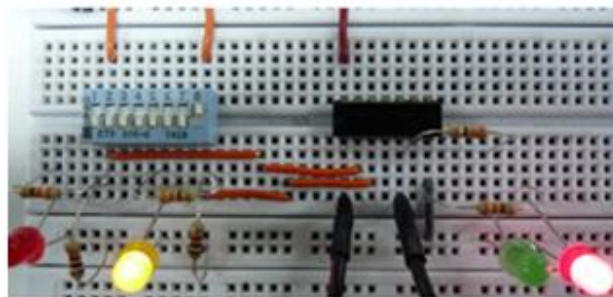
Figura 270. Comportamiento del *flip-flop* tipo D



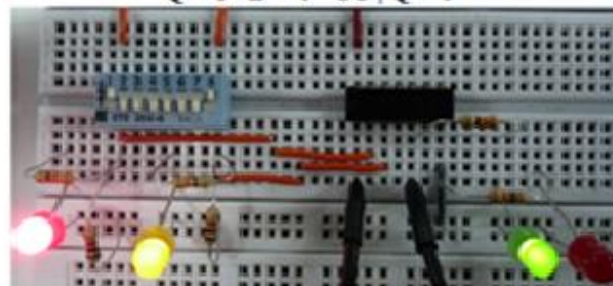
Q=0



Q=0 D=1 CC | Q=1



Q=1 D=0 CC | Q=0



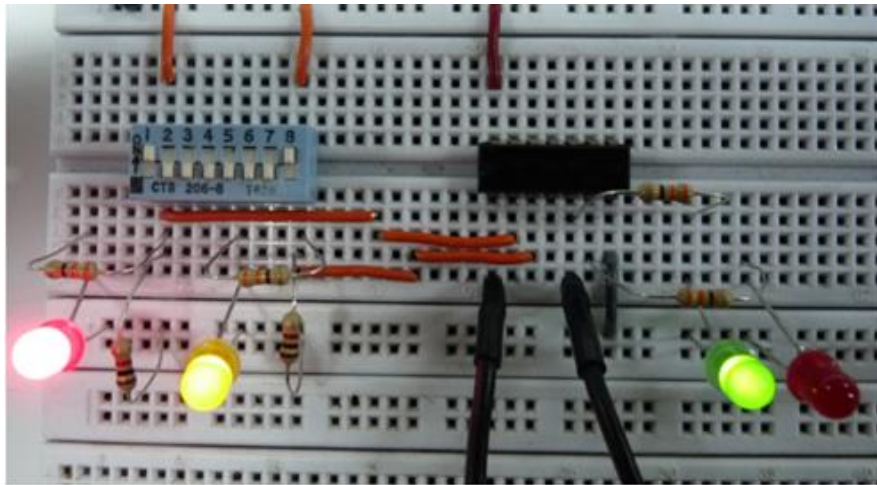
Q=0 D=1 CC | Q=1

Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

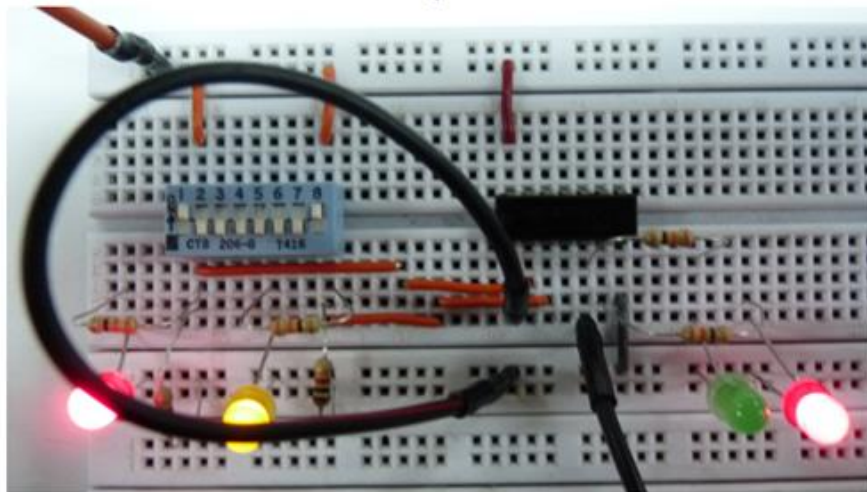


Utilizar *reset* y *set*, vea la figura 271 y 272. Conectar *reset* a tierra lleva a Q a cero y conectar *reset* a Q, la regresa su estado anterior.

Figura 271. **RESET**



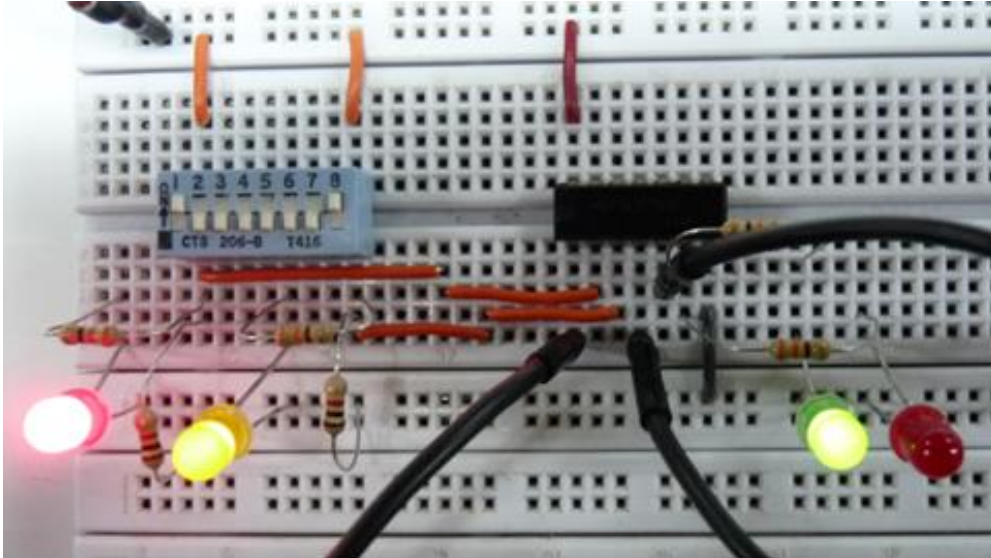
Q = 1



RESET a tierra | Q = 0

Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

Figura 272. **SET**



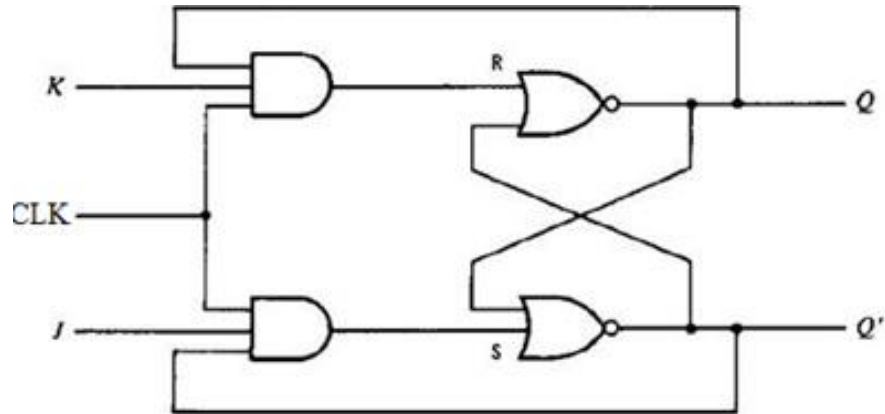
Q = 0 SET a Q Q = 1

Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

### 11.5.2. **Flip-flop JK**

El *flip-flop* JK (figura 273) es parecido al D pero tiene dos entradas de datos; la tabla XL muestra su tabla de verdad. Realizar el experimento anterior utilizando un 74LS73; su diagrama de pines lo muestra la figura 277. Ver las figura 274 a 276; el reloj es el led amarillo, J es el led verde y K es el led rojo del DIPS.

Figura 273. **Flip-flop JK**



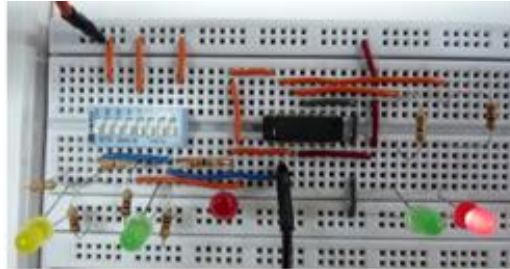
Fuente: JK type Flip Flop. <http://www.brighthubengineering.com>. Consulta: junio de 2013.

Tabla XL. **Tabla de verdad del *flip-flop* JK**

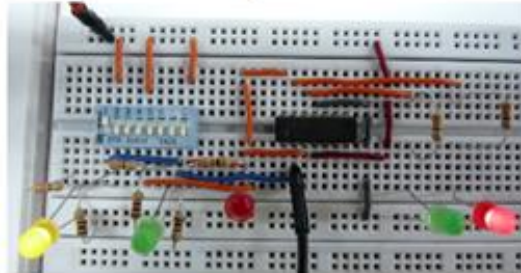
Q	J	K	Q(t+1)
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	1
0	1	1	1
1	0	0	1
1	0	1	0
1	1	0	1
1	1	1	0

Fuente: elaboración propia.

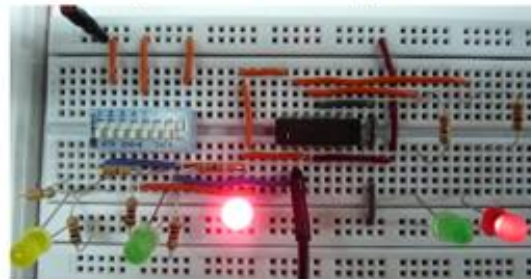
Figura 274. Comportamiento del *flip-flop* tipo JK (a)



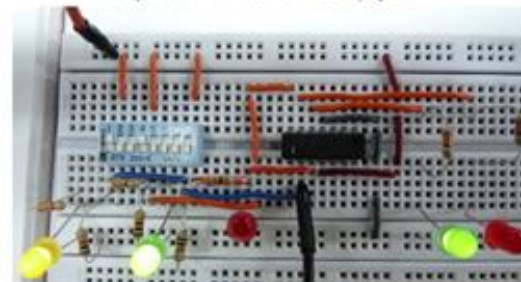
Q=0



Q=0 J=0 K=0 CC | Q=0



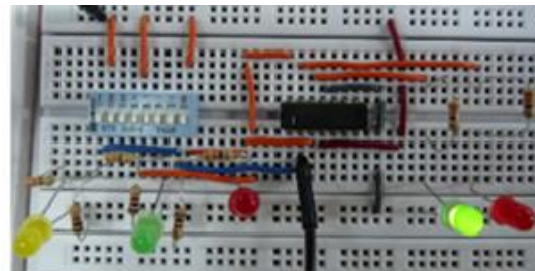
Q=0 J=0 K=1 CC | Q=0



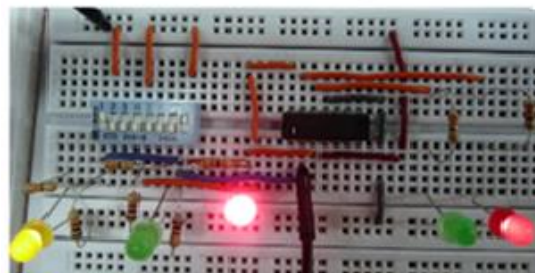
Q=0 J=1 K=0 CC | Q=1

Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

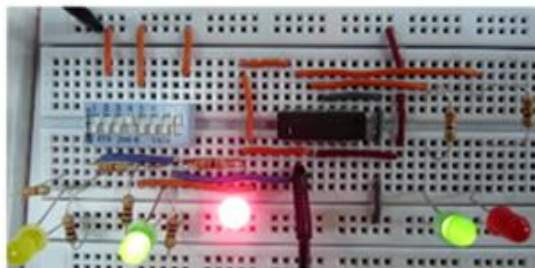
Figura 275. Comportamiento del *flip-flop* tipo JK (b)



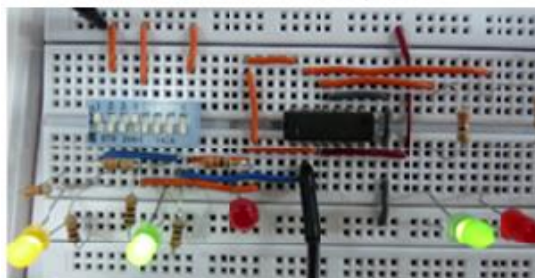
$Q=1 \ J=0 \ K=0 \ CC \ | \ Q=1$



$Q=1 \ J=0 \ K=1 \ CC \ | \ Q=0$



$Q=0 \ J=1 \ K=1 \ CC \ | \ Q=1$

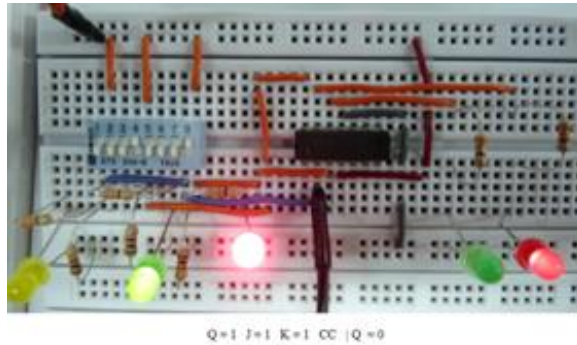


$Q=1 \ J=1 \ K=0 \ CC \ | \ Q=1$

Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.



Figura 276. **Comportamiento del *flip-flop* tipo JK (c)**

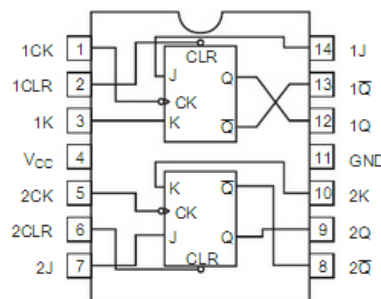


Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

### 11.5.3. *Flip-flop* T

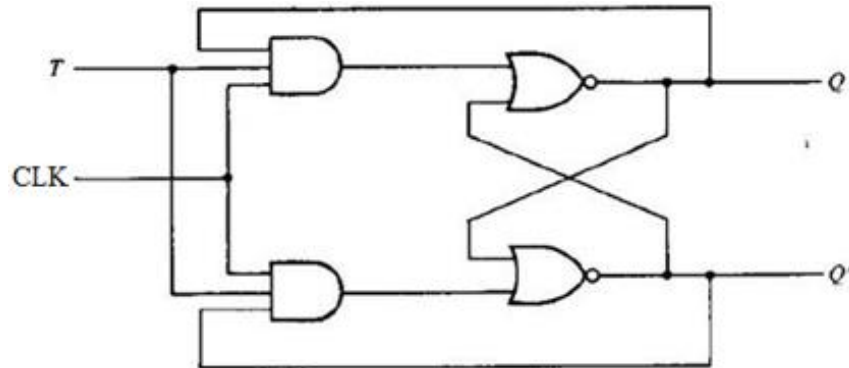
El *flip-flop* T es igual que el *flip-flop* JK, pero sus entradas J y K son iguales todo el tiempo. Este *flip-flop* recuerda el estado anterior y lo conmuta cuando  $T = 1$ . Ver la figura 278 y la tabla XLI. El diagrama de pines lo muestra la figura 277; ver su comportamiento en la figura 279. Construir un *flip-flop* T utilizando un *flip-flop* JK con las entradas J y K comunes.

Figura 277. **74LS73**



Fuente: MOTOROLA. 74LSXX series datasheet. p. 1.

Figura 278. **Flip-flop T**



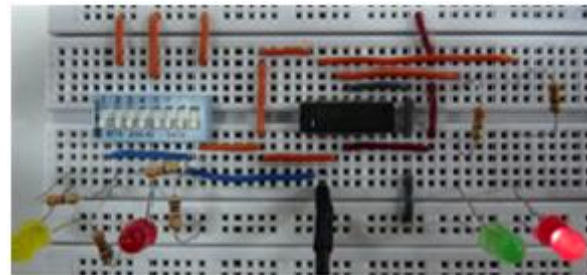
Fuente: T type Flip Flop. <http://www.brighthubengineering.com>. Consulta: junio de 2013.

Tabla XLI. **Tabla de verdad del *flip-flop* tipo T**

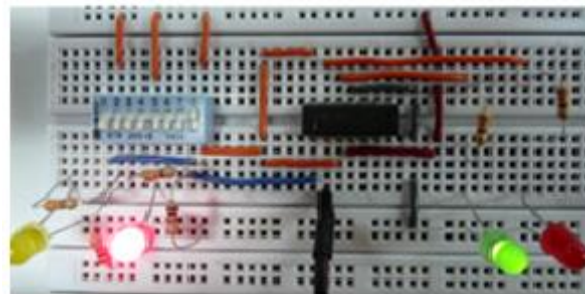
Q	T	Q(t+1)
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Fuente: elaboración propia.

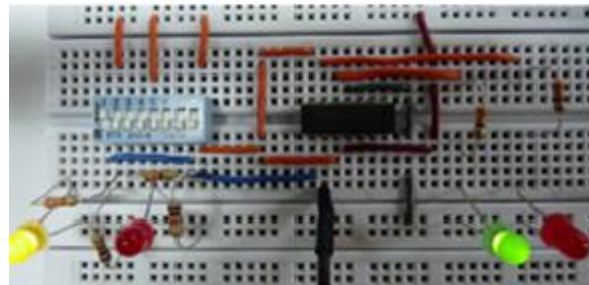
Figura 279. Comportamiento del *flip-flop* tipo T



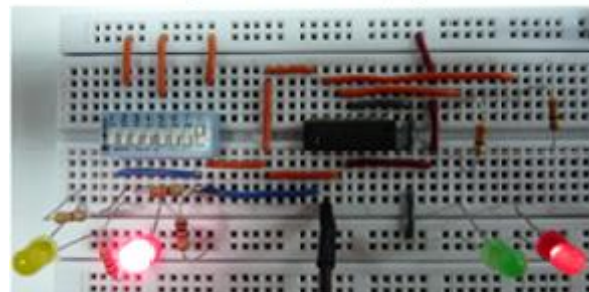
Q = 0



Q = 0 T = 1 CC | Q = 1



Q = 1 T = 0 CC | Q = 1



Q = 1 T = 1 CC | Q = 0

Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.



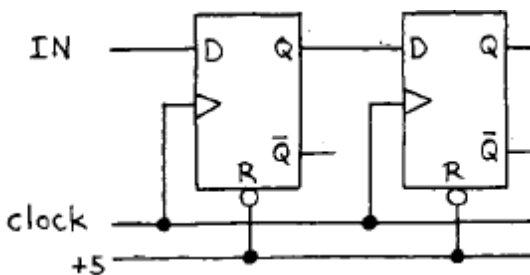
## 11.6. Registros y contadores

Un circuito lógico en el que la misma fuente de reloj controla todos los *flip-flops* es un sistema síncrono, funciona justo después de cada pulso de reloj basado en los niveles presentes, justo antes de cada pulso de reloj. Un registro es un conjunto de *flip-flops* tipo D con las entradas de reloj conectadas entre ellas y sus entradas D conectadas a la salida Q del *flip-flop* anterior.

El registro de desplazamiento (*shift register*) es un circuito lógico que crea un *delay* entra la información que entra y la que sale. Si se tienen N *flip-flops* se necesitan N pulsos de reloj para que la información que está en la entrada llegue a la salida; es decir, la información de salida va a estar atrasada N pulsos de reloj respecto de la entrada. Un registro de desplazamiento se puede utilizar para almacenar información, una memoria temporal o *buffer*.

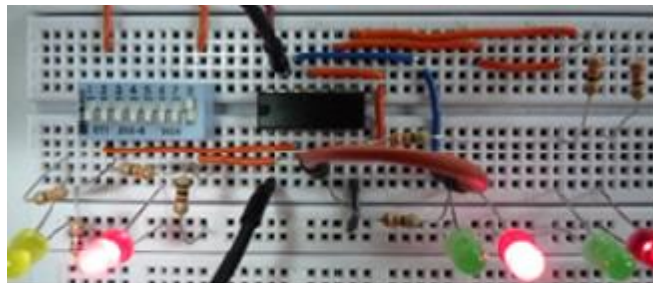
Armar el circuito que muestra la figura 280, donde puede verse un registro de desplazamiento “dividido entre 2” porque atrasa la información dos pulsos de reloj. Su comportamiento lo muestra la figura 281.

Figura 280. Registro de desplazamiento

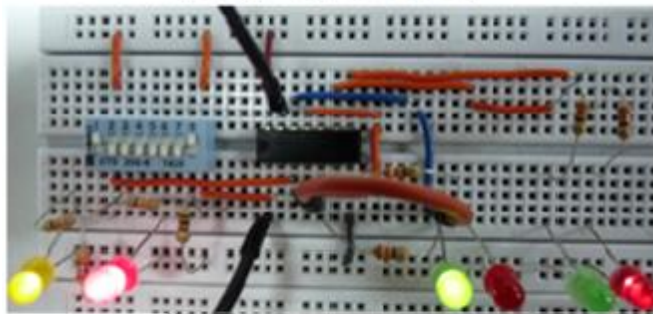


Fuente: HOROWITZ, Paul; HILL, Windfield. *The art of electronics: student manual*. p. 340.

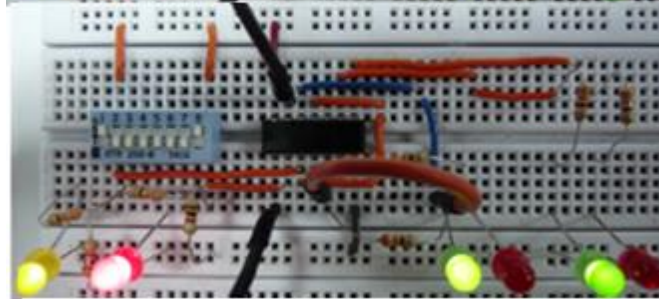
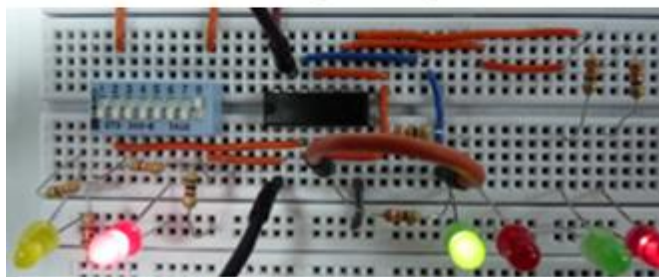
Figura 281. Comportamiento del registro de desplazamiento



D1 = 1 Q1 = 0 Q2 = 0



CC D1 = 1 Q1 = 1 Q2 = 0



CC D1 = 1 Q1 = 1 Q2 = 1

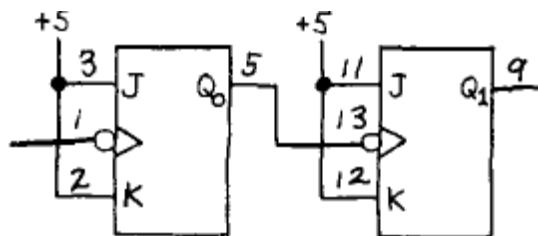
Fuente: laboratorio de Física, S-11, Facultad de Ingeniería.

Un contador síncrono es un conjunto de *flip-flops* tipo JK configurados como *Toggle*; estos puede ser síncronos o asíncronos. En los contadores asíncronos (figura 282) se conecta la entrada de reloj a la salida Q del *flip-flop* anterior; cada *flip-flop* cambia de estado cuando el anterior cambia también de estado; es decir, produce cambios en tiempos diferentes. Esos cambios pueden afectar el funcionamiento interno de cada *flip-flop*.

El contador síncrono tiene conectadas todas sus entradas de reloj a la misma fuente y sus entradas T a la salida Q del *flip-flop* anterior. Todos los cambios se realizan al mismo tiempo, es decir, sincronizados al mismo pulso de reloj.

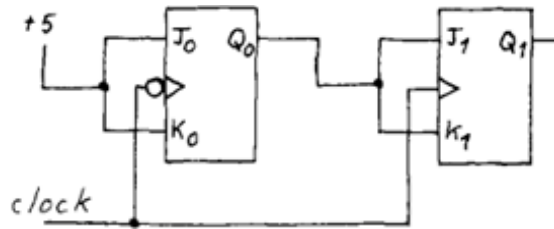
En la figura 283 puede verse que el primer *flip-flop* cambia de estado cuando el reloj cambia, los demás *flip-flops* de la cadena cambian de estado solo si T es alta (si la salida del *flip-flop* anterior es alta). Comprobar el comportamiento del contador síncrono (figura 284).

Figura 282. **Contador asíncrono**



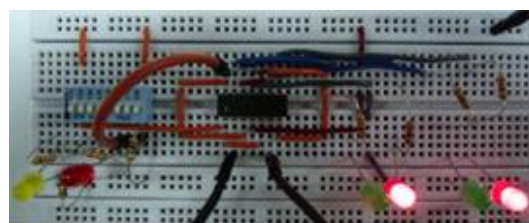
Fuente: HOROWITZ, Paul; HILL, Windfield. *The art of electronics: student manual*. p. 338.

Figura 283. **Contador síncrono**

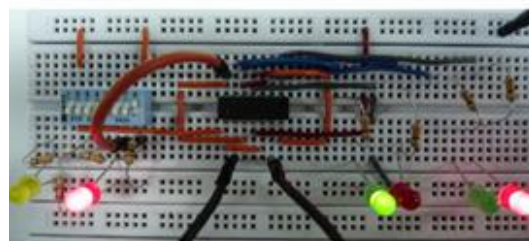


Fuente: HOROWITZ, Paul; HILL, Windfield. *The art of electronics: student manual*. p. 338.

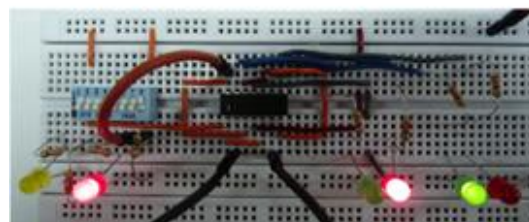
Figura 284. **Comportamiento del contador síncrono**



T=0 Q1=0 Q2=0



T=1 CC Q1=1 Q2=0



CC Q1=0 Q2=1

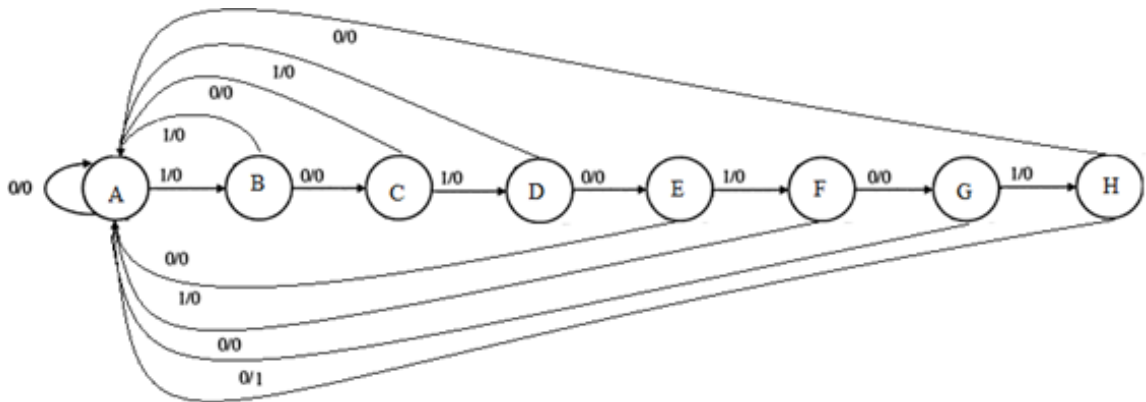
Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

### 11.7. Diseño de un detector de secuencia

Un detector de secuencia acepta una entrada de cadena de bits y su salida es 1 cuando una secuencia específica es detectada. El detector de secuencia es una máquina de estado, se utilizan circuitos combinacionales y secuenciales.

Se empiezan con un diagrama de estados; este circuito va a detectar la secuencia de ocho bits: 10101010. Ver la figura 285. El estado inicial es A, si se tiene en la entrada un 1 la máquina pasa al estado B, si B recibe un 0 pasa al estado C; esto se repite hasta obtener el último 0 que lleva a la máquina al estado inicial con salida 1. Notar que mientras no se complete la secuencia la salida siempre es cero.

Figura 285. Diagrama de estados



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Paint.

Puede verse ahora si la entrada no es lo que se espera (figura 285), si el primer bit recibido es 0, la máquina permanece en el estado A esperando un 1; si se encuentra en cualquier otro estado y no recibe el bit esperado, la máquina

regresa al estado inicial y la salida siempre es cero. La transición de estados se muestra en la tabla XLII.

Tabla XLII. **Estados**

Estado	X=0	X=1
A	A	B
B	C	A
C	A	D
D	E	A
E	A	F
F	G	A
G	A	H
H	A	B

Fuente: elaboración propia.

Se tienen ocho estados, para calcular el número de *flip-flops* necesarios resolver la ecuación 11.5. En este caso  $P = 3$ ; por tanto, se necesitan 3 *flip-flops*.

$$2^{P-1} < N \leq 2^P \quad \text{Ec. [11.5]}$$

Hay que asignar un número binario de P bits a cada estado. La forma más simple de asignar números a los estados es en orden, de  $0_{10}$  a  $7_{10}$  ver la tabla XLIII.

El diagrama de estados es útil si se diseña con lógica secuencial, particularmente si los estados se conectan a través de muchos caminos. Una aproximación de este diseño es seleccionar un conjunto de estados únicos del sistema y darles un nombre. Luego se fijan las reglas para el movimiento entre

estados y todas las condiciones para entrar y salir de un estado. Así se convierte un problema de lógica secuencial en lógica combinacional.

Tabla XLIII. **Números decimales y su equivalente binario**

Decimal	Binario
0	000
1	001
2	010
3	011
4	100
5	101
6	110
7	111

Fuente: elaboración propia

La tabla XLIV muestra la transición de estados, hay que separarla en P tablas, una para cada *flip-flop* y decidir qué tipo de *flip-flop* utilizar. En este caso se usa *flip-flop* tipo D por su funcionamiento simple (74LS74). La tabla XLV muestra las transiciones para cada *flip-flop*, el estado actual y el siguiente.

Tabla XLIV. **Transición de estados**

Estado	X = 0	X = 1
000	000	001
001	010	000
010	000	011
011	100	000
100	000	101
101	110	000
110	000	111
111	000	000

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLV. **Transición de estados para cada *flip-flop***

Estado	$Q_2 Q_1 Q_0$	X = 0		X = 1		X = 0		X = 1		X = 0		X = 1	
		$D_2$	$Q_2^*$	$D_2$	$Q_2^*$	$D_1$	$Q_1^*$	$D_1$	$Q_1^*$	$D_0$	$Q_0^*$	$D_0$	$Q_0^*$
A	000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
B	001	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
C	010	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1
D	011	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E	100	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1
F	101	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
G	110	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1
H	111	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: elaboración propia.

La tabla XLVI muestra la entrada X, las salidas Q y entradas D para cada *flip-flop*, y la salida Z del detector de secuencia.

Tabla XLVI. **Tabla de entrada y salida de cada *flip-flop***

X	$Q_2$	$Q_1$	$Q_0$	$D_0$	$D_1$	$D_2$	Z
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	1	0	0
0	0	1	0	0	0	0	0
0	0	1	1	0	0	1	0
0	1	0	0	0	0	0	0
0	1	0	1	0	1	1	0
0	1	1	0	0	0	0	0
0	1	1	1	0	0	0	1
1	0	0	0	1	0	0	0
1	0	0	1	0	0	0	0
1	0	1	0	1	1	0	0
1	0	1	1	0	0	0	0
1	1	0	0	1	0	1	0
1	1	0	1	0	0	0	0
1	1	1	0	1	1	1	0
1	1	1	1	0	0	0	0

Fuente: elaboración propia.



Para encontrar las ecuaciones de entrada puede utilizarse álgebra booleana o mapas de *Karnaugh*. Ver las ecuaciones 11.6 a 11.9; las figuras 286 y 287 muestran los circuitos combinacionales de dichas ecuaciones. La figura 288 muestra la conexión de los *flip-flops*, *set* y *clear* se conectan a Q y tierra, respectivamente, a través de un *push-button*.

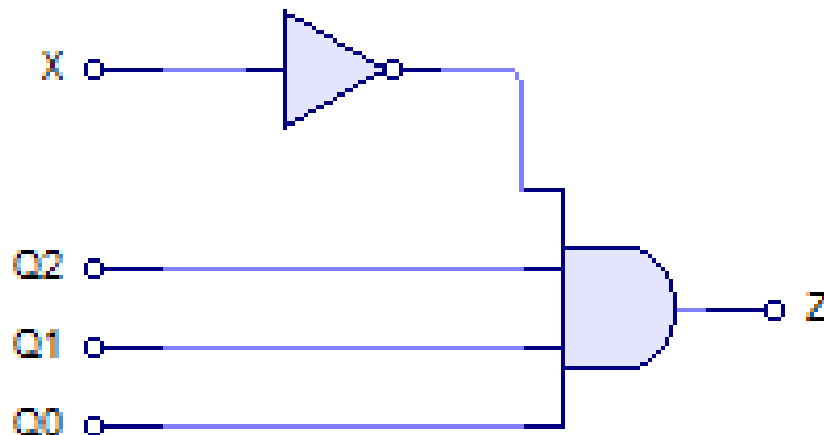
$$D_0 = X\overline{Q_0} \quad \text{Ec. [11.6]}$$

$$D_1 = \overline{X}Q_1Q_0 + XQ_1\overline{Q_0} \quad \text{Ec. [11.7]}$$

$$D_2 = \overline{X}Q_0(\overline{Q_2}Q_1 + Q_2\overline{Q_1}) + XQ_2\overline{Q_0} \quad \text{Ec. [11.8]}$$

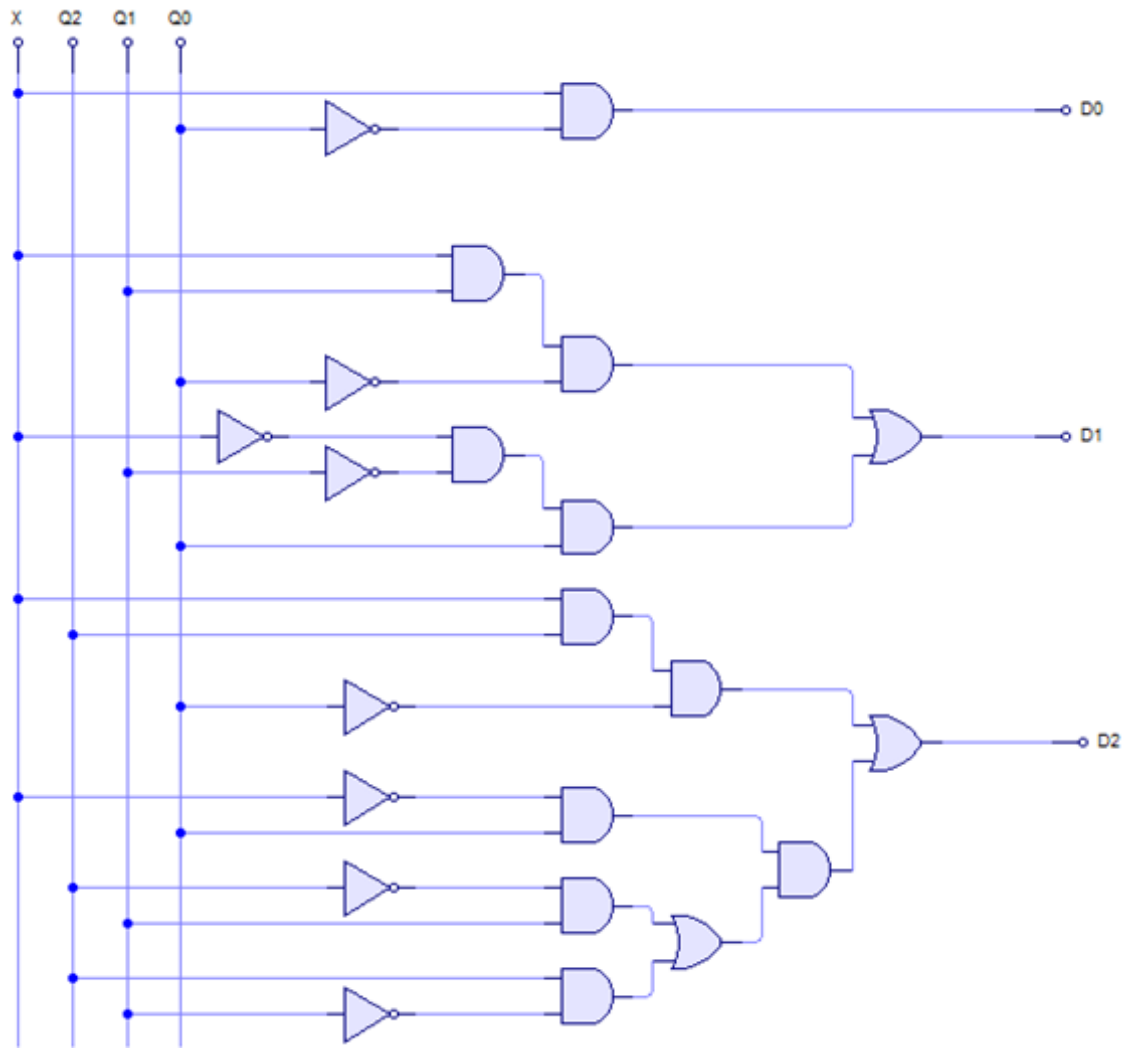
$$Z = \overline{X}Q_2Q_1Q_0 \quad \text{Ec. [11.9]}$$

Figura 286. Salida del detector



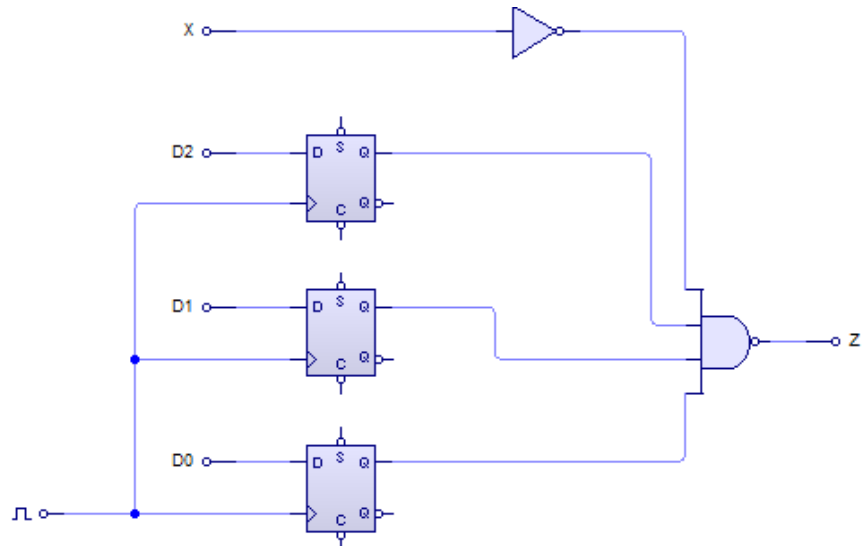
Fuente: elaboración propia, empleando LiveWire.

Figura 287. Entradas de los *flip-flops*



Fuente: elaboración propia, empleando LiveWire.

Figura 288. **Detector de secuencia 10101010**



Fuente: elaboración propia, empleando LiveWire.

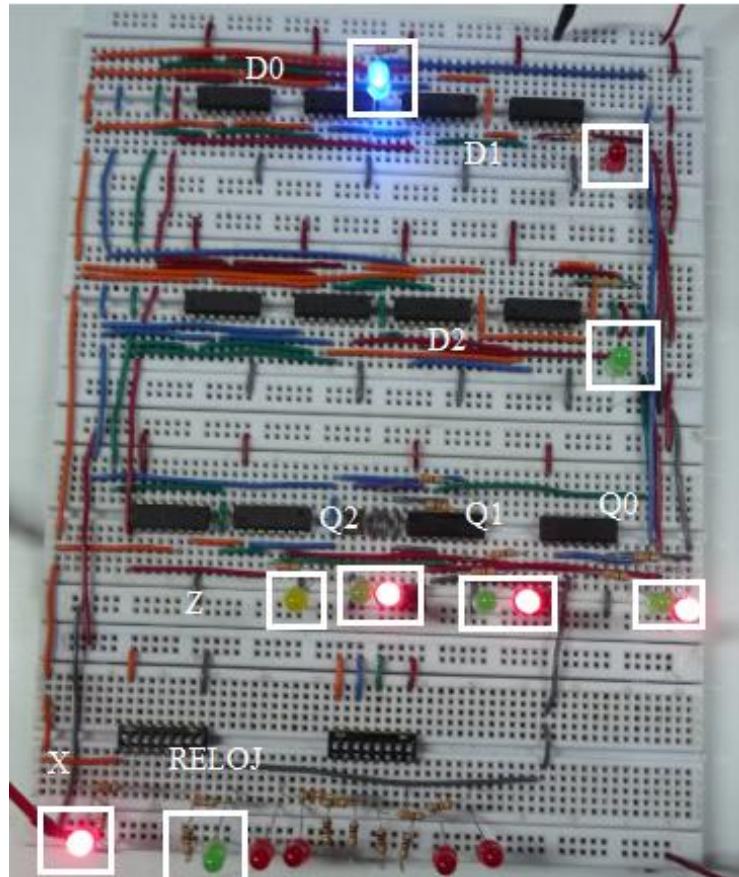
Armar el circuito que muestra la figura 288 y comprobar su funcionamiento; ver la figura 289. Para probar el circuito se puede usar la tabla XLVII.

Tabla XLVII. **Entradas y salidas para 10101010**

<b>X</b>	<b>Q<sub>2</sub></b>	<b>Q<sub>1</sub></b>	<b>Q<sub>0</sub></b>	<b>D<sub>0</sub></b>	<b>D<sub>1</sub></b>	<b>D<sub>2</sub></b>	<b>Z</b>
1	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	1	0	1	0	0
1	0	1	0	1	1	0	0
0	0	1	1	0	0	1	0
1	1	0	0	1	0	1	0
0	1	0	1	0	1	1	0
1	1	1	0	1	1	1	0
0	1	1	1				1

Fuente: elaboración propia.

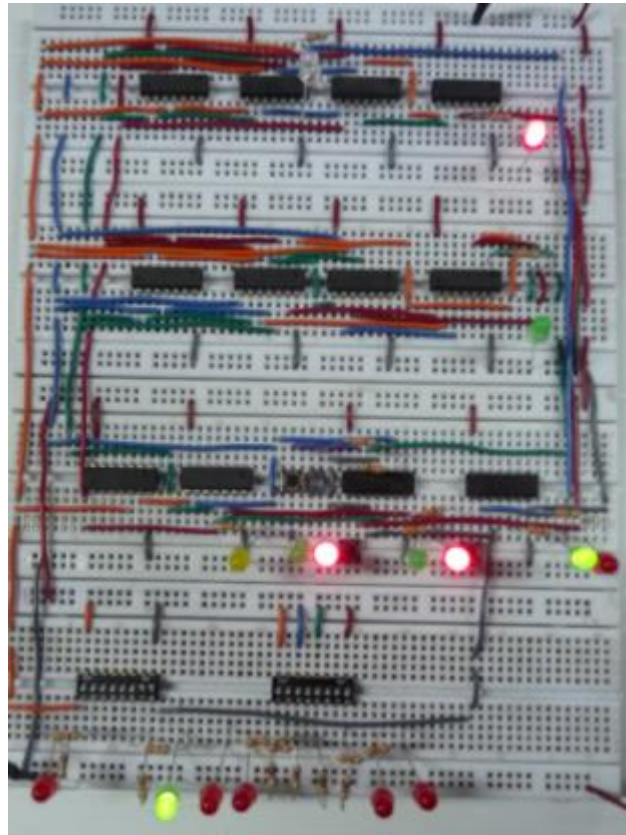
Figura 289. Circuito detector



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

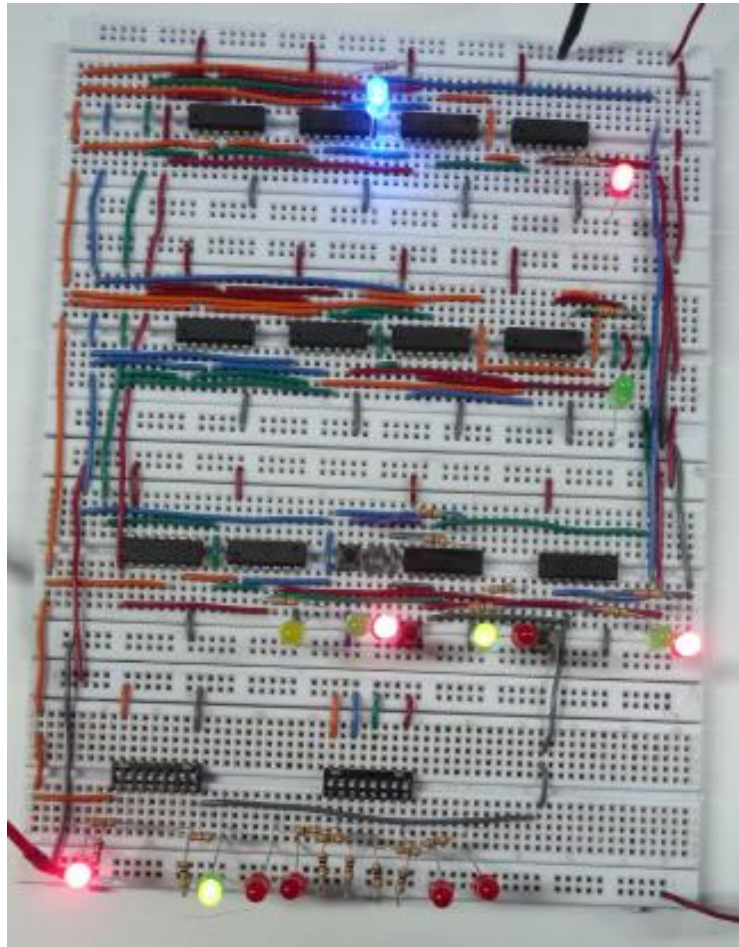
Ver la primera fila de la tabla XLVII; la entrada es 1000 y se obtiene 100 en las entradas de los *flip-flops* y  $Z = 0$ , al hacer el cambio de reloj las entradas de los *flip-flops* deberán cambiar a 010 (según la segunda fila de la tabla) y  $X$  debe ser cero para pasar al siguiente estado; esto se repite hasta que se cumplen todos los valores de la tabla y  $Z = 1$ . Ver las figuras 290 a 296.

Figura 290. **Circuito detector en el estado 0001|010|X= 0**



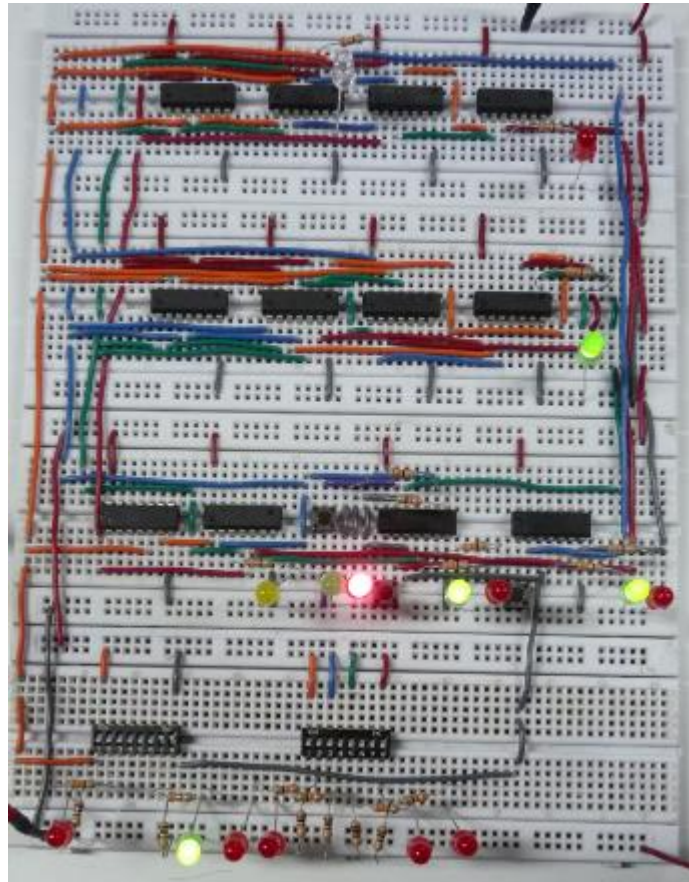
Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

Figura 291. **Circuito detector en el estado 1010|110|X = 0**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

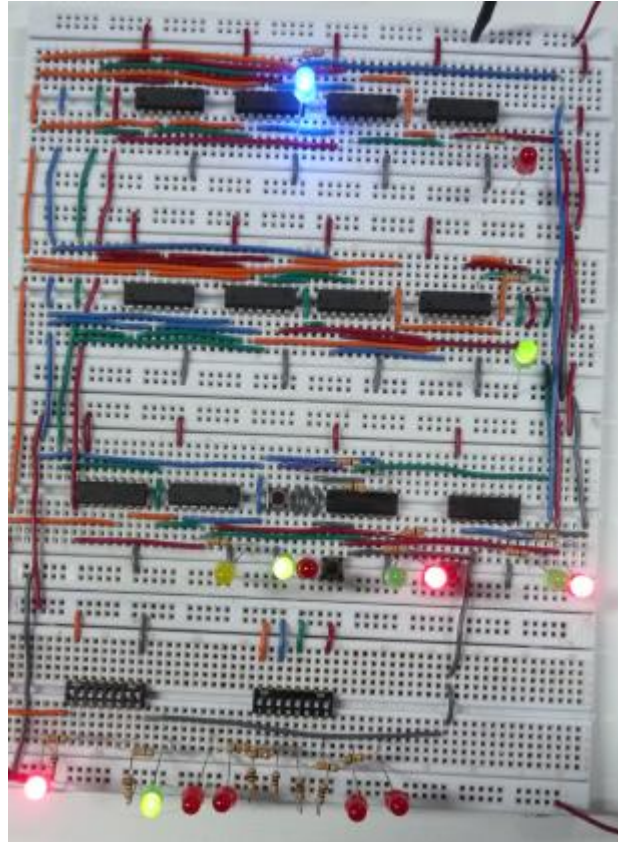
Figura 292. **Circuito detector en el estado 0011|001|X = 0**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.



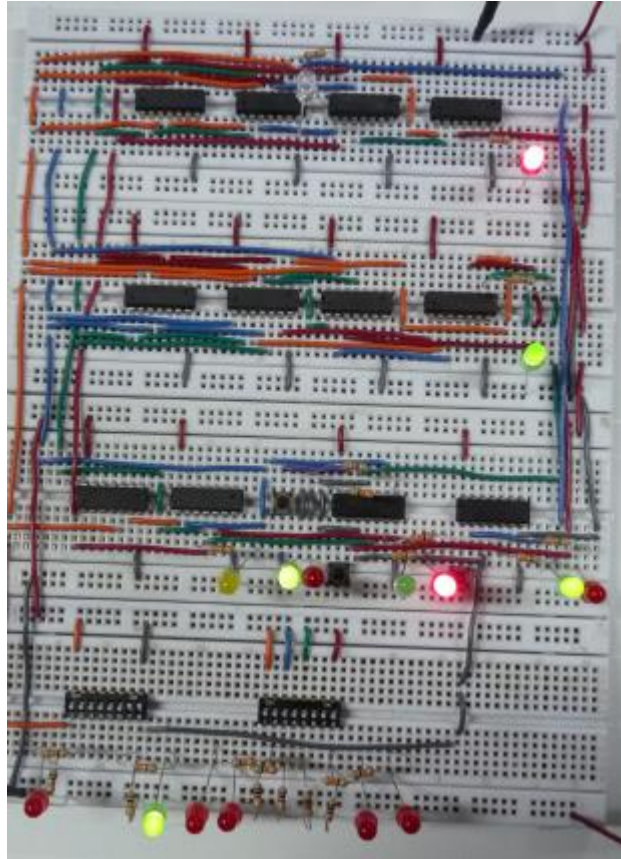
Figura 293. **Circuito detector en el estado 1100|101|X = 0**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

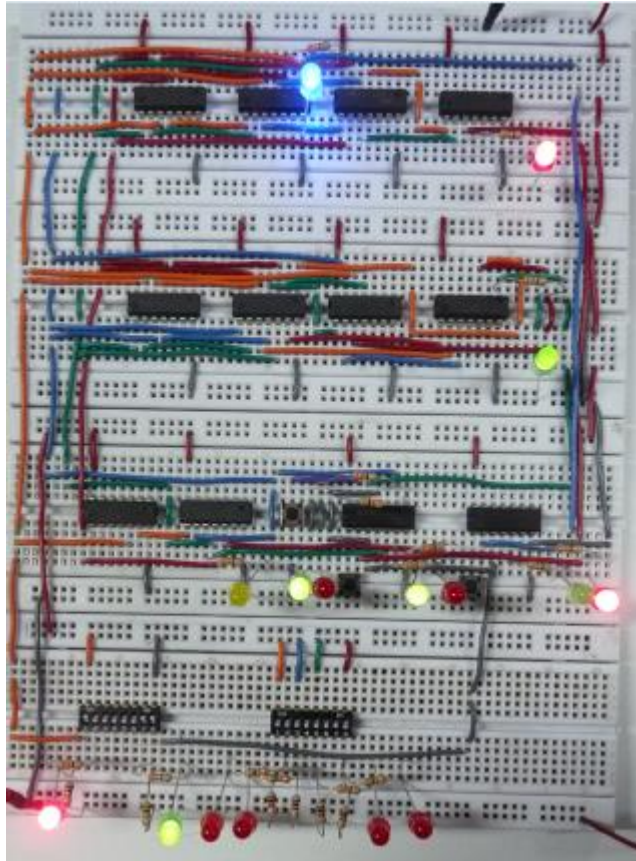


Figura 294. **Circuito detector en el estado 0101|011|X = 0**



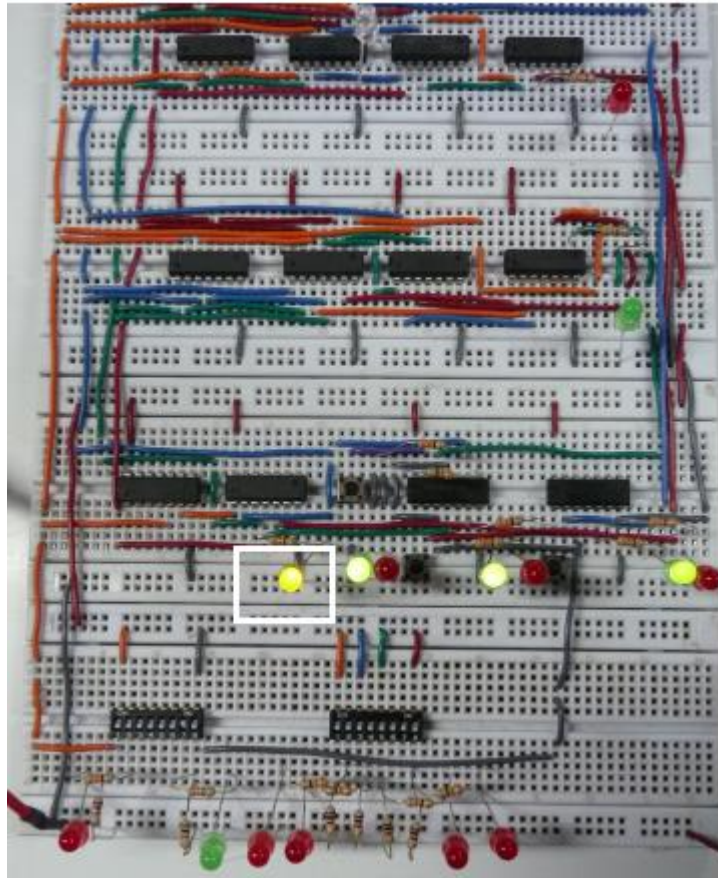
Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

Figura 295. **Circuito detector en el estado 1110|1111|X=0**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

Figura 296. **Circuito detector en el estado 0111|X=1**



Fuente: laboratorio de Física, edificio S-11, Facultad de Ingeniería.

Esta máquina de estados se puede aplicar, por ejemplo, si se necesita detectar una secuencia entre una cadena de bits transmitidos en serie. En este caso, los bits que componen el mensaje se transmiten uno detrás de otro por la misma línea. Datos en paralelo se convierten en datos en serie en el transmisor y pasa lo contrario en el receptor; esto se hace a través de registros de corrimiento.

Un aspecto fundamental de la transmisión serie es el sincronismo; el transmisor y el receptor están sincronizados con el mismo reloj. El receptor recibe continuamente la información a la misma velocidad a la que el transmisor la envía, además se agrega información para evitar errores en la transmisión.

### 11.8. Equipo y materiales para electrónica digital

A continuación se muestran los dispositivos utilizados en los experimentos de electrónica digital.

Tabla XLVIII. **Equipo y materiales para electrónica digital**

Equipo	Dispositivos	Cantidad
Fuente de voltaje directo		2
Generador de señales		1
<i>Protoboard</i>		3
Conector banana-lagarto rojo		2
Conector banana-lagarto negro		2
Alambre para conectar en el <i>protoboard</i>		
		6
		2
	Contador integrado 74LS138	
	Compuestas OR 74LS32	
	Compuertas AND 74LS08	
	Compuestas NAND 74LS00	

Continuación de la tabla XLVIII.

	Compuertas XOR 74LS86	
	Inversores NOT 74LS04	
	<i>Flip-flop D 74LS74</i>	
	<i>Flip-flop JK 74LS73</i>	
	DIP switch	
	Resistores de 330 $\Omega$	
	Resistores de 1 $K\Omega$	

Fuente: elaboración propia.



## CONCLUSIONES

1. El funcionamiento de los dispositivos electrónicos nunca es ideal; su funcionamiento obedece a un comportamiento probabilístico.
2. Realizar los experimentos sugeridos en este documento facilita la comprensión de los conceptos de electrónica en la aplicación de dispositivos y proporciona las bases del diseño de circuitos electrónicos.
3. El uso correcto de los instrumentos de medición es fundamental en el análisis del comportamiento de los dispositivos electrónicos.
4. El análisis de error y la interpretación del resultado de la medición es importante para identificar errores en el funcionamiento de los dispositivos y la calibración de los instrumentos de medición al identificar el tipo de error que se tiene en la medición.





## RECOMENDACIONES

1. Es importante para el diseño de circuitos con funcionamiento parecido al ideal, realizar otros experimentos, además de los incluidos en este trabajo, que ayuden a entender los fenómenos físicos involucrados en el desempeño de los circuitos electrónicos.
2. Antes de realizar cualquier experimento propuesto en este trabajo, leerlo completamente, asegurarse de entender lo que se está haciendo, por qué se está haciendo y lo que se espera obtener.
3. Calibrar el equipo antes de iniciar cada experimento, para disminuir los errores sistemáticos.
4. Utilizar la hoja de datos para verificar los valores de voltaje y corriente máximos que se pueden suministrar a los dispositivos.
5. Verificar las conexiones en los circuitos y los diagramas de pines de los integrados antes de conectar la fuente de voltaje.
6. Documentar ordenadamente los datos obtenidos; esto puede ayudar a identificar algún error durante el desarrollo del experimento.



## BIBLIOGRAFÍA

1. BOYLESTAD, Robert L. *Electrónica: Teoría de circuitos*. 6a ed. México: Prentice Hall Hispanoamérica. 1997. 950 p.
2. \_\_\_\_\_. *Introducción al análisis de circuitos*. 10a ed. México: Pearson Education, 2004. 1234 p.
3. BOSWORTH, EDWARD L. *Design and architecture of digital computers: an introduction* [en línea]. Estados Unidos: EDWARD BOSWORTH. <[http://edwardbosworth.com/My5155Textbook/MyText5155\\_AFrontMatter.htm](http://edwardbosworth.com/My5155Textbook/MyText5155_AFrontMatter.htm)> [Consulta: septiembre de 2012].
4. EnergyLabs Brazil Forum. 2012. *All electronics GR: Shift - register (serial p/ serial)* [video de YouTube]. 00:02:29. <[http://www.youtube.com/watch?v=ip2pCbtbhpc&list=PLQ4bYmp0mquKKuyZikM0dutZ7SC\\_S3LWz&index=3](http://www.youtube.com/watch?v=ip2pCbtbhpc&list=PLQ4bYmp0mquKKuyZikM0dutZ7SC_S3LWz&index=3)>. [Consulta: julio de 2013].
5. \_\_\_\_\_. 2013. *All electronics GR: Aula amplificador operacinal – não inversor* [video de YouTube]. 01:10:21. <<http://www.youtube.com/watch?v=Y553lf7xSek>>. [Consulta: julio de 2013].
6. HIGGINS, Richard J. *Electrónica experimental*. España: Reverté, 1971. 227 p.

7. HOROWITZ, Paul; HILL, Windfield. *The art of electronics*. 2a ed. Massachusetts: Cambridge University Press, 1980, 1989. 1100 p.
8. \_\_\_\_\_. *Student Manual for The art of electronics*. 2a ed. Massachusetts: Cambridge University Press, 1980. 622 p.
9. MALVINO, Albert Paul. *Principios de electrónica*. 6a ed. España: Mcgraw-Hill, 2000. 1126 p.
10. MrElberni. 2012. *Electrónica digital básica* [video de YouTube]. 00:10:55.<[http://www.youtube.com/watch?v=4HdS75MwQbc&list=PL\\_b\\_BMipvTUd9VDw-IQUx9JA7wvhX8f5f](http://www.youtube.com/watch?v=4HdS75MwQbc&list=PL_b_BMipvTUd9VDw-IQUx9JA7wvhX8f5f)>. [Consulta: julio de 2013].
11. \_\_\_\_\_. *Transistor Bipolar 21: Amplificador* [video de YouTube]. 00:11:30. <[http://www.youtube.com/watch?v=cm\\_dTYJxvZg](http://www.youtube.com/watch?v=cm_dTYJxvZg)>. [Consulta: julio de 2013].
12. \_\_\_\_\_. *Transistor FET 1* [video de YouTube]. 00:10:07. <[http://www.youtube.com/watch?v=4HdS75MwQbc&list=PL\\_b\\_BMipvTUd9VDw-IQUx9JA7wvhX8f5f](http://www.youtube.com/watch?v=4HdS75MwQbc&list=PL_b_BMipvTUd9VDw-IQUx9JA7wvhX8f5f)>.[Consulta: julio de 2013].
13. PHLLIPS, W.D. *Design electronics* [en línea]. Inglaterra: DOCTRONICS <<http://www.doctronics.co.uk/scope.htm>>. [Consulta: septiembre de 2012].
14. PRESTON, Daryl W. *The art of experimental physics*. 2a ed. Estados Unidos. John Wiley & Son, 1991. 448 p.