



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

**ESTRUCTURACIÓN VIRTUAL CONSTRUCTIVISTA DE LOS TEMAS AMPLIFICADORES
OPERACIONALES, PUENTES Y METROLOGÍA DEL CURSO INSTRUMENTACIÓN
ELÉCTRICA, DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA, DE LA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**

Leonel Alexander Pérez Monterroso

Asesorado por el Ing. Otto Fernando Andrino González

Guatemala, noviembre de 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTRUCTURACIÓN VIRTUAL CONSTRUCTIVISTA DE LOS TEMAS AMPLIFICADORES
OPERACIONALES, PUENTES Y METROLOGÍA DEL CURSO INSTRUMENTACIÓN
ELÉCTRICA, DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA, DE LA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

LEONEL ALEXANDER PEREZ MONTERROSO
ASESORADO POR EL ING. OTTO FERNANDO ANDRINO GONZALEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRONICO

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Luis Diego Aguilar Ralón
VOCAL V	Br. Christian Daniel Estrada Santizo
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Walter Giovanni Álvarez Marroquín
EXAMINADOR	Ing. Carlos Eduardo Guzmán Salazar
EXAMINADORA	Inga. Ingrid Salomé Rodríguez de Loukota
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

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:

ESTRUCTURACIÓN VIRTUAL CONSTRUCTIVISTA DE LOS TEMAS AMPLIFICADORES OPERACIONALES, PUENTES Y METROLOGÍA DEL CURSO INSTRUMENTACIÓN ELÉCTRICA, DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA, DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha del 23 de Febrero de 2018.

Leonel Alexander Pérez Monterroso

Guatemala 2 de Septiembre 2019

Ingeniero

Otto Fernando Andrino González

Coordinador del Área de Electrotecnia

Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

Facultad de Ingeniería, USAC

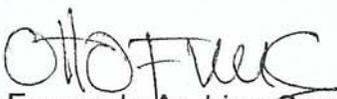
Estimado Ingeniero Andrino:

Me permito dar aprobación al trabajo de graduación titulado "**ESTRUCTURACIÓN VIRTUAL CONSTRUCTIVISTA DE LOS TEMAS AMPLIFICADORES OPERACIONALES, PUENTES Y METROLOGÍA DEL CURSO INSTRUMENTACIÓN ELÉCTRICA, DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA, DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**", del señor Leonel Alexander Pérez Monterroso, por considerar que cumple con los requisitos establecidos.

Por tanto, el autor de este trabajo de graduación y, yo, como su asesor nos hacemos responsables por el contenido y conclusiones del mismo.

Sin otro particular, me es grato saludarle.

Atentamente.


Ing. Otto Fernando Andrino González

Colegiado activo 4038

Asesor

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

REF. EIME 60. 2019.
2 de SEPTIEMBRE 2019.

Señor Director
Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado: **ESTRUCTURACIÓN VIRTUAL CONSTRUCTIVISTA DE LOS TEMAS AMPLIFICADORES OPERACIONALES, PUENTES Y METROLOGÍA DEL CURSO INSTRUMENTACIÓN ELÉCTRICA, DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA, DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA, del estudiante; Leonel Alexander Pérez Monterroso, que cumple con los requisitos establecidos para tal fin.**

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,
ID Y ENSEÑAD A TODOS


Ing. Otto Fernando Andriano González
Coordinador de Electrotécnica





REF. EIME 60. 2019.

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 de el estudiante: **LEONEL ALEXANDER PÉREZ MONTERROSO** Titulado; **ESTRUCTURACIÓN VIRTUAL CONSTRUCTIVISTA DE LOS TEMAS AMPLIFICADORES OPERACIONALES, PUENTES Y METROLOGÍA DEL CURSO INSTRUMENTACIÓN ELÉCTRICA, DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA, DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**, procede a la autorización del mismo.

Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo



GUATEMALA, 30 DE SEPTIEMBRE 2019.



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Decanato

24189102 - 24189103

DTG. 553.2019

La Decana 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: **ESTRUCTURACIÓN VIRTUAL CONSTRUCTIVISTA DE LOS TEMAS AMPLIFICADORES OPERACIONALES, Puentes Y METROLOGÍA DEL CURSO INSTRUMENTACIÓN ELÉCTRICA, DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA, DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA,** presentado por el estudiante universitario: **Leonel Alexander Pérez Monterroso,** y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Inga. Anabela Cordova Estrada

Decana

Guatemala, noviembre de 2019

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por ser siempre mi camino y mi verdad, por darme la fuerza y la voluntad de seguir adelante y colmarme de bendiciones.
- Mis padres** Jenny Cristina y Otto Leonel, por su amor incondicional, por enseñarme lo bueno y lo malo, por toda su comprensión y paciencia, por estar siempre a mi lado.
- Mi hermana** Jenny Walesa Pérez Monterroso, por ser mi mejor amiga, mi confidente, mi apoyo, por su incansable amor para conmigo.
- Mi abuela** Mi mama Miriam, por ser mi más grande luz, por estar conmigo en las dificultades y nunca dejar de creer en mí.
- Mi familia** Por su cariño y sus palabras de aliento y motivación.
- Mis amigos** Por ser mi bendición más grande, Anna García, Werner Solorzano, Jorge López, Fernando Monzón, Alejandro Lemus, Eduardo Florián, Mariano Cap, Carlos Estrada, Emilio Estrada, Víctor Porras, Pamela Sikahall, Eddy Solares,

Pablo Bethancourt, Diego Arias, Oscar Lanfur,
Eric Mendoza, Ángel Martínez, Hugo Borrayo y
todos aquellos que merecen un lugar aquí.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por darme la oportunidad de crecer académicamente y ser profesional, estoy feliz y orgulloso de pertenecer a esta <i>alma máter</i> .
Facultad de Ingeniería	Por brindarme el conocimiento y las habilidades para ser un profesional de la ingeniería.
Departamento de Física	Por darme la oportunidad de formar parte de esa familia, lugar donde conocí a las mejores personas de mi vida.
El ingeniero	Otto Fernando Andrino, por confiar en mis talentos y brindarme la oportunidad de realizar mi trabajo de graduación bajo su tutoría.
La ingeniera	Ingrid de Loukota, por todo su apoyo incondicional, sus valiosos consejos y enseñanzas.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	XV
LISTA DE SÍMBOLOS	XXIII
GLOSARIO	XXV
RESUMEN	XXIX
OBJETIVOS.....	XXXI
INTRODUCCIÓN	XXXIII
1. TEORÍAS CONSTRUCTIVISTAS	1
1.1. ¿Qué es el constructivismo?	2
1.1.1. El desarrollo del constructivismo	3
1.1.2. Principios constructivistas del aprendizaje	4
1.1.3. El aprendizaje autónomo	5
1.1.4. Técnicas de aprendizaje constructivista	7
1.2. Tecnologías de la información y la comunicación (TIC)	9
1.2.1. ¿Qué son las TIC?.....	10
1.2.2. Aplicaciones de las TIC	11
1.2.3. TIC para el aprendizaje constructivista	13
1.3. TIC en la Facultad de Ingeniería	14
1.3.1. Necesidad del aprendizaje constructivista	15
1.3.2. Implementación del modelo constructivista en la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica	16
1.3.3. Características representativas de las TIC en la implementación en la escuela de ingeniería mecánica eléctrica	18

1.3.4.	Estructuración multimedia de las herramientas TIC para el curso de instrumentación eléctrica	20
1.3.5.	Uso del modelo constructivista y herramientas TIC en el desarrollo de los cursos	21
1.3.6.	Software de simulación MultiSim.....	23
1.3.7.	Software de presentaciones Prezi.....	23
1.3.8.	Software de edición de videos Camtasia.....	24
2.	CONCEPTUALIZACION DEL CURSO - AMPLIFICADORES OPERACIONALES, PUENTES DC Y METROLOGIA	25
2.1.	Historia.....	25
2.2.	Conceptos del Amp Op.	26
2.2.1.	Descripción.....	26
2.2.2.	Simbología	26
2.2.3.	Terminales del circuito.....	27
2.2.4.	Esquema del circuito	28
2.2.5.	Conexión física de circuitos del Amp Op.....	30
2.3.	Amplificador operacional ideal y real.....	32
2.4.	Características eléctricas de los amplificadores operacionales.....	34
2.4.1.	Impedancia de entrada.....	36
2.4.2.	Impedancia de salida	36
2.4.3.	Ganancia de tensión	37
2.4.4.	Tensiones de salida	37
2.4.5.	Corrientes de polarización de entrada.....	38
2.4.6.	<i>Offset</i>	39
2.4.7.	<i>Slew rate</i>	39
2.5.	Realimentación	40
2.5.1.	Realimentación positiva	40

2.5.2.	Realimentación negativa	40
2.5.3.	Ganancia en retroalimentación negativa	43
2.5.3.1.	Ganancia a lazo abierto	43
2.5.3.2.	Ganancia a lazo cerrado.....	44
2.6.	Configuraciones básicas.....	44
2.6.1.	Amplificador inversor	45
2.6.2.	Amplificador no inversor	47
2.6.3.	Sumador ponderado en modo inversor	49
2.6.4.	Sumador no inversor	51
2.6.5.	Seguidor de voltaje	51
2.6.6.	Fuente ideal de voltaje.....	54
2.6.7.	Servoamplificadores	55
2.7.	Aplicaciones en instrumentación	55
2.7.1.	Acondicionamiento de señales	55
2.7.1.1.	Formas de acondicionamiento.....	56
2.7.1.2.	Acople de impedancias.....	58
2.7.1.3.	Comparador.....	59
2.7.2.	Convertidores A/D y D/A.....	65
2.7.2.1.	Convertidores de señal	66
2.7.2.1.1.	Muestreo	67
2.7.2.1.2.	Cuantización.....	68
2.7.2.1.3.	Codificación	70
2.7.3.	Amplificador como convertidor.....	71
2.7.4.	Convertidor A/D	72
2.7.5.	Convertidor D/A	75
2.7.6.	Convertidor de corriente a voltaje	77
2.7.7.	Convertidor de voltaje a corriente	78
2.8.	Amplificador diferencial.....	80
2.8.1.	Detectores de cruce por cero.....	81

2.8.2.	Detector de nivel de voltaje	84
2.9.	Amplificadores de instrumentación	85
2.9.1.	Amplificador de instrumentación	85
2.9.2.	Conexiones amplificador de instrumentación	87
2.9.3.	Análisis matemático en un amplificador de instrumentación	88
2.9.4.	Amplificador de señal	92
2.9.4.1.	Amplificador de instrumentación como convertidor de señal	93
2.9.5.	Lazo de corriente estándar	95
2.9.6.	Circuito de protección de entrada.....	97
2.9.7.	Circuito medidor de pH con amplificador de instrumentación	98
2.10.	Filtros activos	99
2.10.1.	Filtro activo pasabajos.....	100
2.10.2.	Filtro activo pasoaltos.....	102
2.10.3.	Filtro activo pasobanda	104
2.11.	Procesamiento de señales	107
2.11.1.	Integrador	108
2.11.2.	Derivador.....	111
2.11.3.	Logarítmicos y antilogarítmicos	114
2.12.	Osciladores	116
2.12.1.	Realimentación positiva	117
2.12.2.	Oscilador de puente de Wien	119
2.12.3.	Oscilador con corrimiento de fase	121
2.12.4.	Oscilador en doble T	122
2.12.5.	Oscilador de onda triangular	124
2.13.	Mediciones con puentes.....	126
2.13.1.	Puente Wheatstone	126

2.13.2.	Puente <i>Kelvin</i>	130
2.13.3.	Puente doble <i>Kelvin</i>	132
2.13.4.	Puente de <i>Wheatstone</i> con protección	135
2.14.	Introducción a la metrología	137
2.14.1.	Metrología eléctrica	138
2.14.2.	Campo de la metrología eléctrica	138
2.14.2.1.	Mediciones de tiempo y frecuencia....	139
2.14.2.2.	Mediciones electromagnéticas.....	139
2.14.3.	Instrumentos de lectura	140
2.14.3.1.	Instrumentos electrométricos.....	140
2.14.3.1.1.	Osciloscopio	141
2.14.3.1.2.	Analizador de espectro.....	143
2.14.3.2.	Galvanómetros	143
2.14.3.2.1.	Amperímetros.....	146
2.14.3.2.2.	Voltímetros	149
2.14.3.2.3.	Óhmetro	152
2.14.3.2.4.	Multímetro.....	154
2.14.4.	Interpretación de mediciones.....	157
2.14.4.1.	Sistema de medición SI para la metrología eléctrica	159
2.14.4.2.	El Amper en el Sistema Internacional (SI).....	159
2.14.4.3.	Estándares de tensión y resistencia en uso de laboratorio	159
3.	EJERCICIOS Y LABORATORIOS VIRTUALES - AMPLIFICADORES OPERACIONALES, PUENTES DC Y METROLOGÍA.....	161
3.1.	Amplificadores operacionales.....	161

3.1.1.	Ejercicios de análisis	161
3.1.1.1.	Problema 1 – Ganancia de voltaje	161
3.1.1.2.	Problema 2 – Voltaje de saturación....	162
3.1.1.3.	Problema 3 – Voltajes de polarización.....	163
3.1.1.4.	Problema 4 – Corrientes de saturación.....	164
3.1.1.5.	Problema 5 – <i>Slew rate</i>	165
3.1.2.	Laboratorios	165
3.1.2.1.	Laboratorio 1 – Voltaje de saturación.	166
3.1.2.1.1.	Objetivos	166
3.1.2.1.2.	Material y equipo	166
3.1.2.1.3.	Instrucciones	166
3.1.2.2.	Laboratorio 2 – Características del amplificador operacional.....	167
3.1.2.2.1.	Objetivos	167
3.1.2.2.2.	Material y equipo	167
3.1.2.2.3.	Instrucciones	167
3.2.	Configuraciones básicas del amplificador operacional.....	168
3.2.1.	Ejercicios de análisis	168
3.2.1.1.	Problema 1 – Amplificador inversor....	168
3.2.1.2.	Problema 2 – Amplificador inversor con ajuste de ganancia variable	170
3.2.1.3.	Problema 3 – Amplificador inversor con tensión de entrada variable	171
3.2.1.4.	Problema 4 – Amplificador no inversor.....	173

3.2.1.5.	Problema 5 – Amplificador no inversor con ajuste de ganancia variable	174
3.2.1.6.	Problema 6 – Amplificador no inversor con tensión de salida variable	175
3.2.1.7.	Problema 7 – Sumador o circuito mezclador	177
3.2.1.8.	Problema 8 – Mezclador de audio	178
3.2.1.9.	Problema 9 – Circuito sumador inversor con ganancia variable	180
3.2.1.10.	Problema 10 – Sumador inversor ponderador	181
3.2.1.11.	Problema 11 – Seguidor de tensión...	183
3.2.1.12.	Problema 12 – Seguidor de tensión como seguidor unitario	185
3.2.1.13.	Problema 13 – Acople de impedancias.....	186
3.2.1.14.	Problema 14 – Diferenciador de señales	188
3.2.2.	Laboratorios virtuales	190
3.2.2.1.	Laboratorio 1 – Amplificador inversor	190
3.2.2.1.1.	Objetivos	190
3.2.2.1.2.	Material y equipo	190
3.2.2.1.3.	Instrucciones	191
3.2.2.2.	Laboratorio 2 – Amplificador inversor con tensión de entrada variable.....	191
3.2.2.2.1.	Objetivos	191

	3.2.2.2.2.	Material y equipo.....	191
	3.2.2.2.3.	Instrucciones.....	192
3.2.2.3.	Laboratorio 3 – Amplificador no inversor.....		192
	3.2.2.3.1.	Objetivos	192
	3.2.2.3.2.	Material y equipo.....	192
	3.2.2.3.3.	Instrucciones.....	193
3.2.2.4.	Laboratorio 4 – Sumador de señales .		193
	3.2.2.4.1.	Objetivos	193
	3.2.2.4.2.	Material y equipo.....	194
	3.2.2.4.3.	Instrucciones.....	194
3.2.2.5.	Laboratorio 5 – Sumador de señales con ganancia variable		195
	3.2.2.5.1.	Objetivos	195
	3.2.2.5.2.	Material y equipo.....	195
	3.2.2.5.3.	Instrucciones.....	196
3.2.2.6.	Laboratorio 6 – Sumador ponderado..		196
	3.2.2.6.1.	Objetivos	196
	3.2.2.6.2.	Material y equipo.....	197
	3.2.2.6.3.	Instrucciones.....	197
3.3.	Aplicaciones en instrumentación para un amplificador operacional.....		198
3.3.1.	Ejercicios de análisis		198
	3.3.1.1.	Problema 1 – Amplificador diferencial.....	198
	3.3.1.2.	Problema 2 – Comparador de ventana.....	201
	3.3.1.3.	Problema 3 – Convertidor análogo a digital.....	203

3.3.1.4.	Problema 4 – Digitalización de señales y tiempo de muestreo	204
3.3.1.5.	Problema 5 – Digitalización de señales y niveles de cuantización.....	205
3.3.1.6.	Problema 6 – Digitalización y resolución	206
3.3.1.7.	Problema 7 – Digitalización, cuantización y resolución de 12 bits ..	207
3.3.1.8.	Problema 8 – Convertidor digital analógico	208
3.3.1.9.	Problema 9 – Convertidor inversor de voltaje a corriente	211
3.3.1.10.	Problema 10 – Convertidor inversor de corriente a voltaje	212
3.3.1.11.	Problema 11 – Convertidor no inversor de voltaje a corriente.....	213
3.3.1.12.	Problema 12 – Salida en modo diferencial	215
3.3.1.13.	Problema 13 – Salida en modo común.....	215
3.3.1.14.	Problema 14 – Amplificador operacional de instrumentación	216
3.3.1.15.	Problema 15 – Amplificador operacional de instrumentación con factor de ganancia menor a la unidad.....	218
3.3.1.16.	Problema 16 – Detector de tensión basado en amplificador de instrumentación	219

3.3.1.17.	Problema 17 – Filtro activo pasabajos	221
3.3.1.18.	Problema 18 – Amplificador operacional en modo integrador	223
3.3.1.19.	Problema 19 – Amplificador operacional en modo derivador	225
3.3.2.	Laboratorios	227
3.3.2.1.	Laboratorio 1 – Comparador de ventana.....	227
3.3.2.1.1.	Objetivos	227
3.3.2.1.2.	Material y equipo	227
3.3.2.1.3.	Instrucciones	228
3.3.2.2.	Laboratorio 2 – Convertidor R2R.....	229
3.3.2.2.1.	Objetivos	229
3.3.2.2.2.	Material y equipo	230
3.3.2.2.3.	Instrucciones	230
3.3.2.3.	Laboratorio 3 – Convertidor de voltaje a corriente	231
3.3.2.3.1.	Objetivos	231
3.3.2.3.2.	Material y equipo	231
3.3.2.3.3.	Instrucciones	231
3.3.2.4.	Laboratorio 4 – Convertidor de corriente a voltaje	232
3.3.2.4.1.	Objetivos	232
3.3.2.4.2.	Material y equipo	233
3.3.2.4.3.	Instrucciones	233
3.3.2.5.	Laboratorio 5 – Amplificador diferencial	234
3.3.2.5.1.	Objetivos	234

	3.3.2.5.2.	Material y equipo	234
	3.3.2.5.3.	Instrucciones	234
3.3.2.6.	Laboratorio 6 – Funcionamiento interno de un amplificador de instrumentación		236
	3.3.2.6.1.	Objetivos	236
	3.3.2.6.2.	Material y equipo	236
	3.3.2.6.3.	Instrucciones	236
3.3.2.7.	Laboratorio 7 – Ganancia variable en un amplificador de instrumentación. ..		237
	3.3.2.7.1.	Objetivos	237
	3.3.2.7.2.	Material y equipo	237
	3.3.2.7.3.	Instrucciones	238
3.3.2.8.	Laboratorio 8 – Aplicación para un amplificador de instrumentación		239
	3.3.2.8.1.	Objetivos	239
	3.3.2.8.2.	Material y equipo	239
	3.3.2.8.3.	Instrucciones	239
3.3.2.9.	Laboratorio 9 – Simulación de osciloscopio		241
	3.3.2.9.1.	Objetivos	241
	3.3.2.9.2.	Material y equipo	241
	3.3.2.9.3.	Instrucciones	242
3.4.	Mediciones con puentes en corriente directa		243
3.4.1.	Ejercicios de análisis		243
	3.4.1.1.	Problema 1 – Puente de <i>Wheatstone</i>	243
	3.4.1.2.	Problema 2 – Puente doble <i>Kelvin</i>	246

3.4.1.3.	Problema 3 – Puente <i>Wheatstone</i> y su calibración	248
3.4.2.	Laboratorios	251
3.4.2.1.	Laboratorio 1 – Puente de <i>Wheatstone</i> con sensor lineal	251
3.4.2.1.1.	Objetivos	251
3.4.2.1.2.	Material y equipo	251
3.4.2.1.3.	Instrucciones	252
3.4.2.2.	Laboratorio 2 – Puente de <i>Wheatstone</i> con sensor exponencial.	253
3.4.2.2.1.	Objetivos	253
3.4.2.2.2.	Material y equipo	253
3.4.2.2.3.	Instrucciones	254
3.4.2.3.	Laboratorio 3 – Puente de <i>Wheatstone</i> con sensor de temperatura positivo	255
3.4.2.3.1.	Objetivos	255
3.4.2.3.2.	Material y equipo	256
3.4.2.3.3.	Instrucciones	256
3.4.2.4.	Laboratorio 4 – Puente de <i>Wheatstone</i> y el porcentaje de error en mediciones	257
3.4.2.4.1.	Objetivos	257
3.4.2.4.2.	Material y equipo	257
3.4.2.4.3.	Instrucciones	258
3.5.	Introducción a la metrología eléctrica	259
3.5.1.	Ejercicios de análisis	259

3.5.1.1.	Problema 1 – Error porcentual en mediciones teóricas y experimentales	259
3.5.1.2.	Problema 2 – Circuito interno de un voltímetro	261
3.5.1.3.	Problema 3 – Circuito interno de un amperímetro	264
3.5.2.	Laboratorios.....	266
3.5.2.1.	Laboratorio 1 – Comparaciones de mediciones teóricas y experimentales	266
3.5.2.1.1.	Objetivos	266
3.5.2.1.2.	Material y equipo	267
3.5.2.1.3.	Instrucciones	267
3.5.2.2.	Laboratorio 2 – Construcción y diseño de un voltímetro	268
3.5.2.2.1.	Objetivos	268
3.5.2.2.2.	Material y equipo	268
3.5.2.2.3.	Instrucciones	268
3.5.2.3.	Laboratorio 3 – Construcción y diseño de un amperímetro	269
3.5.2.3.1.	Objetivos	270
3.5.2.3.2.	Material y equipo	270
3.5.2.3.3.	Instrucciones	270
4.	AUTOEVALUACIONES - AMPLIFICADORES OPERACIONALES, PUENTES DC Y METROLOGIA	273
4.1.	Amplificadores operacionales.....	273
4.1.1.	Pruebas conceptuales	273

4.2.	Configuraciones básicas del amplificador operacional.....	275
4.2.1.	Pruebas conceptuales.....	275
4.2.2.	Pruebas de aplicación.....	277
4.3.	Aplicaciones en instrumentación para un amplificador operacional.....	286
4.3.1.	Pruebas conceptuales.....	286
4.3.2.	Pruebas de aplicación.....	291
4.4.	Mediciones con puentes en corriente directa.....	295
4.4.1.	Pruebas conceptuales.....	295
4.4.2.	Pruebas de aplicación.....	296
4.5.	Introducción a la metrología eléctrica.....	298
4.5.1.	Pruebas conceptuales.....	298
CONCLUSIONES.....		301
RECOMENDACIONES.....		303
BIBLIOGRAFÍA.....		305

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Conceptualización del aprendizaje cognitivo.....	3
2.	Conceptualización del proceso cognitivo	9
3.	Simbología eléctrica para un Amp Op.....	27
4.	Terminales del circuito	28
5.	Esquema de Amplificación	29
6.	Conexiones de un amplificador operacional.....	31
7.	Conexiones de un amplificador operacional.....	31
8.	Características entre un amplificador operacional ideal y real	33
9.	Realimentación negativa	41
10.	Configuración amplificador inversor	45
11.	Configuración amplificador no inversor	47
12.	Configuración amplificador sumador inversor	49
13.	Configuración amplificador seguidor unitario	52
14.	Comparación de señales.....	59
15.	Ruido en señales	60
16.	Respuesta del comparador a una señal de entrada afectada con ruido eléctrico.....	61
17.	Reducción de ruido mediante histéresis.....	62
18.	Configuración de amplificador operacional con reducción de ruido por histéresis.....	63
19.	Configuración comparador tipo ventana.....	64
20.	Conversión de señales.....	66
21.	Muestreo de señales continuas.....	68

22.	Niveles de cuantización $-Q/2$ y $+Q/2$	70
23.	Niveles de cuantización	71
24.	Circuito red en escalera conversor A/D	74
25.	Convertidor D/A circuito red en escalera	76
26.	Señal senoidal obtenida de señal digital	77
27.	Convertidor de corriente a voltaje, circuito básico.....	77
28.	Convertidor de voltaje a corriente, circuito básico	79
29.	Detección por cruce de cero inversor	82
30.	Detección por cruce de cero no inversor	83
31.	Amplificador de instrumentación	86
32.	Amplificador de instrumentación con ganancia.....	87
33.	Convertidor de voltaje a corriente mediante amplificador de instrumentación.....	93
34.	Señal de puente en lazo de corriente de 4 a 20 mA	95
35.	Circuito protector de entrada para amplificador de instrumentación	97
36.	Medidor de pH con amplificador de instrumentación	99
37.	Respuesta del filtro ideal pasobajos	100
38.	Filtro activo pasabajos en modo no inversor y su respuesta en salida	101
39.	Respuesta del filtro ideal pasoaltos	102
40.	Filtro activo pasoaltos en modo no inversor y su respuesta en salida	103
41.	Respuesta del filtro ideal pasobanda	104
42.	Filtro activo pasobanda en modo no inversor	105
43.	Respuesta en salida filtro activo pasobanda.....	106
44.	Integrador basado en amplificador operacional	108
45.	Derivador basado en un amplificador operacional.....	111
46.	Voltaje de entrada y voltaje de salida en un derivador.....	113
47.	Amplificador operacional en modo logarítmico	114

48.	Amplificador operacional en modo antilogarítmico	115
49.	Circuito oscilador y formas de onda en la señal de salida.....	116
50.	Estabilidad de un oscilador	119
51.	Oscilador de puente de Wien	120
52.	Oscilador de corrimiento de fase con retroalimentación positiva	121
53.	Oscilador en doble T basado en amplificador operacional.....	123
54.	Oscilador de onda triangular	124
55.	Tensión de salida en comparador e integrador que funcionan como oscilador de onda triangular	125
56.	Puente Wheatstone.....	127
57.	Puente Kelvin	131
58.	Puente doble Kelvin	134
59.	Puente doble Kelvin de ajuste y calibración con resistor “patrón”	135
60.	Protección en el dispositivo de medición en circuito puente	136
61.	Osciloscopio analógico.....	141
62.	Funcionamiento de un osciloscopio	142
63.	Constitución física de un galvanómetro.....	144
64.	Medición en un galvanómetro	145
65.	Divisor de corriente	146
66.	Amperímetro diseñado con divisor de corriente	147
67.	Medición en serie con el amperímetro	148
68.	Divisor de tensión.....	149
69.	Voltímetro diseñado con divisor de tensión.....	150
70.	Medición en paralelo con voltímetro.....	151
71.	Óhmetro, configuración básica para diseño	152
72.	Óhmetro con selección a media escala.....	153
73.	Presentación de un multímetro digital	155
74.	Perilla seleccionadora para conmutaciones del multímetro.....	156

75.	Diagrama representativo de conmutadores en un multímetro	157
76.	Precisión y exactitud en diferentes análisis	158
77.	Amplificador inversor, problema 1.....	169
78.	Amplificador inversor con ganancia variable, problema 2.....	170
79.	Amplificador inversor con entrada variable, problema 3	172
80.	Amplificador operacional no inversor, problema 4 y 5	173
81.	Amplificador operacional no inversor, problema 6	176
82.	Circuito sumador a partir de un amplificador sumador inversor, problema 7	177
83.	Mezclador de audio, problema 8.....	179
84.	Sumador inversor de ganancia variable.....	180
85.	Circuito sumador ponderado, diseñado a partir de un sumador inversor	182
86.	Seguidor de tensión con entrada negativa, problema 11	184
87.	Seguidor unitario con entrada positiva, problema 12.....	185
88.	Combinación de amplificadores operacionales, problema 13	187
89.	Circuito amplificador de varias etapas, problema 14	189
90.	Amplificador operacional inversor de lazo abierto y lazo cerrado	200
91.	Comparador ventana, problema 1	201
92.	Gráfica de tensión de entrada contra tensión de salida en el comparador ventana del amplificador operacional	203
93.	Convertidor digital analógico, tipo R2R.....	209
94.	Señales binarias de entrada en el convertidor R2R.....	210
95.	Señales binarias y su valor analógico de salida	211
96.	Convertidor de voltaje a corriente	211
97.	Convertidor de corriente a voltaje	213
98.	Convertidor voltaje a corriente, modo no inversor.....	214
99.	Amplificador de instrumentación, problema 14	217
100.	Amplificador de instrumentación problema 15	219

101.	Amplificador operacional como detector de cruce por cero, comparador de ventana	220
102.	Tensión de entrada versus tensión de salida	221
103.	Filtro activo pasabajos.....	222
104.	Circuito integrador con amplificador operacional	224
105.	Circuito derivador con amplificador operacional.....	226
106.	Laboratorio 5, amplificador operacional en modo diferencial	235
107.	Conexiones físicas del amplificador de instrumentación AD620 para el laboratorio 8	240
108.	Diagrama esquemático del laboratorio 8.....	241
109.	Circuito puente de <i>Wheatstone</i> , problema 1	244
110.	Circuito equivalente de <i>Thevenin</i> para el puente <i>Wheatstone</i> DC, problema 1	245
111.	Puente de <i>Wheatstone</i> , problema 3	249
112.	Circuito puente de <i>Wheatstone</i> , laboratorio 1	252
113.	Circuito interno de un voltímetro, problema 2.....	262
114.	Circuito interno de un voltímetro, problema 3.....	264
115.	Circuito de voltímetro con selector de escala	269
116.	Circuito de amperímetro con selector de escala	271
117.	Circuito seguidor de tensión del ejercicio 1	277
118.	Circuito del ejercicio 2	278
119.	Circuito del ejercicio 3	278
120.	Circuito del ejercicio 4	279
121.	Circuito del ejercicio 5	280
122.	Circuito del ejercicio 6	280
123.	Circuito del ejercicio 7	281
124.	Circuito del ejercicio 8	282
125.	Circuito del ejercicio 9	282
126.	Circuito del ejercicio 10	283

127.	Circuito del ejercicio 11	284
128.	Circuito del ejercicio 12	284
129.	Circuito del ejercicio 13	285
130.	Circuito del ejercicio 14	286
131.	Circuito del ejercicio 8	293
132.	Circuito del ejercicio 9	294
133.	Circuito del ejercicio 10	294
134.	Circuito del problema 1	297

TABLAS

I.	Conexiones para retroalimentación negativa	42
II.	Tipo de ancho de banda en el filtro pasobanda mediante el factor de calidad	107
III.	Valores de tensión entrada vs salida en comparador ventana	202
IV.	Valores de la tensión de entrada analógica	207
V.	Tensiones de entrada y su nivel digital asociado	208
VI.	Valores de tensión entrada vs salida en comparador ventana, laboratorio 1 de amplificadores de instrumentación	229
VII.	Señal binaria de entrada y señal analógica de salida	230
VIII.	Rangos de conversión de voltaje a corriente	232
IX.	Rangos de conversión de corriente a voltaje para 10mA	233
X.	Voltajes diferenciales entrada	235
XI.	Ganancia en el amplificador de instrumentación	238
XII.	Desequilibrio y deflexión en el galvanómetro, problema 1	246
XIII.	Valores en un sensor óhmico conectado al puente de Wheatstone ...	250
XIV.	Valores de temperatura, laboratorio 1	253
XV.	Valores de temperatura, laboratorio 2	255
XVI.	Valores de temperatura, laboratorio 3	257

XVII.	Valores de resistencia, laboratorio 1	258
XVIII.	Valores teóricos y experimentales, problema 1	260
XIX.	Valores teóricos, experimentales y errores porcentuales, problema 1	261
XX.	Escalas de tensión para el voltímetro.....	262
XXI.	Escalas de tensión para el voltímetro con su resistencia complementaria o de protección	263
XXII.	Escalas de corriente para el amperímetro.....	265
XXIII.	Escalas de corriente para el amperímetro.....	266
XXIV.	Valores resistivos teóricos y experimentales, laboratorio 1	267

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Amperios, unidad de corriente
mA	Amperios en escala de mili
Amp Op	Amplificador Operacional
Apps	Aplicaciones en inglés
EIME	Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
IC	Integrate Circuit
LTP	Lower Trigger Point
NIP	Número de identificación de parte
TIC	Tecnologías de la información y comunicación
UTP	Upper Trigger Point
V	Voltios, unidades de voltaje
mV	Voltios en escala de mili

GLOSARIO

Acoplamiento	Dispositivo que se utiliza para unir dos circuitos diferentes.
Autodidacta	Persona que se instruye a sí mismo, en una determinada metodología.
Autónomo	Trabajo personalizado, aprendizaje, funcionamiento y administración propia.
Autosuficiente	Que basta de sí mismo para comprender y entender diversidad de temas.
Cognitivo	Pertenece o relativo al conocimiento y al aprendizaje.
Conceptualización	Reducción de un tema a conceptos o representaciones mentales.
Didáctico	Posee la naturaleza fundamental de enseñar o instruir, propósito de enseñanza.
Diferencial	Definición de una cantidad muy pequeña obtenida a partir de una sustracción de otras cantidades.

Ejemplificación	Demostración o ilustración con ejemplos de un tema o concepto particular.
Encapsulado	Cápsula utilizada para sintetizar circuitos integrados complejos con el fin de miniaturizar.
Generador	Dispositivo que produce o genera señales bajo cierta simetría geométrica.
Hardware	Conjunto de aparatos o circuitos que conforman una computadora o minicomputadora.
Impedancia	Relación entre la tensión aplicada y la corriente producida, marcando la oposición eléctrica de un circuito.
Interactivo	Programa que permite la interacción a modo de diálogo entre un dispositivo y el usuario.
Microelectrónica	Diseño de circuitos electrónicos en miniatura, aplicando elementos semiconductores.
Multimedia	Sistema que utiliza de forma conjunta y simultánea, diversidad de medios interactivos para transmitir información.
Parámetros	Datos o factores necesarios para analizar un sistema o determinar valores en una situación, familia de elementos.

Plataforma	Entorno informático determinado, que utiliza sistemas compatibles entre sí.
Polaridad	Propiedad que tienen los agentes físicos de acumularse en los polos de un cuerpo y de organizarse en determinada orientación.
Selectiva	Dispositivo que permite escoger una onda de longitud determinada, sin perturbar la recepción de otras señales.
Servidor	Unidad informática que proporciona diversos servicios a dispositivos conectados consigo mismo en una red.
Software	Conjunto de programas instrucciones y reglas informáticas para ejecutar ciertas tareas en una computadora.
Telecomunicaciones	Sistema de transmisión y recepción a distancia de señales de diversa naturaleza por medios electromagnéticos.
Temática	Ejecuta o dispone según el tema o asunto definido en la materia.
Tensión	Voltaje con que se realiza una transmisión de energía eléctrica.

Terminal	Extremo de un conductor o dispositivo eléctrico dispuesto para facilitar su conexión con otros sistemas eléctricos.
Transistor	Dispositivo semiconductor de varias capas, amplificador de corriente.
Versátil	Capacidad de adaptarse con facilidad y rapidez a diversidad de funciones.

RESUMEN

El presente trabajo desarrolla la propuesta de mejora educativa virtual constructivista que la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica implementa en los temas seleccionados de amplificadores operacionales, configuraciones básicas y aplicaciones en instrumentación, así como mediciones con puentes en corriente directa e introducción a la metrología eléctrica, todos correspondientes al curso de instrumentación eléctrica.

El primer capítulo presenta de forma clara las teorías que conforman las bases del aprendizaje constructivista implementado por la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Facultad de Ingeniería.

El segundo capítulo constituye la recapitulación de los temas seleccionados, se realiza una descripción conceptual a cada concepto analizado, acompañado de las aplicaciones más habituales que se presentan en el desarrollo práctico.

El tercer capítulo está dedicado a la ejemplificación, análisis práctico y material audiovisual de los temas conceptualizados en el capítulo anterior. Se presenta una serie de ejercicios resueltos y laboratorios totalmente elaborados para representar aplicaciones habituales de los circuitos analizados.

En el cuarto capítulo se presentan las autoevaluaciones; dichas pruebas fueron construidas para medir la comprensión obtenida de los temas seleccionados.

OBJETIVOS

General

Estructuración virtual constructivista del curso de instrumentación eléctrica en los temas de amplificadores operacionales, puentes e introducción a la metrología, de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, de la Facultad de Ingeniería, de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Específicos

1. Implementación de las teorías constructivistas para la estructuración virtual del curso de instrumentación eléctrica.
2. Conceptualización de los temas seleccionados de amplificadores operacionales, aplicaciones en instrumentación, mediciones con puentes en corriente directa e introducción a la metrología.
3. Desarrollo de ejercicios metodológicos y aplicados en conjunto en laboratorios virtuales, acerca de los temas seleccionados de amplificadores operacionales, amplificadores de instrumentación, puentes en corriente directa e introducción a la metrología.
4. Desarrollo de autoevaluaciones conceptuales y pruebas de aplicación de los temas seleccionados de amplificadores operacionales, amplificadores de instrumentación, puentes en corriente directa e introducción a la metrología.

INTRODUCCIÓN

Actualmente son muchos los factores que influyen la educación universitaria, lo cual restringe a muchos estudiantes para concluir en ciertos cursos de las redes curriculares de sus carreras. Con base en lo anterior, con el fin de corregir la enseñanza para ellos, se ha creado diversas herramientas a distancia mediante el uso de la tecnología. Se beneficia no solo a los estudiantes sino también a catedráticos, quienes obtienen un punto de partida para mejorar la efectividad de sus estudiantes que aprueban los cursos a su cargo. Estas herramientas conforman una mejora educativa para diversas instituciones que buscan nuevas oportunidades para sus alumnos. Entre dichas instituciones surge la iniciativa de las herramientas TIC en el curso de instrumentación eléctrica de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Facultad de Ingeniería, de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

En busca de renovar la calidad de las redes curriculares de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, surge el punto de inflexión de una educación a distancia. La estructuración virtual constructivista conceptualiza los temas principales del curso de instrumentación eléctrica en contenidos multimedia; es decir, totalmente virtuales, con el fin de darle al estudiante la capacidad de comprender los conceptos más elementales y básicos del curso desde cualquier lugar, con total accesibilidad de llevar sus clases a su propio ritmo.

La estructuración virtual contempla sintetizar los temas con sus respectivas aplicaciones, para mejorar la comprensión de los mismos a una amplia gama de ejercicios resueltos. La ejemplificación de dichos ejercicios permitirá obtener técnicas y herramientas para solucionar diversidad de problemas, y con ello

poder resolver laboratorios virtuales. Esto con el fin de contrastar la teoría con un análisis práctico de carácter virtual. Una vez realizado dicho proceso, el estudiante podrá obtener un censo de su desempeño, mediante autoevaluaciones construidas para medir su aprendizaje.

La Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica centra el diseño y estructuración de sus redes curriculares virtuales en tres fundamentos principales: el primero representa la explicación fundamental del catedrático; la segunda es donde el catedrático aplica todas las explicaciones que ha realizado y, para finalizar, el estudiante aplica los conocimientos adquiridos y tiene la capacidad de explicarlos. Lo mencionado fundamenta la comunicación con los estudiantes, mediante la automatización de los cursos.

Los beneficios de dicha estructuración darán a los estudiantes accesibilidad a los temas seleccionados del curso de instrumentación eléctrica en cualquier instante. Estos se centran en los amplificadores operacionales, sus configuraciones básicas, sus aplicaciones en instrumentación, las mediciones con puentes en corriente directa y, para terminar, una introducción a la metrología eléctrica. Cada tema posee una conceptualización sintetizada en el segundo capítulo y una ejemplificación clara en el tercer capítulo acompañada de los laboratorios virtuales. Para finalizar, se da paso a diversas pruebas de autoevaluación en el último y cuarto capítulo de este trabajo.

1. TEORÍAS CONSTRUCTIVISTAS

Se toma énfasis del siguiente texto, basado en la educación como medio necesario para la libertad: “la educación permite al ser humano conocer distintas realidades, esta entrega las herramientas necesarias para que el hombre se desenvuelva en su vida, siendo capaces de tomar sus propias decisiones, es indispensable una amplia concienciación de las masas que a través de una educación haga posible la autorreflexión sobre su tiempo y su espacio, esto quiere decir que la educación permite que el hombre se cuestione lo que está viviendo y puede realizar cambios y las herramientas adecuadas para el efecto que quiere provocar. En lo descrito, se observa que este enfoque está ligeramente asociado al pensamiento de Jean Piaget, quien propone: “una educación donde se pretenda que el niño forme un desarrollo pleno de la personalidad humana”. La explicación que él da de personalidad está basada en la autonomía, reciprocidad, respeto y compromiso.

Es forjar individuos capaces de autonomía intelectual y moral; que respeten esta autonomía en el prójimo. Se pretende que el conocimiento adquirido por los estudiantes no sea de forma mecanicista, donde se enseñe una cantidad desconsiderada de conocimientos de forma rápida y con poca consistencia. Todo lo contrario a lo anterior, se busca la educación autodidacta, donde los conocimientos, sigan un proceso que permita asimilarlos de una mejor manera, para que los mismos se mantengan frescos por el hecho de haberse construido, por el propio estudiante, y esto a pesar de que probablemente no se dé de una manera tan veloz como lo es en la educación actual, que el niño comprenda y pueda aplicar su conocimiento en forma general, sin importar el contexto.

La educación juega un papel fundamental para los seres humanos, por ello cada cambio que se realiza en el tema, debe ser guiado y adaptado a las necesidades de la sociedad; ya que esto permitiría un desarrollo igualitario y la adquisición de un respeto como sociedad altamente amplia en la educación.

1.1. ¿Qué es el constructivismo?

Se plantea como una técnica pedagógica, que describe un proceso de construcción interno, activo e individual. Los métodos de aprendizaje y toma de conocimiento se basan en procesos donde la nueva información se incorpora a la estructura de pensamiento propia de las personas. Esta información se modifica y reorganiza para obtener una mejor asimilación de lo aprendido. Bajo el estudio y afirmaciones de Piaget, el aprendizaje significa entender y comprender; de esta idea surge una condición importantísima, que el alumno ya debe saber sobre aquello que se le quiere enseñar. Un análisis previo, también conocido como un puente cognitivo, donde el alumno será capaz de establecer relaciones concretas con lo que ya saben y lo que están por adquirir.

Dado el aprendizaje de cada persona, se debe delimitar la relación de transmisión y recepción. Se busca superar el método tradicional de enseñanza y permitir al alumno obtener su propio modelo didáctico que permita a los instructores comprender el punto de partida de los estudiantes.

Con la mención anterior, se afirma que el constructivismo se define como la idea del individuo con respecto a sus experiencias cognitivas y sociales, por lo que no depende del ambiente propio que lo envuelve sino de lo que siente y comprende. Estas disposiciones internas no son más que la construcción propia de lo que se percibe como el conocimiento.

1.1.1. El desarrollo del constructivismo

El aprendizaje de los estudiantes es la influencia del desarrollo cognitivo en los mismos; eso depende de la acción didáctica de los profesores, los cuales forman la enseñanza en sus alumnos. El aprendizaje es la estructuración de ideas y conocimientos que forman el razonamiento de los seres humanos.

Figura 1. **Conceptualización del aprendizaje cognitivo**



Fuente: Blanco, S. (2014). *Teorías constructivistas del aprendizaje*. Recuperado de <http://bibliotecadigital.academia.cl/jspui/bitstream/123456789/2682/1/TPEDIF%2024.pdf>

Esta interacción entre alumnos y profesores sucede bajo el proceso de comunicación a través del lenguaje, una conducción entre hablar y expresar dinámicamente los pensamientos a través de palabras concretas y entendibles. De esta manera se conceptualizan las ideas, las cuales son transmitidas a los estudiantes.

De lo cual surgen ideas que tratan de innovar las técnicas de aprendizaje a medida que pasan los años. Se propone un aprendizaje colectivo, como una nueva estrategia para entender y asimilar los pensamientos entrantes. Esta metodología promueve la interacción social entre compañeros de clase con el fin de facilitar la construcción del razonamiento.

El texto anterior define la evolución del constructivismo como agente fundamental del aprendizaje. Cada etapa define un paso nuevo, en metodología y aplicación de la forma de enseñanza. La nueva era muestra técnicas y herramientas de mucha utilidad para reformar la idea de aprendizaje en los estudiantes; se concreta una educación interna, donde el estudiante es capaz de adquirir conocimientos bajo criterio propio, siempre tomando como referencia el entorno constructivista.

1.1.2. Principios constructivistas del aprendizaje

El aprendizaje implica un método de construcción interno, de autosuficiencia, lo que lo complementa de forma satisfactoria. El estudiante puede obtener una educación tanto subjetiva como objetiva y totalmente personal. Las personas pueden asimilar la información de diferentes formas; dependiendo de su nivel de desarrollo, emocional, social, laboral y cognitivo, y así mismo de la propia naturaleza del conocimiento que adquiere o construye, mediante experiencias previas o recientes que reorganizan su esquema pensante.

Visto desde este punto, el aprendizaje en los estudiantes tiene aspectos importantes, principios fundamentales que establecen la base de una educación constructivista. Se puede resaltar los siguientes principios:

- Autoconocimiento
- Causalidad y motivación
- Metas y restos personales
- Disposición por aprender
- Conciencia sobre éxito y fracaso
- Expectativas

Estos principios conceptualizan un estudio constructivista de la nueva era, donde se dice que el estudiante potencializa sus conocimientos, ideas y pensamientos mediante un estudio propio, autodidacta, autónomo; donde aprende viendo, haciendo y practicando, mediante una constante retroalimentación de lo adquirido, y un fortalecimiento de los datos y teorías que entran a su esquema pensante, para adaptarse a lo que entiende y comprende a medida que estudia cosas nuevas y descubre sus nuevas habilidades cognitivas.

1.1.3. El aprendizaje autónomo

La idea de un estudiante como aprendiz de conocimientos, difiere de cuanto pueda asimilar y su capacidad de aprender por sus propios métodos. El enfoque constructivista de la nueva era permite al alumno establecer y delimitar sus horarios de aprendizaje y las situaciones en las que se desarrolla su aprendizaje cognitivo, estableciendo un horario adecuado. El alumno puede acceder a determinadas herramientas para continuar sus estudios, con la ventaja de acceder desde cualquier lugar en el que se encuentre. Esta es la visión de los educadores de este tiempo, desarrollar un ambiente autodidacta en cada estudiante, capaces de fortalecer sus conocimientos, mediante técnicas y métodos adecuados a sus capacidades y necesidades.

La acción autodidacta en los seres humanos indica la capacidad que se tiene para detectar faltas de conocimiento. Mediante un detallado análisis analítico y crítico de estas bajas que se presentan en el conocimiento cognitivo, que da como resultado la selección adecuada y la toma de decisiones correcta para mejorar estas faltas que concurren en el estudiante. Una persona con mucho interés en el conocimiento e ideas nuevas, se somete a una rigurosa prueba de autoevaluación para cifrar los errores habituales que se presentan en su conocimiento con el fin de eliminarlos. Bajo lo anterior, el estudiante define tiempos adecuados para su aprendizaje, así como los lugares correctos para desarrollar y desempeñar su aprendizaje autónomo.

Es considerada una herramienta docente que se encuentra a disposición de todos los educadores. El aprendizaje autónomo es un proceso constructivista en el que tanto los estudiantes y los profesores alternan o bien se intercambian de papel continuamente.

Los estudiantes construyen su conocimiento a partir de conocimientos previos, mediante un aprendizaje propio; donde aprenden haciendo, para luego complementar estos conocimientos mediante el aprendizaje que el educador les transmite.

Por ello se considera constructivista, un enfoque completamente innovador en la cadena del aprendizaje. De este proceso no solo se beneficia el alumno, sino que el profesorado también posee la oportunidad de renovar su enfoque de enseñanza y plantear nuevos problemas con una reforma diferente, con punto de vista nuevo, lo que también construye su aprendizaje.

1.1.4. Técnicas de aprendizaje constructivista

Al conocer los términos bajo los cuales el enfoque del modelo constructivista se aplica a un aprendizaje autónomo, donde el estudiante aprende haciendo, y determina las formas adecuadas en las que los alumnos son capaces de aprender por su cuenta, aprender bajo sus propios límites. Se enmarca la teoría constructivista en tres eslabones importantes para emplear y hacer uso de un aprendizaje autónomo, autodidacta:

- Transmisión del conocimiento
- Resolución de problemas
- Aplicaciones

Estos tres medios de educación son enfatizados en el aprendizaje antiguo. Esto significa que los mismos métodos de enseñanza son aplicados para este nuevo enfoque constructivista, solo cambia el método de aplicación para los mismos. La transmisión de conocimientos era el trabajo fundamental de un catedrático; este determinaba el contenido, conceptualización y explicación de los temas delimitados para determinado tópico. La explicación con llevaba una serie de procedimientos, procesos y técnicas, todo bajo el punto de vista teórico.

La resolución de problemas es el punto de partida para desarrollar el conocimiento cognitivo. Los estudiantes comienzan a relacionar y enlazar ideas. Todo lo aprendido y obtenido en la teoría y conceptos toma forma mediante una ejemplificación concreta. El catedrático explica y aplica lo que previamente ha definido en un marco teórico adecuado; esto desarrolla un método para el estudiante, lo que fortalece su carácter analítico, el cual le permitirá buscar una aplicación para dicho ejemplo, bajo ciertos conceptos teóricos.

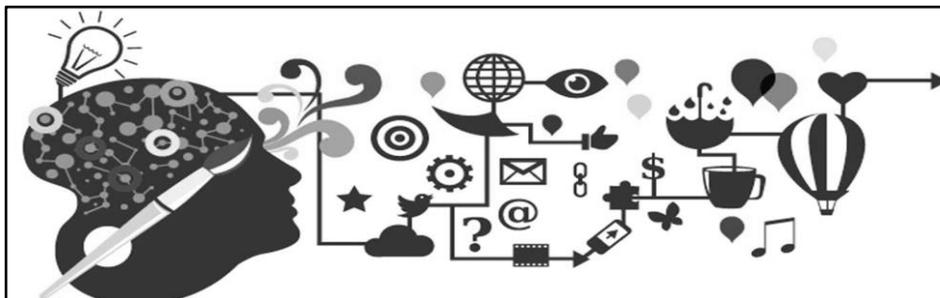
El último medio de este enfoque, es que no hay mejor forma que aprender haciendo. Un estudiante forma su idea completa de un tópico después de entender la teoría que lo envuelve, conocer los conceptos para la resolución de problemas orientados a la conceptualización, y aplicarlos a determinada práctica. Con o sin equipo de trabajo, bajo términos completos, el estudiante aplica y explica lo aprendido; es capaz de materializar lo comprendido. Actualmente esta etapa es fundamental, la aplicación de laboratorios, talleres, etc., orientados a proveer herramientas de trabajo para los alumnos.

Estos eslabones fundamentales constituyen el método de aprendizaje autónomo bajo un modelo constructivista, donde los aprendices construyen su conocimiento bajo sus límites y bajo su contexto.

Esta nueva metodología surge bajo el auge de la nueva era, donde las herramientas para aprender se desarrollan a pasos agigantados, donde los alumnos poseen un nuevo mundo al alcance de sus manos, como lo vimos anteriormente.

El enfoque constructivista se acopla y se establece bajo los avances del nuevo mundo. La educación se adapta y se desarrolla; el aprendizaje se innova, pero para ello es necesario utilizar determinadas herramientas. Es necesario comprender qué herramientas posee este nuevo alcance del aprendizaje constructivista.

Figura 2. **Conceptualización del proceso cognitivo**



Fuente: Blanco, S. (2014). *Teorías constructivistas del aprendizaje*. Recuperado de <http://bibliotecadigital.academia.cl/jspui/bitstream/123456789/2682/1/TPEDIF%2024.pdf>

1.2. **Tecnologías de la información y la comunicación (TIC)**

El aprendizaje no puede existir completamente solo. A través del proceso evolutivo de la educación se han empleado diversos métodos y utilidades para llevar a cabo el proceso de transmisión de información entre educadores y estudiantes.

En cada época se desarrollan nuevas herramientas que están a la disposición de la enseñanza, solo depende saber utilizarlas. Cada avance en la tecnología representa un avance en educación, puesto que ambos se relacionan constantemente. La educación se beneficia de los nuevos utensilios de tecnología, y la tecnología puede continuar su proceso de innovación mediante la enseñanza.

Estas herramientas utilizadas para desenvolver el proceso de comunicación entre catedrático y alumno, se enfocan en su mayor parte en cómo el estudiante asimilará las nuevas herramientas.

El siglo XXI dio paso a una era de computación. Todos los recursos están en nuestras manos, desde computadoras altamente efectivas, dispositivos móviles de alto rendimiento y acceso casi global a internet, desde cualquier punto del planeta. Estas nuevas disposiciones son el punto de partida para una educación sin barreras, donde todos accedan a información educativa en cualquier momento y en cualquier lugar. Estas técnicas y herramientas utilizadas para realizar el proceso de enseñar son de recursos libres, lo que significa que cualquier persona puede hacer uso de ellas, mejorarlas y compartirlas. Se cumple el propósito de la educación de enseñar sin complejidades, educación para todos.

Las tecnologías de la información y comunicación se han convertido en las herramientas pedagógicas de la nueva era. Toda mente pensante da uso de estos medios para compartir el conocimiento; aprovecha y explota al máximo todas las oportunidades que estas les permiten, los recursos de accesibilidad, multimedia y ampliación de la temática. Pero, ¿qué son realmente las tecnologías de la información y la comunicación?

1.2.1. ¿Qué son las TIC?

Son todos aquellos recursos tecnológicos, como la computación, microelectrónica y telecomunicaciones, utilizados para crear e innovar nuevas formas y métodos de comunicación, con el fin de facilitar la emisión, acceso y tratamiento de la información mediante contenido gráfico e interactivo que permita la comprensión de los mismos. Como sabemos, el proceso de comunicación implica la existencia de un emisor y un receptor, los cuales interactúan por medio de un canal, habitualmente la voz, donde establecen una conversación oral que permite transmitir información, conocimiento o bien ideas.

Las TIC usan el mismo método de compartir los datos, pero para su caso particular, lo hacen por medio de un canal completamente digital, hardware y software computacional. Todo esto mediante la red, lo cual nos permite tener acceso desde cualquier punto y en cualquier instante que sea posible para la persona que emplea su aprendizaje autónomo.

1.2.2. Aplicaciones de las TIC

Las tecnologías de la información son parte del día a día laboral, educacional, y complemento fundamental del desarrollo de la sociedad. Las TIC son adaptativas a cualquier necesidad que se demande; si se sabe son altamente excepcionales.

Las TIC destacan en el ámbito educativo como herramienta pedagógica efectiva en su totalidad. Algunas aplicaciones generales de las TIC son:

- Televisión: planificación televisiva, programas educativos, escuela de carácter crítico, contenidos dedicados para diferentes tópicos.
- Telefonía celular: aplicaciones digitales para desarrollar conocimientos mediante juegos, evaluaciones. Las aplicaciones en sistemas operativos de dispositivos móviles son un recurso latente y muy afín para las nuevas generaciones, las cuales tienen una tendencia por conocer y utilizar diferentes apps.
- Multimedia: música, imágenes, y videos; estos son los recursos que conforman esta aplicación de las TIC. Los planes educativos con recursos multimedia proporcionan una vía de innovación para desarrollar conocimiento, imágenes afines con la temática de un determinado curso,

videos complementarios para fortalecer el carácter educativo de los alumnos. Mediante una aplicación visual pueden fortalecer las relaciones con la conceptualización adquirida.

- Internet: el acceso a internet forma parte del día a día, educación, compras, consejos; hasta charlas con profesionales pueden ser desarrolladas mediante internet. Si este recurso es explotado para fines educativos se logrará un sinnúmero de utilidades. Cualquier persona puede acceder a contenido multimedia, recursos literales, mediante un clic, a millones de opciones para obtener lo que buscan, y complementar su proceso educativo autónomo.
- Plataformas interactivas: existen diversos recursos en internet para complementar el proceso educativo de los estudiantes. Hay diversas plataformas interactivas donde los estudiantes pueden acceder y utilizar aplicaciones colocadas en las mismas. Estas aplicaciones permiten realizar diversidad de ejemplos, comparaciones y obtener los resultados esperados para aprender lo necesario, al nivel solicitado. Estas aplicaciones o programas alojados en internet permiten visualizar adyacente a sí mismos, contenido interactivo, para complementar los recursos.
- Blogs: uno de los recursos más explotados de este siglo; un debate digital, donde diversas personas opinan, cuestionan y contestan diferentes interrogantes, propuestas por otros usuarios. Así se construye un largo debate donde todos aportan ideas y aclaran dudas, y se forma un carácter racional y de aprendizaje constructivista.

1.2.3. TIC para el aprendizaje constructivista

Los estudiantes de carácter autónomo necesitan recursos para fortalecer su proceso constructivista. Es allí donde entra en juego el uso de herramientas, entre las cuales cabe destacar y priorizar las TIC. Un aprendizaje autodidacta incita a la búsqueda de nuevas teorías, nuevos ejemplos y nuevas aplicaciones, por lo que el estudiante necesita textos bibliográficos y prácticos para desenvolverse en su aprendizaje.

Las TIC brindan apoyo fundamental para ello. Los estudiantes y alumnos pueden acceder a los recursos y aplicaciones antes mencionadas, para complementarse y desarrollar nuevas ideas.

Un ejemplo concreto es el siguiente: una profesional o estudiante de carrera afín necesita implementar o crear un determinado dispositivo de la ingeniería, por lo cual deberá investigar y aprender cómo desarrollar determinados factores necesarios para llevar a cabo dicho proyecto. El profesional, ahora estudiante, podrá acceder a todos los recursos de las TIC para llevar a cabo su fin. El desarrollo de dicho proyecto le dará nuevas enseñanzas, ideas y, sobre todo, técnicas para desarrollar este tipo de actividades. De ser necesario, podrá hacer consultas con diversas personas que trabajen en dicho ámbito.

Estos y muchos más beneficios proveen las TIC para los estudiantes; sobre todo, la ventaja de la accesibilidad de aprender en cualquier momento, aprendizaje sin fronteras, aprovechar al máximo los materiales y reducir los contras para desarrollar una nueva educación; donde somos capaces de aprender en todo momento, sin complicaciones, y compartir lo desarrollado con las demás sociedades estudiantiles.

1.3. TIC en la Facultad de Ingeniería

En la sociedad actual de Guatemala hay recursos educativos un tanto reservados, donde no se aprovecha al máximo todas las herramientas que se poseen en el entorno educativo.

En educación media de la sociedad se comienza un proceso evolutivo e innovador, donde se aplican los diversos recursos tecnológicos; podemos observar diferentes entidades públicas y privadas que implementan y desarrollan un aprendizaje basado en las TIC. Desde que los estudiantes son muy chicos les proponen la temática de la tecnología, y así estimulan sus ideas para obtener un conocimiento más completo, y desarrollar un aprendizaje más adaptable para nuestra sociedad.

Este recurso de las nuevas tecnologías, poco a poco llega a la educación a nivel superior. Los nuevos profesionales se desarrollan en un entorno competitivo, donde es necesario innovarse día con día, para mejorar el desarrollo sostenible de la sociedad.

Muchas entidades de educación superior se han planteado la meta de mejorar la calidad de estudio de sus diferentes entidades facultativas, para desempeñar mejor su papel como casa de estudios. Diferentes carreras universitarias han implementado laboratorios y talleres, digitales y virtuales, donde sus alumnos pueden tener acceso a sus diferentes cursos en cualquier instante sin perder de vista el desarrollo del contenido. Bajo una iniciativa completamente fundamentada, se busca mejorar la nueva generación de profesionales egresados de dichas casas de estudio.

La Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, en un plan de mejora constante y actualización para docentes y alumnos, se plantea la aplicación de las TIC como fuente fundamental para renovar la didáctica implementada y mejorar la educación de los egresados. Se busca respaldar a los estudiantes con información a su alcance, con accesibilidad para sus estudios, evaluaciones consistentes y concretas que mejoren la calidad de conocimiento que los estudiantes pueden adquirir.

La Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, en búsqueda de mejora educativa, decide evolucionar el contenido de una cantidad de cursos de área profesional. El fin es crear un modelo constructivista para el alumnado, donde se practique el aprender haciendo, con diferentes conceptos, ejemplificaciones claras, laboratorios completos, pero sobre todo con información actualizada y adecuada para el campo afín del estudiante. Como parte de esta iniciativa se busca la digitalización de dichos cursos; todo el contenido bibliográfico se convertirá en material digital, alojado en un determinado servidor o plataforma interactiva donde los estudiantes podrán ingresar, obtener lo que necesitan y utilizar el contenido multimedia que se dedicó para fortalecer las diversas áreas que abarca determinado curso o diversidad de cursos.

1.3.1. Necesidad del aprendizaje constructivista

El entorno educativo de la escuela; la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, se requiere una actualización tanto en sus métodos de enseñanza y aprendizaje. Se busca orientar a los alumnos a una educación autónoma e incentivar una cultura autodidacta, mediante un aprendizaje constructivista. Esto surge de las situaciones que se presentan en la vida cotidiana de los estudiantes y de los educadores.

Se citan diversas situaciones que afectan la enseñanza de los estudiantes. La sociedad tiene problemas con la articulación vial; la vida se alarga. Las cuestiones del tiempo que se pierde para movilizarse de un lugar a otro, se traducen en pérdidas del tiempo efectivo para dar o recibir una clase magistral, por lo que se necesita que los estudiantes puedan obtener la información que se les va impartir antes de recibir su curso. Por ello se plantea un modelo constructivista, para que los estudiantes puedan reforzar sus clases magistrales; mediante el acceso a una plataforma interactiva, donde pueden encontrar toda la conceptualización del curso de forma textual y digital, donde puedan acceder a contenido multimedia, una biblioteca de audio y videos, ver ejemplos y ejercicios resueltos, en cualquier momento, manejar su horario y estudiar al ritmo más adecuado que les parezca. Es una de las ventajas de las TIC, como herramienta de estudio, herramienta de aprendizaje constructivista.

Como parte innovadora del proyecto, los alumnos pueden recibir mensajes y anuncios en tiempo real de parte de sus educadores; así mismo pueden ser evaluados a través de la plataforma multimedia, dando al catedrático el beneficio de mejorar su tiempo y no permitir atrasos para desarrollar su clase magistral.

1.3.2. Implementación del modelo constructivista en la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

Bajo la descripción presentada en los apartados anteriores, surge la iniciativa de mejorar la calidad educativa dentro de la Facultad de Ingeniería, directamente en la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica. La teoría constructivista indica que el estudiante, como entidad propia, puede establecer su método de aprendizaje, bajo sus propios límites y a un ritmo prudente, en el cual puede obtener y retener la mayor cantidad de información.

Basado en ello se han propuesto tres etapas importantes para desarrollar el conocimiento en el estudiantado, son las siguientes:

- Primera etapa: transmisión del conocimiento
- Segunda etapa: resolución de problemas
- Tercera etapa: aplicaciones

A través de estos tres pasos el estudiante puede crear un criterio completo de conocimiento del curso, materia o asignación en donde se encuentra. Una clase magistral habitual debe cumplir con estas tres etapas; el catedrático transmite, el alumno resuelve y aplica. El constructivismo educativo en las clases magistrales de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica se fundamentó en lograr estos tres pasos. El profesor da su cátedra al describir y transmitir toda la conceptualización del curso, para luego realizar ejemplos con resoluciones objetivas sobre los temas que fueron explicados en la cátedra. Luego se presentan las evaluaciones, donde el estudiante pone en práctica todo lo que se resolvió por el profesor y todo aquello que este mismo les ha explicado.

El recurso didáctico será acompañado por material audiovisual de apoyo; esto significa que el alumno revisará su clase magistral y luego podrá obtener un refuerzo de cada clase mediante videos respectivos sobre la teoría y ejemplos de cada tema que fue recibido.

Luego, el profesor podrá ejecutar las evaluaciones correspondientes a la temática vista y asignar las tareas respectivas, como laboratorios prácticos, donde el estudiante pone a prueba sus conocimientos teóricos y obtiene un contraste con el análisis práctico.

De esta manera el alumno es capaz de discernir la diferencia de ambas metodologías, con la ventaja de poder ejecutar todo esto a distancia con las herramientas TIC implementadas por la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la facultad de ingeniería.

1.3.3. Características representativas de las TIC en la implementación en la escuela de ingeniería mecánica eléctrica

Existe diversidad de características de las herramientas tecnológicas educativas. Muchas están basadas en la accesibilidad e interacción que permiten a los estudiantes.

Los catedráticos de la escuela de ingeniería mecánica eléctrica de la universidad de San Carlos de Guatemala pueden aprovechar al máximo de recursos que añade a la educación la aplicación de las TIC. Estas características de las herramientas de la tecnología son:

- **Material abstracto:** las herramientas tecnológicas permiten poseer documentación necesaria, libre de existencia física porque son textos completamente digitales. Esto permite tener una infinidad de apoyo didáctico de forma digital, sin necesidad de poseer una limitada cantidad de libros. Esta característica añade movilidad a la educación, porque puede ser llevada a cualquier parte de la facultad. Los textos pueden ser utilizados en cualquier instante, en cualquier lugar, y por cualquier estudiante.
- **Recursos interactivos:** uno de los factores más importantes que poseen las TIC a nivel educativo es que mejoran la interacción entre el estudiante y la educación. Es posible adaptar cada materia a las necesidades de sus

estudiantes, tanto en recursos económicos, de tiempo y de capacidades cognitivas de aprendizaje, tal y como lo describe el constructivismo; es una educación al ritmo propio de cada alumno.

- **Accesibilidad instantánea:** como fue mencionado, acceder a estos recursos es completamente instantáneo. Un par de segundos es suficiente para que los estudiantes visualicen el recurso didáctico; esta es una de las ventajas por la que el constructivismo se implementa en la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica.
- **Optimización de la materia:** estas herramientas permiten innovación a nivel educativo y social, que la educación sea accesible y esté al alcance de todas las sociedades. Dentro del campus universitario cualquier estudiante de la Facultad de Ingeniería, y específicamente de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica representará el cambio y actualización de las antiguas tecnologías didácticas. De esta manera se espera que todos ellos puedan evolucionar sus técnicas de aprendizaje y generar ideas para seguir mejorando las herramientas TIC.
- **Abundancia de herramientas:** estos recursos representan una alta gama de metodologías de enseñanza y aprendizaje para el estudiantado. Permiten toda clase de ayuda, desde lenguaje multimedia hasta resolución de conflictos prácticos y teóricos. Esto mejora la calidad de estudio para los estudiantes.

1.3.4. Estructuración multimedia de las herramientas TIC para el curso de instrumentación eléctrica

La implementación de estas técnicas constructivistas dentro de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, están concentradas en la educación a distancia, recursos audiovisuales, materiales multimedia para mejorar la enseñanza, teniendo en cuenta las necesidades de los estudiantes y para darles las mismas oportunidades a todos.

El contenido multimedia son videos con audio, que describen los temas correspondientes a amplificadores operacionales, puente DC y metrología del curso de instrumentación eléctrica. En estos videos se abarca la teoría de cada temática con sus respectivos problemas resueltos y laboratorios prácticos para que el estudiante los desarrolle a medida que avanza con el contenido. Se pretende que se realice en paralelo con lo analizado y visto en el curso.

La estructura de estos videos está constituida de la siguiente forma:

- Información general: datos respectivamente colocados, de la institución, asesor del trabajo de graduación, nombre del estudiante y videos, nombre del curso y contenido por desarrollarse.
- Información de tema: datos correspondientes al tema por tratar en ese video, título del contenido, objetivos, desafíos que se han planteado y conclusiones que se espera obtener
- Desarrollo del tema: desarrollo completo del video, toda la teoría de clase magistral, con sus conceptos, ejemplos y problemas resueltos. Se busca

que el alumno complemente sus ideas obtenidas en el curso y de esta manera pueda reducir las dudas que se generan en la cátedra magistral.

- Cierre del tema: se plantea el laboratorio práctico recomendado, para obtener una mayor comprensión del tema. Se comprueban las conclusiones planteadas para verificar que el video contiene el material adecuado para el tema visto.
- Créditos: se hace mención de las personas que participaron en el desarrollo de los videos, títulos, subtítulos, video, edición, diseño de imágenes, entre otros. Al estudiante que realiza el trabajo como autor y productor del material multimedia, en conjunto con el ingeniero asesor del trabajo de graduación.

1.3.5. Uso del modelo constructivista y herramientas TIC en el desarrollo de los cursos

La implementación de las teorías constructivistas en los cursos de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica toma como punto de partida la mejora del aprendizaje para sus alumnos, con base en tres puntos importantes y característicos del modelo constructivista, que son:

- Transmisión de conocimientos
- Resolución de problemas
- Aplicaciones

Estos puntos se logran a través de medios explícitos para mejorar el proceso educativo, donde el estudiante experimenta lo aprendido en sus clases magistrales.

El modelo constructivista hace uso de tres herramientas que son:

- Conceptos en clase o vía virtual
- Ejemplos en clase o vía virtual
- Ejercicios de profundización vía virtual

Luego de que el estudiante ha pasado estas tres etapas, puede ser sometido a un proceso de comprobación o evaluación, donde se busca medir su alcance a partir de lo aprendido en sus clases virtuales. Estas evaluaciones deben ser capaces de censar el alcance bajo, medio o alto del alumno. Se consigue mediante pruebas conceptuales y de aplicación, orientadas a la temática central del curso.

Las evaluaciones pueden realizarse en modo presencial o virtual, no importa el medio. Lo que es objetivo en estas evaluaciones es que el estudiante sea capaz de entender el concepto visto y pueda aplicarlo de forma correcta. Es aquí donde las herramientas TIC desarrollan el papel más fundamental. Las pruebas pueden constituirse por contenido multimedia, basado en software especializado, y procesos completamente virtuales que automatizan el aprendizaje y productividad del alumno.

Si las evaluaciones obtienen resultados esperados, se puede concluir que el objetivo del curso se ha alcanzado. Esta retroalimentación permitirá al catedrático evaluar su desempeño al momento de realizar las clases tanto presenciales como virtuales y qué mejorar de estas.

1.3.6. Software de simulación MultiSim

Es un software de diseño y simulación de circuitos eléctricos. Permite manejar simulaciones de circuitos de potencia, electrónica analógica, electrónica digital y tratamiento de señales. Posee una diversidad amplia de instrumentos y componentes para poder simular en diferentes entornos. En diversidad de cursos de electrónica tiene la función principal de establecer un refuerzo de teoría para estudiantes.

La simulación brinda una incerteza reducida. En tiempo real ejecuta miles de iteraciones para obtener una respuesta y análisis más certero. La implementación de los diseños se basa en los diagramas esquemáticos, permite una mejor comprensión para quien los diseña, como para quien los interpreta.

Se recomienda usar de este software para los laboratorios, debido a su amplia gama de componentes que permite utilizar. Los laboratorios se basan en diagramas muy conceptuales, pero que permiten comprender con mayor facilidad cada tema. La simulación de MultiSim permite mejorar la discrepancia de los errores que se dan tanto en el cálculo teórico como en la práctica real.

1.3.7. Software de presentaciones Prezi

Es un software dedicado a presentaciones, con accesibilidades para explorar y compartir ideas de formas alternativas creativas. Posee características gráficas espaciales bastante diferentes a otro software. Permite relacionar las diferentes diapositivas en forma de zoom, dando la oportunidad al usuario de entender todo el contenido de forma no lineal. Estrecha y relaciona las diferentes diapositivas en un contexto más abierto.

Posee una versión gratuita para estudiantes, con recursos limitados, pero sin perder la amplia utilidad que brinda.

Las conversaciones permiten sincronizar las ideas en el cerebro de todas las personas. Bajo este concepto, Prezi concentra su utilidad en una continuidad no lineal. Al momento de presentar las diapositivas, brinda una mejor interacción con las personas que observan la presentación.

1.3.8. Software de edición de videos Camtasia

Software de edición de videos y grabación de pantalla en computadora. Tiene muchas ventajas sobre otros editores; permite grabar en video la presentación de diversas diapositivas, así como interacción para grabar audio mientras tiene grabación de pantalla.

Adjunto a esas características, permite añadir diversidad de contenido multimedia, imágenes y audio externo. Así mismo, se añaden videos con subtítulos para darle al usuario una mejor experiencia con nuestro proyecto visual en desarrollo.

2. CONCEPTUALIZACION DEL CURSO - AMPLIFICADORES OPERACIONALES, PUENTES DC Y METROLOGIA

2.1. Historia

Los primeros años del amplificador operacional no fueron los de un circuito integrado. Este amplificador operacional era un tubo al vacío. El Sr. George Philbrick, quien trabajaba en los Huntington Engineering Labs y a quien se le atribuye su invención, lo introdujo al mercado en el año 1948. Originalmente, la idea de estos circuitos operacionales, era ser utilizados en computadoras analógicas para cálculos aritméticos y operaciones más avanzadas. Fue la empresa Fairchild la que en los años 1964 y 1967 introdujeron al mercado los conocidos amplificadores operacionales 702, 709 y 741.

Estos circuitos son versátiles, de bajo precio, tamaño diminuto, con excelentes características. Con ello se reduce el diseño de un amplificador a la utilización de unos cuantos resistores. Con el paso de los años y la mejora de la tecnología y de fabricación, los amplificadores operacionales mejoraron considerablemente. Su configuración interna se modifica, reemplazan los transistores bipolares por transistores de efecto de campo JFET. Estos amplificadores, mejorados con tecnología JFET, están a las entradas del amplificador operacional e incrementan la impedancia de entrada del mismo. El amplificador operacional ahora es capaz amplificar señales, las cuales pueden tener la amplitud de la fuente que los alimenta y consumir muy poca corriente de la señal de entrada.

2.2. Conceptos del Amp Op

Se describen los conceptos fundamentales del amplificador operacional; características y funcionamiento básico.

2.2.1. Descripción

Considerado como uno de los dispositivos electrónicos de mayor uso y versatilidad en aplicaciones electrónicas lineales, el amplificador operacional, conocido también como Amp Op (Operational Amplifier), es destacado por su bajo costo y sencillez en la utilidad, con alto campo de aplicación. Permite diseñar y construir circuitos sin necesidad de conocer la complejidad interna del mismo. Con sus características de acoplamiento y autoprotección disminuyen los errores más comunes en circuitos electrónicos.

Conocido como un dispositivo amplificador de modo diferencial, posee cualidades que permiten su uso de forma general en diferentes aplicaciones. Posee alta impedancia de entrada y baja en salida, permite modificar una señal de voltaje tanto en magnitud y polaridad. Está constituido por un circuito interno de amplificación de varias etapas para conseguir la ganancia alta que proporciona a la señal.

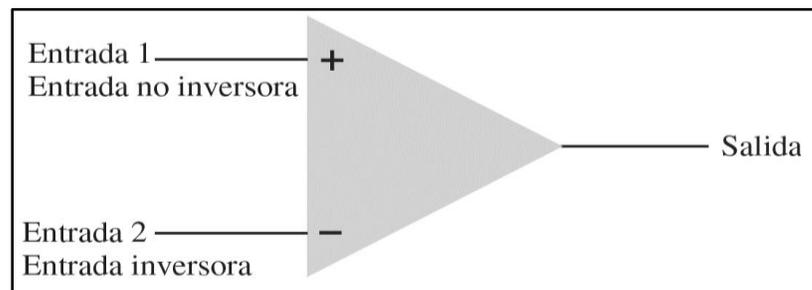
2.2.2. Simbología

La representación gráfica de un Amp Op, figura 3, consiste de un triángulo que apunta en la dirección del flujo de la propia señal de entrada. Estos diagramas poseen un número de serie o identificación, que corresponde a la pieza o chip utilizado. Esta identificación se conoce como NIP (Número de Identificación de Parte).

La leyenda procedente del NIP indica características específicas de cada pieza. Junto a este esquema que representa al Amp Op, puede utilizar un nombre de referencia, como lo es IC (Integrate Circuit).

La descripción del amplificador operacional es acompañada del nombre de cada una de sus terminales respectivas, para identificar sus conexiones tanto esquemáticas como físicas.

Figura 3. **Simbología eléctrica para un Amp Op**



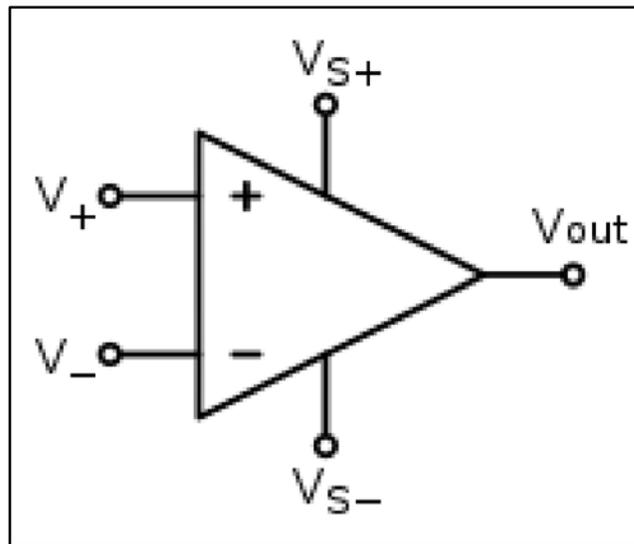
Fuente: Floyd, T. (2008). *Dispositivos Electrónicos*. p.595

2.2.3. **Terminales del circuito**

En la mayoría de circuitos integrados correspondientes a un amplificador operacional, se puede identificar cinco partes importantes y destacadas del dispositivo. Estas partes, conocidas como las terminales del amplificador operacional, son: terminal de entrada inversora, terminal de entrada no inversora, terminal de salida, fuente de alimentación positiva o Vcc, fuente de alimentación negativa o Vee. Estas son las terminales principales y descriptivas para un amplificador operacional, representan a un amplificador operacional de propósito general o bien de condiciones de análisis ideal.

Puesto que existen construcciones diferentes para estos dispositivos, muchos se diseñan con terminales especializadas, destinadas a su uso definitivo o aplicación específica de diseño.

Figura 4. **Terminales del circuito**

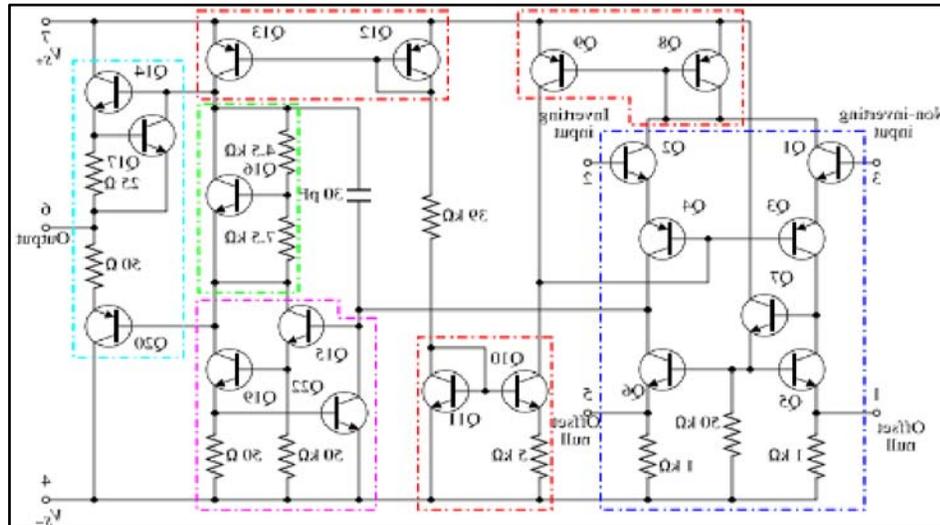


Fuente: Wikipedia. (2014). *Amplificador Operacional*. Recuperado en https://es.wikipedia.org/wiki/Amplificador_operacional#/media/File:Op-amp_symbol.svg.

2.2.4. **Esquema del circuito**

Tal y como se ha definido, el amplificador operacional es un circuito altamente complejo formado por muchos transistores y otros componentes en un solo encapsulado que le da el nombre circuito integrado. El esquema funcional de un amplificador operacional puede tomarse como un circuito de varias etapas, como se ve en la figura 5.

Figura 5. Esquema de Amplificación



Fuente: Wikipedia. (2014). *Amplificador Operacional*. Recuperado en https://es.wikipedia.org/wiki/Amplificador_operacional#/media/File:OpAmpTransistorLevel_Color_ed_Labeled.svg.

La primera etapa amplifica levemente la señal de entrada o la diferencia de las mismas. Esto se suele expresar también como el modo diferencial de las señales, mientras que el *modo común*, rechaza. Posteriormente se observa la segunda etapa, de ganancia intermedia, en la que se amplifica nuevamente el modo diferencial filtrado por la primera. La ganancia total es muy elevada. Y para finalizar, la última etapa no amplifica la tensión, sino que habilita el suministro para corrientes elevadas.

Para que este dispositivo pueda funcionar necesita de una fuente de alimentación que polarice los transistores internos del Amp Op. Habitualmente se emplean dos fuentes de alimentación, una positiva y otra negativa, (V_{cc} & V_{ee}).

De este modo se permite que la salida del dispositivo sea de ambas polaridades. Es evidente que la tensión de salida no puede superar el límite de voltaje de las fuentes de alimentación.

El circuito amplificador operacional está diseñado y construido por componentes, no por dispositivos generadores de señal.

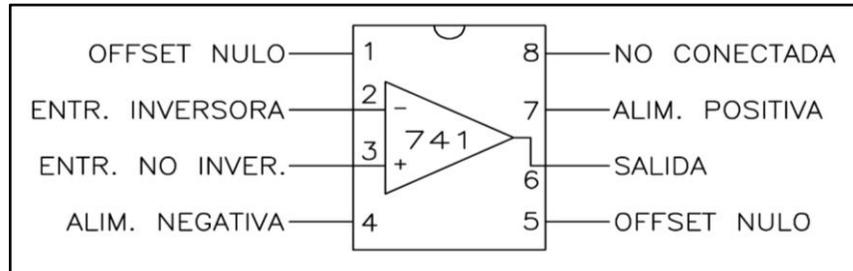
Bajo este modelo esquemático es posible conocer el comportamiento básico de un circuito de amplificación, en el que se utiliza un Amp Op sin tener en cuenta la estructura interna del mismo. Por lo cual, se trata y analiza un dispositivo ideal que permita tener una aproximación del real.

2.2.5. Conexión física de circuitos del Amp Op

El diseño y fabricación de los diversos circuitos amplificadores debe su dependencia a la utilidad con la cual fueron manufacturados; por ello, es habitual encontrar una hoja de datos donde se encuentra el diagrama del circuito amplificador operacional en conjunto con un esquema del encapsulado físico. Esto con el fin de identificar las conexiones físicas que posee el circuito integrado para su utilización.

Para comprender cómo se distribuye y posiciona cada terminal en el dispositivo, se busca un punto de referencia que indica que, a partir de allí, se encuentra el pin número uno del circuito integrado. Como se muestra en la figura 6, cuando se observa desde arriba el circuito, la numeración de los pines se realiza en sentido contrario a las manecillas del reloj.

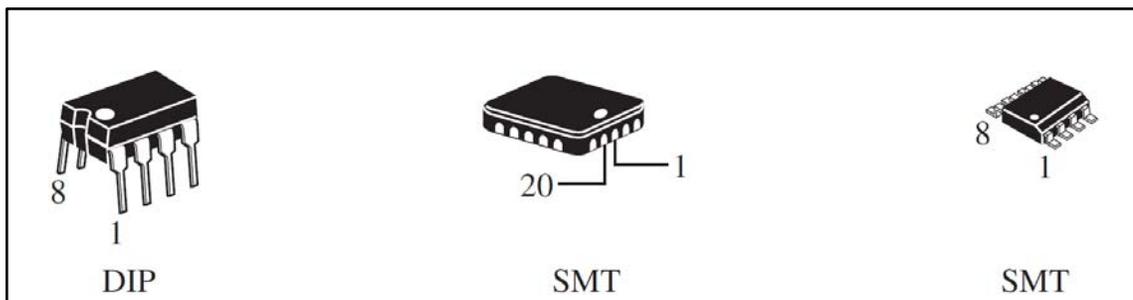
Figura 6. **Conexiones de un amplificador operacional**



Fuente: Martínez, B. (2014). *Amplificadores operacionales*. p2.

Como ya se ha mencionado antes, cada circuito integrado de amplificador operacional contiene una leyenda prescrita en su encapsulado, conocido como el NIP. Este número de identificación de parte, plantea al diseñador de circuitos electrónicos las características de la circuitería que implementara, como el fabricante, el número de la pieza, su límite de temperatura en uso y el tipo de material con el que fue fabricado el encapsulado.

Figura 7. **Conexiones de un amplificador operacional**



Fuente: Floyd, T. (2008). *Dispositivos Electrónicos*. p. 593

2.3. Amplificador operacional ideal y real

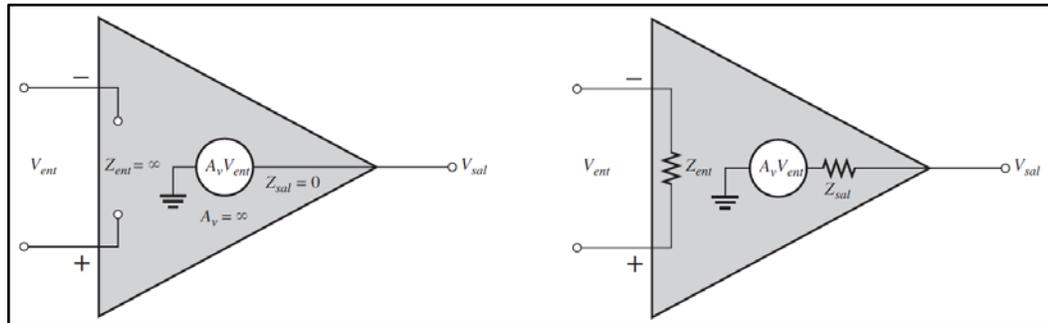
El análisis del funcionamiento de dispositivos electrónicos para determinar su comportamiento bajo condiciones electrónicas de uso considera conceptos importantes que surgen de comparaciones entre modelos reales e ideales, de las cuales se puede obtener aproximaciones de su funcionamiento.

Los modelos reales utilizados con el análisis de los amplificadores operacionales se adecuan a sistemas reales donde se presentan errores o variaciones dependiendo de los elementos que se sometan a las pruebas. Mediante aplicaciones de muestreo estadístico se puede aumentar la factibilidad de funcionamiento de los amplificadores operacionales reales, todo basado de manera práctica; es decir, someterlo a pruebas para determinar los errores de funcionamiento.

Como se ha mencionado, los amplificadores operacionales son elementos de uso común por su versatilidad y alto rendimiento en diferentes aplicaciones, dadas sus condiciones para realizar operaciones matemáticas básicas. Poseen parámetros fundamentales de funcionamiento.

Se presenta una breve descripción de los parámetros en la figura 8. En el caso de los amplificadores ideales, los parámetros se toman de la misma forma, con valores limitados para que obtenga un comportamiento de la misma manera al supuesto, con el fin de obtener un funcionamiento total del circuito.

Figura 8. **Características entre un amplificador operacional ideal y real**



Fuente: Floyd, T. (2008). *Dispositivos Electrónicos*. p.594

Para el caso ideal, la impedancia de entrada del amplificador operacional obtiene un valor que tiende al infinito. La impedancia de salida se toma con un valor que se aproxima a cero. La ganancia para configuración de lazo abierto del amplificador operacional se asume como infinito; asumir estos valores ideales permite despreciar consideraciones por pérdida de parámetros reales del circuito integrado de amplificador operacional. Esto permite una simplificación al análisis diferencial que se presenta en las entradas del amplificador, por lo cual se dice que:

$$(1) \quad V^+ = V^-$$

$$(2) \quad V_{entrada} = V^+ - V^-$$

Existen otras consideraciones que se obtienen del caso ideal, como el acoplamiento de señales, lo que significa que no se toma en cuenta la existencia de corrientes de entrada, dado que la impedancia de entrada del mismo tiende a infinito, y esto permite observar únicamente la respuesta de voltaje; de la misma

manera, si su impedancia de salida obtiene un valor aproximado a cero no se presentará caída de tensión, y dará como resultado una salida sin alteraciones. Esto presenta una de sus aplicaciones más utilizadas, el acople de impedancias.

Todo es contrastado con las características propias de un amplificador operacional real, donde su funcionamiento se ve afectado por cuestiones de diseño y fabricación, donde su funcionamiento se ve limitado por conexiones de alimentación, inestabilidad de la señal eléctrica, su diseño y acoplamiento del encapsulado.

Sus características se modifican según el fabricante. En un conjunto donde no se puede alcanzar las características ideales, es complicado alcanzar un valor infinito de impedancia entrada o un valor aproximado a cero en su salida. Estos son los factores más cruciales que definen a un amplificador operacional real, por lo cual difiere con las propiedades de uno ideal. Cabe mencionar que un amplificador operacional es acoplado directamente.

2.4. Características eléctricas de los amplificadores operacionales

En el apartado anterior se hizo mención de las características eléctricas básicas que posee el amplificador operacional. Estas características tienen dependencia principal de su diseño y manufacturación; es decir, de su fabricación. Dadas ciertas limitantes físicas no se puede obtener un amplificador operacional completamente ideal, por lo cual estos valores difieren demasiado de lo esperado en el análisis ideal.

Las características principales que posee un amplificador operacional son las siguientes:

- Impedancia de entrada
- Impedancia de salida
- Ganancia de tensión
- Tensiones de alimentación
- Tensiones de salida
- Corrientes de polarización de entrada
- Offset
- Slew Rate

El funcionamiento de estas características eléctricas está constituido por escalas. Para entender las mismas, se debe comprender las etapas que posee el amplificador operacional.

La etapa de entrada representa el acoplamiento de la señal donde se presenta alta impedancia de entrada que da como resultado una corriente aproximada de cero. En esta etapa se obtiene ganancia de voltaje para la señal diferencial.

La etapa intermedia o interna se encarga de establecer la señal de salida a un valor de voltaje de referencia; es decir, desplazar la salida a un valor conocido como offset.

De esta manera se obtiene un voltaje óptimo para polarizar la etapa de salida. Una vez la señal diferencial ha sido acondicionada, esta etapa otorga una impedancia de salida muy baja que resulta en una atenuación limitada de la señal, lo cual quiere decir no da pérdidas a la señal.

2.4.1. Impedancia de entrada

Tal y como su nombre lo dice, la impedancia es oposición que se presenta a una señal de entrada o salida. Ambas impedancias son dependientes de la frecuencia de la señal que ingresa o egresa a la circuitería. Para análisis general se consideran puramente resistivas. La impedancia de entrada de un Amp Op es grande comparada con las impedancias de entradas de otros dispositivos electrónicos, donde la aproximación ideal para los mismos se considera infinita y precisa. No actúa como carga y de esta manera no consume corriente.

$$(3) \quad Z_{entrada} = \infty \Omega$$

2.4.2. Impedancia de salida

La impedancia de salida de un Amp Op ideal se asume como muy pequeña, dadas las condiciones de uso se precisa una pérdida casi nula en la señal de salida. Están diseñados para evitar una caída de tensión en la salida, por lo cual se define a dicha impedancia como un valor muy cercano a cero.

No puede descartarse el efecto que producen las diversas configuraciones del amplificador. Para cada aplicación a la cual se dedique el dispositivo será necesario analizar y comprender para cada caso, tiene independencia total de carga, por lo que no existe efecto Joule.

$$(4) \quad Z_{salida} = 0 \Omega$$

2.4.3. Ganancia de tensión

Es la relación de voltaje entre la señal de entrada y la señal de salida. Se le conoce como ganancia en lazo abierto, sin realimentación. Esta característica depende del propio fabricante y no se posee control sobre la misma. La principal aplicación, fuera del análisis matemático para comprender el funcionamiento de un amplificador operacional, es en circuitos comparadores.

$$(5) \quad \text{Ganancia Voltaje} = \frac{\text{Voltaje Salida}}{\text{Voltaje Entrada}}$$

2.4.4. Tensiones de salida

Las terminales de salida de un dispositivo amplificador operacional se conectan directamente al circuito de carga R_L . El circuito de carga se encuentra alimentado por la tensión de salida del amplificador operacional, por lo que se puede medir el nivel de voltaje de salida del Amp Op; al medir el V_{out} a tierra. Los niveles de voltaje y corriente de salida en el amplificador operacional están limitados o controlados por las tensiones de alimentación, V_{cc} y V_{ee} .

La corriente máxima habitual que se determina en un amplificador operacional oscila entre 5 a 15 mA. Estos dispositivos manejan circuitos reguladores de corriente, por lo que la existencia de una sobrecarga no elevará la corriente más allá de lo que permita el amplificador.

Los niveles máximo y mínimo de voltaje de salida en este son conocidos como voltajes de saturación, los cuales dependen directamente de la alimentación provista al circuito integrado. El error conocido de estos es aproximadamente:

$$(6) \quad V_{sat+} = V_{cc} - 1V$$

$$(7) \quad V_{sat-} = V_{ee} + 2V$$

Podemos asumir un voltaje pico-pico, simétrico entre el voltaje de V_{sat+} y V_{sat-} ; esto indica que la impedancia interna del circuito de carga estará determinada por un valor mínimo. Existen dispositivos semiconductores a partir de los cuales se construyen amplificadores operacionales, que permiten obtener voltajes de saturación aproximados a las tensiones de alimentación.

2.4.5. Corrientes de polarización de entrada

Un circuito amplificador operacional permite corrientes muy pequeñas de polarización, esto con el fin de conmutar los transistores que lo componen. Un amplificador operacional es usualmente utilizado para dar ganancia a una señal de voltaje; no necesita de corrientes muy elevadas, por lo que posee una impedancia de entrada muy elevada, ya que esto permite tener un mejor acople con el voltaje de entrada.

Sabiendo que la impedancia de entrada es muy elevada se analiza la corriente de polarización que entra al amplificador operacional. Puesto que la impedancia del Amp Op tiende a infinito, se puede aproximar el valor de la corriente a 0 mA , lo cual no es del todo cierto.

Este es un análisis teórico; sabemos que el valor de la impedancia es muy elevado, pero no lo suficiente para ser infinito, lo cual indica que existe una corriente muy pequeña del orden de μA o bien puede ser del orden de pA . Dada esta condición se puede interpretar que la corriente tiende a cero.

$$(8) \quad I_{entrada} = \lim_{Z_{ent} \rightarrow \infty} \frac{V_{entrada}}{Z_{entrada}}$$

$$(9) \quad I_{entrada} = \frac{V_{entrada}}{\infty} \cong 0 A$$

2.4.6. **Offset**

Mejor conocido como voltaje de desviación en la entrada, esta característica se modela como una fuente de tensión DC en serie con la entrada no inversora del amplificador.

2.4.7. **Slew rate**

La capacidad de un amplificador operacional con respecto al tratamiento de señales variables es la velocidad de cambio conocida como *Slew Rate*. Esta característica indica la velocidad que se presenta en la salida de nuestro amplificador operacional a un cambio considerable en la señal de entrada.

La señal de salida se trata de modificar a una velocidad mucho mayor que la permitida por el dispositivo. Se presentará un recorte o bien distorsión en la salida y perderá la continuidad con respecto a la señal de entrada, lo que podría representar una pérdida de información considerable para el circuito.

Se representa matemáticamente esta capacidad como la razón da cambio de la señal de voltaje de salida con respecto del tiempo, sabiendo que la velocidad no es más que un cambio de señal en un determinado intervalo de tiempo. De esta manera decimos que:

$$(10) \quad Slew Rate = \frac{V_{out}}{\Delta t}$$

2.5. Realimentación

La configuración de realimentación de un circuito amplificador se traduce en una conexión física entre la salida del dispositivo hacia una de las terminales de entrada; es decir, una configuración entre la salida y la entrada inversora o bien entre la salida y la entrada no inversora. Cada conexión produce un efecto eléctrico diferente sobre las señales que entran al circuito, tomando cuenta la disposición de dicha señal de entrada si es un voltaje de corriente continua o corriente alterna.

2.5.1. Realimentación positiva

La conexión de *feedback* se realiza entre la salida y la terminal no inversora. Es un circuito que tiene como característica principal desestabilizar al circuito del amplificador operacional. Hace que el mismo entre en oscilación amortiguada hasta alcanzar la estabilidad de las oscilaciones. La aplicación más generalizada para estos circuitos es un generador, como osciladores.

2.5.2. Realimentación negativa

En este modelo de configuración, el *feedback* se encuentra entre la salida y la terminal inversora, (figura 9). Las aplicaciones más generalizadas para esta configuración son amplificadores de señal, amplificadores diferenciales, filtros activos, etc. Un circuito conectado de esta forma indica que su funcionamiento variará la salida en función de la tensión aplicada a su terminal no inversora, donde el cortocircuito virtual entre sus entradas dará paso a que el voltaje de la

terminal inversora tenga el mismo que el de la terminal no inversora y, por ende, la salida tendrá el mismo valor que estas:

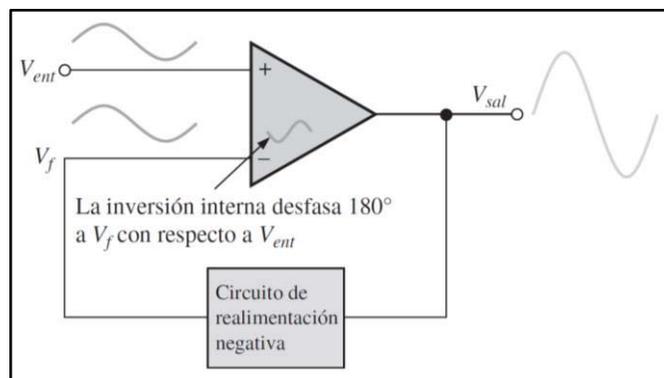
$$(11) \quad V_+ = V_-$$

$$(12) \quad V_- = V_{out}$$

La realimentación negativa permite la estabilidad de los cambios en el funcionamiento del amplificador operacional. Este tipo de realimentación se basa en el control de la señal de entrada; en pocas palabras, es darle información a la entrada sobre lo que sucede en la salida para mantener el sistema en una medición estable.

La retroalimentación negativa surge de la necesidad de controlar el sistema de lazo cerrado para evitar la saturación del amplificador. Al analizar el circuito de la siguiente manera se observa que una señal muy pequeña aplicada a la entrada del amplificador operacional produce un efecto masivo en el dispositivo.

Figura 9. **Realimentación negativa**



Fuente: Floyd, T. (2008). *Dispositivos Electrónicos*. p.602

La realimentación negativa puede conectarse en cuatro configuraciones diferentes; estas dependen de cómo se presentarán las impedancias de entrada y salida en el amplificador operacional. Se puede interconectar la entrada y salida o salida y entrada, así como utilizar en serie o en paralelo, lo que da un total de cuatro posibilidades. Cada una induce un efecto en la impedancia de entrada o de salida del sistema, por lo cual las conexiones en paralelo disminuyen la impedancia y las conexiones en serie, la incrementan.

Una alta impedancia de entrada es necesaria para obtener una transferencia máxima de tensión, mientras que una baja impedancia es mejor para obtener una transferencia máxima de corriente. Una alta impedancia no producirá caída de tensión, mientras que una baja impedancia no reducirá la corriente del circuito. La realimentación negativa permite reducir la distorsión producida en la salida y aumenta considerablemente el ancho de banda, y da como resultado un efecto en las impedancias de entrada y de salida. De esta manera estabiliza las ganancias en lazo abierto y cerrado.

Tabla I. **Conexiones para retroalimentación negativa**

Conexión	Impedancias	Funcionamiento	Relación
Serie-Serie	Alta/Baja	Amplificador de tensión	V_o/V_i
Serie-Paralelo	Alta/Alta	Convertidor de tensión a corriente	I_o/V_i
Paralelo-Serie	Baja/Baja	Convertidor de corriente a tensión	V_o/I_i
Paralelo-Paralelo	Baja/Alta	Amplificador de corriente	I_o/I_i

Fuente: elaboración propia

2.5.3. Ganancia en retroalimentación negativa

El amplificador inyecta una ganancia a la señal que es procesada en sus terminales de entrada. La ganancia de un amplificador operacional es dependiente de las características del mismo. Un Amp Op, tiene una ganancia muy elevada para una señal de entrada muy pequeña, pero hará que la tensión de salida alcance el voltaje más alto posible; es decir, que el dispositivo llegará al nivel de saturación.

Dado esto se puede tener pérdida considerable de información, por lo que es necesario mantener el control de la ganancia mediante un sistema de retroalimentación. La señal de feedback tendrá el control del voltaje diferencial aplicado a las entradas del dispositivo.

2.5.3.1. Ganancia a lazo abierto

El voltaje de salida del amplificador operacional queda definido por el voltaje aplicado a sus terminales de entrada, conocido como voltaje diferencial, multiplicado por la ganancia en lazo abierto del circuito integrado. Esto indica que un circuito en lazo abierto no posee una ruta de retroalimentación, lo que deja la relación directa de voltaje de salida como:

$$(13) \quad V_{salida} = A_{OL} * V_{entrada}$$

Esto significa que el amplificador posee una ganancia muy elevada para el voltaje diferencial aplicado a sus terminales; si este voltaje de entrada es muy pequeño comparable con cero, la ganancia de nuestro amplificador tiende a infinito. Sin embargo, las capacidades del amplificador poseen límites, esto

quiere decir que la ganancia en bucle abierto es finito pero lo suficientemente elevado para una señal de voltaje muy pequeña.

Un circuito conectado en configuración de lazo abierto no limita la ganancia del dispositivo; es decir, este alcanza niveles lo suficientemente altos como para obtener un voltaje de saturación en señales de entrada relativamente pequeña en comparación con la tensión de salida.

2.5.3.2. Ganancia a lazo cerrado

Como se ha visto antes, la retroalimentación negativa en un circuito amplificador se utiliza para controlar de cierto modo la ganancia del dispositivo mediante un arreglo de componentes pasivos para retroalimentar la señal de salida. De esta manera podemos mantener estable la señal de voltaje diferencial aplicado en las terminales de entrada del Amp Op, tal y como funciona un sistema de control de lazo cerrado, hacemos *feedback* de la señal de salida. Para mantener bajo rango la señal de error que entra al controlador, se mantiene el error en su valor más bajo.

De esta manera, los elementos pasivos de la red de feedback manejan de forma precisa la ganancia del circuito y evitan así la saturación del mismo; en la misma forma, se logra obtener un ancho de banda estable.

2.6. Configuraciones básicas

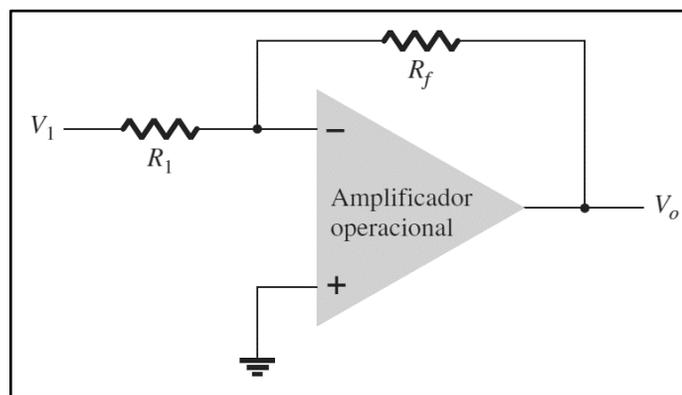
Las diversas aplicaciones electrónicas permiten configurar circuitos en diferentes modalidades. Permiten adaptar las características de los componentes electrónicos para mejorar el desempeño de los dispositivos eléctricos y electrónicos.

El amplificador operacional brinda una diversidad de recursos adaptativos; con base en las características, estas configuraciones se emplean para brindar impedancia o ganancia a los circuitos de carga. Se analiza una diversa gama de conexiones básicas para un circuito de amplificador operacional y su análisis funcional y teórico.

2.6.1. Amplificador inversor

Circuito de amplificación de ganancia constante. La salida del amplificador es el resultado de conmutar el voltaje de entrada con una ganancia fija. Esta ganancia se determina por la configuración de componentes pasivos a los cuales está conectado el amplificador operacional, la resistencia de entrada y la resistencia de retroalimentación que viene desde la salida. La salida de este circuito es la señal de entrada invertida y amplificada en proporción a la ganancia fija del mismo.

Figura 10. Configuración de amplificador inversor



Fuente: Boylestad, R. (2009). *Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos*. p.607

La corriente que viene desde la señal de entrada atraviesa la resistencia de entrada, para luego llegar la entrada inversora del amplificador. Puesto que hay una impedancia muy alta en el amplificador, produce una corriente igual a 0, por lo que la corriente continua atravesando la resistencia de referencia para luego llegar hacia el nodo de salida.

$$(14) \quad I_1 = I_f$$

La corriente que viene desde la señal de entrada será la misma que llega a la salida del amplificador, por lo que se igualan ambas corrientes y obtener la relación de voltajes. Si analizamos nodos para cada corriente que hemos establecido, se destacan dichas relaciones de voltaje, de esta manera:

$$(15) \quad \frac{V_{entrada}}{R_1} = -\frac{V_{salida}}{R_f}$$

Puesto que la ganancia es una relación entre el voltaje de salida sobre el voltaje de entrada, se entiende que la ganancia en una configuración inversora es una relación entre la resistencia de referencia sobre la resistencia de entrada. El sentido de la corriente que va hacia la salida del amplificador es de polaridad contraria a la que produce aparentemente el voltaje de salida del amplificador.

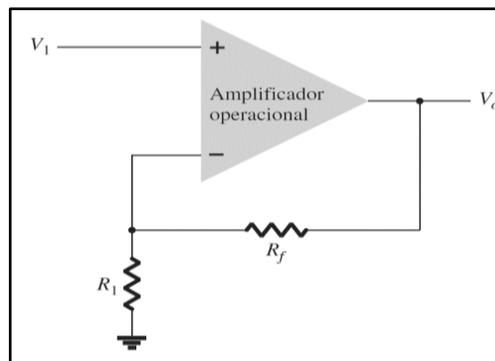
$$(16) \quad \frac{R_f}{R_1} V_{entrada} = -V_{salida}$$

$$(17) \quad V_o = -\frac{R_f}{R_1} V_i$$

2.6.2. Amplificador no inversor

Este modelo de amplificación también posee una ganancia constante. A diferencia del circuito inversor, esta no afecta la polaridad de la señal de entrada, solo suministra una ganancia constante a dicha señal. La señal de entrada se conecta hacia la terminal no inversora, por lo cual la salida no cambia de signo, y en este caso la resistencia de entrada se conecta directamente a tierra.

Figura 11. Configuración de amplificador no inversor



Fuente: Boylestad, R. (2009). *Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos*. p.611

Puesto que la corriente que transita entre las terminales es muy pequeña, se puede considerar que la terminal inversora tendrá el voltaje que se encuentra en la terminal no inversora. Se puede observar que se comporta como un divisor de tensión que alimenta a dicha terminal inversora; entonces el voltaje de salida produce una aparente caída de tensión, la cual tendrá el valor de la fuente de voltaje que se encuentra en la terminal no inversora.

$$(18) \quad I_1 = I_f$$

Si se analiza el sentido de las corrientes, y se determinan los nodos del circuito, para lo cual hallamos la relación de voltajes. La corriente que viene desde la terminal de salida atraviesa la resistencia de referencia hasta llegar a la terminal inversora, donde existirá un voltaje proporcionado por la fuente de tensión que entra al amplificador.

Puesto que la impedancia de entrada del amplificador es lo suficientemente elevada, la corriente no ingresará, sino que continuará hasta atravesar la resistencia que se conecta a tierra.

Para comprender esta configuración como si fuese un divisor de voltaje controlado, es función directa del voltaje de entrada. De esta manera se dice que el divisor de tensión siempre proveerá el valor de la señal de entrada, por lo que la señal de salida se mantendrá en equilibrio.

$$(19) \quad \frac{V_{entrada}}{R_1} = \frac{V_{salida} - V_{entrada}}{R_f}$$

$$(20) \quad \frac{R_f}{R_1} = \frac{V_{salida} - V_{entrada}}{V_{entrada}}$$

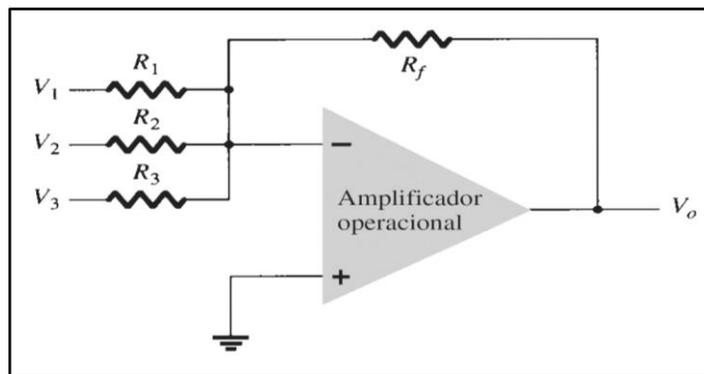
$$(21) \quad \frac{R_f}{R_1} = \frac{V_{salida}}{V_{entrada}} - 1$$

$$(22) \quad V_{salida} = \left(\frac{R_f}{R_1} + 1 \right) V_{entrada}$$

2.6.3. Sumador ponderado en modo inversor

Una aplicación habitual de un circuito inversor es un circuito algebraico de diversas señales de entrada. Cada voltaje de entrada lleva su resistencia respectiva, donde todas las conexiones convergen hacia la terminal inversora en la que se une la resistencia de referencia que viene desde el voltaje de salida.

Figura 12. Configuración amplificador sumador inversor



Fuente: Boylestad, R. (2009). *Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos*. p.612

Dado que del teorema de superposición las corrientes en dicho terminal se sumarán, centraremos el análisis de forma independiente. Para cada ramal de las señales de entrada, planteamos las siguientes expresiones:

$$(23) \quad I_1 = \frac{V_1}{R_1}, \quad I_2 = \frac{V_2}{R_2}, \quad I_3 = \frac{V_3}{R_3}$$

Del análisis de un amplificador configurado en modo inversor, asumimos que las corrientes de entrada conformarán la corriente sobre el resistor de referencia, por lo que:

$$(24) \quad I_1 + I_2 + I_3 = I_f$$

De la misma manera, la propiedad lineal que nos da la ley de ohm para analizar diversidad de circuitos, y una vez aplicado el concepto de superposición, de lo cual tomaremos ciertas condiciones de linealidad, se puede representar la salida total del circuito como la suma de cada una de las señales de entrada con su respectiva ganancia aplicada:

$$(25) \quad V_o = -\frac{R_f}{R_1}V_1, \quad V_o = -\frac{R_f}{R_2}V_2, \quad V_o = -\frac{R_f}{R_3}V_3$$

$$(26) \quad V_o = -\frac{R_f}{R_1}V_1 - \frac{R_f}{R_2}V_2 - \frac{R_f}{R_3}V_3$$

Al simplificar la expresión se obtiene lo siguiente:

$$(27) \quad V_o = -\left(\frac{R_f}{R_1}V_1 + \frac{R_f}{R_2}V_2 + \frac{R_f}{R_3}V_3\right)$$

La característica particular que cada coeficiente de ganancia puede ser modificado de forma independiente; es decir, se puede modificar la ganancia individual de cada señal de entrada. Esta propiedad sucede gracias a la tierra virtual que se obtiene entre sus terminales de entrada. Puesto que se habla de una configuración de amplificador inversor, la suma ponderada de los voltajes de entrada tiene como resultado un cambio de polaridad en la salida es decir un desfase en la señal.

2.6.4. Sumador no inversor

Esta configuración es un sumador, pero la configuración en la que se basa es la de un no inversor. Las señales de entrada se suman con la polaridad con la que se conectan al circuito; es decir, un voltaje negativo en suma con voltajes positivos, pero para obtener la suma de voltajes lo hacemos mediante un circuito ponderador, al igual que un sumador inversor. Este circuito conecta todas las entradas a la terminal no inversora, mientras que desde la terminal inversora existe una conexión de componentes pasivos que conforman la configuración de retroalimentación del circuito.

La característica principal de este circuito se basa en que la resistencia que viene desde la salida hacia la terminal inversora debe tener un valor resistivo adecuado. Dicho valor dependerá de la cantidad de fuentes que estén operando en la entrada de nuestro circuito de amplificación. El valor resistivo será $n - 1$ veces, con respecto a la n cantidad de señales de entrada.

$$(28) \quad E_{entrada} = \frac{E_1 + E_2 \dots + E_n}{n}$$

$$(29) \quad R_f = (n - 1) * R$$

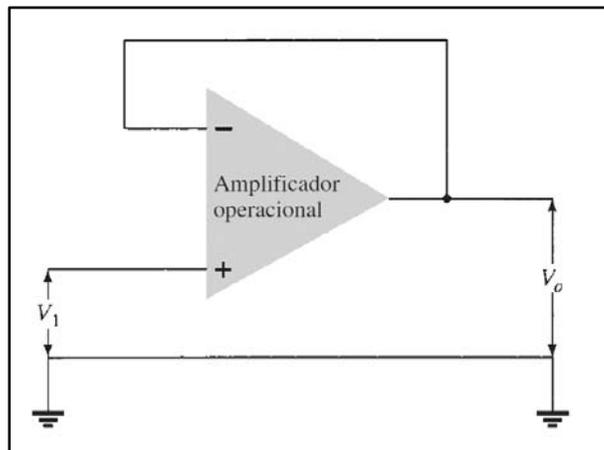
2.6.5. Seguidor de voltaje

Dadas las condiciones de los circuitos para acoplar una fuente de alimentación de alta impedancia a un circuito de baja impedancia, se hace necesario el uso de un componente búfer. Estos no se utilizan en la mayoría de casos para suministrar ganancia al circuito. Su uso principal radica en transformar las impedancias de las interconexiones del circuito.

Dado que la salida tiene *feedback* a la terminal inversora sin componentes pasivos, se dice que posee una retroalimentación negativa del 100 %, lo cual le da estabilidad completa al circuito. Este es una configuración de ganancia finita o ganancia unitaria.

Tienen una implementación bastante práctica y su comprensión matemática es realmente básica; solo se deben recordar bien las características principales que posee un amplificador operacional en esta configuración.

Figura 13. **Configuración amplificador seguidor unitario**



Fuente: Boylestad, R. (2009). *Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos*. p.611

Puesto que la señal de entrada se encuentra en la terminal no inversora, se puede notar que el voltaje de salida no cambiará de signo. Ya que este circuito posee ganancia unitaria, el voltaje de salida seguirá tanto en signo como en magnitud al voltaje de entrada.

$$(30) \quad V_+ = V_{entrada}$$

Dada la particularidad de cortocircuito que se presenta entre las terminales de entrada del amplificador, podemos suponer que ambas terminales poseerán el mismo valor de tensión, por lo que el voltaje de salida se igualará a la tensión de la terminal inversora.

$$(31) \quad V_- = V_+$$

$$(32) \quad V_{salida} = V_-$$

$$(33) \quad V_{salida} = V_{entrada}$$

Podemos asumir el siguiente análisis matemático. Tomemos el modelo de un amplificador operacional configurado como no inversor.

$$(34) \quad V_{salida} = \left(\frac{R_f}{R_1} + 1 \right) V_{entrada}$$

Ahora se analizan las conexiones físicas, conductores, como elementos resistivos. ¿Por qué elementos resistivos? Puesto que la resistencia de los conductores es muy pequeña se considera como si no existiese, pero se modela esa pequeña resistencia como un valor de resistor cualquiera, pero matemáticamente se le asigna una magnitud igual a cero. La resistencia de referencia es un alambre, tendrá resistencia igual a cero, y para este caso la resistencia R_1 no se encuentra conectada; entonces se dice que hay una resistencia a tierra de valor infinito. Nuestra expresión queda planteada de la siguiente forma:

$$(35) \quad V_{salida} = \left(\frac{0}{\infty} + 1\right) V_{entrada} = (0 + 1)V_{entrada}$$

Por lo cual nuestra expresión se reduce a una igualdad, y queda corroborado lo que asumimos en los análisis anteriores.

$$(36) \quad V_{salida} = V_{entrada}$$

2.6.6. Fuente ideal de voltaje

Una fuente de voltaje ideal describe las características de un dispositivo capaz de suministrar alimentación a un circuito electrónico. Un dispositivo ideal proporciona sus capacidades sin sufrir daños o reducciones en el suministro. Los amplificadores operacionales pueden describir las características de una fuente perfecta de voltaje cuando se analizan en el aspecto de frecuencia; es decir, cuando trabajamos con circuitos de filtros activos, al establecer una señal de voltaje en la entrada y la frecuencia en su nivel más bajo, cuando se alcanzan las frecuencias más altas se puede apreciar que la señal de entrada decrece. Por tanto, es necesario controlar la fuente de voltaje de entrada para mantener el nivel de tensión adecuado.

De esta manera se observa que el amplificador de voltaje se comporta como una fuente de voltaje ideal.

La impedancia de entrada del amplificador demanda una corriente muy pequeña como para producir una caída de tensión, por lo que evita que la señal de voltaje se reduzca. De esta manera obtenemos una fuente de tensión ideal.

2.6.7. Servoamplificadores

Un servoamplificador no es más que un amplificador operacional en modo de comparación, utilizado para determinar el error en el circuito interno de un servomotor. Tiene como función principal ser un controlador proporcional. La tensión de salida del amplificador constituye el punto de referencia para determinar la ubicación del motor.

Él realiza una diferencia entre dos tensiones: la señal de control proveniente de una señal de pulso cuadrado y la tensión retroalimentada que viene del motor. Esta tensión de retroalimentación pasa por un divisor de tensión con el fin de reducir los voltajes elevados que vienen del servomotor. Una vez determinado el error, el circuito interno toma decisiones para poder ajustar el dispositivo en la ubicación deseada o necesitada, y luego verificar que el error se haya reducido o en el mejor de los casos, sea cero voltios.

2.7. Aplicaciones en instrumentación

El amplificador operacional toma muchas aplicaciones dadas sus capacidades eléctricas. Sus diversas conexiones mencionadas y analizadas nos permiten aplicarlo al campo de la instrumentación. Podemos manejar y manipular señales muy pequeñas, de pequeña escala; podemos obtener estas señales se acondicionan, se les proporciona ganancia, se convierten y compararlas con otras.

2.7.1. Acondicionamiento de señales

Una señal aplicada a un circuito electrónico posee diversas características que presentan los componentes que conforman dicho circuito.

Acondicionar una señal de entrada a un dispositivo es tarea necesaria para evitar reducir las propiedades de las señales de voltaje. Un dispositivo con baja resistencia producirá una caída de tensión en la señal de entrada, lo cual reduce la potencia de la misma, y eso puede significar pérdida de información considerable para el dispositivo. El acondicionamiento de señales nos permite aumentar la potencia y la intensidad, para evitar la distorsión y atenuación de la señal. Esto se logra al garantizar que la impedancia del sensor que realizará la medición es lo suficientemente alta.

2.7.1.1. Formas de acondicionamiento

Diversas señales de voltaje, provenientes de diferentes sistemas de energía, necesitan prepararse antes de ser manipuladas. Puesto que se presentan señales con niveles muy bajos de tensión, otros dispositivos de censado necesitan linealizarse para ingresarlas al nuevo sistema de tratamiento. Dado esto es necesario tratar y preparar las señales para ser ingresadas al circuito. Los principales fundamentos para acondicionar señales a diferentes circuiterías se basan en las siguientes propiedades:

- **Amplificación:** se puede incrementar el nivel de voltaje para mejorar su adaptación al rango de un convertidor analógico-digital. Con esto se logra incrementar la resolución y sensibilidad, mejora la relación de señal a ruido, para evitar que se vea afectado por el ruido natural. Esto se logra mediante un circuito de amplificación que inyecta una ganancia lo suficientemente elevada para alcanzar un voltaje estándar
- **Atenuación:** existen circuiterías que pueden verse afectadas por señales de voltaje muy elevadas, para tratamiento de las mismas, por lo que salen del rango permisible para ser trabajadas por los circuitos. Para ello, se atenúan

las señales hasta alcanzar un voltaje estándar. Esto se puede lograr mediante la aplicación de una ganancia menor a la unidad; de esta manera se reduce el nivel de tensión.

- **Filtrado:** se conoce que un filtro reduce el ruido no deseado para un determinado rango de frecuencias. Un filtro pasa bajos se emplea para eliminar el ruido producido por la red eléctrica de 60 Hz. Los filtros aliasing en señales de alta frecuencia, o antialiasing para evitar la atenuación por las señales que sobrepasan el criterio de Nyquist. La mayoría de los filtros son dedicados a manejar sonidos y vibraciones no deseadas de las señales.
- **Linealización:** Se hace cuando la señal de entrada no posee linealidad con el sensor que manejan. Se debe acoplar mediante un proceso de software, para evitar muestreo erróneo o interpretación poco confiable de la señal de información y, de esta manera, el circuito pueda funcionar de la manera adecuada. Los amplificadores permiten una linealización mediante la aplicación de un circuito integrador o bien derivativo.
- **Aislamiento:** esto sucede cuando la señal de entrada tiene niveles muy elevados de corriente o tensión. Luego de pasar por un circuito de atenuación, se hace necesario limitar los picos de la señal y así no dañar la circuitería. En conjunto a esto, el aislamiento se utiliza para los circuitos que no poseen conexión a tierra en un mismo plano, así se evita ruido externo y la inestabilidad que podría producir al circuito esta conexión en falso. El aislamiento se ve representado en la mayoría de casos por un acople de impedancias, configurado por una conexión de amplificador operacional.

2.7.1.2. Acople de impedancias

Un acoplamiento permite manejar señales sin pérdidas de información; es decir, caídas de tensión y divisiones de corriente por las ramas del circuito.

El acople de impedancias añade características resistivas a los circuitos para evitar considerables modificaciones en la señal de entrada.

Cuando introducimos un circuito de impedancia a un dispositivo que maneja señales, inyectamos alta impedancia al mismo. Como se mencionó en un apartado anterior, esta reduce la corriente que pasará por el mismo, lo que significa que la señal se convierte únicamente en una señal de tensión, para luego ser procesada en la salida con muy baja impedancia. Permite manejar la señal sin pérdida de tensión y poder filtrarle, o bien proporcionarle ganancia, para que luego en la salida, la señal manipulada desde la entrada se proyecte de forma completa sin pérdidas, ya que el acople le añade una baja resistencia en salida.

Con esto se logra adaptar la impedancia del primer circuito, con el circuito posterior del acople, para lograr una máxima transferencia de potencia. Cabe resaltar que los sistemas que se acoplan mediante este arreglo de impedancias poseen la particularidad de ser lineales, o bien tienen un sistema de linealización.

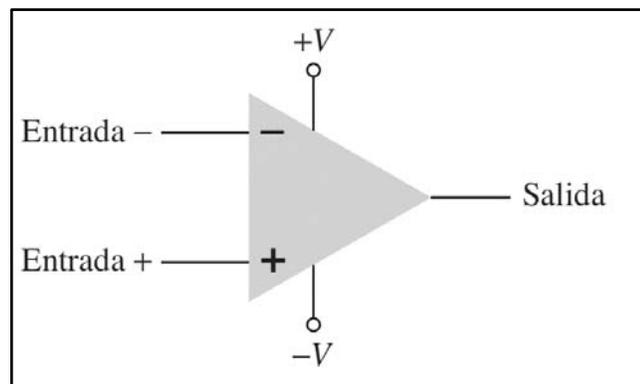
Una adaptación de impedancias surge como solución a una transferencia de energía de un sistema a otro, esto debido a que la transmisión de la señal puede verse afectada por una reflexión o bien absorción de la tensión o corriente que caracteriza a la señal.

2.7.1.3. Comparador

Dadas las necesidades de diversos circuitos, se encuentran diversas aplicaciones para diferentes dispositivos dadas sus capacidades eléctricas. Dadas sus capacidades de funcionamiento, un amplificador operacional puede destacar en ciertas condiciones para determinadas aplicaciones. La propiedad que posee el Amp Op conectado en su modo de ganancia en lazo abierto puede ser utilizada para conmutar un comparador de señales, un amplificador conectado en DC. Aplicar un lazo abierto puede comparar una señal de voltaje de entrada.

Se establece una señal de referencia, el cual es un voltaje que compararemos con su otra terminal; es decir, según el voltaje diferencial aplicado a sus terminales, se obtendrá una respuesta en salida. Esta respuesta solo puede abarcar dos estados, 1 o 0 bajo simbología digital, un estado en alto o un estado en bajo. Cuando la señal que analizamos es mayor o bien menor al valor de referencia obtendremos una salida en estado.

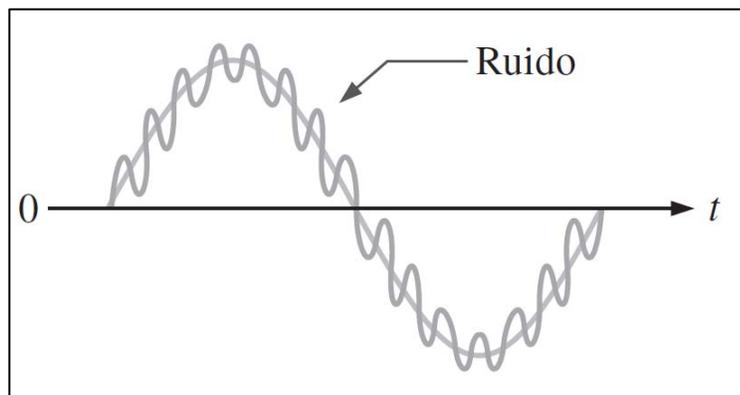
Figura 14. Comparación de señales



Fuente: Boylestad, R. (2009). *Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos*. p.712

En muchos casos, las señales de entrada pueden ser afectadas por señales aleatorias de ruido; estas se superponen a la propia señal y dañan sus características generales. Este principal error en las señales afecta considerablemente la respuesta de un circuito comparador, puesto que la conmutación producida en el amplificador tiende a oscilar en respuesta al ruido que se presenta en la tensión de entrada.

Figura 15. **Ruido en señales**



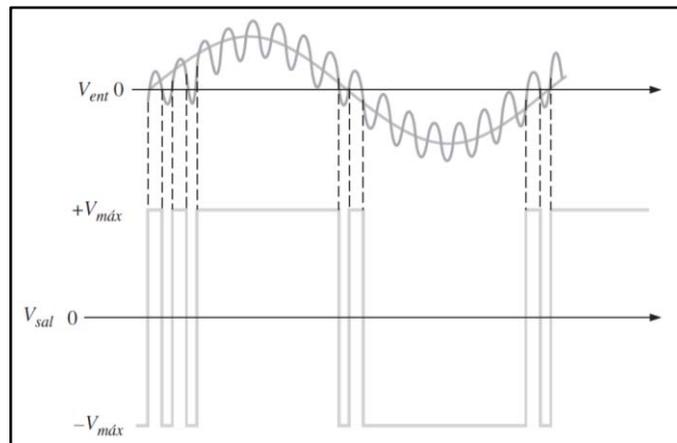
Fuente: Floyd, T. (2008). *Dispositivos Electrónicos*. p.661

Para comprender cómo funciona la configuración de comparador en los amplificadores operacionales, se ilustra una aplicación directa de un comparador: el detector de cruce por cero que se analizará más adelante. Este cruce por cero se utiliza para analizar la señal de entrada y detectar cada vez que la magnitud de la misma atraviese un valor determinado, establecido como 0 voltios. Si la señal de entrada pasa de magnitud positiva a negativa, es definitivo que en determinado instante, alcanzar una magnitud igual a 0, el amplificador detectará dicho cambio.

Por tanto existirá un cambio en la señal de salida. Suponiendo que la señal de entrada se ve afectada por ruido eléctrico, tendremos oscilaciones que afectarán la conmutación del amplificador y producirán cambios considerables en la salida. Se puede decir que veremos una oscilación en el voltaje de salida.

La siguiente imagen describe una señal de entrada afectada por determinado ruido. Podemos observar cómo se comporta la señal de tensión de salida en respuesta a ese ruido inyectado en la señal.

Figura 16. **Respuesta del comparador a una señal de entrada afectada con ruido eléctrico**

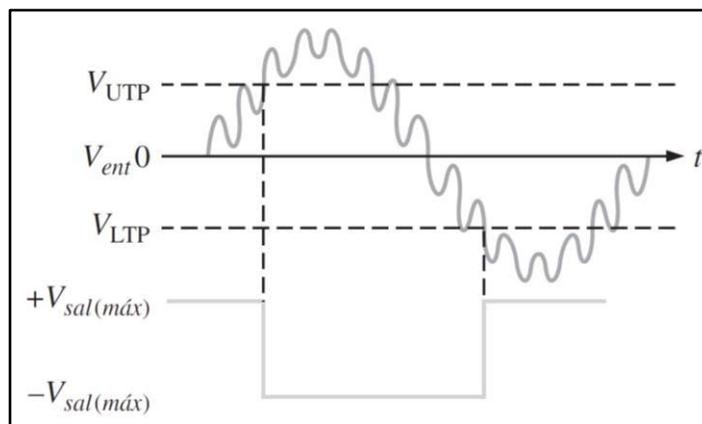


Fuente: Floyd, T. (2008). *Dispositivos Electrónicos*. p.661

Los circuitos comparadores de voltaje se han diseñado para mejorar la conmutación de los mismos y ser inmunes a diversas señales de ruido, mediante mejoramiento de los dispositivos utilizando técnicas como compensación de histéresis, donde se establecen niveles máximos y mínimos de tensión, esto quiere decir que cuando la señal de entrada alcanza el nivel máximo de tensión conocido Upper Trigger Point, <UPT>; el amplificador operacional se dispara

solamente una vez, tomando el valor de tensión de alimentación V_{cc} ; y el caso inverso cuando la señal alcanza el valor mínimo de tensión conocido Lower Trigger Point, <LTP>, el amplificador se vuelve a disparar solamente una vez alcanzado el valor de la tensión de alimentación V_{ee} .

Figura 17. **Reducción de ruido mediante histéresis**



Fuente: Floyd, T. (2008). *Dispositivos Electrónicos*. p.662

A continuación, se presenta un circuito con configuración de comparador, se utiliza el método de histéresis para dar estabilidad en respuesta al amplificador operacional. Al analizar el circuito se establecen los valores de UTP y LTP, para los cuales el circuito empleará el método de reducción de ruido:

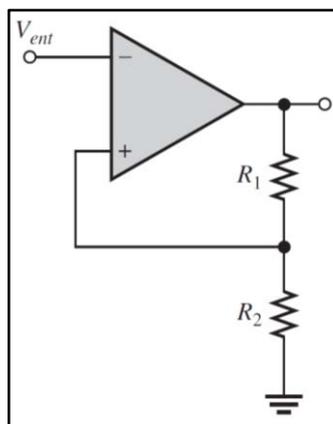
$$(37) \quad V_{UTP} = \frac{R_2}{R_1+R_2} (+V_{salida_{max}})$$

$$(38) \quad V_{LTP} = \frac{R_2}{R_1+R_2} (-V_{salida_{max}})$$

$$(39) \quad V_{HYS} = V_{UTP} - V_{LTP}$$

Se establece un rango de voltaje donde la señal de entrada no produce ningún efecto sobre la tensión de salida. Este rango de voltaje se conoce como voltaje de histéresis:

Figura 18. **Configuración de amplificador operacional con reducción de ruido por histéresis**



Fuente: Floyd, T. (2008). *Dispositivos Electrónicos*. p.662

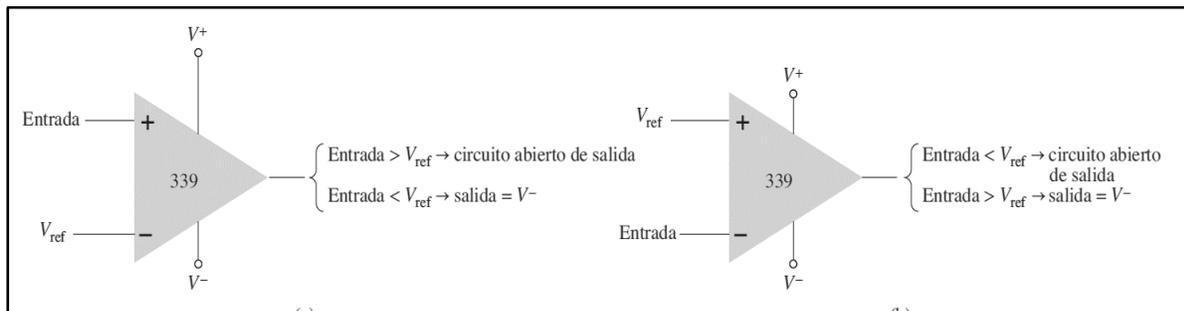
Ya pudimos observar las características de un circuito amplificador operacional configurado como comparador de voltaje, en muchas ocasiones conocidos como comparadores de ventana. Para entender la razón de este nombre, observaremos un poco más a detalle a los circuitos comparadores.

Con el fin de mejorar la conmutación y velocidad de funcionamiento, Slew rate, los circuitos integrados de amplificador operacional han sido diseñados con características especiales para influenciar el rendimiento de los mismos. Muchos de estos trabajan con transistores internos en configuración emisor común, esto con el propósito de permitirle al amplificador operacional actuar con mayor rapidez. El amplificador operacional más común con estas características posee el número de parte 311, y existen variantes del mismo como el 339.

Un circuito comparador de ventana está diseñado para obtener una respuesta en la salida el amplificador bajo dos límites de voltaje; es decir, dos niveles de tensión como referencia. Puesto que hablamos de dos niveles de tensión diferentes y el amplificador operacional solo maneja dos entradas, la referencia y la señal de entrada que compararemos con esa tensión de referencia, nos vemos en la necesidad de ampliar el circuito. Esto se logra mediante la unión de dos comparadores individuales.

Para entender el circuito de comparación de ventana, entenderemos las dos configuraciones principales del mismo.

Figura 19. **Configuración comparador tipo ventana**



Fuente: Boylestad, R. (2009). *Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos*. p.717

Este circuito posee un funcionamiento bastante sencillo de comprender. Se basa en una comparación mutua en dos amplificadores operacionales, donde la salida se verá afectada cuando alguna de las dos comparaciones sea verdadera. Esta configuración tiene dos límites de comparación cuando estos dos valores extremos son sobrepasados, la comparación dará una respuesta en alto.

Posee un valor límite inferior y uno superior. Cuando el valor de la señal de entrada es menor al voltaje de referencia tendrá una salida en alto, y cuando el límite superior es excedido por la señal de entrada, se obtienen nuevamente una salida en alto. Podemos observar que este circuito comparador, nos deja crear una ventana de valores para los cuales el circuito funcionará. Una aplicación útil para un circuito de este tipo es para establecer un límite de presión o bien un límite de temperatura.

2.7.2. Convertidores A/D y D/A

Las diversas aplicaciones de la instrumentación eléctrica y electrónica han evolucionado, aumentando la eficiencia en su funcionamiento. La electrónica digital ha jugado un papel importante en este desarrollo. La digitalización de información permite a los dispositivos mejorar el tratamiento de señales, permite obtener mejores conmutaciones y alto acople entre dispositivos. La era de las señales digitales nos ha permitido obtener características importantes de las señales, por lo que mediante un circuito integrado o bien un microcontrolador y a grandes rasgos una microcomputadora, se nos permite manipular diversidad de señales continuas en el tiempo para amplificarlas, atenuarlas, filtrarlas, compararlas, todo mediante operaciones lógicas y diversos procesos matemáticos.

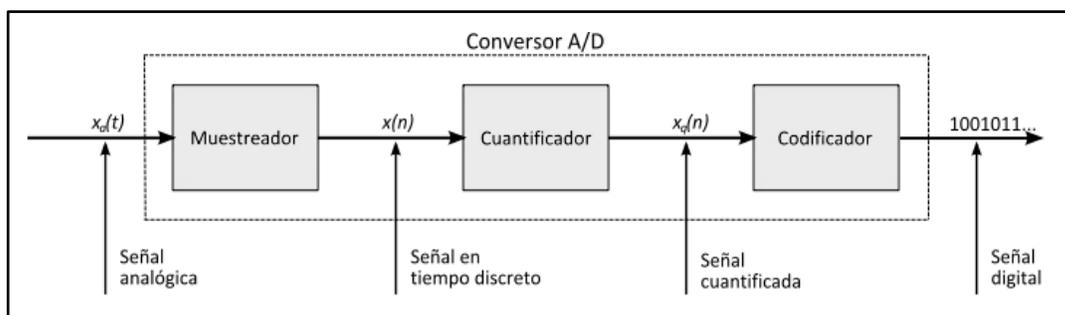
Estos dispositivos toman la señal continua, aplican un proceso de conversión y obtienen una réplica de valores discretos de la señal. Cada una de estas magnitudes discretas compone la aparente copia digital de la señal de entrada. A estos dispositivos les llamamos convertidores analógico-digitales. Así mismo, otros dispositivos realizan el proceso inverso al que describimos antes, a estos les llamamos convertidores digital-analógicos.

2.7.2.1. Convertidores de señal

Los dispositivos actuales son más digitales con el paso del tiempo, esto debido a que es más conveniente trabajar y procesar una señal digital para un circuito integrado, dado que se manipulan valores discretos, lo cual es más eficiente de entender para las microcomputadoras. Los sensores están acondicionados para proporcionar una medición analógica de la magnitud física que miden. Por ejemplo, un sensor de temperatura otorga una señal continua en el tiempo; cuando la temperatura aumenta, la señal analógica de salida aumenta y por ende, cuando la temperatura disminuye, la salida lo hace de forma proporcional. Estas señales que entregan los sensores se digitalizan para luego ser procesadas. Cuando han sido modificadas y han cumplido con su propósito, son reconvertidas a una señal continua.

¿Cómo se digitaliza una señal continua? El proceso de conversión de una señal analógica a una señal digital cumple tres pasos importantes que son: muestreo, cuantización y codificación.

Figura 20. Conversión de señales



Fuente: Wikipedia. (2018). *Cuantificación digital*. Recuperado en https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Convertor_AD.svg

2.7.2.1.1. Muestreo

Proceso mediante el cual se toman diversas muestras de la señal continúa en el tiempo. Son tomadas en un determinado intervalo de tiempo, el cual es un valor muy pequeño, dada la frecuencia de la señal de entrada que se está digitalizando. Es decir, el tiempo de muestreo para una señal es función de la frecuencia propia de la señal que se observa.

A esta frecuencia de muestreo o tiempo de muestreo le llamamos criterio de Nyquist, el cual indica que para cualquier señal continua en el tiempo con determinada frecuencia propia que se desea muestrear, se debe establecer una frecuencia de muestreo superior a esta frecuencia que posee la señal.

El criterio indica que el valor de dicha frecuencia de muestreo debe ser aproximadamente:

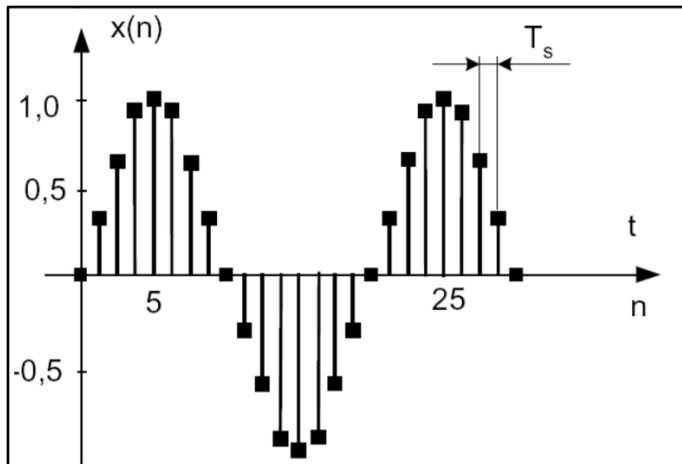
$$(40) \quad f_{muestreo} \geq 2 * f_{señal\ muestreada}$$

El tiempo de muestreo se deduce de la siguiente manera:

$$(41) \quad T_{muestreo} = \frac{1}{f_{muestreo}}$$

Con esto se optimizan los valores de las muestras que se toman, con el fin de cuantificar dichos valores y evitar pérdidas de información. En términos muy generales se dice que se analiza la señal mucho más rápido de lo que se recrea.

Figura 21. **Muestreo de señales continuas**



Fuente: Ramírez, L. (2012). *Convertidores digital-analógico y analógico-digital*. Recuperado en <http://www.utm.mx/~hugo/metrologia/Metro9.pdf>

2.7.2.1.2. **Cuantización**

El siguiente paso de la digitalización de una señal, consiste en asignar determinados valores de voltaje de referencia a cada muestra. ¿Por qué un voltaje de referencia? Porque un circuito digital o bien una microcomputadora solo es capaz de leer determinados valores de voltaje, entre los cuales no puede interpretar un voltaje negativo; por lo tanto, se aconseja añadir un determinado valor de componente DC a la señal alterna. Una vez la señal ha sido elevada a un nivel DC, donde no hay componente de tensión negativos, y ya se encuentra en el proceso de muestreo, prosigue asignar determinados valores de tensión bajo los niveles apropiados para el dispositivo convertidor. Los niveles de tensión que se pueden asignar a los valores discretos de la señal son dependientes de la resolución.

La resolución es la escala más pequeña sensible para el dispositivo convertidor. La resolución de los dispositivos depende de su fabricación o bien de la configuración que se le programa. Para determinar la cantidad de niveles que se obtienen con base en la resolución del dispositivo se debe:

$$(42) \quad \text{Niveles de Cuantización} = 2^{\# \text{ bits}}$$

Podemos observar que los niveles de cuantización dependen de la capacidad en bits que el microcontrolador es capaz de digitalizar. Suponiendo el caso donde se tienen 8 bits.

$$(43) \quad \text{Niveles de Cuantización} = 2^8 - 1 = 256 \text{ niveles}$$

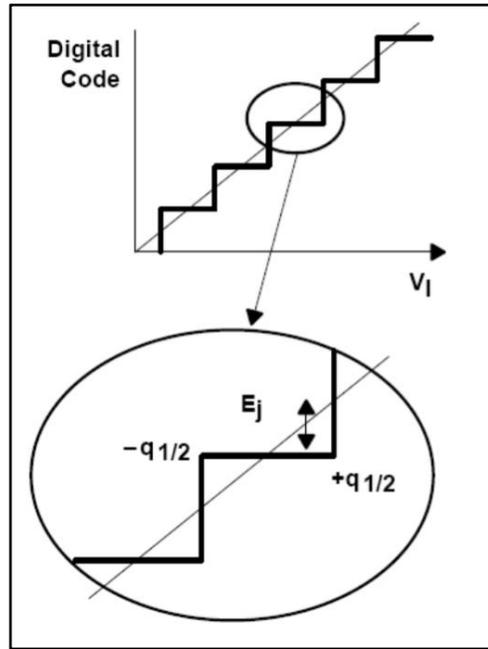
Estos niveles indican la resolución que se tienen para cuantizar la señal. Para ejemplificar esto mencionaremos los niveles de tensión admisibles en estos convertidores. De forma general, un microcontrolador o bien una microcomputadora puede leer niveles de tensión entre 0 a 3,3 – 5 voltios. Se toma un voltaje máximo de 5 voltios, de esta se obtienen la resolución del dispositivo.

$$(44) \quad \text{Resolución} = \frac{V_{max}}{\text{niveles de cuantización}} = \frac{5}{255} = 0,0196078 \text{ Volts}$$

$$(45) \quad \text{Resolución} = 19,6 \frac{mV}{\text{nivel}}$$

Por lo que al obtener una resolución de 19,6 mV por nivel de cuantización. Cada muestra será asociada a un determinado nivel de cuantización, dependiendo de la tensión muestreada en ese instante de tiempo.

Figura 22. Niveles de cuantización $-Q/2$ y $+Q/2$



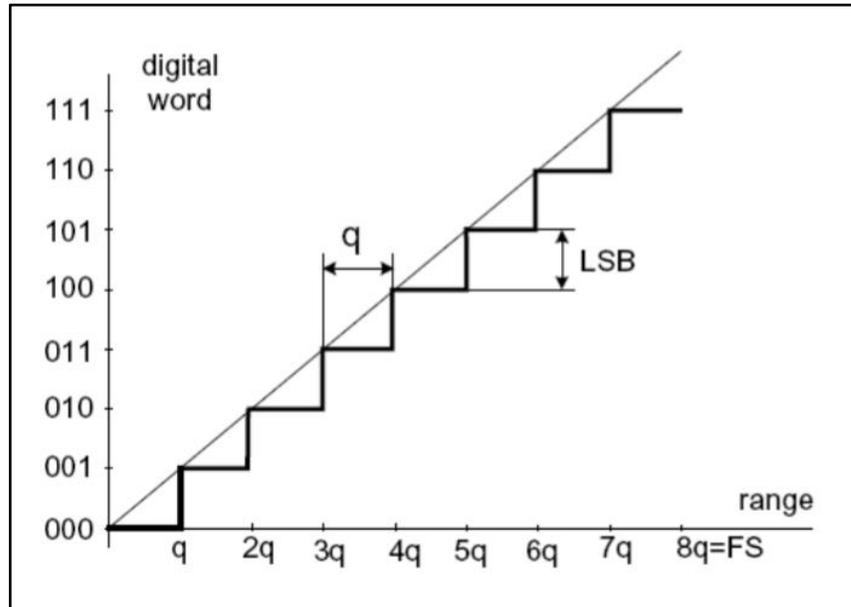
Fuente: Ramírez, L. (2012). Convertidores digital-analógico y analógico-digital. Recuperado en <http://www.utm.mx/~hugo/metrologia/Metro9.pdf>

2.7.2.1.3. Codificación

El último paso de un convertidor de señal es la codificación. En este punto, cada muestra de tensión ha sido cuantizada a niveles de voltaje permisibles para el dispositivo, por lo que ahora falta asociar cada medición discreta de voltaje a un valor que el microcontrolador pueda interpretar, manejar, operar y transmitir.

De esta manera, cada medición es codificada a un valor binario, por lo que el microcontrolador será capaz de realizar diversidad de operaciones, lógicas, matemáticas, conversiones numéricas, filtraje, amplificación, reducción, entre otras.

Figura 23. Niveles de cuantización



Fuente: Ramírez, L. (2012). *Convertidores digital-analógico y analógico-digital*. Recuperado en <http://www.utm.mx/~hugo/metrologia/Metro9.pdf>

2.7.3. Amplificador como convertidor

Entre las variadas aplicaciones que permite un dispositivo amplificador operacional está convertir señales de corriente en voltaje o bien viceversa, así como ser parte funcional en los convertidores de señales analógicas y digitales. Son utilizados en filtrado de componentes de frecuencia añadidas en la señal, por cuestiones de muestreo, o bien dados los niveles de cuantización de las muestras. Un amplificador operacional como tal, no puede realizar un proceso de conversión completo, pero es parte fundamental de los dispositivos de conversión.

Como fue citado en el apartado anterior, conocemos el proceso que conlleva la toma de datos y conversión de la misma información, para obtener muestras de una señal continua para luego discretizarla; es decir, obtener valores de la señal en instantes de tiempo tales que sean nT_0 , donde T_0 el tiempo establecido entre muestras, el cual se determina mediante el criterio de Nyquist y n sea un número entero. Esta aplicación de conversión de información conlleva una circuitería larga, donde se destacan circuitos integrados de alta complejidad que se encargan de realizar el muestreo, cuantización y codificación.

La mejora de un circuito convertidor se destaca por la aplicación de filtrado en las señales que los dispositivos manejan. Es en este punto donde los Amp Op son utilizados como filtros activos, los cuales se encargan de reducir el ruido que producen los cuantizadores. Cuando una señal es muestreada en determinado tiempo y reproducida con la misma frecuencia, se produce un solapamiento en la banda de frecuencia; es decir, una superposición de las réplicas periódicas, por lo que la señal no es reconstruida en su totalidad.

Así mismo existen otros convertidores, como los de señales analógicas

2.7.4. Convertidor A/D

La conversión de señales analógica a digital puede ser realizada mediante un circuito de red en escalera, en conjunto con dispositivos contadores y comparadores. El contador digital comienza la cuenta desde cero mientras que la red escalera es controlada intrínsecamente por dicha cuenta. Se produce una tensión escalonada; es decir, cada vez que el conteo aumenta, la tensión sube un escalón y crea una rampa escalonada.

Cuando el contador alcanza un determinado valor se obtiene un voltaje equivalente al mismo, el cual es comparado mediante un circuito de amplificador operacional comparador. Cuando el nivel de tensión del circuito escalera alcanza el voltaje de la señal de entrada analógica, el amplificador operacional nos da una respuesta en salida. Esta tensión de salida es utilizada para detener el contador.

La cantidad de cambio de voltaje escalonado está definida por el número máximo que puede dar el contador digital. Tal y como lo definimos antes, en los dispositivos digitales existe un factor importante cuando cuantizamos y codificamos una señal. La resolución del contador es dada por la ecuación:

$$(46) \quad 2^n = N \text{ etapas de conteo}$$

Supongamos el caso que nuestro contador para el ADC es de aproximadamente $n = 10$, lo que da como resultado un conteo de:

$$(47) \quad 2^{10} = 1\,024$$

Ahora sabemos que poseemos 1 024 etapas de conteo, por lo que tendremos la misma cantidad de niveles de tensión, basándonos en un voltaje de referencia, el cual puede ser un valor de tensión predeterminado. Analizaremos basados en un valor de voltaje estándar en un microcontrolador, es decir 3,3 V. A partir de la siguiente ecuación obtendremos el valor de cada incremento de tensión a partir del conteo:

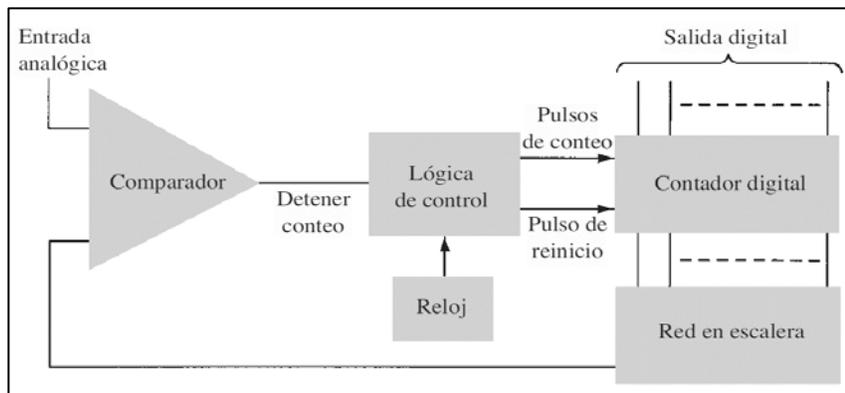
$$(48) \quad \text{Nivel de tensión} = \frac{V_{ref}}{N \text{ etapas de conteo}} = \frac{3,3}{1\,024} = 3,22mV$$

Esto significa que nuestro convertidor analógico digital realiza cambios en la salida dados por un paso 3,22 mV. Otro factor importante por considerar en el tiempo de conversión, el cual está definido por el reloj de conteo. Este establece el tiempo que tarda en convertir la señal analógica en una señal digital.

$$(49) \quad t_{conv} = N \text{ etapas de conteo} * T_{frec. \text{ de conteo}}$$

En este circuito se obtiene una señal digital a partir de una señal analógica. Para comprender este dispositivo describiremos brevemente el funcionamiento del mismo, a partir de la siguiente figura.

Figura 24. **Circuito red en escalera conversor A/D**



Fuente: Boylestad, R. (2009). *Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos*. p.721

La entrada analógica entra en el circuito comparador. Puesto que la señal que viene del circuito en escalera es cero, no se detendrá el conteo, por lo que da inicio la cuenta y esta aumenta en función de las etapas de conteo. Cada paso del contador es manejado por el contador del dispositivo, el contador da una salida digital, la cual es retroalimentada por un circuito de red en escalera, que luego se proyecta al amplificador operacional comparador.

Este determina en qué momento la señal de salida digital ha superado la tensión analógica de entrada, y detiene el contador.

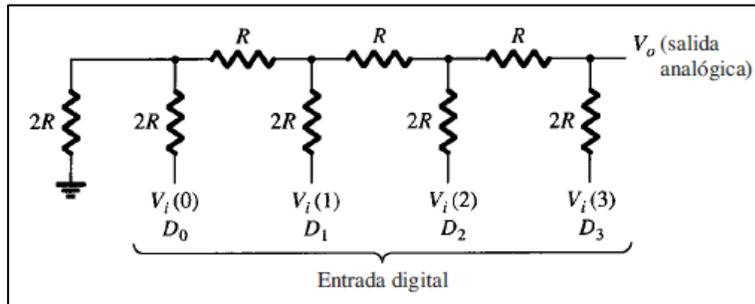
2.7.5. Convertidor D/A

Como se analizó en el apartado anterior, se convierte una señal analógica en una señal digital y, así mismo, puede ser convertida en el proceso contrario. Ya se ha mencionado el circuito en red escalera, este permite convertir una señal digital en una señal analógica.

Este circuito está compuesto por una escalera de resistores, que bajo el principio de divisor de tensión permite reconstruir una señal digital, en una señal continua en el tiempo. La red recibe valores binarios de tensión, es decir 0 voltios y 3,3 voltios, o bien 5 voltios, dependiendo con el dispositivo que se trabaja la conversión. Esta red entrega un voltaje de salida proporcional a dicho valor de tensión de referencia, lo que se entiende como si se obtendrá un valor mínimo de 0 voltios y un máximo de 3,3 V o 5 V.

Como se menciona antes, el voltaje de salida es proporcional al valor de entrada digital, por lo que se asume que el circuito tiene un comportamiento lineal, el cual se obtiene del divisor de tensión. La mejor manera de analizar un circuito en escalera para obtener su comportamiento matemático es mediante análisis nodal; es decir, aplicando el método de nodos para comprender el voltaje de salida de dicho circuito.

Figura 25. **Convertidor D/A circuito red en escalera**



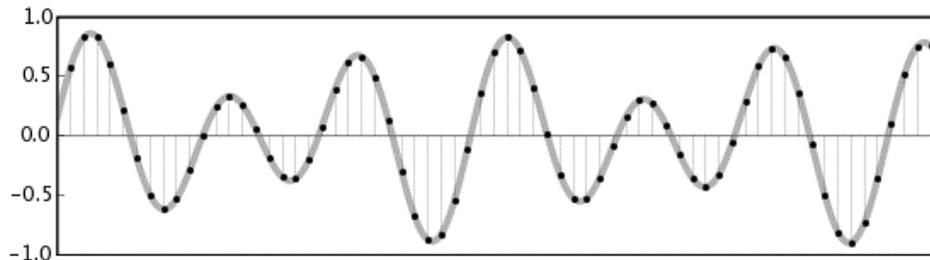
Fuente: Boylestad, R. (2009). *Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos*. p.718

La función de la red en escalera es convertir los valores binarios posibles en niveles escalonados de tensión. Como se analizó en el convertidor de señal analógica a digital, cada valor binario representará un aumento de voltaje; dado por una determinada resolución, este nivel de voltaje está representado en la ecuación 48. Según sea la resolución n del dispositivo, así serán los niveles de voltaje para los escalones. Con ello se obtiene una mayor cuantización gracias a una mejor resolución en la conversión binaria. La relación matemática para obtener el voltaje de salida de un circuito convertidor digital-analógico está dada por la siguiente expresión:

$$(50) \quad V_o = \frac{V_1 \times 2^0 + V_1 \times 2^1 + V_1 \times 2^2 + V_1 \times 2^3 + \dots + V_{n-1} \times 2^{n-1}}{2^n}$$

La red escalera dedicada para conversión de una señal digital a una analógica es conocida como R/2R. Esto se debe a la simetría que posee la estructuración del mismo, valores de resistencia totalmente simétricas para obtener un comportamiento lineal.

Figura 26. **Señal senoidal obtenida de señal digital**

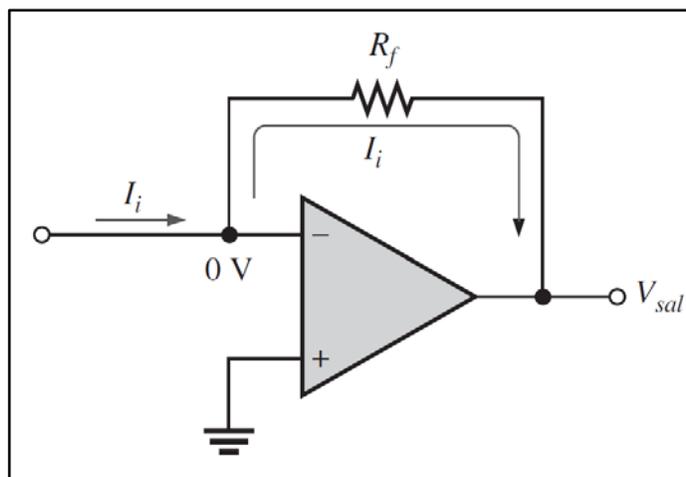


Fuente: Audacity Manual. (2013). *Audio-numérique*. Recuperado en https://ttmanual.audacityteam.org/m/images/e/e2/Waveform_digital.png

2.7.6. **Convertidor de corriente a voltaje**

Otras aplicaciones para los amplificadores operacionales y directamente para los convertidores son los convertidores de corriente a voltaje y viceversa. Un convertidor de corriente a voltaje se encarga de transformar una señal de corriente de entrada en una señal de tensión de salida, (figura 27).

Figura 27. **Convertidor de corriente a voltaje, circuito básico**



Fuente: Floyd, T. (2008). *Dispositivos Electrónicos*. p.734

La corriente de entrada entra al amplificador operacional. Puesto que la impedancia de entrada del mismo es sumamente elevada, la corriente en la rama de retroalimentación será la misma que la corriente de entrada, como se ve en la ecuación 51; en este punto se asume que entonces la tensión en la resistencia R_f será proporcional a la corriente en esta misma:

$$(51) \quad I_{entrada} = I_{R_f}$$

$$(52) \quad V_{R_f} = I_{ent} * R_f$$

Un amplificador operacional posee alta impedancia en sus entradas y este, a su vez, tiene un corto circuito virtual entre las mismas, por lo que el voltaje en el resistor de retroalimentación será el voltaje de salida de nuestro amplificador operacional.

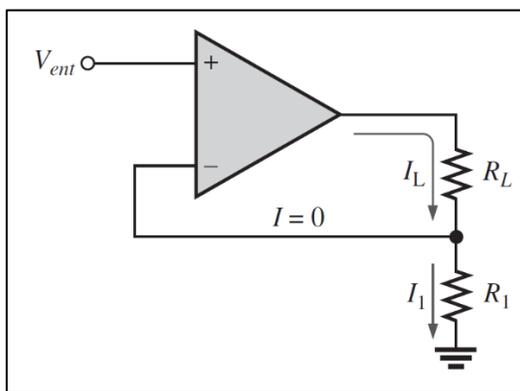
$$(53) \quad V_{sal} = I_{ent} * R_f$$

Se observa que el voltaje de salida es completamente dependiente de la corriente de entrada, puesto que tiene una dependencia lineal. Un incremento en corriente significará un incremento en el voltaje de salida.

2.7.7. Convertidor de voltaje a corriente

Tal y como fue visto en el apartado anterior, se tiene un convertidor de corriente a voltaje y así mismo uno de voltaje a corriente, este circuito surge de la necesidad de tener un dispositivo que pueda proporcionar una corriente de salida controlada mediante un voltaje de entrada, (figura 28).

Figura 28. **Convertidor de voltaje a corriente, circuito básico**



Fuente: Floyd, T. (2008). *Dispositivos Electrónicos*. p.734

Considerando las condiciones prácticas que posee el amplificador operacional, se sabe que existe un corto circuito virtual entre sus terminales de entrada, por lo que la tensión en una de ellas dará como resultado el mismo valor de voltaje en la otra entrada.

$$(54) \quad V_{ent} = V_+ = V_-$$

El voltaje en la resistencia R_1 debe tener la tensión que se encuentra en la entrada inversora. Esto se debe a que ambos están conectados al mismo nodo dispositivos conectados en paralelo poseen el mismo valor de voltaje.

$$(55) \quad V_{R_1} = V_{ent}$$

Por lo que ahora que se conoce el valor de tensión en dicho resistor, (ecuación 55), se puede determinar el valor de corriente que atraviesa a esa

resistencia. Por la ley de Ohm se establece la expresión correspondiente de la corriente de salida en el convertidor, (ecuación 56).

$$(56) \quad I_L = \frac{V_{ent}}{R_1}$$

Esta última ecuación describe el comportamiento de la corriente de salida del convertidor, por lo que se puede observar que el voltaje de entrada controla de manera proporcional la corriente de salida. Un aumento de voltaje en la entrada produce un incremento en la corriente de salida, o bien la corriente de carga del circuito.

2.8. Amplificador diferencial

Una característica importante en un amplificador diferencial es que posee un circuito diferencial, el cual describe la resta matemática entre dos señales; es decir:

$$(57) \quad V_{dif} = V_{i1} - V_{i2}$$

Esta condición de circuito diferencial se cumple si y solo si ambas señales son completamente distintas, a esto le llamamos entradas diferenciales. Pero para el caso en que ambas señales son similares, definimos estas como entradas comunes, en las cuales en amplificador diferencial da como resultado el promedio de ambas señales, de esta manera:

$$(58) \quad V_c = \frac{1}{2}(V_{i1} + V_{i2})$$

Estas dos características principales se presentan en un amplificador diferencial como entradas diferenciales y comunes.

Cabe destacar que cuando dos señales son aplicadas en el Amp Op, estas tienen diversas componentes, que en algún instante podrían estar desfasadas, lo que daría como resultado una superposición de entradas, las cuales cambian en cada momento.

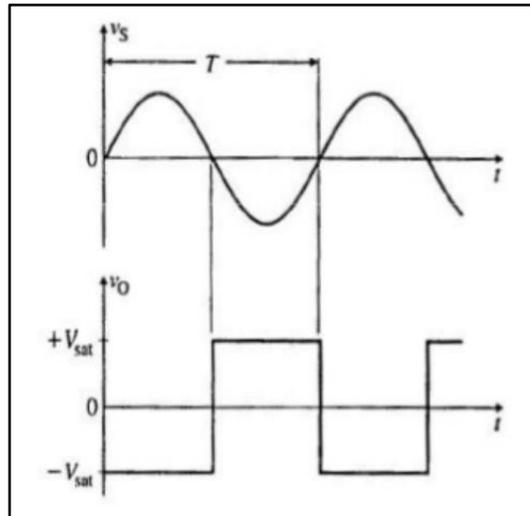
$$(59) \quad V_o = A_{dif}V_{dif} + A_cV_c$$

La anterior ecuación describe el voltaje de salida del amplificador diferencial, el cual está compuesto por una parte en modo común y una parte diferencial. Según el instante en el que la señal es procesada existirá una de estas características o ambas en la señal de salida.

2.8.1. Detectores de cruce por cero

En diversidad de aplicaciones es necesario determinar el cambio de ciclo de una determinada señal continua en el tiempo. Por ejemplo, en una señal senoidal producida por un generador de corriente alterna, para cada cambio de ciclo, existe un instante de tiempo t , tal que la señal sinusoidal tendrá un valor 0 en magnitud. Para estos casos se diseñaron los circuitos detectores de cruce por cero, donde se determina cuando la señal es positiva o negativa. El detector de cruce por cero no es más que un dispositivo que da una respuesta cuando se alcanza un determinado nivel de tensión, que, en este, caso dicho valor de referencia es igual a cero. Así mismo, cuando el nivel tensión sea menor que dicho valor de referencia nos dará una respuesta diferente de la anterior, que nos indicará que se encuentra por debajo de este.

Figura 29. **Detección por cruce de cero en modo inversor**

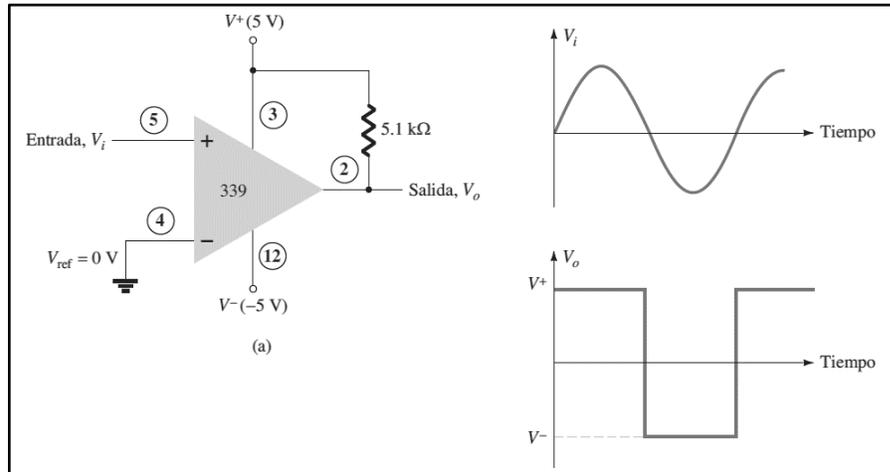


Fuente: Sedra, A. (2006). *Microelectronics Circuits*. p.260

La figura 29, describe el comportamiento de un circuito detector de cruce por cero. Podemos observar la señal de entrada, una señal senoidal continua en el tiempo, y la señal de salida del circuito detector. Podemos observar que cada que la señal de entrada pasa por un valor de 0 voltios; la señal de salida experimenta un cambio en el valor de la tensión. Para este caso se analiza cuando la señal entra al semiciclo negativo; el circuito proporciona un valor de tensión en salida de aproximadamente $+V_{sat}$, y el caso inverso para cuando la señal de entrada pasa al semiciclo positivo, la salida obtiene un valor de tensión de $-V_{sat}$.

Como fue visto secciones atrás, este circuito no es más que un comparador de tensión, pero con una aplicación específica, que es la detección de 0 voltios en una señal variante y continua en el tiempo. Esto nos permite, por ejemplo, determinar en qué sentido gira una rueda, o en qué estado se encuentra instrumento de medición.

Figura 30. **Detección por cruce de cero no inversor**



Fuente: Boylestad, R. (2009). *Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos*. p.712

Existen dos tipos de detectores de cruce por cero, cada uno configurado en la modalidad necesaria para la aplicación que se requiere:

- Detector de cruce por cero inversor: tal y como fue visualizado en la figura 24, el detector de cruce inversor tiene un comportamiento recíproco, esto debido a que una señal de entrada en paso positivo, da una salida en estado negativo. Para una señal de entrada en paso negativo se obtiene una salida en estado positivo.
- Detector de cruce por cero no inversor: para este caso se observa la figura 25, la cual muestra un detector en configuración no inversora. Como el nombre lo describe no hay inversión de polaridad, digámoslo así. Posee un comportamiento lineal con respecto a la polaridad de las señales, si la entrada está en ciclo positivo, la salida tendrá una respuesta de tensión

positiva, pero si la entrada está en ciclo negativo la salida estará en un estado negativo.

Dado que un circuito detección de cruce por cero no es más que un comparador, al retomar las configuraciones antes vistas en la sección de comparadores. En la figura 19 se observa las dos configuraciones principales para un comparador ventana en modo inversor y no inversor, dependiendo de la función que desempeñará el dispositivo.

2.8.2. Detector de nivel de voltaje

Como vimos en la sección anterior, tenemos un circuito detector de cruce por cero, lo que permite determinar cuándo una señal variante en el tiempo atraviesa un valor aproximado a cero voltios en determinado instante de tiempo.

Supongamos el caso en el que se requiera analizar el mismo comportamiento que el circuito mencionado, pero no para un nivel de 0 voltios, sino que puede ser un cruce por 5 voltios, o bien -5 voltios. Por lo que basados en la configuración principal de un detector de cruce por cero, se regresa al principio de los amplificadores comparadores. Estos permiten comparar dos señales o bien una señal con respecto a un valor de referencia, a lo que se le llama comparador de ventana, en el cual se analiza la señal de entrada. Cuando esta es mayor o menor al valor de referencia, se obtiene una respuesta diferente para los dos casos, con ello se determina el estado de la señal de entrada.

Pues bien, un detector de nivel de voltaje es la aplicación de dicho comparador de ventana, en el cual el nivel voltaje no es más que un valor de referencia. Por lo que se determina que los detectores de nivel o cruce son una aplicación inmediata a los comparadores de voltaje.

2.9. Amplificadores de instrumentación

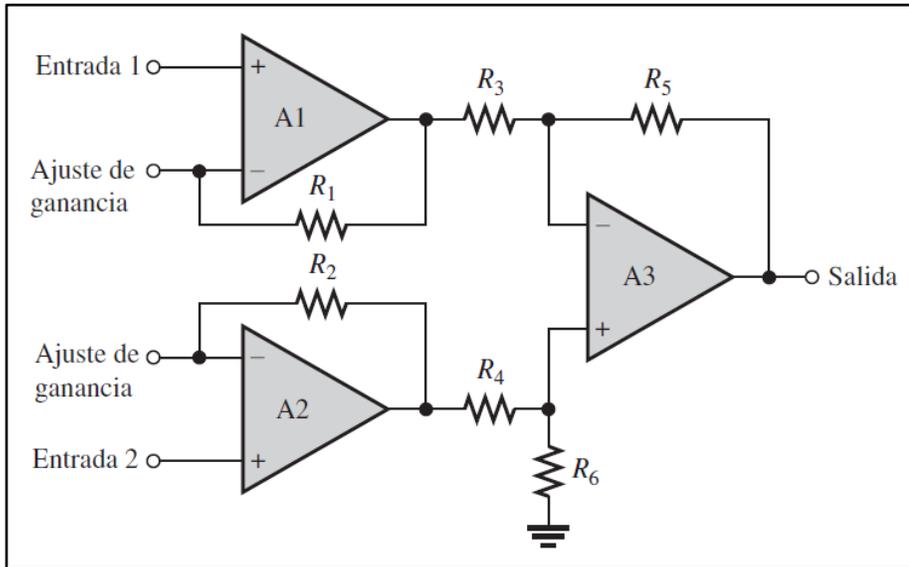
Una de las aplicaciones más utilizadas en los amplificadores operacionales es la configuración de un circuito de instrumentación, los cuales son habitualmente implementados en ambientes con ruido eléctrico; se ejemplifica para dispositivos de adquisición de datos, donde una señal puede ser afectada, distorsionada e incluso modificada.

2.9.1. Amplificador de instrumentación

Este circuito de amplificador operacional, como habitualmente lo hace, aplica ganancia a una señal de entrada diferencial. A diferencia de otros amplificadores, esta configuración tiene propósito especial en amplificar señales de niveles bajos de tensión; en otras palabras, señales muy pequeñas, que pueden añadirse a señales de mayor tensión y ser distorsionadas.

Entre las características principales de un amplificador de instrumentación, está su alta impedancia de entrada, así como su baja impedancia de salida, bajo desequilibrio de voltaje de salida y un alto rechazo en modo común. Internamente está constituido por tres amplificadores operacionales. En la figura 24 se puede visualizar la configuración de este; está armado con dos amplificadores operacionales conectados como no inversores y uno en modo diferencial de ganancia unitaria.

Figura 31. **Amplificador de instrumentación**

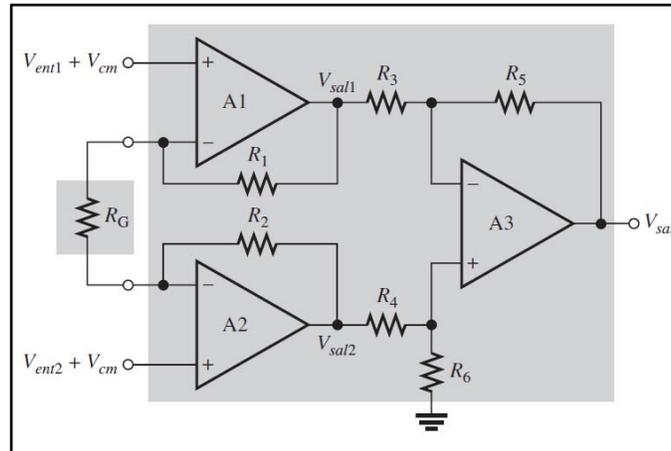


Fuente: Floyd, T. (2008). *Dispositivos Electrónicos*. p.710

Ahora analizaremos matemáticamente cada parte que compone al amplificador de instrumentación, pero para ello definiremos el ajuste de ganancia entre las señales; esto se hace mediante un resistor variable colocado entre los nodos de ajuste de ganancia. ¿Por qué conectado justamente allí? Esto se debe a que el ajuste del resistor variable dará mayor ganancia a una señal mientras que a la otra se lo reducirá.

Obviamente una señal siempre será mayor a la otra, siempre y cuando el resistor R_g , como se observa en la figura 32, no se encuentre al 50 % de su posicionamiento. Para cuestiones de diseño y cálculo teórico se asume R_g con un similar a las demás resistencias que posee el amplificador de instrumentación, o bien se sustituye por completo el resistor variable por una resistencia fija.

Figura 32. **Amplificador de instrumentación con ganancia**



Fuente: Floyd, T. (2008). *Dispositivos Electrónicos*. p.711

2.9.2. Conexiones amplificador de instrumentación

Un amplificador de instrumentación tiene básicamente cuatro conexiones principales: las entradas diferenciales, el ajuste de ganancia y la salida del mismo, además de las respectivas conexiones de alimentación que posee. Para las entradas uno y dos, como se muestra en la figura anterior, es allí donde ingresan las señales por diferenciarse.

El amplificador hará una operación de diferencia entre la entrada uno y la entrada dos. Supongamos el caso en que ingresamos una señal corrompida, la cual posee ruido eléctrico, de la cual queremos obtener la verdadera señal de información; entonces, por una entrada ingresamos esta señal alterada y por el otro lado deberíamos ingresar la señal de ruido, lo que significa que al ser operadas por el amplificador de instrumentación obtendremos la verdadera señal. Si se analiza esto, nos damos cuenta que le restamos el ruido a nuestra señal.

Un amplificador de instrumentación está constituido por ciertas etapas, de las cuales se mencionan dos. La primera es correspondiente al modo diferencial que posee este circuito de instrumentación; dos señales son aplicadas a las entradas del mismo, estas son analizadas, comparadas y matemáticamente se dice que son restadas, para luego obtener una tensión diferencial que será trasladada a la siguiente etapa, que es de amplificación.

Aquí es donde la señal diferencial obtenida de la etapa uno se maneja para mejorar sus condiciones eléctricas; habitualmente es añadir una ganancia a dicha tensión. Para cuestiones de diseño de dispositivos, se recomienda y se acostumbra dar una ganancia de valor unitario a la señal para evitar cualquier pérdida de información con el fin de evitar saturación del dispositivo, que es la causa más común por la que se podría dañar la señal de información. De esta manera, la misma no se verá modificada por valores de tensión muy elevados.

2.9.3. Análisis matemático en un amplificador de instrumentación

De la misma manera como hemos analizado anteriormente las diversas configuraciones y aplicaciones que posee el amplificador operacional, al obtener un análisis matemático para el funcionamiento de un amplificador de instrumentación, se observa que el circuito esquemático representativo de dicho dispositivo está compuesto por diversos circuitos internos. Entre ellos cabe visualizar amplificadores no inversores, así como un amplificador diferencial. La figura 25 será nuestro punto de partida para describir este modelo analítico y teórico que describe el funcionamiento de este particular Amp Op.

Se sabe la característica particular que posee el amplificador operacional entre sus terminales inversora y no inversora, de corto circuito virtual. Podemos asumir que los voltajes de entrada V_{ent1} y V_{ent2} se encuentran directamente en los nodos de la resistencia R_g . De esto plantearemos el primer análisis: la corriente que atraviesa los nodos desde V_{sal1} hasta V_{sal2} pasa por medio de los resistores R_1 , R_2 y R_g , por lo que obtenemos esta primera ecuación.

$$(60) \quad I = \frac{V_{sal1} - V_{sal2}}{R_1 + R_2 + R_g}$$

Ahora nos concentraremos en determinar el comportamiento de la corriente únicamente en el resistor de ganancia, R_g . Para ello volvemos a mencionar la característica de corto circuito virtual que posee el Amp Op. Dicho factor permite que ambos nodos en R_g posean directamente el valor de los voltajes de entrada. Ahora utilizamos análisis nodal y obtenemos que la corriente en dicho resistor es:

$$(61) \quad I = \frac{V_{ent1} - V_{ent2}}{R_g}$$

A partir de estos dos análisis, podemos intuir que dicha corriente, para ambos casos, resulta ser la misma, puesto que la corriente que va desde el nodo del voltaje de salida uno, al nodo del voltaje de salida 2 es exactamente la misma que va del nodo del voltaje de entrada 1 al nodo del voltaje de salida 2. De tal manera asumimos que matemáticamente es lo mismo.

$$(62) \quad \frac{V_{sal1} - V_{sal2}}{R_1 + R_2 + R_g} = \frac{V_{ent1} - V_{ent2}}{R_g}$$

Para condiciones de modelaje de circuitos, evitaremos dar mayor ganancia a las señales de entrada. La única ganancia aplicada en nuestro amplificador de instrumentación la dará la resistencia R_g . Ahora obtendremos una expresión definitiva para el comportamiento de nuestro circuito de instrumentación, tomando como referencia que tanto R_1 , R_2 , y todas las resistencias del circuito a excepción de R_g , tendrán un mismo valor R .

$$(63) \quad V_{sal1} - V_{sal2} = \frac{R+R+R_g}{R_g} (V_{ent1} - V_{ent2})$$

$$(64) \quad V_{sal2} - V_{sal1} = \left(\frac{2R}{R_g} + 1 \right) (V_{ent2} - V_{ent1})$$

De esta manera conocemos el comportamiento del voltaje que se presenta después de la etapa diferencial del mismo, donde las señales de entrada del modo diferencial son afectadas con una constante de ganancia controlada, establecida por la resistencia R_g . Puesto que R es un valor constante, R_g permitirá cambiar la ganancia que se aplica a las señales diferenciadas.

Ahora analizaremos el voltaje de salida del amplificador de instrumentación, puesto que estudiaremos el comportamiento de cada nodo de salida visto en la parte anterior. Los nodos V_{sal1} y V_{sal2} , están conectados respectivamente a un circuito de amplificación configurada como inversor y como no inversor.

De la figura 25, al observar que el nodo del voltaje de salida uno se encuentra conectado a una configuración inversora, por lo que de esta forma se determina la ganancia que posee dicha tensión en ese punto.

De la misma forma el nodo del voltaje de salida dos se encuentra conectado a una configuración no inversora, pero este ramal del circuito tiene una particularidad; se encuentra conectado a un divisor de tensión que luego ya permite al mismo conectarse al circuito no inversor.

Ahora plantearemos matemáticamente el análisis que hemos determinado con anterioridad. Primero definimos el voltaje de salida como la suma de los voltajes de salida internos multiplicados con su respectiva ganancia.

$$(65) \quad V_o = G_{sal1}V_{sal1} + G_{sal2}V_{sal2}$$

$$(66) \quad V_o = -\frac{R_3}{R_5} V_{sal1} + \left(1 + \frac{R_3}{R_5}\right) \left[\frac{R_6}{R_4+R_6} V_{sal2}\right]$$

Para fines de diseño, hemos establecido que lo más recomendable fuera la resistencia de ganancia. Trabajaremos con resistores del mismo valor, por lo que los resistores R_3 , R_4 , R_5 , y R_6 tendrán un mismo valor R . Nuestra ecuación 52 se ve modificada y simplificada de esta manera:

$$(67) \quad V_o = -\frac{R}{R} V_{sal1} + \left(1 + \frac{R}{R}\right) \left[\frac{R}{R+R} V_{sal2}\right]$$

$$(68) \quad V_o = -V_{sal1} + (2) \left[\frac{1}{2} V_{sal2}\right]$$

$$(69) \quad V_o = -V_{sal1} + V_{sal2} = V_{sal2} - V_{sal1}$$

Así obtenemos una expresión para el voltaje de salida de nuestro amplificador de instrumentación. Este es función de los voltajes de salida

internos, provenientes de la etapa del amplificador diferencial; es decir, es función de los voltajes V_{sal1} y V_{sal2} . Con todo ello establecido, definido y analizado se enlazan las ecuaciones 50 y 55, lo cual nos dará como resultado la expresión completa para nuestra tensión de salida. Esta es dependiente de los voltajes de entrada aplicados a nuestro amplificador de instrumentación, tomando en cuenta que este análisis tuvo ciertas condiciones establecidas para diseño de circuitos.

Por el mismo motivo, esta configuración de instrumentación solo puede ser manipulada en su ganancia por el resistor dedicado a ello, el resistor de ganancia R_g .

$$(70) \quad V_o = \left(\frac{2R}{R_g} + 1 \right) (V_{ent2} - V_{ent1})$$

2.9.4. Amplificador de señal

El amplificador de instrumentación es utilizado normalmente para medir pequeños valores de tensión diferenciales, en modo común. La señal es obtenida por un transductor, que convierte cualquier tipo de energía en energía eléctrica, en una señal de voltaje o bien de corriente, que luego es manipulada y acondicionada para obtener información de esta mediante el uso de un amplificador de instrumentación. Esta señal es enviada por un medio guiado, el cual afecta de forma directa la señal de información.

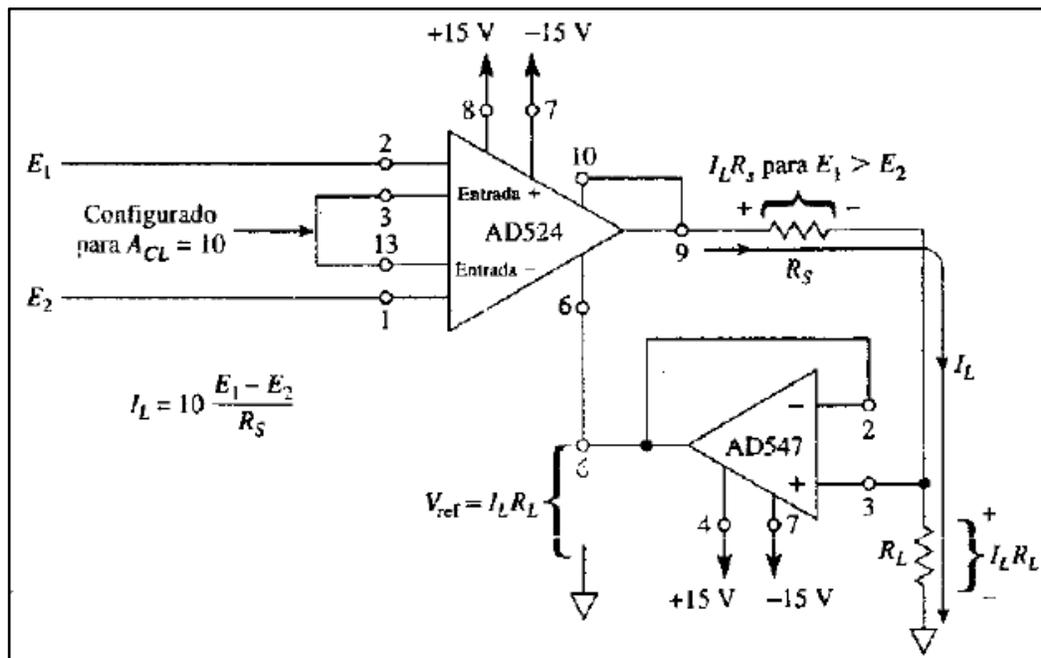
Es aquí donde el amplificador de instrumentación actúa, amplificando la señal de entrada y rechazando el gran voltaje en modo común.

2.9.4.1. Amplificador de instrumentación como convertidor de señal

El funcionamiento de un dispositivo de estas características es dependiente de su capacidad para obtener una señal en modo diferencial, mediante el voltaje diferencial obtenido del amplificador de instrumentación, que es dependiente de la corriente de carga demandada por la resistencia de carga del circuito. Mediante una resistencia de ajuste de corriente, se obtiene la siguiente expresión analizando el circuito de la figura 31.

$$(71) \quad V_{AI} = I_{carga}(R_{Ajuste} + R_{carga})$$

Figura 33. Convertidor de voltaje a corriente mediante amplificador de instrumentación



Fuente: Coughlin, Robert. (2004). *Amplificadores operacionales*. p 223

La salida del amplificador de instrumentación está conectada al circuito de carga y a un seguidor unitario. Este circuito proporciona un voltaje de salida que sirve como señal de referencia para el amplificador de instrumentación. Con el fin de igualar el voltaje de la carga, podemos reescribir la ecuación 65 de la siguiente forma:

$$(72) \quad V_{AI} = V_{ref} + G_{AI}(E_1 - E_2)$$

De esta manera se reescriben las ecuaciones planteadas para obtener una función que describa la corriente en el circuito de carga, dado el voltaje diferencial de entrada en el amplificador de instrumentación. Igualando las ecuaciones 66 y 65 se obtiene la ecuación para la corriente de carga.

$$(73) \quad I_{carga}R_{carga} + G_{AI}(E_1 - E_2) = I_{carga}(R_{Ajuste} + R_{carga})$$

Simplificando la ecuación anterior, obtenemos lo siguiente:

$$(74) \quad G_{AI}(E_1 - E_2) = I_{carga}R_{Ajuste}$$

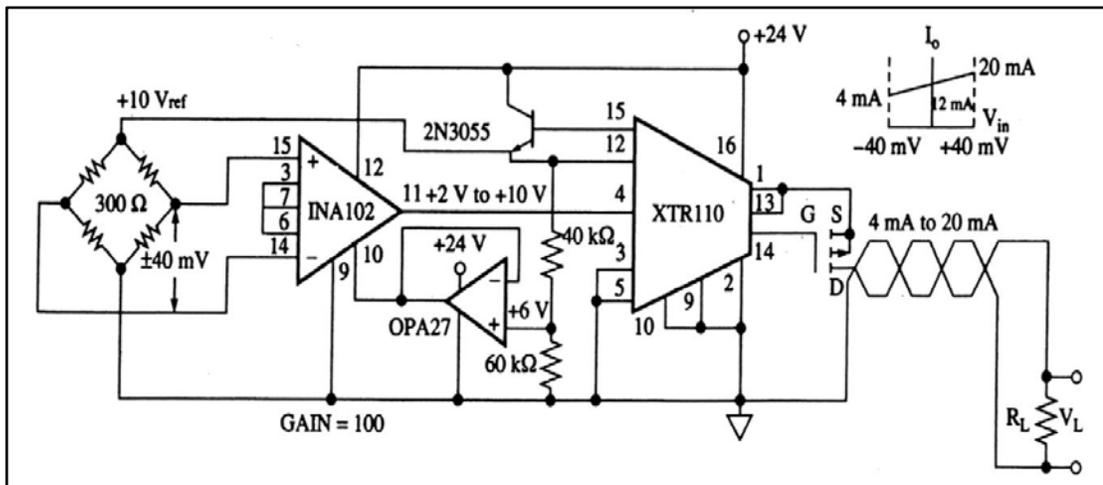
$$(75) \quad I_{carga} = \frac{G_{AI}(E_1 - E_2)}{R_{Ajuste}}$$

Al observar que la corriente obtenida en el circuito de carga, es totalmente dependiente del voltaje diferencial aplicado a nuestro amplificador operacional. Así mismo, la resistencia de ajuste o limitación establecerá la corriente que llegará a la carga. El voltaje en este circuito de carga estará limitado por el voltaje diferencial aplicado y la ganancia configurada en el amplificador de instrumentación.

2.9.5. Lazo de corriente estándar

Es un amplificador de señal de puente. Los puentes DC se analizarán en los textos posteriores a este. En la figura 32 se observa cómo una señal amplificada puede ser trasladada a través de una distancia considerable, lo que llamamos protocolos de comunicación. Estos protocolos poseen valores de voltaje y corriente predeterminados, en los cuales se ha establecido que a dichas magnitudes se puede alcanzar una distancia adecuada sin tener pérdida de información en las señales.

Figura 34. Señal de puente en lazo de corriente de 4 a 20 mA



Fuente: Anónimo. *Amplificadores diferenciales y de instrumentación*. Recuperado en <https://docplayer.es/12626730-Tema-9-amplificadores-diferenciales-y-de-instrumentacion.html>.

Un ejemplo aplicable para un lazo de corriente estándar es convertir una señal de tensión a una de corriente.

La razón es que cuando se transmite una señal de voltaje a través de una distancia muy extensa, con un medio guiado que pueda ser susceptible al ruido eléctrico debido a su blindaje, esta señal se degradaría debido a que existe una caída de tensión a través del cable.

Este circuito convierte un voltaje de aproximadamente 2 V a 10 V en una corriente de 4 a 20 mA. Este realiza una compensación debido a la inducción de ruido que se da en una señal de tensión. El ruido se induce como un voltaje, lo que significa que el voltaje de la señal se suma junto al ruido a medida que se traslada por las líneas de señal. La señal de ruido produce una corriente de ruido pero el lazo de corriente posee alta impedancia, por lo que la corriente se reduce aproximadamente en su totalidad. Cuando la señal de ruido sea enviado hasta el tramo final, se conecta a una resistencia de carga de un valor relativamente bajo, en contraste con la resistencia de entrada del amplificador de instrumentación.

El transductor de puente obtiene la señal de voltaje de la medición física que se buscaba. Esta es ingresada a un amplificador de instrumentación, el cual con su impedancia de entrada, reduce la corriente del ruido eléctrico a una milésima de su valor. Nuestro amplificador de instrumentación, INA102 en la figura 32, luego esta señal de tensión es procesada por el integrado XTR110, para convertirla de voltaje a corriente.

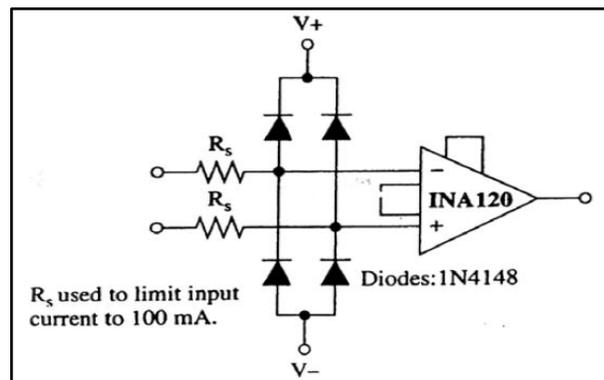
Podemos describir este comportamiento de conversión como una linealización de tensión a corriente. La corriente de ruido se ha reducido a un error de aproximadamente 0,001 %; este error es relativamente muy pequeño al que se obtiene con una señal de tensión a través de un medio cableado.

2.9.6. Circuito de protección de entrada

Como fue visto en el título anterior, una señal a través de una larga distancia de medio guiado puede resultar en pérdidas considerables de información. Por esta razón es necesario reducir la distancia entre el sensor y el amplificador de instrumentación.

En muchos casos podemos observar la presencia de sobrecorrientes y sobretensiones que pueden dañar al amplificador de instrumentación. La figura 33 muestra un circuito con acople de protección utilizando diodos clamp. Estos diodos se utilizan para evitar sobre tensiones y permiten conducción en un sentido, por lo que se establece una diferencia de potencial entre sus terminales y de esta manera el voltaje es regulado. En la figura 33 podemos observar que los diodos clamp están conectados a un voltaje de referencia, lo que indica que en las entradas de amplificador operacional existirá limitado.

Figura 35. **Circuito protector de entrada para amplificador de instrumentación**



Fuente: Anónimo. *Amplificadores diferenciales y de instrumentación*. Recuperado en <https://docplayer.es/12626730-Tema-9-amplificadores-diferenciales-y-de-instrumentacion.html>.

Podemos observar en la figura que existen dos resistencias que limitan la corriente que llega al amplificador, de si existe una sobretensión que exceda los límites establecidos entre los voltajes de referencia $+V$ y $-V$. Podemos indicar que el voltaje en las terminales del amplificador de instrumentación no excederá lo que se ha establecido y el resto del voltaje de sobretensión quedará sobre la resistencia limitante R_s . El circuito con protección de diodos limitadores es de uso común con amplificadores de instrumentación.

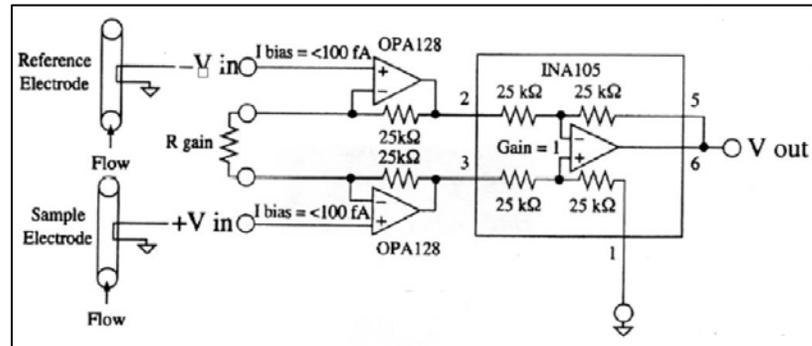
2.9.7. Circuito medidor de pH con amplificador de instrumentación

En antiguos medidores de los niveles de pH se utilizaban amplificadores femto. Las etapas en la entrada de un amplificador de instrumentación se encuentran conectadas a los electrodos de alta impedancia prueba y referencia.

La solución fluye en el electrodo de prueba y se realiza una comparación con el electrodo de referencia. Este circuito está completamente aislado de tierra para evitar ruido eléctrico en las mediciones. Debido a que una medición como esta posee valores de tensión muy pequeños, una señal de ruido podría alterar más del 100 % de información. Las mediciones de pH están hechas para análisis de fluidos del cuerpo. La figura 34 describe la configuración básica de un medidor de pH.

La implementación de un circuito como este, posee una simplicidad un tanto elevada; la dificultad más grande recae en los electrodos que se utilizarán para realizar las mediciones, puesto que deben realizarse con un material que soporte las diferentes soluciones que se movilizarán por ellos.

Figura 36. **Medidor de pH con amplificador de instrumentación**



Fuente: Anónimo. *Amplificadores diferenciales y de instrumentación*. Recuperado en <https://docplayer.es/12626730-Tema-9-amplificadores-diferenciales-y-de-instrumentacion.html>.

2.10. Filtros activos

Una de las aplicaciones más destacadas para los amplificadores operacionales es construir filtros activos. El circuito de filtrado está constituido por componentes puramente pasivos en conjunto con el circuito de amplificación, que aumenta la señal de tensión y de esta manera acopla la señal a otra sección del circuito.

Los filtros están clasificados en cuatro tipos diferentes, cada uno posee un funcionamiento muy similar. Cada uno de estos es diseñado para actuar en diferentes frecuencias.

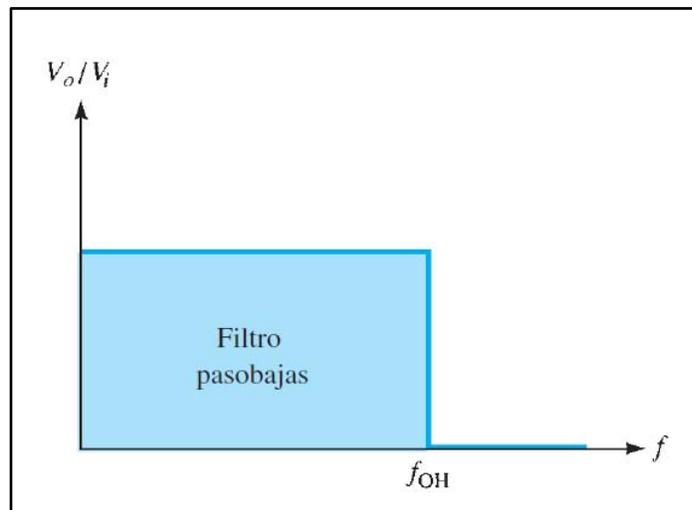
¿Qué es un filtro? Un circuito de filtrado está construido para eliminar componentes espectrales de frecuencia en un determinado valor. Existe una respuesta estable en salida desde la componente en DC hasta una frecuencia de corte determinada, o bien el caso inverso, desde una componente de frecuencia muy alta hasta una determinada frecuencia de corte mucho menor.

Un filtro activo es la combinación de un filtro pasivo y un circuito de amplificación. Si se combina un circuito de filtrado con un amplificador operacional configurado en modo no inversor, obtenemos la respuesta de salida del filtro multiplicado con una ganancia respectiva.

2.10.1. Filtro activo pasabajos

Un filtro pasabajos proporciona una señal de salida desde una frecuencia muy pequeña, que se puede considerar desde cero Hertz hasta una frecuencia límite que llamaremos frecuencia de corte f_{OH} . Una vez se sobrepasa este valor de corte, no existe una salida en el amplificador operacional.

Figura 37. **Respuesta del filtro ideal pasabajos**



Fuente: Boylestad, R. (2009). *Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos*. p.655

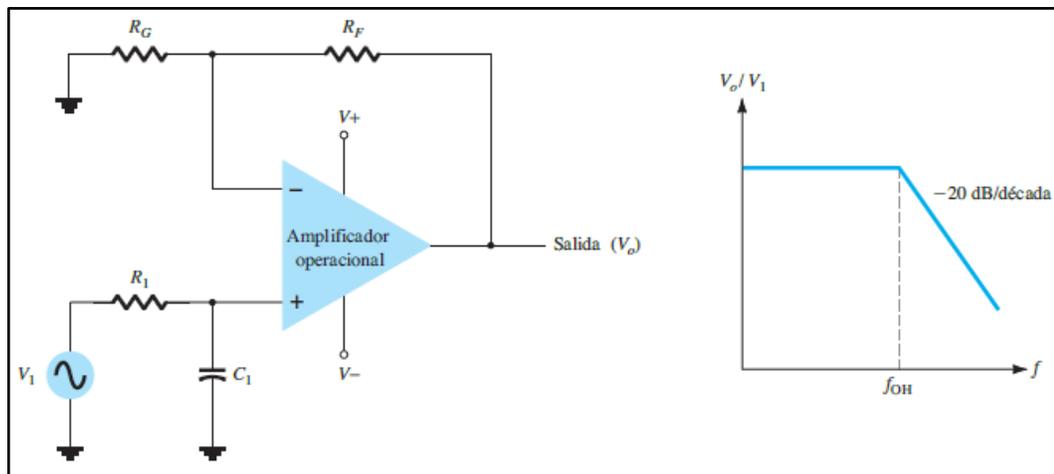
Un filtro pasabajos permite el paso de bajas frecuencias. Está compuesto por un resistor y un capacitor en serie.

Mediante este circuito se obtiene la función de frecuencia de corte que establece el comportamiento físico del circuito de filtrado; en la figura 36 se presenta el circuito RC. Podemos determinar el ancho de banda bajo el cual funcionará el circuito de filtrado, así como la ecuación respectiva para establecer la frecuencia de funcionamiento.

$$(76) \quad f_{OH} = \frac{1}{2\pi RC}$$

$$(77) \quad BW = f_c = f_{OH}$$

Figura 38. **Filtro activo pasabajos en modo no inversor y su respuesta en salida**



Fuente: Boylestad, R. (2009). Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos. p.656

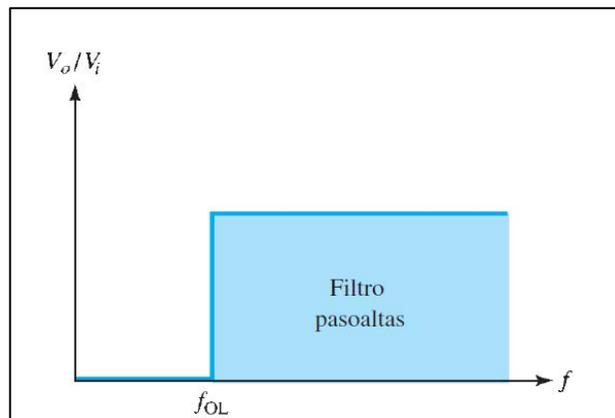
Basados en la configuración de un circuito en modo no inversor, sabemos que para cada valor de frecuencia, donde la salida sea un estado alto, tendremos una ganancia constante, (ecuación 72). Cuando se sobrepasa la frecuencia de corte, la salida se atenúa a razón de -20 dB/década.

$$(78) \quad A_{FPB} = 1 + \frac{R_f}{R_G}$$

2.10.2. Filtro activo pasoaltos

Un filtro pasoaltos proporciona una señal de salida desde una frecuencia de corte f_{OL} hasta una frecuencia muy elevada, que podemos tomar como si fuese un valor infinito. Cualquier valor de frecuencia por debajo de la frecuencia de corte dará como resultado una tensión de salida nula. Este filtro permite pasar señales por arriba de un valor de corte.

Figura 39. **Respuesta del filtro ideal pasoaltos**



Fuente: Boylestad, R. (2009). *Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos*. p.655

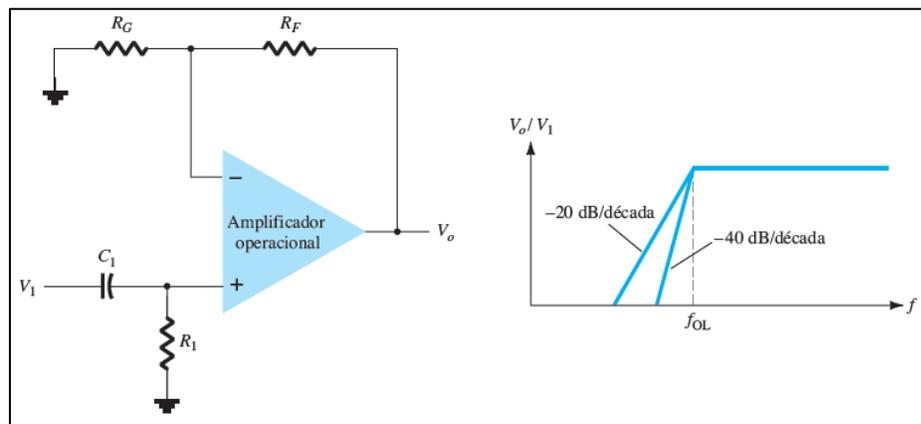
Un filtro pasoaltos permite el paso de altas frecuencias. Está compuesto por un resistor y un capacitor en serie. El orden de los componentes es inverso al circuito de un filtrado pasabajos. Mediante este circuito se obtiene la función de frecuencia de corte que establece el comportamiento físico del circuito de filtrado. En la figura 38 se presenta el circuito RC.

$$(79) \quad f_{OL} = \frac{1}{2\pi RC}$$

Basados en la configuración de un circuito en modo no inversor, sabemos que para cada valor de frecuencia donde la salida sea un estado alto, tendremos una ganancia constante, (ecuación 74). Cuando la señal no alcanza la frecuencia de corte, la salida se atenúa completamente; cuando la frecuencia se acerca al valor de corte, la salida crece a razón de -20dB/década hasta alcanzar el valor de ganancia constante.

$$(80) \quad A_{FPA} = 1 + \frac{R_f}{R_G}$$

Figura 40. **Filtro activo pasoaltos en modo no inversor y su respuesta en salida**



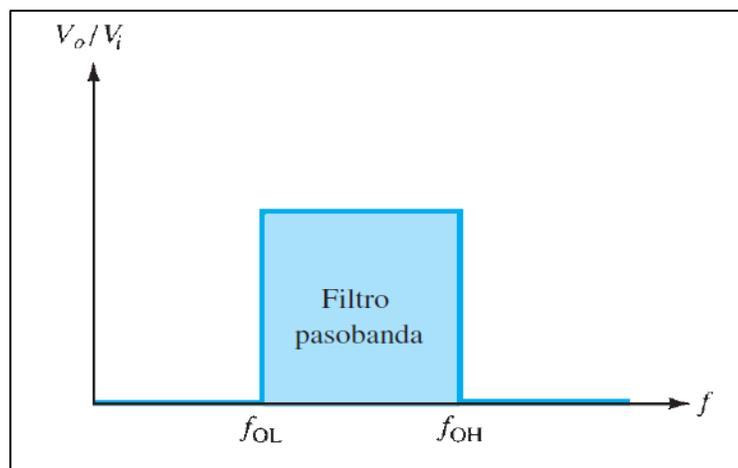
Fuente: Boylestad, R. (2009). *Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos*. p.657

2.10.3. Filtro activo pasobanda

Un filtro pasobanda es la combinación de un filtro pasobajos y un filtro pasoaltos. Un pasobanda permite el paso de una determinada banda, la cual está limitada por dos valores extremos. Podemos definir esto como el paso de señales en un determinado rango de frecuencias de corte inferior f_{OL} y un valor superior f_{OH} .

Un filtro de estas características combina de dos filtros y circuitos diferentes: primero se filtran las frecuencias más bajas y luego las más altas en la señal resultante. De esta manera obtenemos una señal en un determinado rango de frecuencias.

Figura 41. Respuesta del filtro ideal pasobanda



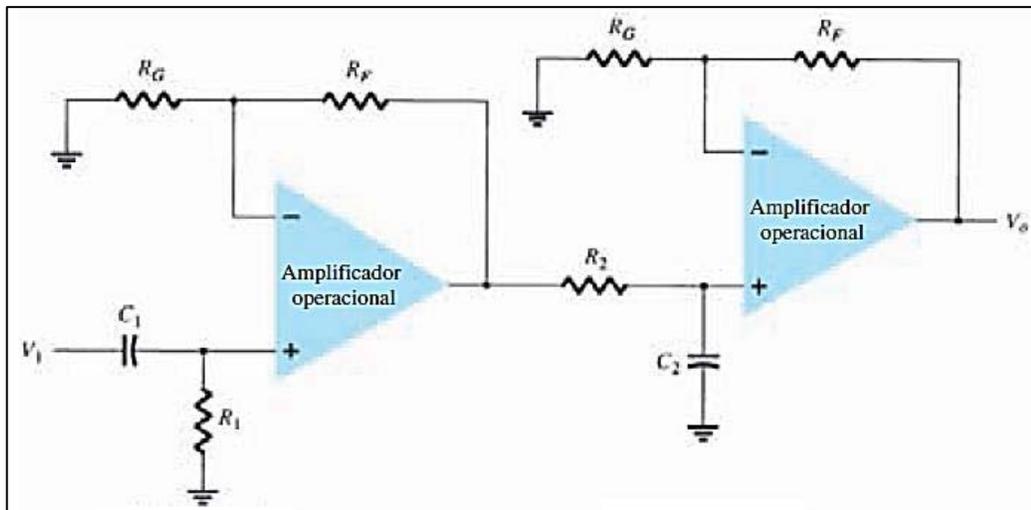
Fuente: Boylestad, R. (2009). *Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos*. p.655

Dado que se deben filtrar primero las frecuencias más bajas, utilizaremos un filtro RC del tipo pasoaltos con una frecuencia de corte, que será la frecuencia inferior del ancho de banda que posee el filtro pasobanda.

Esto dará como resultado una señal de salida con alta frecuencia que será filtrada nuevamente. Ahora se realiza un recorte de las frecuencias más altas mediante un filtro pasabajos con una frecuencia de corte, que funcionará como el límite superior del ancho de banda. El circuito queda configurado tal y como se muestra en la figura 40.

Dará como resultado una señal filtrada con una respuesta alta en salida para un determinado rango de frecuencias.

Figura 42. **Filtro activo pasobanda en modo no inversor**



Fuente: Boylestad, R. (2009). Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos. p.658

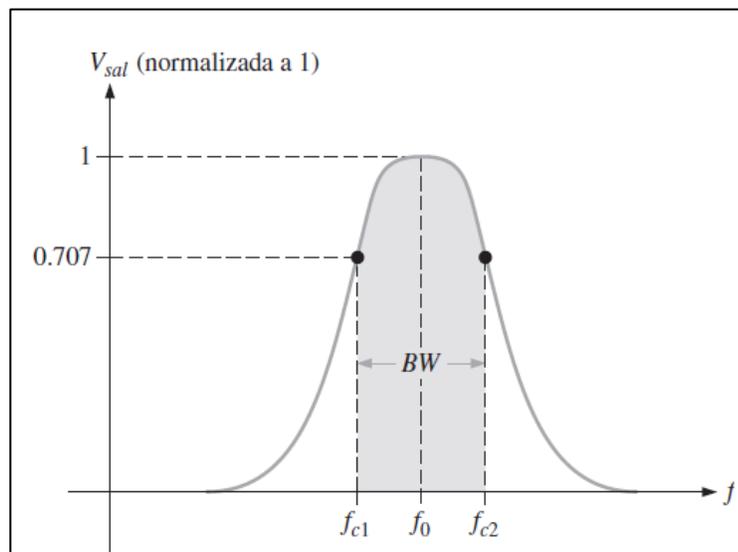
Dado que es la combinación lineal de ambos filtros, podemos observar las frecuencias de corte superior e inferior del pasobanda, para luego determinar el ancho de banda del mismo, (ecuación 77):

$$(81) \quad f_{OH} = \frac{1}{2\pi RC}$$

$$(82) \quad f_{OL} = \frac{1}{2\pi RC}$$

$$(83) \quad BW = f_{OH} - f_{OL} = f_{c2} - f_{c1}$$

Figura 43. **Respuesta en salida filtro activo pasobanda**



Fuente: Floyd, T. (2008). *Dispositivos Electrónicos*. p.759

Podemos determinar el valor de la frecuencia central del ancho de banda en un filtro pasobanda, de la siguiente forma:

$$(84) \quad f_0 = \sqrt{f_{OH} * f_{OL}}$$

La ganancia del sistema no es más que la suma de las ganancias individuales de los filtros que constituyen a este mismo. La ganancia de este circuito de filtrado es:

$$(85) \quad A_{FB} = 2 \left(1 + \frac{R_f}{R_G} \right)$$

Los filtros pasobanda poseen una cualidad especial que se le llama factor de calidad, la cual indica la selectividad del filtro. Cuando un circuito de filtrado tiene un factor de calidad muy elevado, significa que posee un ancho de banda reducido. Esto es una selectividad mejorada.

$$(86) \quad Q = \frac{f_0}{BW}$$

Tabla II. **Tipo de ancho de banda en el filtro pasobanda mediante el factor de calidad**

Factor de calidad	Tipo de ancho de banda
Q < 10	Banda ancha
Q > 10	Banda angosta

Fuente: elaboración propia

2.11. Procesamiento de señales

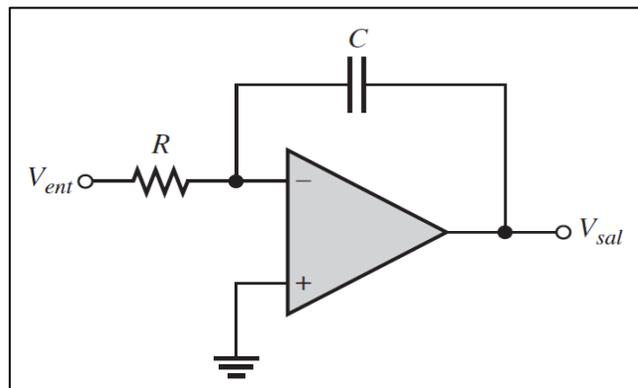
Muchas aplicaciones tienen propósitos generales y especiales, por lo que los amplificadores operacionales poseen también propósitos destacados y se diseñan para desempeñar funciones precisas.

Existen amplificadores operacionales integradores, derivadores, logarítmicos y antilogarítmicos.

2.11.1. Integrador

Matemáticamente, se entiende la integración como un proceso en el que se puede obtener el área bajo la curva definida por una determinada función. Esta función es una señal de tensión que varía en el tiempo. La figura muestra la configuración respectiva para un circuito integrador. Está diseñado mediante un circuito RC, el cual también funciona como un filtro pasabajos. Esto puede ser determinado entendiendo el comportamiento de la reactancia capacitiva ante el cambio de frecuencia; una de las aplicaciones más usadas es como filtro pasabajos en instrumentación médica.

Figura 44. **Integrador basado en amplificador operacional**



Fuente: Floyd, T. (2008). *Dispositivos Electrónicos*. p.678

Para analizar el circuito de un integrador debemos entender cómo se comporta la corriente en la resistencia de entrada, sabiendo que un amplificador operacional posee una tierra virtual entre sus entradas. La corriente que pasa por el resistor R continúa hasta llegar al capacitor C ; de esta manera podemos asumir que la corriente desde la entrada hasta la salida será:

$$(87) \quad I_{\text{entrada}} = I_C = \frac{V_{\text{entrada}}}{R}$$

Ahora debemos determinar el voltaje en el capacitor. Esta tensión es de carácter lineal debido a que la corriente de entrada es constante, por lo que la corriente en el capacitor también lo es; de esta manera se producirá un voltaje continuo en el capacitor.

La conexión positiva del capacitor estará conectada a 0 voltios. Esto se debe al corto circuito producido por la tierra virtual, lo que en consecuencia se refleja como un voltaje negativo en la salida del amplificador operacional que está conectado directamente al borne negativo del capacitor.

A medida que se carga el capacitor el voltaje se reducirá, puesto que la salida dará una tensión negativa. El valor mínimo de voltaje que se obtiene es 0 voltios y el valor máximo será el voltaje del capacitor $-V_c$.

Esta tensión lineal se le conoce como señal rampa de voltaje. Dado que posee la característica de tener una salida negativa, se le llama rampa negativa, la cual se da como consecuencia de un voltaje de entrada constante.

Matemáticamente podemos entender el voltaje de salida de un integrador como una función entrada que es integrada con respecto al tiempo.

$$(88) \quad V_{\text{salida}} = V_c$$

Definamos el voltaje en un capacitor. Sabemos que, para la carga de un condensador, esta es dependiente del voltaje entre sus placas. Ahora se puede obtener una función que exprese el voltaje en función de la carga, la cual varía

en el tiempo. De esto se puede deducir que una variación de carga no es más que la corriente en un conductor, en un determinado tiempo t.

$$(89) \quad Q_c = CV_c$$

$$(90) \quad V_c = \frac{Q_c}{C} = \frac{I_c}{C} t$$

La ecuación 84 define el voltaje en el capacitor dada la corriente que pasa por sus placas. Se ha mencionado que debido a las características del amplificador operacional y su alta impedancia de entrada, la corriente que entra al circuito desde la señal de entrada no sufre variación alguna y continúa su trayecto hasta pasar el condensador conectado a la salida. La ecuación 81 describe lo que se ha mencionado, por lo que la corriente en el capacitor está proyectada por el voltaje de entrada; es decir, un cambio en la tensión de entrada produce un cambio en la corriente del capacitor. Así podemos definir el voltaje de salida del integrador como función de la tensión de entrada.

$$(91) \quad V_c = \frac{V_{entrada}}{RC} t = \int \frac{V_{entrada}}{RC} dt$$

$$(92) \quad \tau^{-1} = \frac{1}{RC}$$

El comportamiento de un circuito integrador es tal y como lo describe una función que es integrada. La función es la señal de entrada multiplicada por una ganancia definida por el inverso de la constante de tiempo, (ecuación 86). Esta función de la tensión de entrada es integrada por el circuito con respecto al tiempo y da como resultado una nueva señal procesada por una integración matemática.

Si la señal de entrada fuese una constante obtendríamos una salida lineal o bien proporcional en la salida, (ecuación 87). Para el siguiente caso, en el que la señal de entrada fuese una rampa, es decir lineal, tendríamos una salida del tipo cuadrático, (ecuación 88).

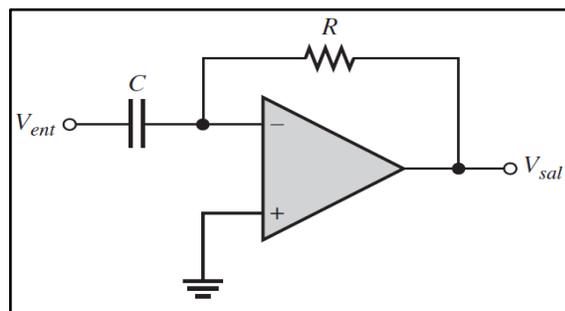
$$(93) \quad V_{salida} = \int \frac{1}{RC} dt = \frac{t}{RC}$$

$$(94) \quad V_{salida} = \int \frac{t}{RC} dt = \frac{t^2}{2RC}$$

2.11.2. Derivador

Como fue analizado en el apartado anterior, un circuito integrador integra las señales de entrada para obtener una señal de salida procesada. De la misma manera lo hace un derivador: este circuito deriva la señal de entrada y da como resultado una nueva señal completamente procesada y modificada, solo que para este caso a la tensión de entrada se le aplica una derivada matemática. En otras palabras, se puede decir que se produce un voltaje de salida proporcional a la razón de cambio de la señal de entrada.

Figura 45. **Derivador basado en un amplificador operacional**



Fuente: Floyd, T. (2008). *Dispositivos Electrónicos*. p.681

El voltaje de entrada es representado como el voltaje del capacitor. Esto se debe al corto circuito producido por la tierra virtual entre las entradas diferenciales del amplificador operacional, por lo que ahora podemos determinar la corriente de entrada sabiendo que el voltaje de entrada es el mismo que en el capacitor. Mediante la ecuación 83, ya fue mencionado que la variación de carga está dada por la corriente que se desplaza en el conductor en un determinado tiempo, de lo cual se tiene que:

$$(95) \quad I_c = \frac{V_c}{t} C$$

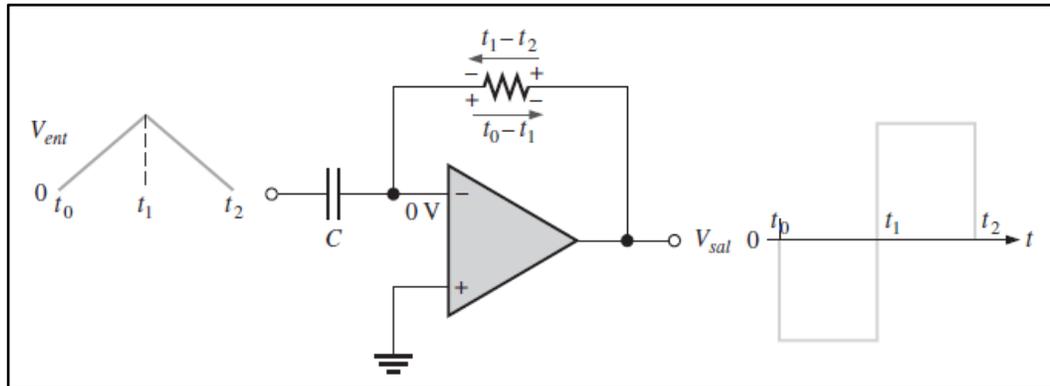
Puesto que la corriente no atraviesa las entradas del amplificador operacional, entonces toda la corriente del condensador pasará a través de la resistencia R. El voltaje de salida será constante e igual al voltaje de la resistencia puesto que esta se encuentra conectada a la tierra virtual del amplificador operacional, por lo que está dado de la siguiente forma:

$$(96) \quad V_{sal} = I_c R = \left(\frac{V_c}{t} C \right) R = -\frac{V_c}{t} RC$$

La salida será negativa cuando se ingrese una señal de entrada que tienda a un valor positivo y, el caso contrario, cuando la señal de entrada tienda a un valor negativo, la salida será positiva.

Esto se debe a que cuando el capacitor se está cargando con la señal de entrada, esta es positiva y da como resultado que la corriente fluya hacia el voltaje de salida con un voltaje negativo en la salida; pero cuando la señal tiende a un valor más pequeño; es decir, se comienza a descargar el condensador, la corriente cambia de sentido, por lo que la fluye en dirección a tierra virtual y se vuelve positiva la salida.

Figura 46. Voltaje de entrada y voltaje de salida en un derivador



Fuente: Floyd, T. (2008). *Dispositivos Electrónicos*. p.682

En la figura 44 podemos observar el comportamiento del voltaje de salida según sea la señal de entrada en un circuito derivador basado en amplificador operacional. Cuando la entrada de rampa posee un valor de pendiente positivo, la salida obtiene un valor constante negativo, y cuando la pendiente tiene una pendiente negativa, la salida obtiene un valor constante positivo. Matemáticamente se puede expresar como la razón de cambio de la señal de entrada con respecto del tiempo.

$$(97) \quad V_{sal} = -\left(\frac{d}{dt} V_c\right) RC$$

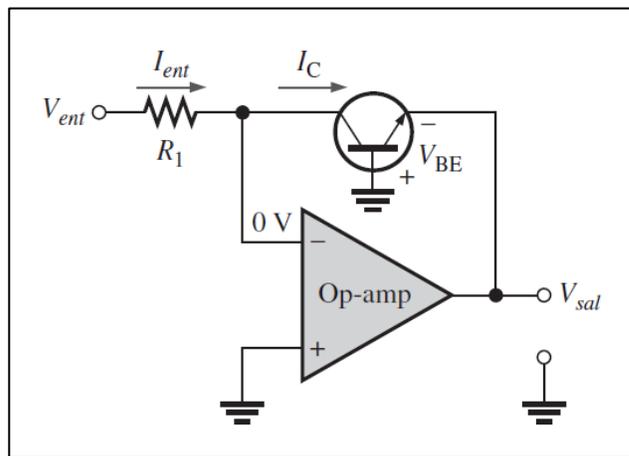
Ahora que conocemos la expresión para un amplificador operacional configurado como derivador, analizaremos lo que sucede con la señal entrada en modo rampa, tanto con pendiente positiva y con pendiente negativa. El resultado es una señal de tensión derivada, dada por el valor de la constante de tiempo τ .

$$(98) \quad V_{sal} = -\left(\frac{d}{dt} t\right) RC = -RC$$

2.11.3. Logarítmicos y antilogarítmicos

Cuando se conocen las propiedades de una red de retroalimentación, se puede manipular una función de transferencia y diseñar una aplicación específica.

Figura 47. **Amplificador operacional en modo logarítmico**

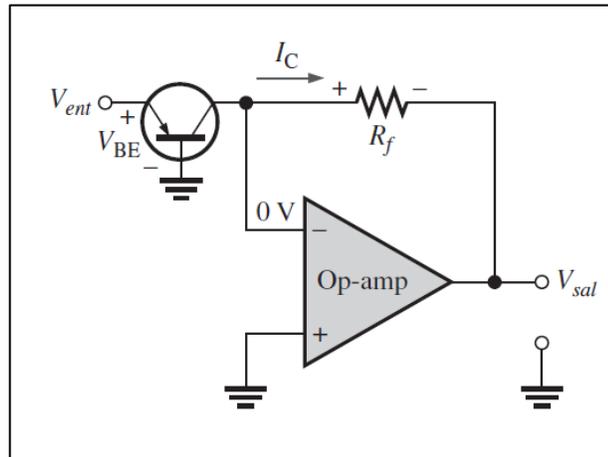


Fuente: Floyd, T. (2008). *Dispositivos Electrónicos*. p.730

Un transistor bipolar posee un voltaje entre base y emisor proporcional al logaritmo natural de la corriente de colector. Esta dependencia es utilizada para circuitos con función de transferencia logarítmica.

La importancia de estos amplificadores destaca en aplicaciones donde el rango dinámico de la señal de entrada es muy elevado; es decir, de alta magnitud. Esta configuración se utiliza para no operar señales de menor amplitud a niveles muy bajos, y trata de evitar la saturación en señales de mucha más amplitud.

Figura 48. **Amplificador operacional en modo antilogarítmico**



Fuente: Floyd, T. (2008). *Dispositivos Electrónicos*. p.731

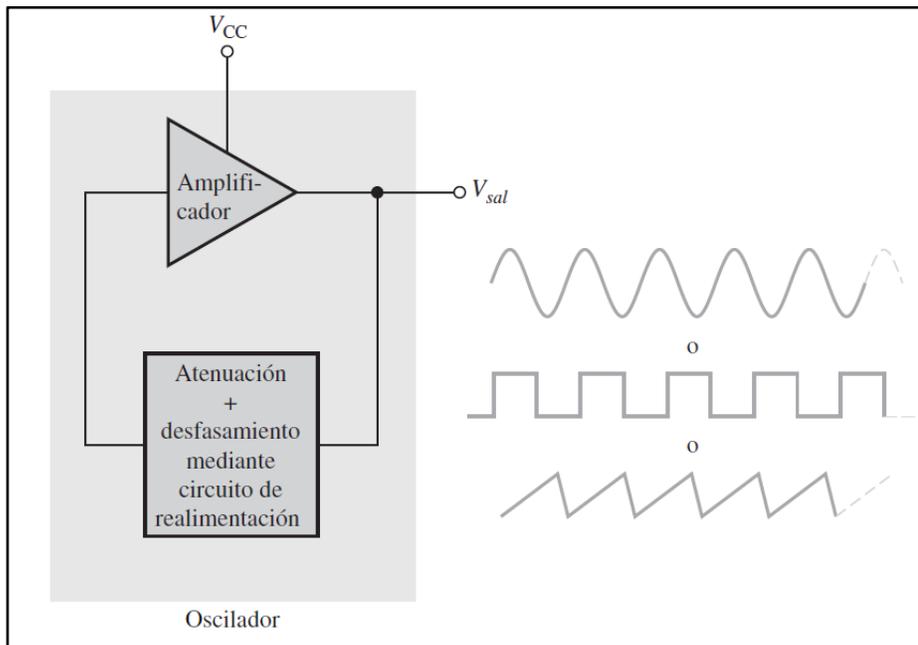
Se puede decir que se realiza una comprensión de rango en la señal, debido a que para señales muy grandes la ganancia es muy pequeña y el caso contrario, cuando la señal es muy baja, la ganancia por su parte es mayor. La respuesta efectiva de un amplificador logarítmico depende del rango en que pueda operar. Matemáticamente podemos decir que, en una escala logarítmica, en cuántas décadas puede operar el dispositivo. Por ejemplo, un rango dinámico de tres y seis décadas es equivalente a decir $1\text{nA} - 1\mu\text{A}$ o bien $1\text{nA} - 1\text{mA}$, por lo que podemos determinar la función de tensión de salida.

Los circuitos logarítmicos basados en un amplificador operacional son dedicados para aplicaciones donde se requiere poca exactitud y no son recomendables cuando se desea tener alta exactitud. Bajo aplicaciones de instrumentación o bioinstrumentación, las funciones logarítmicas se implementan bajo software, por su tiempo de procesamiento. Dadas sus características de aparente linealización logarítmica se pueden realizar multiplicaciones y divisiones de señales analógicas.

2.12. Osciladores

Básicamente, un circuito oscilador convierte energía producida por la fuente de alimentación en una señal con formas de onda periódicas. Un tipo es el oscilador retroalimentado, que regresa parte de la señal sin desfase alguno y dando estabilidad a las oscilaciones en la señal de salida. Las ganancias del circuito de retroalimentación se mantienen en valor unitario y conservan las oscilaciones del mismo. Un circuito oscilador basado en amplificador operacional consta del circuito de retroalimentación positiva con desfase y atenuación; los osciladores son clasificados en circuitos sinusoidales o de relajación, (figura 49).

Figura 49. **Circuito oscilador y formas de onda en la señal de salida**



Fuente: Floyd, T. (2008). *Dispositivos Electrónicos*. p.800

Los sistemas de comunicación utilizan osciladores armónicos o de referencia; es decir, osciladores de cristal, o bien utilizan osciladores de frecuencia variables, los cuales permiten ajustar el valor de operación mediante dispositivos mecánicos o por un voltaje aplicado. Los osciladores disponen de ciertos parámetros de suma consideración, tanto de diseño como de operación:

- Frecuencia: la frecuencia de operación.
- Margen de sintonía: rango ajustable de frecuencia, únicamente para los osciladores de frecuencia variable.
- Eficiencia: el valor relativo de la potencia entregada sobre la potencia que consume.
- Nivel armónico: potencia del N-ésimo armónico, referido al valor de la potencia en su armónico fundamental.
- *Pulling*: variación en la frecuencia de operación al conectar el circuito a una determinada carga.
- *Pushing*: variación en la frecuencia de operación, dada una variación en la tensión de alimentación.
- Ruido de fase: variación instantánea en la frecuencia de operación.

2.12.1. Realimentación positiva

Esta configuración tiene como característica principal que una parte de la señal de salida regresa sin un desfase completo, lo que da como resultado un lazo cerrado en que la señal de salida siempre regresa. Da paso a la amplificación de la misma y se repite el ciclo, por lo que se automantiene y produce una señal senoidal continua. Un oscilador puede configurarse en modo inversor y no inversor, lo que resulta en una señal desfasada 0° y 180° , respectivamente.

Cuando la señal es desfasada 180° se hace necesario utilizar un circuito inversor para acomodar la señal en 0° , para luego ser retroalimentada y mantener la señal sin desfase.

Para que el criterio de oscilación resulte ser efectivo, se debe cumplir dos características principales:

- El desfase en el lazo de realimentación debe permanecer en invariante.

$$(99) \quad \theta_{desfase} = 0^\circ$$

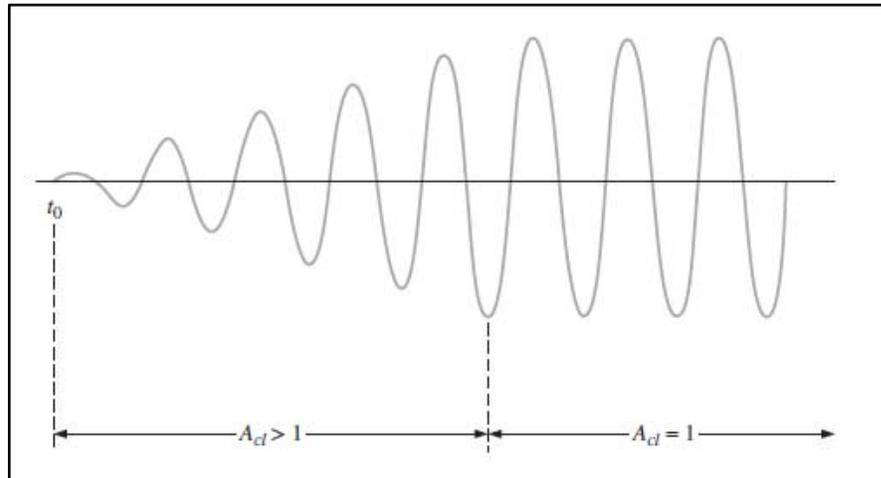
- La ganancia de voltaje del amplificador y la ganancia del circuito de realimentación; es decir, la ganancia del lazo cerrado debe mantenerse en magnitud unitaria.

$$(100) \quad A\beta = 1$$

Inicialmente se desarrolla un voltaje muy pequeño de realimentación positiva debido al ruido eléctrico que produce la red cuando la fuente de alimentación se enciende. El circuito realimentado da una salida con frecuencia igual a la frecuencia de oscilación establecida para entrar en fase con la entrada del amplificador.

Esto produce que la señal realimentada amplifique y refuerce la señal de forma continua, lo que permite que la señal de salida se incremente hasta estabilizarse.

Figura 50. **Estabilidad de un oscilador**



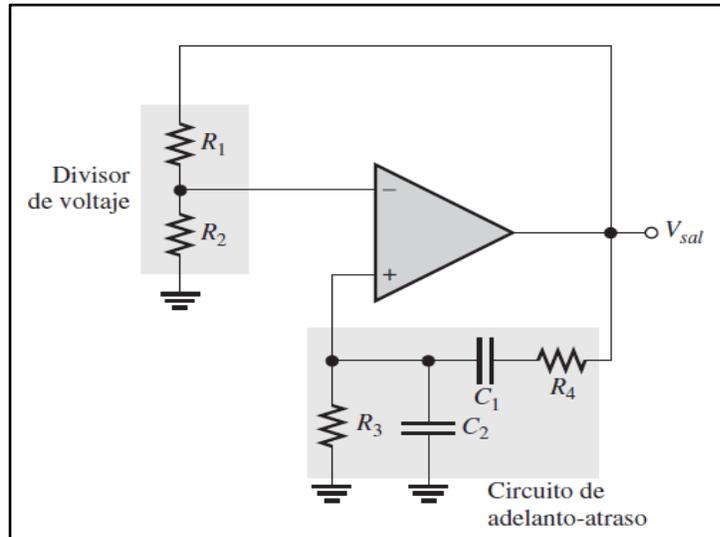
Fuente: Floyd, T. (2008). *Dispositivos Electrónicos*. p.802

2.12.2. **Oscilador de puente de Wien**

Un tipo muy común de oscilador senoidal con realimentación positiva, es el oscilador de puente de Wien. Este posee un circuito delay. La combinación diversa de los dispositivos pasivos del circuito de la figura responde a diferentes frecuencias debido a la configuración de las reactancias capacitivas de la red. En altas frecuencias, el adelanto predomina dada la alta impedancia de condensador C2. Si la frecuencia aumenta esta impedancia se reduce y permite el aumento del voltaje de salida.

Cuando se alcanza una determinada frecuencia el circuito delay decrece la impedancia del condensador C1, y da como resultado una reducción en el voltaje de salida.

Figura 51. **Oscilador de puente de Wien**



Fuente: Floyd, T. (2008). *Dispositivos Electrónicos*. p.804

El circuito delay indica que se obtiene un valor pico en la señal de salida cuando se alcanza una determinada frecuencia de operación, conocida como frecuencia de resonancia del oscilador. El oscilador posee una frecuencia de corte, (ecuación 95), en la cual su tensión de salida posee un equilibrio de fase en 0° y con atenuación en la señal entrada.

$$(101) \quad f_r = \frac{1}{2\pi RC}$$

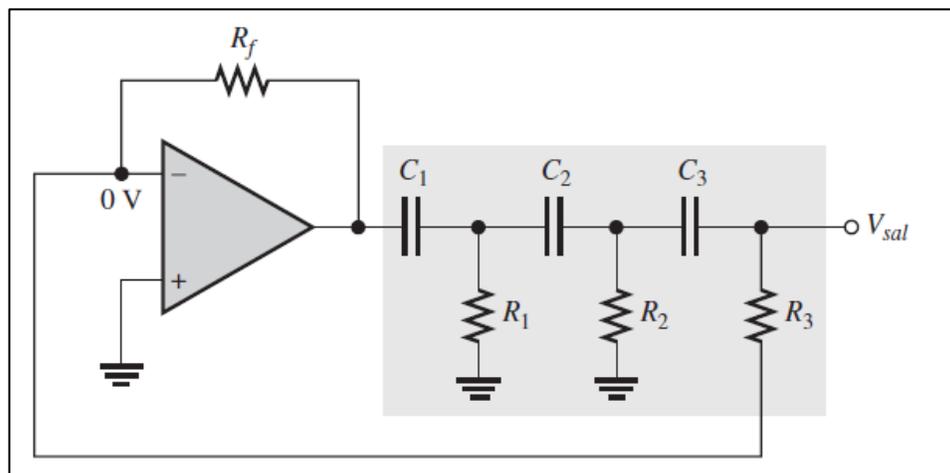
Para que se obtenga una salida sinusoidal periódica estable se debe tener un desfase de 0° en la realimentación. Esto sucede si y solo si se alcanza la frecuencia de resonancia para el cual fue diseñado. Esto se debe a que en dicha frecuencia el circuito delay, atraso o adelanto, la señal de salida se encuentra en un desfase de 0° .

Dado que está configurado como un circuito no inversor, el amplificador operacional no afectará de ninguna manera la señal, más que solo amplificando la misma señal.

2.12.3. Oscilador con corrimiento de fase

Un oscilador con corrimiento de fase es un circuito oscilador sinusoidal compuesto por tres circuitos R en el lazo de realimentación como el de la figura 52. Este produce un corrimiento de fase de aproximadamente 90° . El circuito oscila cuando el desfase entre las tres ramas RC es de aproximadamente 180° . Añadido al desfase que proporciona el circuito del amplificador operacional, este es un oscilador configurado en modo inversor, por lo que la señal se corre 360° , lo que es equivalente a 0° .

Figura 52. **Oscilador de corrimiento de fase con retroalimentación positiva**



Fuente: Floyd, T. (2008). *Dispositivos Electrónicos*. p.808

La configuración del oscilador produce una atenuación tal que matemáticamente cumple con el cociente de la resistencia de retroalimentación R_3 de la tensión de salida desfasada 180° por las configuraciones de RC, sobre la resistencia R_f de retroalimentación de la tensión de salida en el amplificador operacional.

$$(102) \quad B = \frac{R_3}{R_f} = \frac{1}{29}$$

Para satisfacer la condición de la ganancia de lazo mayor que la unidad, la ganancia en el amplificador operacional en modo de lazo cerrado debe ser mayor que 29, para evitar la atenuación. Esta condición es efectiva para cuando los valores $R_1 = R_2 = R_3 = R$ y $C_1 = C_2 = C_3 = C$. De esto se puede obtener la expresión de la frecuencia de resonancia de este circuito:

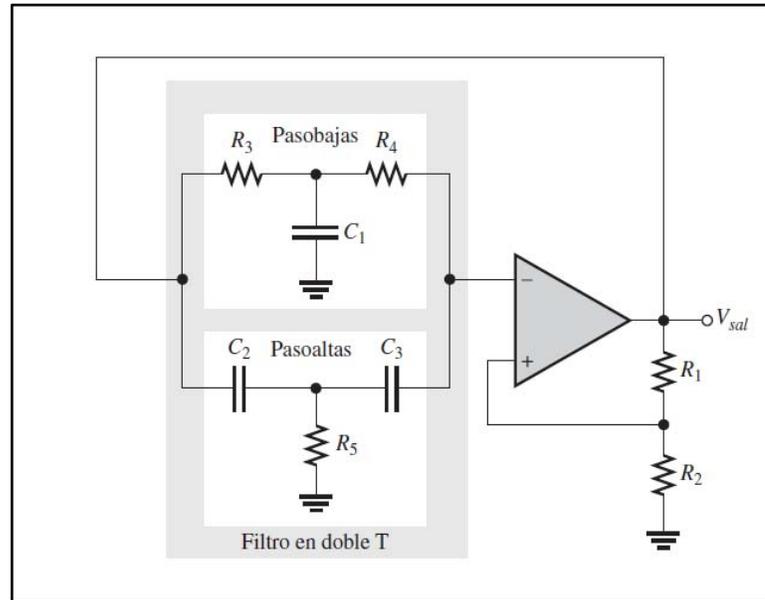
$$(103) \quad f = \frac{1}{2\pi\sqrt{6}RC}$$

2.12.4. Oscilador en doble T

Otra configuración muy destacada para los osciladores con realimentación es el efecto doble T producido por dos filtros tipo RC utilizados en el lazo de realimentación. Están conectados como supresor de banda.

Un supresor de banda realiza el proceso inverso a un filtro pasobanda. La frecuencia central de dicho supresor está predispuesta para ser la frecuencia de resonancia, por lo que la señal se verá atenuada cuando se acerque a esta frecuencia. La figura muestra la configuración respectiva para un oscilador con filtro en doble T.

Figura 53. **Oscilador en doble T basado en amplificador operacional**



Fuente: Floyd, T. (2008). *Dispositivos Electrónicos*. p.811

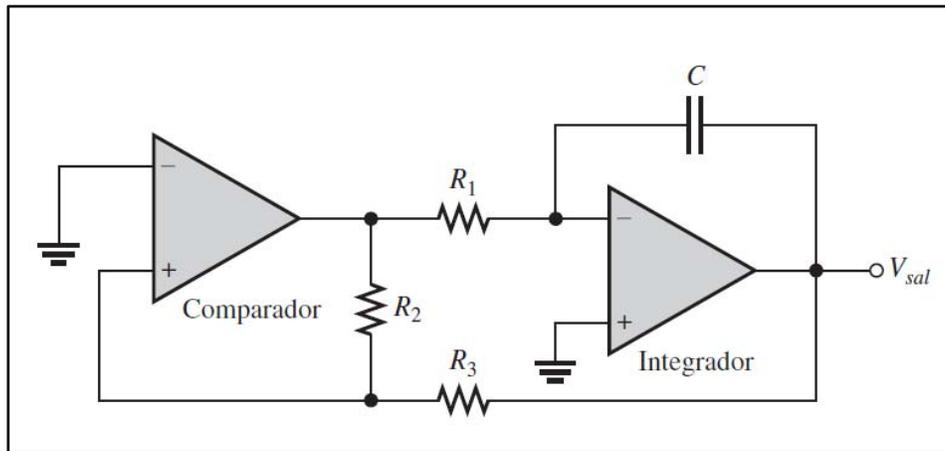
Al analizar el circuito, podemos observar que la retroalimentación positiva permitirá la oscilación, bajo la única condición de que estas oscilaciones existirán cuando la frecuencia en la configuración de doble T sea la frecuencia de resonancia del circuito, puesto que la entrada inversora tendrá un valor de tensión relativamente de cero voltios.

Si la señal de salida del amplificador operacional excede dicho valor de frecuencia, la salida de los filtros tendrá un estado diferente de cero, y la entrada inversora entrará en modo diferencial con la señal de retroalimentación positiva. Producirá que se resten ambas tensiones, y da como resultado una tensión de salida muy baja.

2.12.5. Oscilador de onda triangular

En los apartados anteriores se analizaron los circuitos especializados para el procesamiento de imágenes. Entre ellos destaca el circuito integrador, el cual realiza la operación matemática de integración sobre la función que representa la señal de tensión. Una tensión constante de entrada en el integrador produce una salida lineal de voltaje. Dependiendo de la polaridad que la entrada posea así será la pendiente de la señal de salida de voltaje. Una entrada positiva, produce una tensión negativa, y el caso contrario, a una entrada negativa producirá una salida positiva.

Figura 54. Oscilador de onda triangular



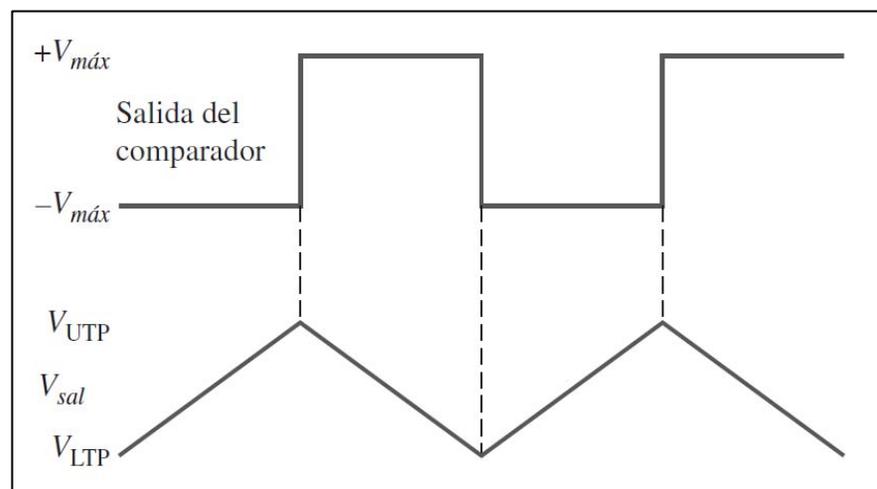
Fuente: Floyd, T. (2008). *Dispositivos Electrónicos*. p.818

Este oscilador está compuesto por dos amplificadores operacionales. Uno de ellos es el circuito integrador y el otro es un comparador de ventana, (figura 54).

El circuito comparador está conectado con un voltaje de referencia de 0 voltios, lo que significa que es un detector por cruce de cero. Este compara la señal de salida del integrador con el voltaje de referencia; cuando la comparación resulta negativa es porque la señal de salida ha alcanzado el LTP. Esta señal es trasladada al circuito integrador, lo que produce una señal de salida lineal ascendente, de pendiente positiva. Cuando la comparación resulta positiva es porque la señal de salida ha llegado al UTP, entonces el integrador procesa dicho valor y da como resultado una salida lineal descendente, de pendiente negativa.

Se puede notar que la retroalimentación positiva se da en el comparador de tensión, por lo que se puede asegurar que este desempeña la función de oscilador, con forma de onda cuadrada, mientras que el integrador se encarga de procesar la señal y convertirla, tal y como se vio en los circuitos convertidores de señal.

Figura 55. **Tensión de salida en comparador e integrador que funcionan como oscilador de onda triangular**



Fuente: Floyd, T. (2008). *Dispositivos Electrónicos*. p.819

La frecuencia de las formas de onda producidas por el oscilador depende directamente del circuito RC propio del integrador, así como de los resistores que establecen la amplitud de la señal retroalimentada. Puede variarse la amplitud de la señal sin afectar la frecuencia de resonancia del circuito.

$$(104) \quad f_r = \frac{1}{4RC} \left(\frac{R_2}{R_3} \right)$$

2.13. Mediciones con puentes

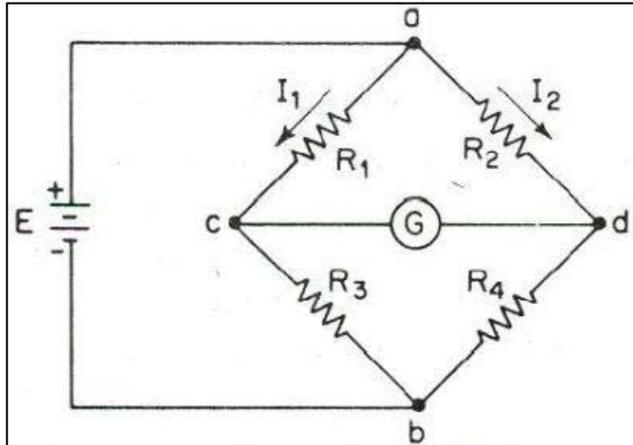
Las mediciones de alta precisión se realizan con dispositivos que poseen poca desviación que estos son llamados puentes. El diseño más sencillo de estos circuitos permite medir un valor de resistencia; mejor dicho, permite medir las variaciones que causa este cambio resistivo en el puente. Los puentes son diseñados para funciones completamente especiales, para medir todo tipo de impedancias.

Los puentes son la interfaz de los transductores para obtener la medición de ciertos componentes. Esta medición se entrega en algunos casos de forma automática.

2.13.1. Puente Wheatstone

Este puente tiene cuatro resistores conectados a una fuente de tensión en conjunto con un dispositivo de medición de energía potencial; es decir, un galvanómetro, (figura 54).

Figura 56. **Puente Wheatstone**



Fuente: Cooper, W. (2000). Instrumentación electrónica moderna y técnicas de medición. p.102

La corriente en el instrumento de medición es dependiente del voltaje en donde se encuentra conectado. El puente está en equilibrio cuando este voltaje aplicado alcanza una tensión total de 0 V. Esta consideración se da cuando el voltaje de los puntos C y D es completamente igual.

$$(105) \quad I_1 R_1 = I_2 R_2$$

Puesto que no existe una corriente en el galvanómetro, se puede concluir que la corriente es la misma en cada ramal, y dada esta condición podemos obtener la expresión de la relación característica de los resistores del puente Wheatstone.

$$(106) \quad I_1 = I_3 = \frac{E}{R_1 + R_3}$$

$$(107) \quad I_2 = I_4 = \frac{E}{R_2 + R_4}$$

Podemos simplificar la ecuación 99 utilizando las expresiones anteriores (ecuaciones 100 y 101), para obtener una expresión que describe la relación que existe en los resistores de forma general. A la ecuación 102 se le llama equilibrio del puente Wheatstone, donde se puede conocer 3 de estos 4 resistores para así determinar el valor desconocido. Esto dado que puede existir una variación resistiva en la medición y mediante esta expresión, (ecuación 103), podemos determinar ese cambio.

$$(108) \quad R_1 R_4 = R_2 R_3$$

$$(109) \quad R_x = \frac{R_2}{R_1} R_3$$

Las mediciones del resistor desconocido R_x son invariantes con respecto al instrumento detector de cero, debido a que el mismo tiene alta sensibilidad para obtener la posición de equilibrio del puente. El puente Wheatstone tiene aplicación directa con mediciones de precisión para resistores de valores relativamente pequeños y muy grandes, de 1 ohm hasta 1 megaohm, aproximadamente. Estas mediciones pueden tener errores relativos a su funcionamiento como:

- Sensibilidad fuera del rango posible para el circuito detector de cero.
- Cambios intrínsecos en los resistores de ambas ramas, efecto Joule, sobrecalentamiento debido a corrientes elevadas, que pueden producir cambios permanentes en los resistores y dañar el equilibrio del puente.

El puente de Wheatstone tiene limitaciones físicas para medir resistencias de muy bajo valor o de muy excesivo valor. Un valor alto reduce la sensibilidad del desequilibrio y produce que la resistencia equivalente de Thevenin tenga valores elevados. Da como resultado una corriente muy pequeña en el galvanómetro, a esto le llamamos el límite superior del puente. Cuando el valor resistivo es tan pequeño comparado con un alambre de conectores obtenemos una resistencia equivalente de Thevenin de bajo valor, dando el límite inferior del puente.

El voltaje de Thevenin del circuito está definido por la diferencia de potencial en las conexiones donde se coloca el galvanómetro o detector de cruce por cero, por lo que se asume que el voltaje equivalente de Thevenin será la diferencia de potencial en los puntos C y D del puente Wheatstone:

$$(110) \quad E_{TH} = E_{CD} = E \left(\frac{R_1}{R_1 + R_3} - \frac{R_2}{R_2 + R_4} \right)$$

$$(111) \quad R_{TH} = \left(\frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3} + \frac{R_2 R_4}{R_2 + R_4} \right)$$

La ayuda que permite el circuito equivalente de Thevenin es una solución práctica para puentes en desequilibrio. Un cambio en el detector de cero puede conllevar el análisis necesario para determinar la deflexión producida en el mismo, así como la sensibilidad del puente desequilibrado. La ecuación 105 presenta la definición de la resistencia de Thevenin, éste resistor equivalente es visto dentro del circuito en los puntos C y D. La conveniencia utilizada para este análisis es que la resistencia interna de la batería es muy baja para poder ser despreciada.

En resumen, el circuito de Thevenin se simplifica en una fuente de tensión con magnitud equivalente a la ecuación 104, en serie con un resistor de magnitud equivalente a la ecuación 105. Cuando se conecta el detector de cero, galvanómetro, en este nuevo circuito equivalente podemos observar una determinada medición en el dispositivo, lo que significa que ha generado una corriente I_g , que no es más que la corriente del galvanómetro. La ecuación 106, muestra el comportamiento de dicha corriente en el circuito serie. Se puede observar la existencia de un resistor R_g . Este valor determina la impedancia propia que posee el detector de cruce.

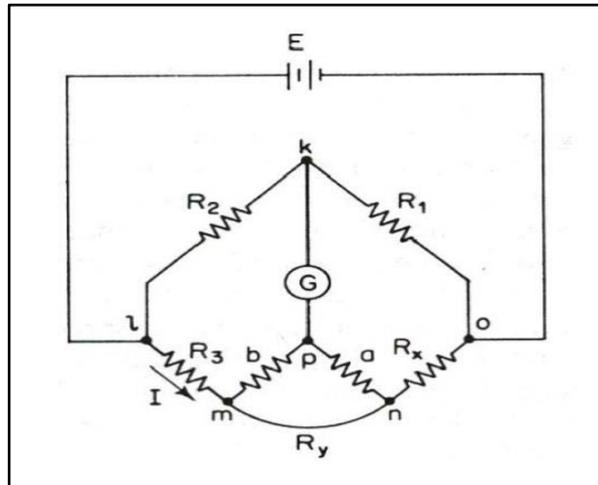
$$(112) \quad I_g = \frac{E_{TH}}{R_{TH} + R_g}$$

2.13.2. Puente Kelvin

El puente Kelvin es una ampliación de exactitud y precisión del puente Wheatstone. Este circuito permite obtener mediciones de valores muy bajos, en varios casos menores a la unidad. Este circuito de medición considera el valor que produce un alambre en el equilibrio del puente, R_y representa el valor de la impedancia del conductor. Considerando la conexión del alambre se puede tener dos posibles circuitos, donde afecta dicha impedancia.

En la figura 55 se puede observar las conexiones del puente Kelvin, las que pueden presentarse debido a la impedancia del alambre son en el punto m o el punto n. Analizando el circuito cuando la conexión se da en el punto m, la resistencia del alambre se suma como parte de la resistencia desconocida R_x y el galvanómetro dará una medición mayor a la esperada en R_x . Cuando la conexión se realiza en el punto n, la resistencia del alambre ahora forma parte de la resistencia R_3 y la medición el galvanómetro será menor a lo esperado en R_x .

Figura 57. **Puente Kelvin**



Fuente: Cooper, W. (2000). *Instrumentación electrónica moderna y técnicas de medición*. p.108

Si el galvanómetro se conecta entre el punto m y n; es decir, el punto p, se logra equilibrar la razón entre cada rama o igualar la razón entre R_1 y R_2 .

$$(113) \quad \frac{R_{np}}{R_{mp}} = \frac{R_1}{R_2}$$

Basados en la ecuación 107 se analiza el comportamiento que añade la resistencia del alambre, para lo cual se describe la ecuación de equilibrio en el puente Kelvin. Dicha ecuación no es más que la descripción extendida del puente Wheatstone, ecuación 103.

$$(114) \quad R_x + R_{np} = \frac{R_1}{R_2} (R_3 + R_{mp})$$

Ahora si se sustituye la relación de resistores de la ecuación 107, en la descripción del equilibrio del puente Kelvin, obtenemos la ecuación respectiva, independiente de la impedancia del alambre.

$$(115) \quad R_x + \left(\frac{R_1}{R_1+R_2}\right)R_y = \frac{R_1}{R_2}\left(R_3 + \left(\frac{R_2}{R_1+R_2}\right)R_y\right)$$

La simplificación del circuito se reduce a una expresión muy conocida y ya antes vista. Esta ecuación describe la conexión que debe realizarse del detector de cero o galvanómetro en la posición central del circuito, la posición p en la figura 55.

2.13.3. Puente doble Kelvin

El nombre puente doble se debe a que el circuito del puente Kelvin posee un conjunto de ramas más. Estos resistores se conectan directamente al detector de cruce por cero en los puntos m y n, analizado en el apartado anterior. Esta conexión conectada a un potencial adecuado producirá un efecto capaz de eliminar el valor de R_y . La relación de las resistencias A y B del nuevo puente deben poseer la misma relación que las resistencias R_1 y R_2 , (figura 56).

El galvanómetro marcará cero voltios cuando el potencial en el punto K sea igual al potencial en P; donde el potencial de P está dado por la condición del nuevo puente agregado A y B. por lo que la tensión del nodo K a L debe ser la misma que hay desde P a L.

$$(116) \quad E_{kl} = \frac{R_2}{R_1+R_2}E = \frac{R_2}{R_1+R_2} I \left[R_3 + R_x + \frac{(a+b)R_y}{a+b+R_y} \right]$$

$$(117) \quad E_{kl} = E_{tmp} = I \left[R_3 + \frac{b}{a+b} \left[\frac{(a+b)R_y}{(a+b)+R_y} \right] \right]$$

$$(118) \quad \frac{R_2}{R_1+R_2} I \left[R_3 + R_x + \frac{(a+b)R_y}{(a+b)+R_y} \right] = I \left[R_3 + \frac{b}{a+b} \left[\frac{(a+b)R_y}{(a+b)+R_y} \right] \right]$$

Con las ecuaciones anteriores, 110 y 111, se puede resolver el sistema y despejar para obtener el valor de R_x a partir de igualación de E_{kl} y E_{tmp} .

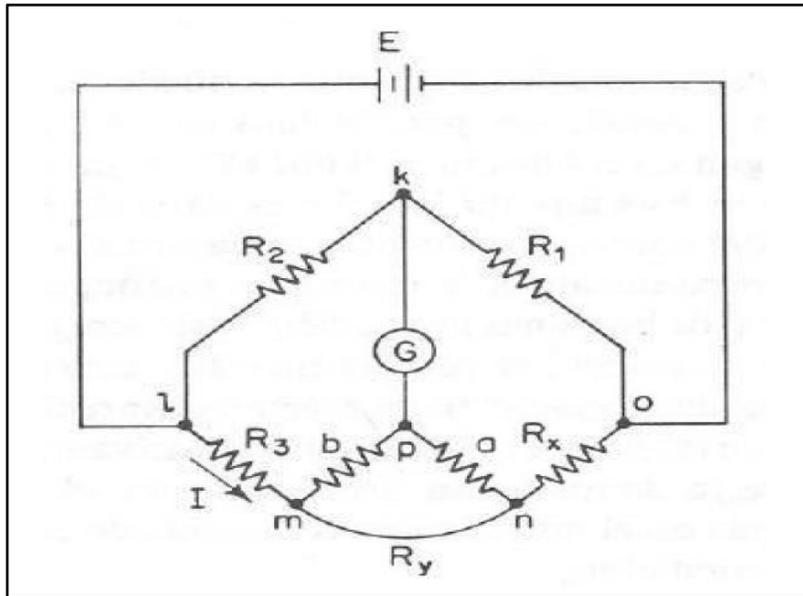
A partir de la ecuación 112 podemos simplificar y despejar hasta definir la solución para R_x y la ecuación 113. Retomando la condición mencionada, que para alcanzar estabilidad en el puente la relación entre a y b debe cumplirse tal que sea $\frac{a}{b} = \frac{R_1}{R_2}$, por lo que la expresión final queda definida en la ecuación 114.

$$(119) \quad R_x = \frac{R_1 R_3}{R_2} + \frac{b R_y}{a+b+R_y} \left(\frac{R_1}{R_2} - \frac{a}{b} \right)$$

$$(120) \quad R_x = R_3 \frac{R_1}{R_2}$$

La ecuación 114 nos traslada a la definición de funcionamiento en un puente Kelvin normal. De esta manera podemos verificar que la resistencia R_y no afecta las mediciones, esto siempre y cuando la relación resistiva se mantenga, ecuación 113.

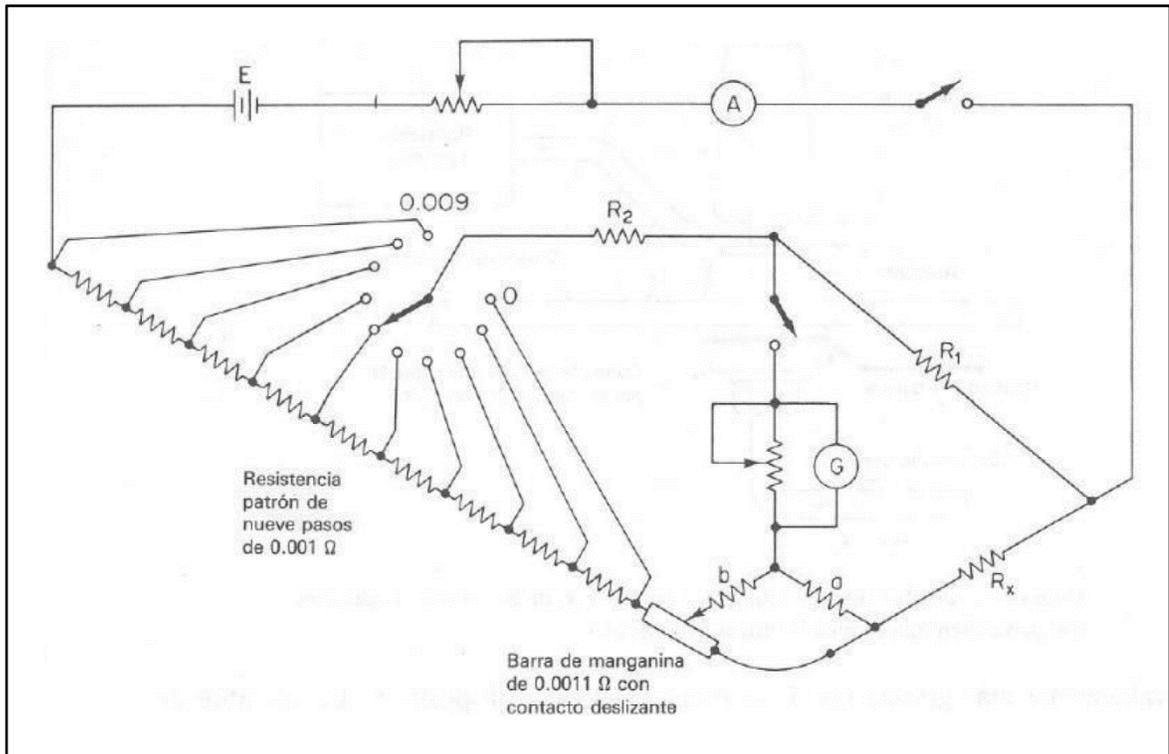
Figura 58. **Puente doble Kelvin**



Fuente: Cooper, W. (2000). *Instrumentación electrónica moderna y técnicas de medición*. p.109

La utilidad principal de un puente Kelvin es la medición de resistencias de muy baja magnitud, muy por debajo de la unidad. En muchas ocasiones las caídas de potencial de contacto pueden resultar en errores, por lo que se utiliza un resistor de calibración, que posee 9 pasos o contactos diferentes, cada uno con un valor resistivo aproximado de $0,001 \Omega$, esto con el fin de calibrar la medición. Cada vez que se presenta una caída de potencial en los bornes del galvanómetro y los resistores del doble puente Kelvin a y b se puede colocar el resistor “patrón” para ajustar la nueva referencia en la medición; el circuito con resistor de contactos se muestra en la figura 57. Esta modalidad del resistor “patrón” se utiliza para ajustar el cruce de cero en el galvanómetro, ya que cada variación en R_x altera la caída de potencial en los contactos, por lo que surge la necesidad de reajustar el detector a la escala equivalente de cero voltios.

Figura 59. **Puente doble Kelvin de ajuste y calibración con resistor “patrón”**



Fuente: Cooper, W. (2000). *Instrumentación electrónica moderna y técnicas de medición*. p.111

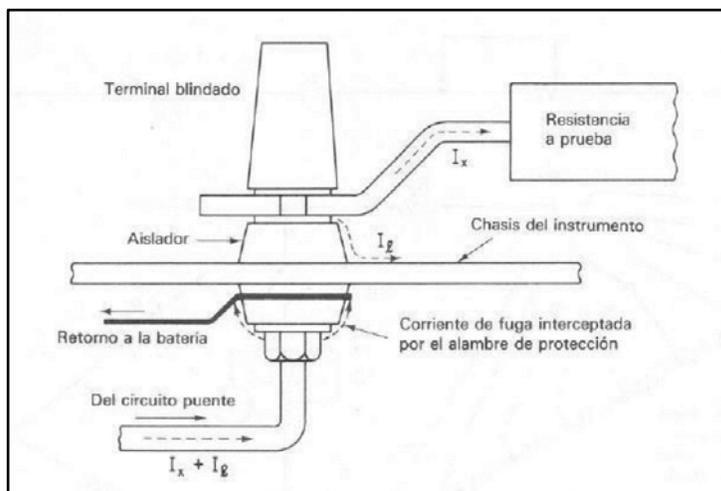
2.13.4. Puente de Wheatstone con protección

Las mediciones de dispositivos con alta impedancia como el aislante dedicado en un cable son del orden de megaohms ($M\Omega$); estos valores son muy elevados para poder ser medidos por un puente Wheatstone habitual. Dado que son resistores de alta oposición de corriente pueden sufrir de corrientes de fuga sobre este al ser conectado a las terminales del puente.

Una corriente de fuga puede causar malas mediciones en el detector de cero. Esto sucede puesto que se necesita un voltaje considerablemente alto para obtener una deflexión lo suficientemente sensible para ser medida y produce las corrientes de fuga.

En diversos circuitos las corrientes de fuga se eliminan con circuitos de protección. El principio del lazo de protección se da debido a que la corriente de fuga que se desplaza sobre la superficie del aislante se suma con la corriente que se encuentra en la medición R_x . Dicha corriente total puede llegar a ser mucho mayor que la corriente real del dispositivo. Es ahí donde la protección entra en juego con un alambre de protección la corriente de fuga es desviada hacia el chasis para luego llegar a los bornes de alimentación. La corriente de fuga es disipada en muchos casos a tierra con el alambre de protección. Este alambre está colocado sobre toda la superficie aislante de la terminal y se conecta directamente al borne de la alimentación.

Figura 60. **Protección en el dispositivo de medición en circuito puente**



Fuente: Cooper, W. (2000). *Instrumentación electrónica moderna y técnicas de medición*. p.112

La protección busca que la corriente de fuga no entre al circuito puente, puesto que dicha corriente puede dañar la configuración del mismo, desestabilizar el puente y proporcionar una medición completamente errónea de la esperada. La conexión del alambre de protección puede ser aplicable en cualquier circuitería interna de una conexión puente para reducir las fugas dentro del mismo.

2.14. Introducción a la metrología

Las magnitudes físicas pueden obtener representaciones numéricas basadas en mediciones directas o indirectas. Esta obtención permite la manipulación de valores para mejorar diseños o implementaciones mediante cálculos efectivos y eficaces, que permiten al ingeniero profesional obtener el mejor desempeño de sus proyectos. No obstante, las mediciones de magnitudes físicas permiten estudiar en forma efectiva el desarrollo y comportamiento de las mismas.

La medición es un método o proceso de comparación directo o indirecto; con o sin cálculos de por medio, en el que se ejecuta un análisis entre una experimentación que llamamos medición y un valor teórico esperado o una medición previamente realizada. El fin es obtener las variaciones o cambios con respecto a dicha referencia. Las mediciones permiten determinar errores en los diferentes métodos de experimentación.

Los diferentes tipos de errores difieren por el método en el que se obtiene la medición. Puede ser producido por mala obtención de la medida o errores intrínsecos de los diferentes instrumentos utilizados en la misma. Las mediciones se clasifican de la siguiente manera:

- Medición directa: describe la medición real, se realiza con diferentes instrumentos. Se obtiene una determinada medida en magnitud, incerteza y unidades respectivas propias del instrumento. Los dispositivos de medida pueden tener factores de escala o linealización para manejar las mediciones de ciertos fenómenos en valores adecuados.
- Medición indirecta: como su nombre lo describe, se obtiene la medida de una forma indirecta; es decir, sin utilizar un instrumento directamente para obtener el valor de la magnitud física. Este tipo de medición se caracteriza por realizar la medición mediante cálculos matemáticos. Se realizan dos mediciones directas que luego serán aplicadas a un cálculo que dará como resultado la medición de interés. A esto le llamamos de forma indirecta.

2.14.1. Metrología eléctrica

Se encuentra bajo la definición de la rama de la metrología encargada de medir todas aquellas magnitudes relacionadas con electricidad y sus campos aplicados a la instrumentación. Estas herramientas implementadas en dichos campos facilitan el desarrollo de la instrumentación eléctrica, crean y construyen dispositivos y aparatos de mayor rendimiento para mejorar la adquisición de datos. Muchos dispositivos funcionan bajo determinados principios de electrodinámica y electromagnetismo.

2.14.2. Campo de la metrología eléctrica

Las diversas mediciones eléctricas abarcan campos muy extensos de los fenómenos físicos asociados con el electromagnetismo, resaltan las mediciones de corriente, tensión, resistencia, reactancia y medición para semiconductores. Las mediciones se realizan aplicando principios de electrodinámica, basados en la Ley de Ampere y la inducción electromagnética de Faraday.

2.14.2.1. Mediciones de tiempo y frecuencia

Las variaciones de magnitudes eléctricas pueden ser percibidas por instrumentos diseñados para interpretar las mismas desde diferentes puntos de vista, a través de las variaciones de tiempo en las que la señal se desarrolla, o bien mediante mediciones de frecuencia según sea la potencia de la señal en un determinado ciclo, o repetición de la misma señal en una unidad de tiempo.

A partir de estos dos parámetros se puede obtener mediciones variadas para diferentes magnitudes eléctricas, como tensión, o corriente. A través de una medición de tiempo podemos observar la forma de onda de una señal y la continuidad de la misma. Si se obtiene mediciones de frecuencia para dicha señal se puede apreciar la densidad que posee en un determinado conjunto de frecuencias.

2.14.2.2. Mediciones electromagnéticas

Las mediciones electromagnéticas abarcan las características principales de señales eléctricas y magnéticas. Estas son medidas mediante diferentes dispositivos como sensores, los cuales se adecuan para percibir y determinar las características propias de las señales electromagnéticas.

Básicamente, una medición de este tipo consiste en obtener datos precisos y correctos. Concentran la adquisición de datos en evitar desacople de los instrumentos, atenuación, reflexión y refracción, debido a que las señales electromagnéticas están dispuestas a sufrir cambios en sus propiedades si el sistema de medición no es adecuado. Las mediciones electromagnéticas se pueden concentrar en determinar medidas banda ancha o un rango determinado de frecuencias.

2.14.3. Instrumentos de lectura

La diversidad de instrumentos de medición eléctrica permite obtener datos adecuados y bastante precisos para determinar el comportamiento de las magnitudes físicas correspondientes, mediciones de corriente, resistencia, capacidad y tensión, entre otros.

La construcción y diseño de estos aparatos y dispositivos se concentra en la constitución de las señales de interés, evitar caídas de tensión, flujo de corriente parásita, capacitancia entre materiales aislantes. El diseño se basa en no tener pérdidas de información para obtener alta precisión en cada medida que se realice.

2.14.3.1. Instrumentos electrométricos

Los instrumentos electrométricos son correspondientes a la gama de dispositivos especificados para realizar mediciones eléctricas y electrónicas. Son diseñados bajo un conjunto de parámetros formales y sistemáticos. Al cumplir con las unidades de medición adecuadas en cada fenómeno físico para el cual fueron construidos, permiten al usuario tener datos precisos de magnitudes estandarizadas para disponer de estas en un determinado campo.

Para las diversas mediciones eléctricas, cabe destacar y definir zonas de interés para mediciones adecuadas, donde los parámetros pueden ser mucho más accesibles. Esto permite al profesional obtener mejoras en diseños, construcción e implementación como lo son:

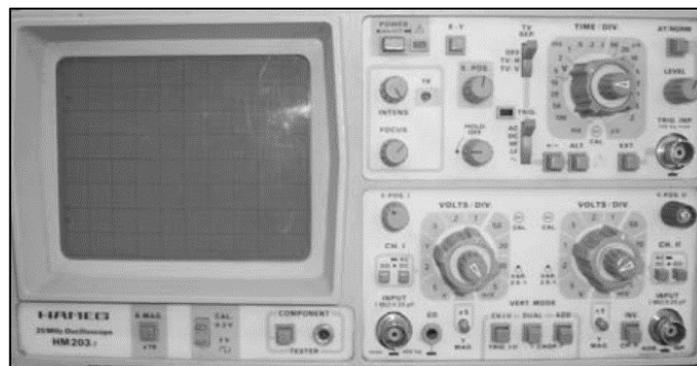
- Reducción de errores
- Reducción de riesgos y fallas
- Mejora en la eficiencia de los sistemas

Los instrumentos son diseñados para medir fenómenos de tiempo y frecuencia, en diversas circunstancias y aplicados a diversidad de sistemas, bajo acoplamiento, para no dañar los dispositivos de medición.

2.14.3.1.1. Osciloscopio

Este instrumento permite medir de forma gráfica ciertos aspectos y parámetros eléctricos de las señales variables en el tiempo. El eje vertical permite medir el voltaje de la señal y el eje horizontal su comportamiento a través del tiempo. Estos dispositivos se pueden encontrar en forma analógica y digital. La diferencia de estos recae en las técnicas de medición y aplicación para obtener las mediciones.

Figura 61. Osciloscopio analógico



Fuente: Fundación San Valero. (2016). *Osciloscopios*. Recuperado en http://profesores.sanvalero.net/~arnadillo/Documentos/Apuntes/Analogica/UD2_Instrumentos%20de%20medida/Presentacion%20Osciloscopio.pdf.

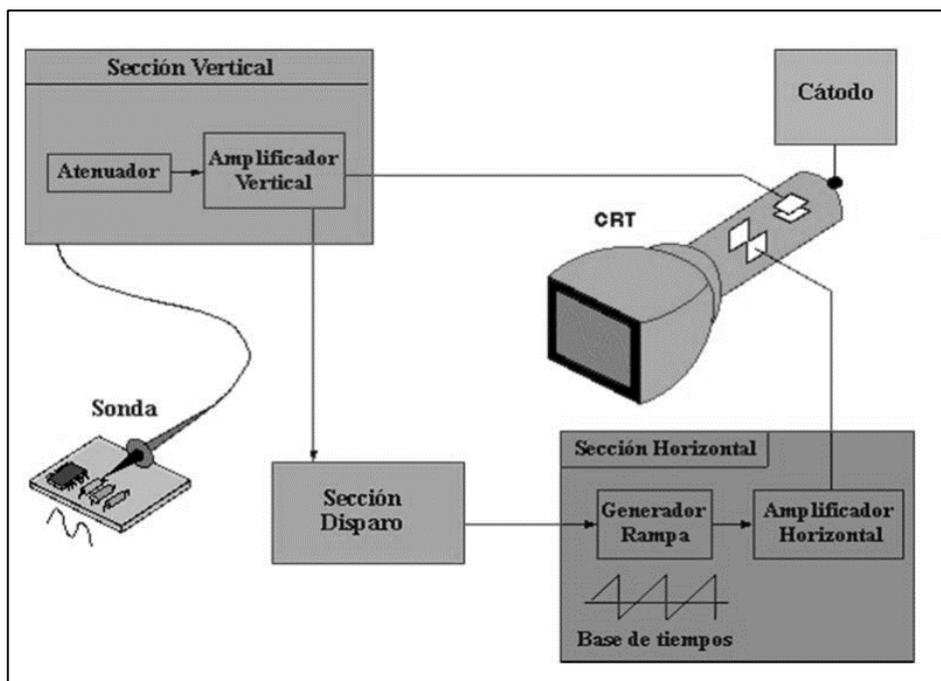
Los osciloscopios analógicos permiten medir de las variaciones rápidas y fluctuaciones que se producen en las señales, mientras que los osciloscopios

digitales permiten visualizar y estudiar los momentos aleatorios que presentan las señales.

Las mediciones más generales de un osciloscopio son:

- Determinar el periodo y voltaje de la señal.
- Observar indirectamente la frecuencia de la señal.
- Determinar las componentes DC y AC de las mismas.
- Medición de fase entre señales continuas del tiempo.
- Obtener y discrepar el ruido eléctrico en una señal.

Figura 62. **Funcionamiento de un osciloscopio**



Fuente: Fundación San Valero. (2016). *Osciloscopios*. Recuperado en http://profesores.sanvalero.net/~arnadillo/Documentos/Apuntes/Analoga/UD2_Instrumentos%20de%20medida/Presentacion%20Osciloscopio.pdf.

2.14.3.1.2. Analizador de espectro

Tomando como referencia el análisis matemático de Fourier — donde todas las señales eléctricas pueden ser representadas como una suma de señales de diferente frecuencia, pero son múltiplo de la frecuencia fundamental; es decir, la frecuencia de la señal principal — este dispositivo, al igual que el osciloscopio, permite medir de forma gráfica los valores eficaces o de potencia de la señal en determinados rangos o valores de frecuencia.

Con el analizador de espectro se pueden realizar medidas de:

- Medidas de la frecuencia de una señal, separación y rangos de frecuencias.
- Medidas de potencia absoluta y relativa en valores discretos de frecuencia.
- Medición de distorsión lineal y no lineal, cuando se analiza su comportamiento antes y después de pasar por un sistema de filtrado.
- Oscilaciones, ruido de fase y estabilidad de frecuencias.

2.14.3.2. Galvanómetros

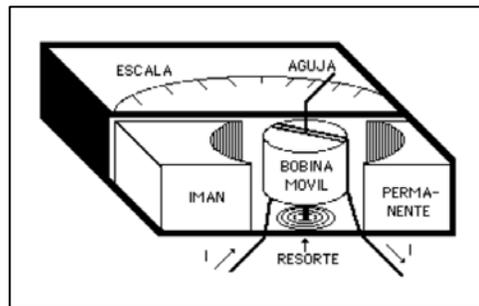
Es un dispositivo de medición que consta de una aguja en movimiento que se adecua a la magnitud que se mide. Esto es resultado de la deflexión de la aguja cuando por ella circula una determinada corriente, la cual es una proporción directa de la magnitud que está midiendo. Teóricamente, su operación está basada en la interacción de una corriente y un campo magnético fijo.

El galvanómetro está constituido por las siguientes partes:

- Bobina móvil: se encuentra en la aguja y es donde la corriente de interés toma efecto.

- Resorte: se encarga de mantener el equilibrio en el dispositivo.
- Imán permanente: fuente de campo magnético, se encuentra fijo dentro del galvanómetro y tiene la característica de interactuar con el campo magnético que produce la bobina móvil.
- Aguja: indicador de la medición, posee alta movilidad y se encuentra con la bobina móvil.
- Escala: indicador visual del rango de mediciones.

Figura 63. **Constitución física de un galvanómetro**



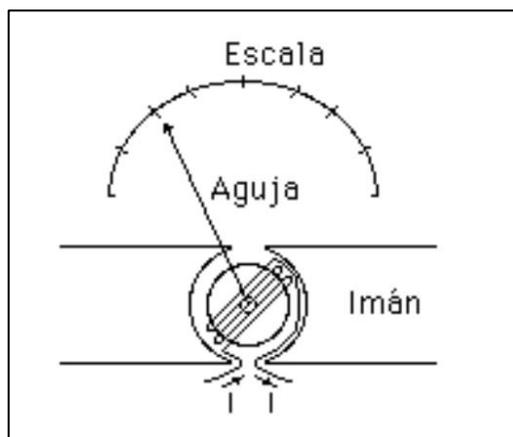
Fuente: Universidad Simón Bolívar. (2019). *Laboratorio de Electrónica*. Recuperado en http://www.labc.usb.ve/paginas/mgimenez/Lab_Circ_Electronicos_Guia_Teorica/Cap5.pdf

Cuando una corriente ingresa al galvanómetro pasa directamente por la bobina, la cual es energizada y como resultado produce un campo magnético. En ese momento, el campo magnético producido por la bobina se pone en interacción con el campo magnético del imán permanente. El campo magnético resultante ejerce una fuerza sobre la bobina móvil y le produce un torque orientado en una determinada dirección.

El movimiento la bobina no es deliberado, ya que se encuentra ajustado al resorte. Cuando la corriente cesa sobre la bobina el resorte le regresa a una posición de equilibrio o una posición referencial.

La interpretación de la medición se lleva a cabo mediante la escala. La aguja que alcanzó una determinada posición angular indica el valor de la corriente o tensión que se aplica. El ángulo o posición angular es proporcional a la magnitud de la medición.

Figura 64. **Medición en un galvanómetro**



Fuente: Universidad Simón Bolívar. (2019). *Laboratorio de Electrónica. Recuperado en* http://www.labc.usb.ve/paginas/mgimenez/Lab_Circ_Electronicos_Guia_Teorica/Cap5.pdf

El diseño de mecánica asociada a la bobina móvil está sujeta a los materiales con los que se construya. Se busca que estos posean baja fricción en el eje de rotación para obtener una medición mucho más rápida y precisa.

Las aplicaciones más elementales y de uso continuo para un galvanómetro son las siguientes:

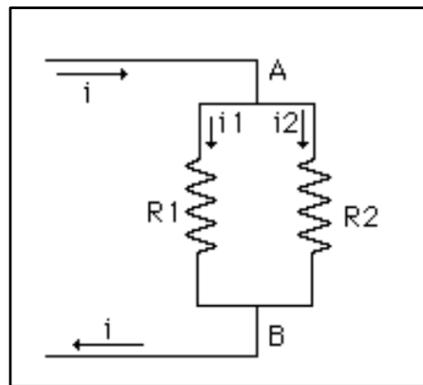
- Voltímetro de corriente directa
- Amperímetro de corriente directa
- Medidor de resistencia, óhmetro.

2.14.3.2.1. Amperímetros

Estos dispositivos centran su aplicación en la medición de la intensidad de flujo de electrones en el tiempo; es decir, que dispone su aplicación en la medición de corriente eléctrica. Con ellos podemos medir corriente a través de líneas de transmisión, cables, transformadores, fuentes de alimentación, entre otros.

El diseño de estos galvanómetros de corriente toma base en las capacidades de corriente que se medirán. Para ello realizan la medición en un divisor de corriente interno.

Figura 65. **Divisor de corriente**



Fuente: Universidad Simón Bolívar. (2019). *Laboratorio de Electrónica*. Recuperado en http://www.labc.usb.ve/paginas/mgimenez/Lab_Circ_Electronicos_Guia_Teorica/Cap6.pdf

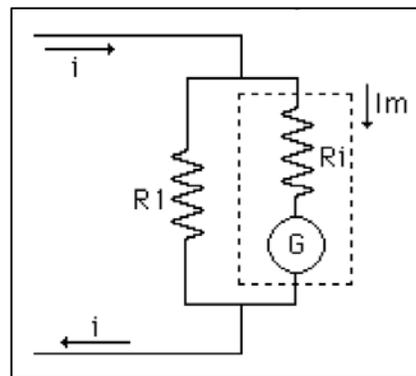
La corriente entra en el nodo A, como se ve en la figura 63, y circula a través de ambas resistencias. En este punto se divide en ambas ramas, donde la magnitud de cada corriente derivada será una proporción del valor de dicha resistencia y el voltaje aplicado en los dos A y B. Las corrientes están descritas por las siguientes ecuaciones del divisor de corriente:

$$(121) \quad i_1 = \frac{R_2}{R_1+R_2} i$$

$$(122) \quad i_2 = \frac{R_1}{R_1+R_2} i$$

Donde la corriente máxima de nuestro amperímetro es la corriente i_2 , la cual nos permite determinar la resistencia de diseño en la cual nuestro galvanómetro medirá de 0 amperios hasta dicho valor máximo i_2 . Para analizar el diseño de nuestro amperímetro delimitamos ahora el circuito interno del mismo.

Figura 66. **Amperímetro diseñado con divisor de corriente**



Fuente: Universidad Simón Bolívar. (2019). *Laboratorio de Electrónica*. Recuperado en http://www.labc.usb.ve/paginas/mgimenez/Lab_Circ_Electronicos_Guia_Teorica/Cap6.pdf

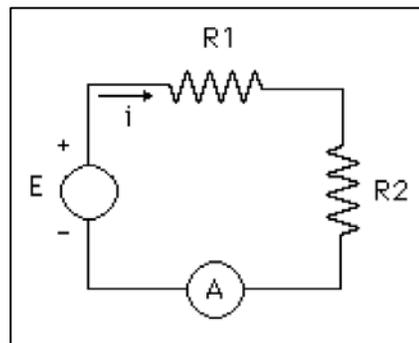
Podemos observar, en la figura 64, a nuestro circuito adecuado para el diseño del galvanómetro de corriente para una i_{max} .

$$(123) \quad i_{max} = \frac{R_1}{R_1+R_i} i_{in}$$

$$(124) \quad R_1 = \frac{R_i i_{max}}{i_{in} - i_{max}} i_{in}$$

Las ecuaciones anteriores permiten diseñar un galvanómetro de corriente para medir flujos de carga entre 0 amperios hasta i amperios, con un valor de corriente nominal de i_{max} para operación. Tiene una resistencia interna y está conectado a una resistencia de ajuste en paralelo, de tal forma que cuando la corriente total incidente i llegue al instrumento, la corriente que pase por el galvanómetro sea realmente i_{max} . El divisor de corriente se encarga de proteger la corriente que entra al galvanómetro.

Figura 67. **Medición en serie con el amperímetro**



Fuente: Universidad Simón Bolívar. (2019). *Laboratorio de Electrónica*. Recuperado en http://www.labc.usb.ve/paginas/mgimenez/Lab_Circ_Electronicos_Guia_Teorica/Cap6.pdf

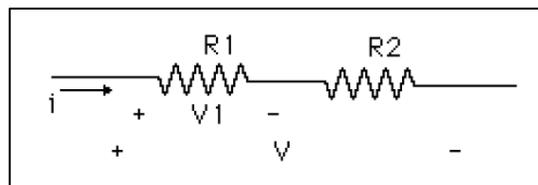
La medición de corriente con un amperímetro se realiza en una forma tal que permita obtener el valor correcto de corriente a través de un componente electrónico. Este se debe conectar en serie al punto de interés (figura 65) y ahora, conociendo las características de diseño de uno, debemos seleccionar el mejor amperímetro para medir corrientes en determinado rango y así evitar dañar el galvanómetro.

Otro factor importante en las mediciones del amperímetro es tener en cuenta el valor de la resistencia interna, ya que, si esta es lo suficientemente grande en comparación con el punto de medición, podemos alterar considerablemente el valor de la corriente y obtendríamos una medición errónea o completamente equivocada.

2.14.3.2.2. Voltímetros

Un voltímetro, al igual que un amperímetro, posee una aplicación dedicada. Su utilidad se centra en la medición de voltajes o caídas de tensión. Estos pueden medir voltajes en un rango específico. Su diseño se basa en la función de un divisor de tensión.

Figura 68. **Divisor de tensión**



Fuente: Universidad Simón Bolívar. (2019). *Laboratorio de Electrónica*. Recuperado en http://www.labc.usb.ve/paginas/mgimenez/Lab_Circ_Electronicos_Guia_Teorica/Cap6.pdf

En el circuito de la figura 66 se describe dos resistores en serie, en los cuales pasa una corriente de igual magnitud y sentido.

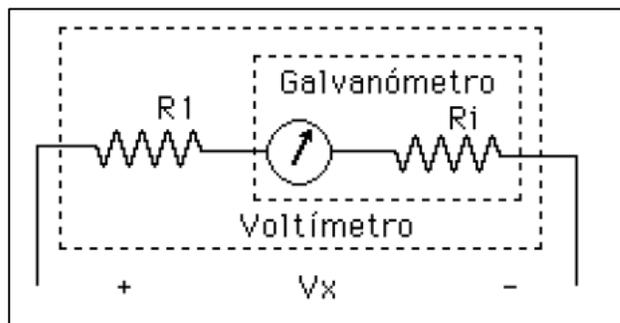
Cada resistor posee una determinada caída de tensión, en proporción con el valor resistivo de cada una.

$$(125) \quad V = (R_1 + R_2) i$$

$$(126) \quad v_{R2} = \frac{R_2}{(R_1+R_2)} V$$

De tal manera, podemos diseñar un voltímetro conociendo el comportamiento de un divisor de tensión, puesto que el galvanómetro debe tener un valor máximo de tensión aplicado en sus terminales.

Figura 69. **Voltímetro diseñado con divisor de tensión**



Fuente: Universidad Simón Bolívar. (2019). *Laboratorio de Electrónica*. Recuperado en http://www.labc.usb.ve/paginas/mgimenez/Lab_Circ_Electronicos_Guia_Teorica/Cap6.pdf

El valor de la primera resistencia debe ajustarse a modo que la tensión en el galvanómetro tenga un límite máximo de operación sin dañar al dispositivo.

$$(127) \quad V_{max} = \frac{R_{int}}{(R_1+R_{int})} V$$

Por lo que, una vez establecido el valor del voltaje máximo nominal en el galvanómetro y su resistencia interna, podemos determinar el valor de la resistencia que acompañará a este en el voltímetro. Cabe resaltar que esta resistencia se utiliza para proteger y estabilizar las mediciones del voltímetro. El valor de la primera resistencia queda determinado por:

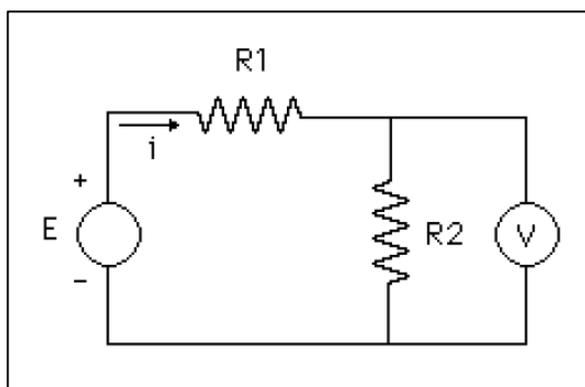
$$(128) \quad R_1 = \frac{V - R_{int} i}{i}$$

La forma de medir tensiones con un voltímetro obedece ciertas características debido a que, de no ser así, podríamos dañar el instrumento o tomar mediciones completamente erróneas. Para que un voltímetro indique un determinado valor de tensión, debe tener un voltaje aplicado en sus terminales sin modificar al mismo. Para evitar una caída de tensión innecesaria, debemos conectar el mismo en paralelo al punto de interés, (figura 68), así el voltaje será el mismo en el voltímetro tomando en consideración la polaridad de dicha tensión.

Como se mencionaba en el capítulo anterior, es necesario tener una estimación adecuada del rango de tensiones; en el caso del voltímetro, para realizar las mediciones.

Esto se hace con el fin de evitar exceder el voltaje máximo que soporta el instrumento y daña considerable el galvanómetro de tensión.

Figura 70. **Medición en paralelo con voltímetro**



Fuente: Universidad Simón Bolívar. (2019). *Laboratorio de Electrónica*. Recuperado en http://www.labc.usb.ve/paginas/mgimenez/Lab_Circ_Electronicos_Guia_Teorica/Cap6.pdf

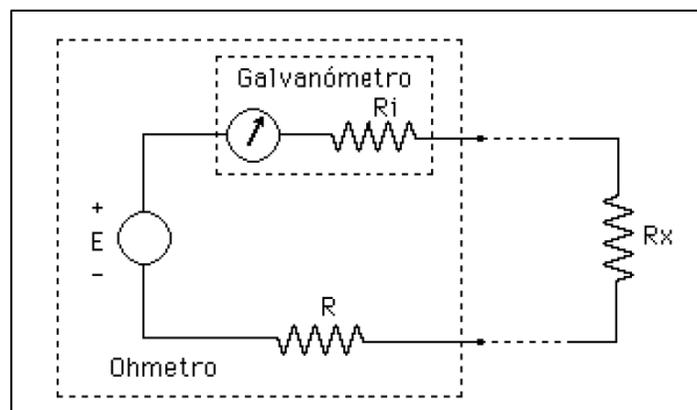
2.14.3.2.3. Óhmetro

Un óhmetro u ohmímetro es un desmotivado capaz de medir la magnitud de un resistor. Debe aclararse que una resistencia es un elemento pasivo, por lo que el óhmetro debe ser capaz de inyectar una determinada corriente a través de sus terminales.

El óhmetro deberá funcionar como un elemento activo en la medición de resistencias.

El galvanómetro interno del óhmetro detectará la magnitud de dicha corriente y el valor de la resistencia que se encuentra en medición.

Figura 71. **Óhmetro, configuración básica para diseño**



Fuente: Universidad Simón Bolívar. (2019). *Laboratorio de Electrónica*. Recuperado en http://www.labc.usb.ve/paginas/mgimenez/Lab_Circ_Electronicos_Guia_Teorica/Cap6.pdf

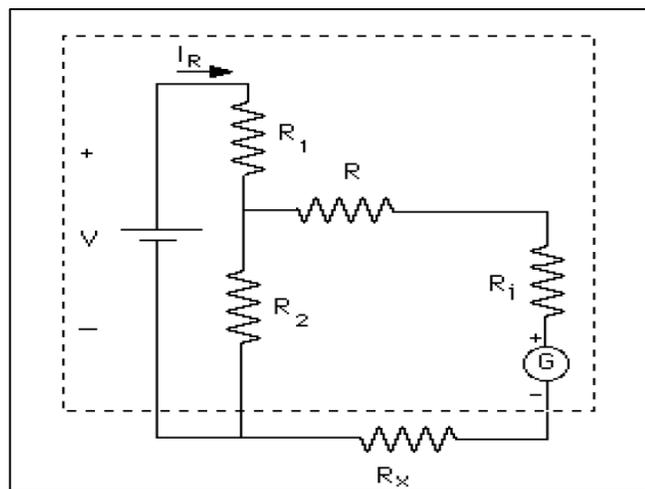
Para diseñar el óhmetro y obtener los valores resistivos internos con los que se manejará este dispositivo, debemos considerar los valores máximos y mínimos de corriente. Cuando la resistencia en medición sea de magnitud casi

infinita la corriente será aproximadamente 0 amperios; caso contrario, cuando la resistencia sea muy pequeña, tal que se aproxime a 0 ohmios, la corriente será muy elevada, semejante al valor máximo de operación que permite el galvanómetro.

$$(129) \quad E = (R_{int} + R) i_{max}$$

Al conocer el valor de la fuente y la resistencia interna del galvanómetro, así como sus especificaciones de corriente máxima de operación, podemos obtener el valor resistivo de diseño adecuado para proteger el óhmetro. Esta resistencia R indica la escala de aplicación para medir en un determinado rango, es un circuito bastante específico. Con base en el diseño básico de un óhmetro se ha podido diseñar un circuito con selección múltiple de escala.

Figura 72. **Óhmetro con selección a media escala**



Fuente: Universidad Simón Bolívar. (2019). *Laboratorio de Electrónica*. Recuperado en http://www.labc.usb.ve/paginas/mgimenez/Lab_Circ_Electronicos_Guia_Teorica/Cap6.pdf

El circuito básico nos permite elegir únicamente dos condiciones de uso. Cuando la resistencia en medición es muy grande o muy pequeña, es partir de esto que se emplean los circuitos selectores de escala, en el cual podemos influir en las características de funcionamiento. Puede ser variando la tensión aplicada a la rama donde se encuentra el galvanómetro, o bien la corriente máxima en proporción al divisor de tensión. Variando la resistencia R1 (figura 70), podemos variar las tensiones aplicadas a nuestro circuito de galvanómetro. De la misma manera, si se varía la resistencia 2, podemos variar los valores de corriente en dicha resistencia R2 y, por ende, la corriente que circulará por la rama del galvanómetro.

De esta manera podemos añadir nuevas condiciones de diseño y variar con ello la escala de medición resistiva.

2.14.3.2.4. Multímetro

Este dispositivo, también conocido como tester, permite realizar una diversidad de mediciones que con anterioridad eran destinadas a un aparato para cada una de ellas. Está considerado como la unidad efectiva de mediciones eléctricas dentro de sí mismo; cumple con las características principales de un amperímetro, voltímetro y un óhmetro.

Este dispositivo se presenta en condiciones analógicas o digitales. Dependiendo del uso que se le da al mismo, su constitución permite tener una función de autorango y ajusta las mediciones a escalas adecuadas para ser manipuladas por el usuario.

Este dispositivo incluye en la mayoría de sus diseños medición de capacitancia e inductancia, como prueba de semiconductores. Los multímetros

están adaptados para mejorar la discriminación de ruidos eléctricos generados por los sistemas. Esta mejora se presenta con una mayor sensibilidad al momento de obtener los datos de la medición.

El diseño de un multímetro toma en cuenta su aplicación final con el usuario, para estimar los rangos posibles en los cuales será de utilidad. Para obtener la versatilidad que posee un multímetro, se debe contemplar ciertos parámetros para diseñarlos.

- No exceder su peso, para ser completamente móvil.
- Accesibilidad para su diversidad de funciones intrínsecas.
- Selector de fácil aplicación para el usuario final.
- Ser un dispositivo altamente ergonómico.
- Diversa gama de protecciones para evitar su deterioro.

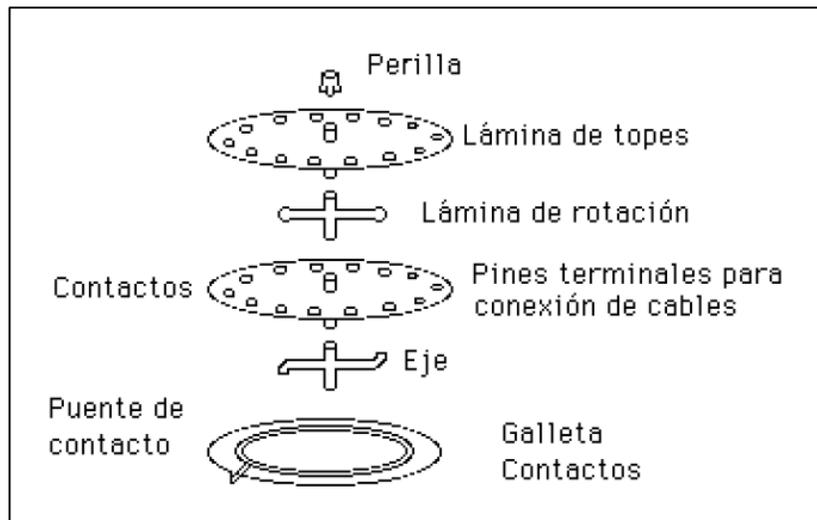
Figura 73. **Presentación de un multímetro digital**



Fuente: Wikipedia. (2018). *Multímetro*. Recuperado en https://es.wikipedia.org/wiki/Mult%C3%ADmetro#/media/File:RE50G_Range_Digital_Multimeter,_professional_Multimeter.jpg.

La mayoría de los multímetros son construidos con una perilla giratoria, debido a que permiten una mejor comprensión de uso para los usuarios; además, permite un diseño más compacto y liviano.

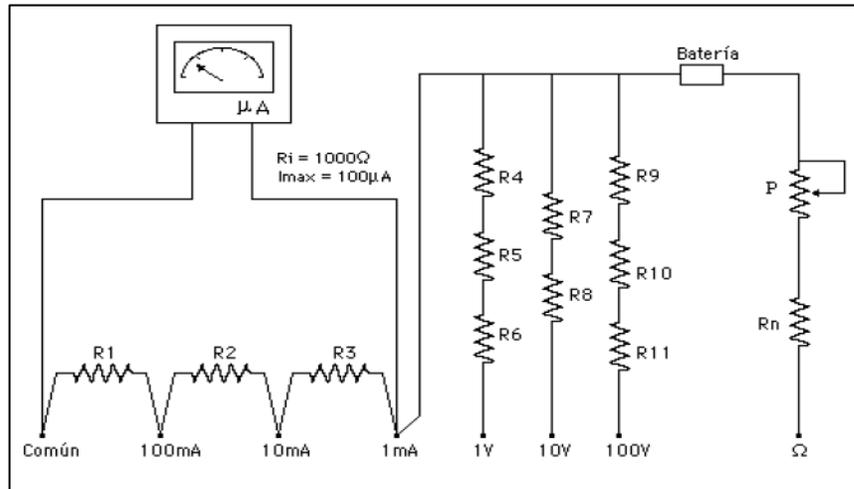
Figura 74. **Perilla seleccionadora para conmutaciones del multímetro**



Fuente: Universidad Simón Bolívar. (2019). *Laboratorio de Electrónica*. Recuperado en http://www.labc.usb.ve/paginas/mgimenez/Lab_Circ_Electronicos_Guia_Teorica/Cap6.pdf

La perilla se desplaza de un punto a otro, para escoger la función que desarrollará el multímetro, y ajustar los rangos en los que se podrá medir la magnitud eléctrica de interés.

Figura 75. Diagrama representativo de conmutadores en un multímetro



Fuente: Universidad Simón Bolívar. (2019). *Laboratorio de Electrónica*. Recuperado en http://www.labc.usb.ve/paginas/mgimenez/Lab_Circ_Electronicos_Guia_Teorica/Cap6.pdf

2.14.4. Interpretación de mediciones

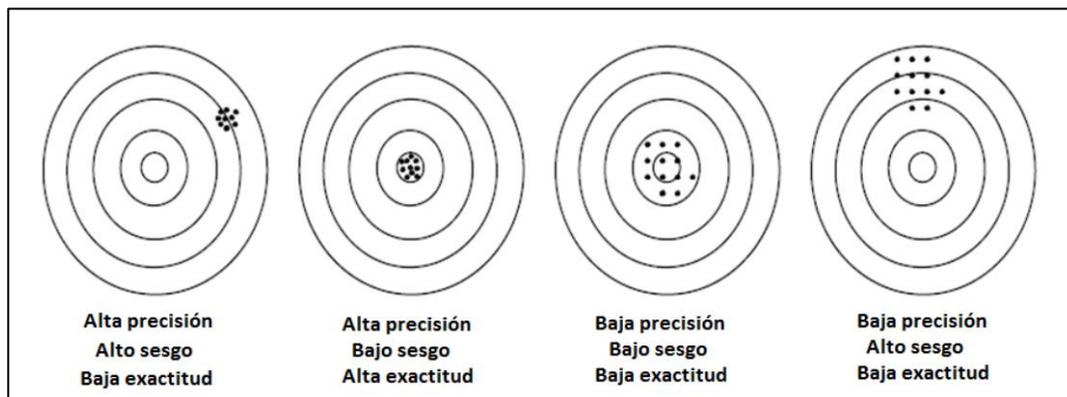
Las mediciones eléctricas se rigen por una gama de reglamentos y conceptos fundamentales para definir e interpretar lo que se mide con un instrumento. Cabe resaltar que se debe considerar tres aspectos importantes, que son:

- Magnitud, características físicas o bien que se pueden registrar en un sistema físico. Se expresa de forma numérica. Estas son todas las propiedades que pueden considerarse cuantitativas.
- Cantidad, el valor que se le adjudica a la medición de una magnitud.
- Unidad, cantidad referencial diseñada y constituida bajo normas y estándares, para uso de comparación con mediciones experimentales.

De estos términos se deduce que una medición es establecer una comparación entre una magnitud conocida y estandarizada con otra que es desconocida. Un instrumento con incerteza puede variar en dos factores de suma importancia al momento de realizar mediciones.

- Exactitud, definido como “el grado de concordancia entre el resultado de una medición y el valor verdadero mensurado” (VIM, Vocabulario Internacional de Términos Fundamentales y Generales de Metrología).
- Precisión, definido como “el grado de coincidencia existente entre los resultados independientes de una medición, obtenidos en condiciones estipuladas” (VIM, Vocabulario Internacional de Términos Fundamentales y Generales de Metrología).

Figura 76. **Precisión y exactitud en diferentes análisis**



Fuente: Univ. Nacional de Mar del Plata. (2019). *Depto. Ingeniería eléctrica*. Recuperado en http://www3.fi.mdp.edu.ar/electrica/medidas1/recursos/me1_2018_cap1.pdf

2.14.4.1. Sistema de medición SI para la metrología eléctrica

Las unidades de medición del Sistema Internacional se rigen por tres grupos fundamentales en los que se clasifican las unidades.

- Unidades base: son las unidades elementales que componen a otras.
- Unidades derivadas: nacen de la composición de dos unidades base.
- Unidades complementarias: no surgen de una unidad base, pero son necesarias para desarrollar comprensión y actualización en determinadas magnitudes físicas.

2.14.4.2. El Amper en el Sistema Internacional (SI)

Para las mediciones eléctricas se tiene una unidad base, que es el Amperio, definido como “La corriente constante que, si es mantenida en dos conductores rectos paralelos de longitud infinita, de sección circular despreciable y separados un metro en el vacío, produciría entre estos dos conductores una fuerza de 2×10^{-7} Newton por metro de longitud” (Sistema internacional SI.)

2.14.4.3. Estándares de tensión y resistencia en uso de laboratorio

Los patrones fundamentales en las mediciones eléctricas de tensión y resistencia están diseñados por los efectos Josephson y Hall cuántico.

El efecto Josephson se presenta cuando una juntura entre dos superconductores es sometida a bajas temperaturas, lo que da como resultado una radiación de microondas, dando paso a la generación de una tensión

continua en dicha juntura. La frecuencia sometida al sistema es cuantificada y basada en una señal de reloj atómico que permite controlar la estabilidad y exactitud de la misma frecuencia. Es un sistema referido para controlar la precisión de su funcionamiento y obtiene tensiones eléctricas nominales de 1,2 Volts, registradas por el INIT (Instituto Nacional de Tecnología Industrial).

El efecto Hall Cuántico se produce cuando un material semiconductor se somete a temperaturas muy bajas e intensidades de campo magnético muy elevadas, Hace que el material obtenga propiedades resistivas, de alta estabilidad. Esta resistencia se le conoce como Resistencia Hall.

De esta manera los técnicos de laboratorio emplean equipos especiales como pilas de Weston y fuentes de estado sólido para determinar magnitudes de voltaje y diversas aleaciones para la magnitud de resistencia.

3. EJERCICIOS Y LABORATORIOS VIRTUALES - AMPLIFICADORES OPERACIONALES, PUENTES DC Y METROLOGÍA

3.1. Amplificadores operacionales

En esta sección describiremos diferentes problemas aplicados a los temas de amplificador operacional real e ideal, conexiones y características del amplificador operacional, y realimentación negativa en los amplificadores operacionales. Así mismo se incluye laboratorios virtuales y material audiovisual de los temas mencionados, como complemento práctico para entender y desarrollar los temas descritos en la conceptualización del curso.

3.1.1. Ejercicios de análisis

Cada problema presenta el enunciado correspondiente y luego se desarrolla la solución del mismo.

3.1.1.1. Problema 1 – Ganancia de voltaje

Determinar la ganancia de voltaje, para una tensión de entrada de 10 Volts y una tensión de salida de 1 00 Volts, 1 000 Volts y 10 000 Volts.

Solución: la relación entre la tensión de entrada y la tensión de salida, nos permite obtener la ganancia de un amplificador operacional en configuración de lazo abierto.

$$G = \frac{V_{Salida}}{V_{Entrada}}$$

Por lo que al sustituir los valores de tensión descritos en el problema, podemos obtener las ganancias para los tres casos.

$$G_1 = \frac{100V}{10V} = 10 \frac{V}{V}$$

$$G_2 = \frac{1\,000V}{10V} = 100 \frac{V}{V}$$

$$G_3 = \frac{10\,000V}{10V} = 1\,000 \frac{V}{V}$$

La ganancia del amplificador para los tres casos varia de la siguiente manera $10 \frac{V}{V}$, $100 \frac{V}{V}$ y $1\,000 \frac{V}{V}$.

3.1.1.2. Problema 2 – Voltaje de saturación

Determinar el voltaje de saturación de un amplificador operacional conectado a una fuente de alimentación de $+12\text{ Volts}$ y -12 Volts .

Solución: Los valores de voltaje de saturación en un amplificador operacional están definidos por la siguiente ecuación:

$$V_{Sat+} = V_{cc} - 1V$$

$$V_{Sat-} = V_{ee} + 2V$$

Por lo que ahora al sustituir los valores indicados en el problema obtenemos las siguientes magnitudes:

$$V_{Sat+} = +12V - 1V = +11 \text{ Volts}$$

$$V_{Sat-} = -12V + 2V = -10 \text{ Volts}$$

Los valores de saturación máximo y mínimo del amplificador operacional son de +11 *Volts* y -10 *Volts* respectivamente.

3.1.1.3. Problema 3 – Voltajes de polarización

Determinar los voltajes de polarización, para un amplificador operacional conectado a una alimentación de +15 *Volts* y -15 *Volts*, respectivamente.

Solución: los valores de voltaje de polarización de un amplificador operacional están definidos como los voltajes de saturación, tal y como se desarrolló en el ejercicio anterior. Los valores son:

$$V_{Sat+} = V_{cc} - 1V$$

$$V_{Sat-} = V_{ee} + 2V$$

Por lo que ahora al sustituir los valores indicados en el problema obtenemos las siguientes magnitudes:

$$V_{Sat+} = +15V - 1V = +14 \text{ Volts}$$

$$V_{Sat-} = -15V + 2V = -13 \text{ Volts}$$

Los valores del voltaje de polarización del amplificador operacional son de +14 Volts y –13 Volts respectivamente.

3.1.1.4. Problema 4 – Corrientes de saturación

Las corrientes de saturación del amplificador operacional surgen debido a las impedancias intrínsecas del Amp Op. Debemos contemplar la corriente producida por la impedancia relativamente elevada de entrada. Determinar el valor de las corrientes de polarización, si la impedancia de entrada es de $1\text{ M}\Omega$ y la tensión de entrada es de 1 Volt, y la variante en el caso que la impedancia de entrada sea de $10\text{ M}\Omega$ y la tensión de entrada sea de 10 mV.

Solución: La corriente a través de un dispositivo con determinada impedancia está definida por la ley de ohm:

$$V_{\text{Entrada}} = I_{\text{Polarización}} * Z_{\text{Entrada}}$$

Por lo que la corriente de polarización para ambas variantes en la impedancia de entrada, alcanza los siguientes valores:

$$I_{\text{Polarización}} = \frac{V_{\text{Entrada}}}{Z_{\text{Entrada}}} = \frac{1\text{V}}{1\text{M}\Omega} = 1\mu\text{A}$$

$$I_{\text{Polarización}} = \frac{V_{\text{Entrada}}}{Z_{\text{Entrada}}} = \frac{10\text{mV}}{10\text{M}\Omega} = 1\text{nA}$$

Las corrientes de polarización para ambos casos son de $1\mu\text{A}$ y 1nA .

3.1.1.5. Problema 5 – Slew rate

Determinar el valor de *Slew Rate* para las siguientes variaciones en la tensión de entrada con respecto del tiempo:

- 10V en 10 μ s
- 12V en 6ms
- 15V en 12ns

Solución: *Slew Rate* define la variación de tensión en un determinado intervalo de tiempo, en la señal de entrada del amplificador operacional:

$$SR_1 = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{10V}{10\mu s} = 1\,000\,000 \frac{V}{s}$$

$$SR_2 = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{12V}{6ms} = 2\,000 \frac{V}{s}$$

$$SR_3 = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{15V}{12ns} = 125\,000\,000 \frac{V}{s}$$

3.1.2. Laboratorios

Se presenta una serie de laboratorios que se fundamentan en comprobar todo lo visto en la teoría y ejercicios del tema de amplificadores operacionales. Se recomienda realizar cada uno de estos laboratorios con el software MultiSim. Todos los diagramas y características se encuentran desarrollados en la conceptualización del curso, en la parte mencionada.

3.1.2.1. Laboratorio 1 – Voltaje de saturación

Laboratorio desarrollado para comprobar los voltajes de saturación en un amplificador operacional.

3.1.2.1.1. Objetivos

- Determinar el comportamiento del voltaje de saturación.
- Comparar las mediciones experimentales de software con los datos teóricos.

3.1.2.1.2. Material y equipo

- Software de simulación MultiSim.
- Fuente de alimentación de $+12V$ y $-12V$.
- Amplificador operacional LM324.
- Multímetro con medición de VDC.

3.1.2.1.3. Instrucciones

- Determinar los voltajes de saturación del amplificador operacional LM324, para una fuente teórica de $+12V$ y $-12V$.
- Comparar dichos valores con mediciones directas de tensión a la fuente de alimentación que se utilice para realizar dicha práctica virtual.
- Describir sus datos, determinar las diferencias encontradas en ambas mediciones y concluir con los resultados obtenidos.

3.1.2.2. Laboratorio 2 – Características del amplificador operacional

Laboratorio desarrollado para medir las características intrínsecas del amplificador operacional.

3.1.2.2.1. Objetivos

- Conocer y comprender las hojas de datos para un amplificador operacional.
- Comparar las mediciones experimentales de software con los datos teóricos.

3.1.2.2.2. Material y equipo

- Software de simulación MultiSim.
- Fuente de alimentación de $+12V$ y $-12V$.
- Amplificador operacional UA741.
- Generador de señales para la señal de entrada.
- Multímetro con medición de VDC.

3.1.2.2.3. Instrucciones

- Determinar el voltaje de salida de un amplificador operacional UA741 para una entrada de tensión de $10V$. Para ello se debe buscar, en un navegador de internet, la hoja de datos característica del amplificador; esta se provee por los fabricantes. Utilizar la hoja de datos de Texas Instruments.
- Con ayuda de la hoja de datos, determinar lo siguiente:
 - Voltajes de alimentación para operación del Amp Op UA741.

- Ganancia máxima del dispositivo.
- Temperatura de operación ideal.
- Voltaje y corriente de offset máximo en sus entradas diferenciales.
- Una vez analizados estos datos, determinar la tensión de salida teórica del amplificador UA741 y luego realizar una conexión virtual del mismo para comparar la tensión de salida real, en el amplificador operacional.
- Utilizar un generador de señales para obtener la tensión de entrada. (La magnitud de dicha señal de entrada, debe ser considerada bajo las características de operación del amplificador analizadas en la hoja de datos).

3.2. Configuraciones básicas del amplificador operacional

En esta sección analizaremos diferentes problemas aplicados a los temas de amplificador operacional y sus configuraciones básicas. Como es amplificador inversor, amplificador no inversor, amplificador sumador, y restador, seguidor de tensión, etc. Así mismo se incluye laboratorios virtuales y material audiovisual de los temas mencionados, esto como complemento práctico para entender y desarrollar los temas descritos en la conceptualización del curso.

3.2.1. Ejercicios de análisis

Cada problema presenta el enunciado correspondiente y luego se desarrolla la solución del mismo.

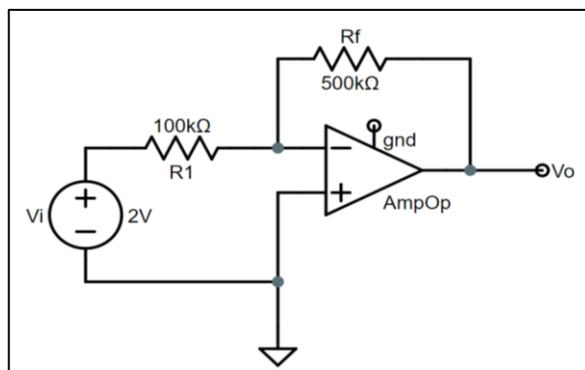
3.2.1.1. Problema 1 – Amplificador inversor

Para un amplificador en modo inversor, que tensión de salida se obtendría para una entrada de 2V.

Solución: en la figura 77, podemos observar la característica principal de un modo inversor, la cual está dada por la ganancia que producen las resistencias de entrada y realimentación respectivamente. Por lo que podemos determinar la tensión de salida a partir de la siguiente ecuación:

$$V_{sal} = -\frac{R_f}{R_i} V_i$$

Figura 77. **Amplificador inversor, problema 1**



Fuente: elaboración propia.

Una vez determinada la función, podemos sustituir los datos que el problema nos proporciona y obtener la magnitud del voltaje de salida en el amplificador operacional:

$$V_{sal} = -\frac{(500k\Omega)}{(100k\Omega)} (2V) = -10V$$

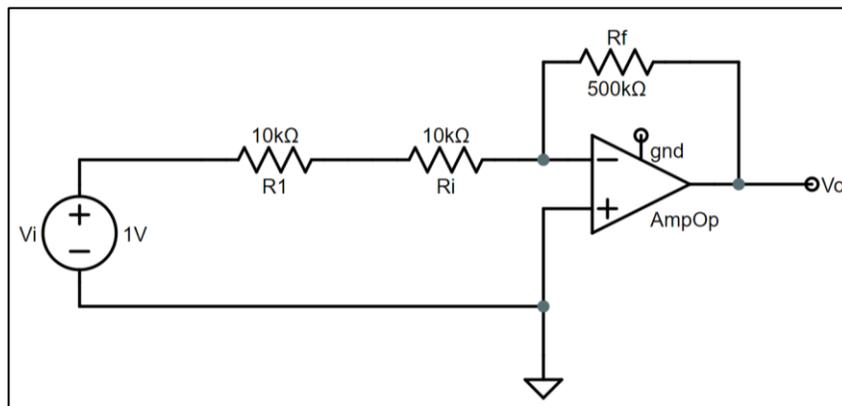
El valor de la ganancia es de cinco unidades, por lo que la tensión de salida es de $-10V$. El signo de esta tensión de salida se define por la razón que el

amplificador está en modo inversor; el dispositivo invierte la polaridad de la salida con respecto de la entrada.

3.2.1.2. Problema 2 – Amplificador inversor con ajuste de ganancia variable

Para el circuito de la figura 78, determinar el intervalo de tensión de salida dada una señal de entrada $V_i = -1V$, para una resistencia variable R_1 que va de $0\Omega - 10k\Omega$.

Figura 78. Amplificador inversor con ganancia variable, problema 2



Fuente: elaboración propia

Solución: el amplificador operacional se encuentra en modo inversor, pero con la característica de tener ganancia variable debido a la resistencia uno, esta puede variar desde cero ohms hasta diez mil ohms. Por lo tanto, podemos obtener el valor máximo de tensión cuando la resistencia variable alcanza el valor mínimo y el caso contrario, cuando la resistencia variable alcanza su valor máximo, la tensión de salida tendrá un valor mínimo.

$$V_{sal} = -\frac{R_f}{R_i + R_1(variable)}V_i$$

Para el primer valor de tensión, se da cuando $R_1(variable) = 10k\Omega$:

$$V_{sal} = -\frac{R_f}{R_i + R_1(0\Omega - 10k\Omega)}V_i$$

$$V_{sal} = -\frac{500k\Omega}{10k\Omega + 10k\Omega}(-1V) = 25V$$

Para el segundo valor de tensión, se da cuando $R_1(variable) = 0\Omega$:

$$V_{sal} = -\frac{R_f}{R_i + R_1(variable)}V_i = -\frac{500k\Omega}{10k\Omega + 0\Omega}(-1V) = 50V$$

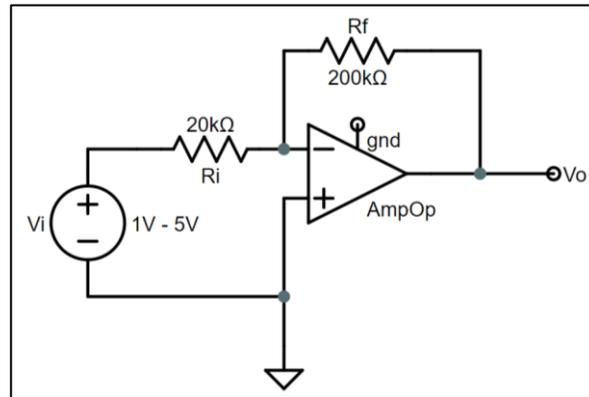
El intervalo de tensión de salida en amplificador operacional va desde 25V hasta 50V, por lo que la diferencia de voltaje es de $\Delta V_{sal} = 25V$.

3.2.1.3. Problema 3 – Amplificador inversor con tensión de entrada variable

Determinar el ajuste de tensión de salida para una señal de entrada que oscila entre 1V hasta 5V, la cual se aplica a un amplificador en modo inversor, figura 79.

Solución: para esta situación, la señal de entrada varía de 1 volt a 5 volts, por lo que la salida también tendrá una variación, pero en magnitud de la ganancia del circuito inversor.

Figura 79. **Amplificador inversor con entrada variable, problema 3**



Fuente: elaboración propia

La tensión de salida del amplificador operacional está definida por la siguiente expresión:

$$V_{sal} = -\frac{R_f}{R_i} V_i$$

Entonces, el valor mínimo de tensión de salida se da cuando la tensión de entrada es mínima; hablamos de valor mínimo al referirnos directamente a la magnitud de la tensión, puesto que por su polaridad se puede asumir que matemáticamente es mayor.

$$V_{sal_{min}} = -\frac{200k\Omega}{20k\Omega} (1V) = -10V$$

El valor máximo de tensión de salida se da cuando la tensión de entrada es máxima; y aclaramos nuevamente que hablamos de valor máximo al referirnos directamente a la magnitud de la tensión, puesto que, por su polaridad, en este caso, matemáticamente es menor.

$$V_{sal_{max}} = -\frac{200k\Omega}{20k\Omega} (5V) = -50V$$

La variación de tensión de salida va desde $-50V$ hasta $-10V$.

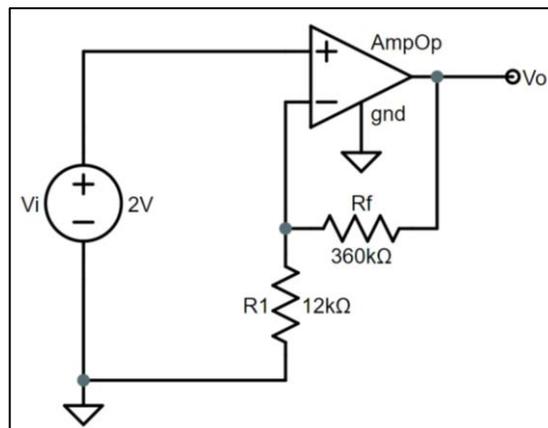
3.2.1.4. Problema 4 – Amplificador no inversor

Determinar el voltaje de salida a partir de una tensión de entrada de $-0,3V$ en un amplificador operacional configurado como no inversor.

Solución: el amplificador operacional en no inversor aplica únicamente la ganancia de tensión sin invertir la polaridad de la señal de salida; es decir, una tensión positiva en la entrada, tendrá una tensión positiva de salida. El voltaje de salida del circuito de la figura 80, está definido por la siguiente expresión:

$$V_{sal} = \left(1 + \frac{R_f}{R_i}\right) V_i$$

Figura 80. **Amplificador operacional no inversor, problema 4 y 5**



Fuente: elaboración propia

De esta manera se puede determinar el valor de la tensión en un amplificador operacional en modo no inversor:

$$V_{sal} = \left(1 + \frac{360k\Omega}{12k\Omega}\right)(-0.3V) = -9,3V$$

La tensión de salida solo presenta características de ganancia, más su polaridad se mantiene, esto se debe a que el modo no inversor afecta únicamente a nivel de la ganancia de la señal.

3.2.1.5. Problema 5 – Amplificador no inversor con ajuste de ganancia variable

Para el problema 5, utilizando el mismo circuito mostrado en la figura 80, hacemos variar la resistencia de $12k\Omega$ a un valor de $24k\Omega$. A partir de ello, ¿Cuál es la variación en la ganancia del circuito?

Solución: determinamos la ecuación que describe la ganancia de un circuito amplificador no inversor.

$$V_{sal} = G V_i$$

$$G = \left(1 + \frac{R_f}{R_i}\right)$$

Con ello analizaremos la ganancia del circuito cuando la resistencia no había cambiado, a la cual llamaremos G_1 , y posterior a ello con la variación en el resistor al que nombraremos G_2 .

$$G_1 = \left(1 + \frac{360k\Omega}{12k\Omega}\right) = 31 \frac{V}{V}$$

$$G_2 = \left(1 + \frac{360k\Omega}{24k\Omega}\right) = 16 \frac{V}{V}$$

Al conocer la ganancia antes y después de hacer el cambio en la resistencia, podemos determinar la diferencia o variación que ha experimentado la ganancia del circuito, de tal forma que:

$$\Delta G = G_2 - G_1 = 31 - 16 = 15 \frac{V}{V}$$

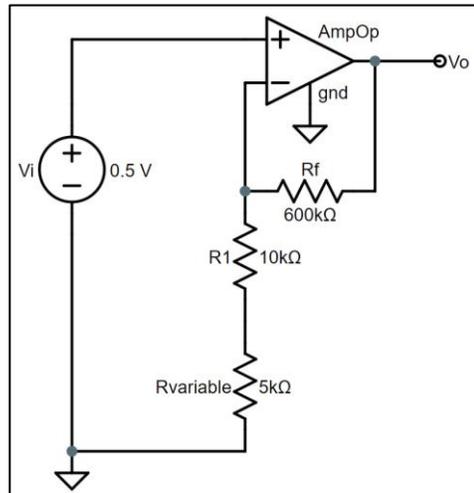
La ganancia del circuito amplificador no inversor experimentó una variación de 15 unidades.

3.2.1.6. Problema 6 – Amplificador no inversor con tensión de salida variable

Determinar el intervalo del voltaje de salida en el circuito de la figura 81, considerando la resistencia R_2 como variable, en el intervalo de 0Ω a $5k\Omega$.

Solución: analizamos el circuito que se presenta en la imagen, del cual podemos determinar que se trata de un circuito amplificador no inversor.

Figura 81. **Amplicador operacional no inversor, problema 6**



Fuente: elaboración propia

Dada la resistencia variable, la ganancia del circuito se verá afectada, por lo que aumentará y disminuirá cuando el resistor aumente o disminuya su valor. Ahora analizamos el voltaje de salida cuando la resistencia variable es aproximadamente cero ohms.

$$V_{sal_{max}} = \left(1 + \frac{R_f}{R_i + R_{variable}}\right) V_i = \left(1 + \frac{600k\Omega}{10k\Omega + 0\Omega}\right) (0,5V) = 30,5 V$$

De la misma manera lo haremos cuando la resistencia variable alcanza su valor máximo; es decir, $5k\Omega$.

$$V_{sal_{min}} = \left(1 + \frac{R_f}{R_i + R_{variable}}\right) V_i = \left(1 + \frac{600k\Omega}{10k\Omega + 5k\Omega}\right) (0,5V) = 20,5 V$$

Así se obtienen los dos valores máximo y mínimo correspondientemente a la tensión de salida, por lo que la diferencia de tensión que presenta la salida será la diferencia matemática del valor superior y el valor inferior.

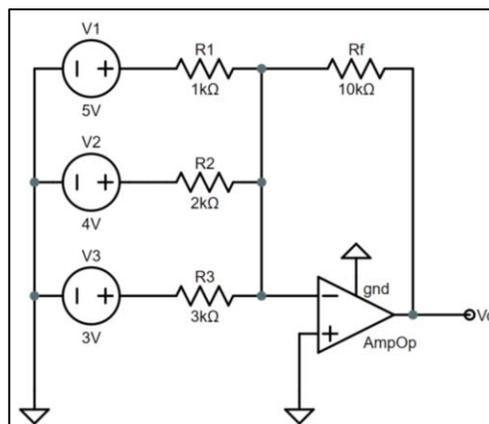
$$\Delta V_{sal} = V_{max} - V_{min} = 30,5 - 20,5 = 10 V$$

La diferencia entre los valores máximo y mínimo que se presentan en el circuito no inversor es de 10 V

3.2.1.7. Problema 7 – Sumador o circuito mezclador

Una de las aplicaciones más útiles para un amplificador operacional en modo inversor es el circuito sumador o mezclador de señales (figura 82). A partir de este circuito, determinar la tensión de salida que resulta de mezclar V_3 , V_2 y V_1 .

Figura 82. **Circuito sumador a partir de un amplificador sumador inversor, problema 7**



Fuente: elaboración propia

Solución: se sabe que un circuito sumador de tensiones aplica el teorema de superposición, por lo que podríamos aplicar la ganancia respectiva a cada una de las entradas y luego sumar las tensiones de salida individuales.

$$V_{sal} = \left(-\frac{R_f}{R_1}V_1\right) + \left(-\frac{R_f}{R_2}V_2\right) + \left(-\frac{R_f}{R_3}V_3\right)$$

Simplificando la expresión anterior para obtener una expresión mucho más reducida que permita comprender mejor el análisis matemático.

$$V_{sal} = -R_f \left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3}\right)$$

Partiendo de la nueva expresión, podemos sustituir los valores individuales de cada tensión de entrada y obtener el voltaje de salida en el sumador inversor.

$$V_{sal} = -10k\Omega \left(\frac{5V}{1k\Omega} + \frac{4V}{2k\Omega} + \frac{3V}{3k\Omega}\right) = -80V$$

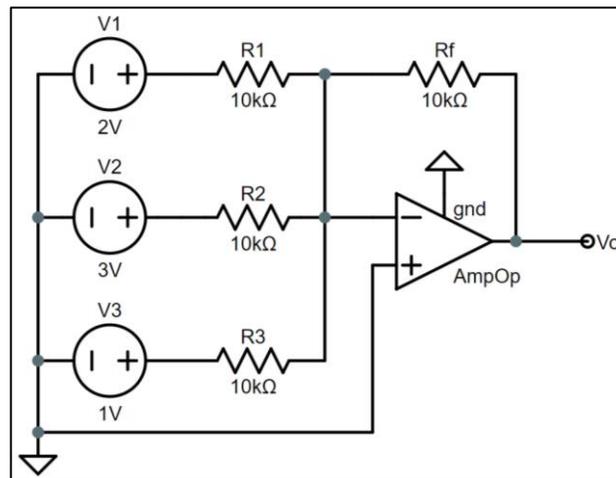
La diferencia de potencial en la salida del sumador inversor es de $-80V$.

3.2.1.8. Problema 8 – Mezclador de audio

Un mezclador de audio está constituido por un circuito sumador o mezclador de señales, como su nombre lo indica. A diferencia de un sumador inversor visto en el problema anterior, este mezclador utiliza un sumador inversor de ganancia unitaria. Determinar la señal de salida en el mezclador de la figura 83.

Solución: el circuito de la figura 83 describe con exactitud lo realizado en el problema anterior, por lo que las ecuaciones se adecuan de la misma manera; la única diferencia recae sobre la ganancia que se produce en este otro circuito.

Figura 83. **Mezclador de audio, problema 8**



Fuente: elaboración propia

Ya que la ganancia es unitaria, todos los resistores deben manejar el mismo valor resistivo, esto con el fin de no añadir ganancia a una entrada, por lo que todas las resistencias del mezclador tienen un valor de $10k\Omega$.

$$V_{sal} = -R \left(\frac{V_1}{R} + \frac{V_2}{R} + \frac{V_3}{R} \right) = -\frac{R}{R} (V_1 + V_2 + V_3)$$

De esta manera tenemos la expresión de la tensión de salida, la cual por simple inspección es una superposición de las tensiones de entrada; es decir, una suma o diferencia de las señales, sean positivas o negativas, respectivamente.

$$V_{sal} = (V_1 + V_2 + V_3) = -(2V + 3V + 1V) = -6V$$

El voltaje de salida del mezclador es de $-6V$.

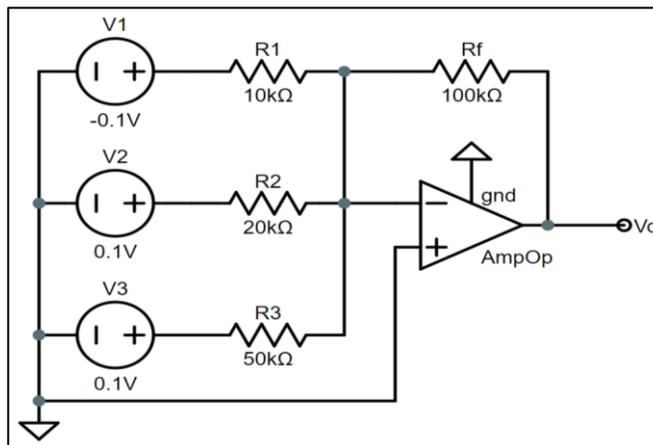
3.2.1.9. Problema 9 – Circuito sumador inversor con ganancia variable

Determinar la diferencia de voltaje que existe en un circuito sumador inversor de ganancia variable de la figura 84. Sabiendo que las entradas son: $V_3 = 0,1V$, $V_2 = 0,1V$ y $V_1 = -0,1V$, la resistencia variable oscila $50k\Omega$ hasta $100k\Omega$.

Solución: primero debemos determinar la ecuación que define el comportamiento del sumador inversor, tal y como se muestra a continuación:

$$V_{sal} = -R_f \left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3} \right)$$

Figura 84. Sumador inversor de ganancia variable



Fuente: elaboración propia

La diferencia de este problema con respecto a los demás, es la variación en la ganancia del circuito, la cual se produce por la resistencia R_f .

$$\Delta V_{sal} = -(50k\Omega \rightarrow 100k\Omega) \left(\frac{-0,1V}{10k\Omega} + \frac{0,1V}{20k\Omega} + \frac{0,1V}{50k\Omega} \right)$$

De esta manera se obtiene la expresión matemática que se adecua a las características del sumador inversor. Cabe destacar que se muestra la variación que tiene el resistor R_f , que va desde $50k\Omega$ hasta $100k\Omega$.

$$V_{sal_{min}} = -(50k\Omega) \left(\frac{-0,1V}{10k\Omega} + \frac{0,1V}{20k\Omega} + \frac{0,1V}{50k\Omega} \right) = 0,15V$$

$$V_{sal_{max}} = -(100k\Omega) \left(\frac{-0,1V}{10k\Omega} + \frac{0,1V}{20k\Omega} + \frac{0,1V}{50k\Omega} \right) = 0,3V$$

$$\Delta V_{sal} = V_{sal_{max}} - V_{sal_{min}} = 0,15V$$

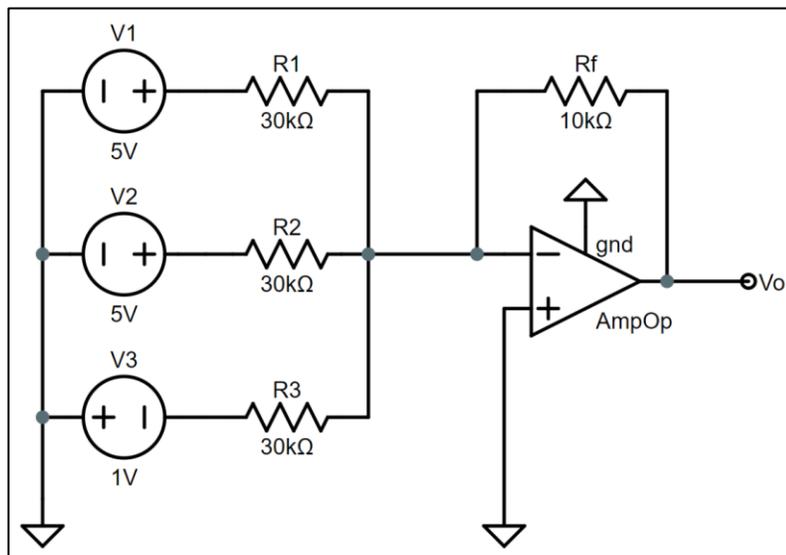
La diferencia de voltaje en la salida del sumador inversor es de $\Delta V_s = 0,15V$.

3.2.1.10. Problema 10 – Sumador inversor ponderador

Determinar la señal de salida del sumador inversor ponderado de la figura 85, donde los resistores de entrada R_1 , R_2 y R_3 son completamente iguales y el resistor R_f constituye la tercera parte de la magnitud de estas resistencias. Obtener el voltaje de salida para las siguientes tensiones de entrada: $V_1 = 5V$, $V_2 = 5V$ y $V_3 = 1V$.

Solución: el circuito ponderador tiene la particularidad que los resistores de entrada son completamente iguales; es decir, una magnitud común R y susresistor R_f es la tercera parte de R . Así podemos analizar la ecuación del sumador inversor habitual.

Figura 85. **Circuito sumador ponderado, diseñado a partir de un sumador inversor**



Fuente: elaboración propia

$$V_{sal} = -\left(\frac{R}{3}\right)\left(\frac{V_1}{R} + \frac{V_2}{R} + \frac{V_3}{R}\right)$$

Por simple inspección podemos observar que el segundo paréntesis de la expresión anterior tiene un factor común, por lo que puede ser extraído y operado con el primer paréntesis.

$$V_{sal} = -\left(\frac{R}{3R}\right)(V_1 + V_2 + V_3) = -\frac{(V_1 + V_2 + V_3)}{3}$$

Las características de un sumador ponderado indican que es independiente de las resistencias de entrada del mismo, siempre y cuando se cumpla la condición que todas las resistencias de entrada sean iguales y su resistencia de retroalimentación sea la n-ésima parte de la magnitud de dichas resistencias, donde n es el número de entradas.

$$V_{sal} = -\frac{(V_1 + V_2 + V_3 + \dots V_n)}{n}$$

Por lo que el valor de la tensión de salida en el sumador es:

$$V_{sal} = -\frac{(5V + 5V - 1V)}{3} = -3V$$

3.2.1.11. Problema 11 – Seguidor de tensión

El circuito seguido de tensión de la figura 86 se encuentra a disposición de una tensión de entrada positiva de 4V. Determinar el voltaje de salida en el seguidor de tensión y la corriente en la resistencia de carga de 10kΩ.

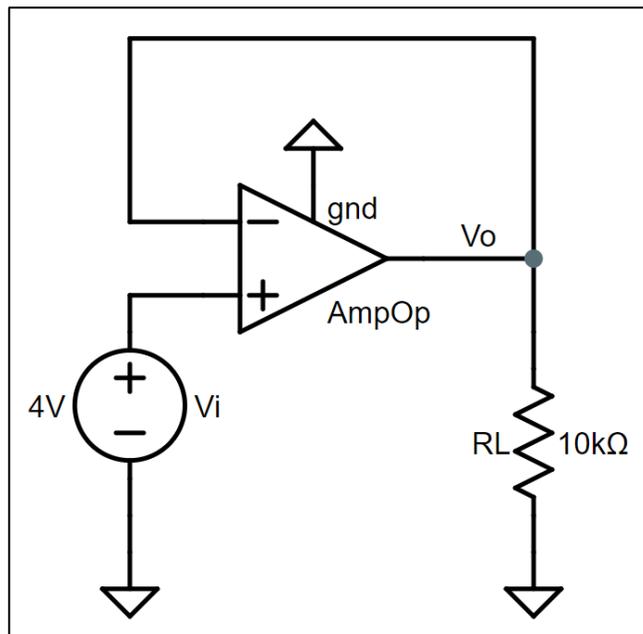
Solución: el circuito seguidor de tensión es también conocido como un seguidor unitario porque se encarga de mantener la misma magnitud de voltaje de entrada en la salida. Podemos asumir que la ganancia del circuito amplificador tiene valor de la unidad.

$$V_{sal} = G V_i$$

$$V_{sal} = (1) V_i$$

A partir de esta simplificación podemos notar por simple inspección que la tensión de salida es completamente igual a la tensión de entrada, tanto en magnitud como polaridad.

Figura 86. **Seguidor de tensión con entrada negativa, problema 11**



Fuente: elaboración propia

$$V_{sal} = V_i$$

$$V_{sal} = 4V$$

Al conocer la tensión de salida, se puede determinar la corriente que atraviesa a la resistencia de carga, la cual está definida por la ley de ohm.

$$V_{sal} = I_L R_L \quad \rightarrow \quad I_L = \frac{V_{sal}}{R_L}$$

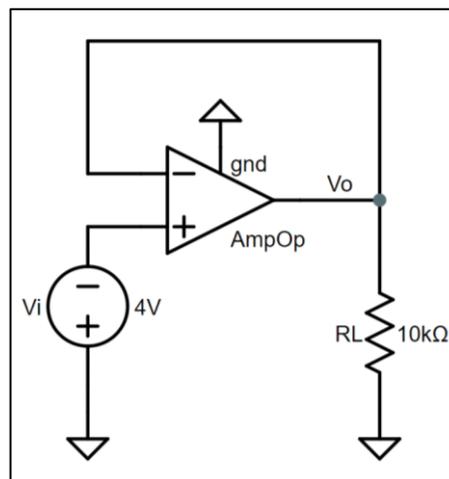
$$I_L = \frac{4V}{10k\Omega} = 0,4 \text{ mA} \quad \downarrow$$

La corriente a través de la carga es de aproximadamente $0,4 \text{ mA}$ o bien $400 \mu\text{A}$, con dirección de salida del circuito de amplificación.

3.2.1.12. Problema 12 – Seguidor de tensión como seguidor unitario

El siguiente ejercicio analiza el seguidor unitario bajo las condiciones de una entrada negativa. Determinar la tensión de salida en el seguidor tensión y la corriente de salida a través de la resistencia de carga si la tensión de entrada es de $-4V$.

Figura 87. Seguidor unitario con entrada positiva, problema 12



Fuente: elaboración propia

Solución: al igual que el circuito anterior, podemos determinar la tensión de salida del seguidor unitario por la definición general.

$$V_{sal} = V_i$$

Puesto que la señal de entrada es negativa, la salida será completamente igual, y con ello podríamos determinar la corriente en la resistencia de carga.

$$V_{sal} = -4V$$

$$I_L = \frac{V_{sal}}{R_L} = \frac{-4V}{10k\Omega} = -0,4mA$$

Para el siguiente circuito la tensión de salida es de $-4V$ y la corriente tiene una magnitud de $0,4mA$, con dirección de entrar al circuito de amplificación.

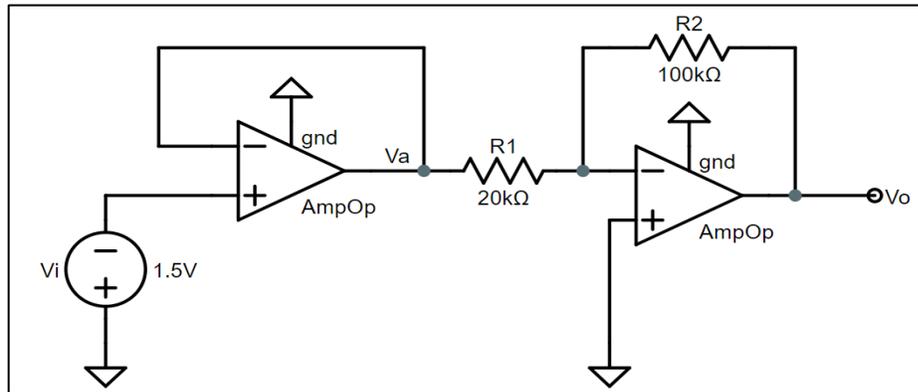
3.2.1.13. Problema 13 – Acople de impedancias

Una de las aplicaciones más comunes para un seguidor de tensión es adaptar diferentes impedancias para más de un circuito. Para la figura 88 se debe analizar el seguidor unitario para luego obtener la tensión de salida del amplificador inversor, la señal de entrada es de $-1,5V$.

Solución: para determinar el voltaje de salida debemos analizar la tensión V_A , la cual es la salida del seguidor unitario, pero a su vez se convierte en la entrada del amplificador inversor.

La teoría del seguidor unitario nos indica que la señal de salida V_A será completamente igual a la señal de entrada V_i .

Figura 88. **Combinación de amplificadores operacionales, problema 13**



Fuente: elaboración propia

Por lo que se asume que:

$$V_{sal} = V_{in}$$

$$V_{sal} = -1,5V$$

La señal de salida del seguidor unitario se convierte en la señal de entrada para el circuito inversor, por lo que la señal será manipulada por la ganancia del amplificador operacional y dará como resultado una tensión más elevada de polaridad opuesta.

$$V_{sal} = -R_1 \left(\frac{V_{in}}{R_2} \right)$$

$$V_{sal} = -(100\text{k}\Omega) \left(\frac{-1,5V}{20\text{k}\Omega} \right) = 7,5V$$

El voltaje de salida del circuito combinado es de 7,5 *Volts*. El circuito tiene las propiedades de un circuito acoplador, ya que el seguidor unitario le añade alta impedancia a la entrada, no modifica las características de la misma.

3.2.1.14. Problema 14 – Diferenciador de señales

Se diseña un circuito diferenciador de señales. Dos entradas con tensiones iguales, pero de polaridad contraria, producen una señal de salida de alta amplificación, el circuito se muestra en la figura 89. Obtener dicha tensión de salida.

Solución: el circuito tiene la característica de estar constituido por más de una aplicación directa del amplificador operacional, (figura 89). Podemos notar que tiene dos circuitos inversores y un seguidor unitario de voltaje.

El primer paso para este circuito es determinar las tensiones V_a y V_b , ya que con ello podremos obtener el voltaje de salida V_{sal} . Para el voltaje del nodo b podemos asumir con mayor facilidad la magnitud de este, puesto que es un seguidor unitario.

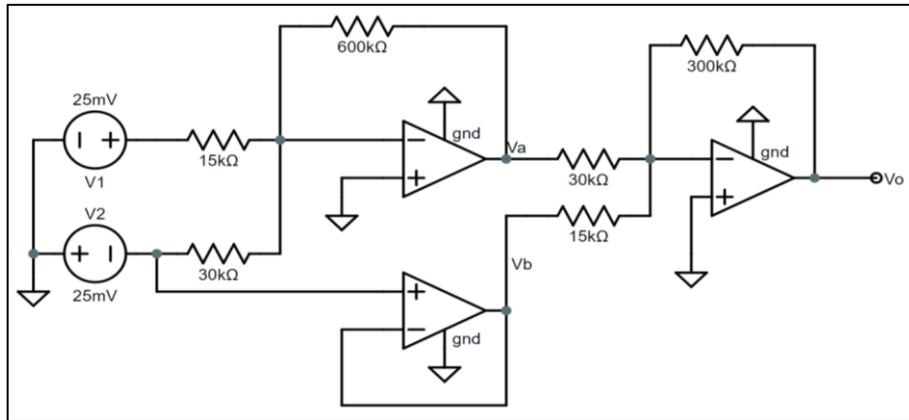
$$V_b = V_2 = -25mV$$

Con ello solo queda analizar el nodo a para determinar la tensión en ese punto, por lo que podemos notar que se trata de un sumador inversor, y esto nos permite aplicar directamente la definición matemática del mismo.

$$V_a = -R_f \left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} \right)$$

$$V_a = -(600k\Omega) \left(\frac{25mV}{15k\Omega} + \frac{-25mV}{30k\Omega} \right) = -500mV$$

Figura 89. **Circuito amplificador de varias etapas, problema 14**



Fuente: elaboración propia

Ahora que se conoce la tensión en el nodo a y b, podemos analizar la parte final del circuito. Dicha etapa está constituida por un inversor de tensión, volvemos a aplicar la definición del amplificador inversor de voltaje para las tensiones de entrada V_a y V_b .

$$V_{sal} = -R_f \left(\frac{V_a}{R_1} + \frac{V_b}{R_2} \right)$$

$$V_{sal} = -(300k\Omega) \left(\frac{-25mV}{15k\Omega} + \frac{-500mV}{30k\Omega} \right) = 5,5V$$

El voltaje de salida del circuito completo es de 5,5V. El circuito tiene dos etapas de amplificación, la preamplificación permite acoplar impedancias en el circuito con las señales de entrada, luego viene la amplificación final donde se le añade la ganancia más elevada al voltaje diferencial.

3.2.2. Laboratorios virtuales

Se presenta una serie de laboratorios virtuales, que se fundamentan en comprobar todo lo visto en la teoría y ejercicios del tema de configuraciones básicas en los amplificadores operacionales. Se recomienda realizar cada uno de estos laboratorios con el software MultiSim. Todos los diagramas y características se encuentran desarrollados en la conceptualización del curso, en la parte antes mencionada.

3.2.2.1. Laboratorio 1 – Amplificador inversor

Laboratorio desarrollado para medir las características de un amplificador en configuración inversor.

3.2.2.1.1. Objetivos

- Determinar la tensión de salida de un amplificador operacional UA741 en modo inversor.
- Analizar y comparar el resultado práctico en software con el desarrollo teórico de la tensión de salida.

3.2.2.1.2. Material y equipo

- Software de simulación MultiSim.
- Fuente de alimentación de $+12V$ y $-12V$.
- Amplificador operacional UA741.
- Multímetro con medición de VDC.
- Elementos eléctricos del diagrama experimental de la figura 77.

3.2.2.1.3. Instrucciones

- Determinar la tensión de salida experimental del circuito de la figura 77.
- Desarrollar este circuito en MultiSim con la ayuda del amplificador operacional UA741.
- Comparar la respuesta teórica desarrollada en el problema 1 de la sección de configuraciones básicas del amplificador operacional.
- Concluir con base en los resultados obtenidos.

3.2.2.2. Laboratorio 2 – Amplificador inversor con tensión de entrada variable

Laboratorio desarrollado para analizar el comportamiento de un amplificador en configuración inversor de tensión de entrada variable.

3.2.2.2.1. Objetivos

- Analizar la diferencia de tensión de salida para un circuito inversor de entrada variable.
- Analizar y comparar el resultado práctico en software con el desarrollo teórico de la tensión de salida variable.

3.2.2.2.2. Material y equipo

- Software de simulación MultiSim.
- Fuente de alimentación de $+12V$ y $-12V$.
- Amplificador operacional UA741.
- Multímetro con medición de VDC.
- Elementos eléctricos del diagrama experimental de la figura 79.

3.2.2.2.3. Instrucciones

- Determinar el rango de tensiones de salida experimental para circuito de la figura 79. La tensión de entrada debe oscilar entre $1V - 5V$.
- Desarrollar este circuito práctico con la ayuda del amplificador operacional UA741.
- Comparar la respuesta teórica desarrollada en el problema 3 de la sección de configuraciones básicas del amplificador operacional.
- Concluir con base a los resultados obtenidos.

3.2.2.3. Laboratorio 3 – Amplificador no inversor

Laboratorio desarrollado para medir las características de un amplificador en configuración no inversor.

3.2.2.3.1. Objetivos

- Analizar la ganancia variable de un circuito de amplificador operacional en modo no inversor.
- Analizar y comparar el resultado práctico en software con el desarrollo teórico de la variación que experimenta la ganancia del circuito.

3.2.2.3.2. Material y equipo

- Software de simulación MultiSim.
- Fuente de alimentación de $+12V$ y $-12V$.
- Amplificador operacional LM324.
- Multímetro con medición de VDC.

- Elementos eléctricos del diagrama experimental, figura 80. (La resistencia uno es variable, que se encuentre en el rango de $12k\Omega - 24k\Omega$).

3.2.2.3.3. Instrucciones

- Determinar el rango de ganancias que posee el amplificador operacional no inversor del problema 5, figura 80. Para analizar la ganancia del circuito deberán hallar la tensión de salida cuando la resistencia variable toma el valor mínimo posible y luego cuando alcanza su valor máximo. Con ello se puede encontrar la ganancia de la primera tensión de salida con respecto a la entrada, y para la siguiente tensión también se podrá determinar dicha ganancia.
- Desarrollar este circuito en MultiSim con la ayuda del amplificador operacional LM324.
- Comparar la respuesta teórica desarrollada en el problema 5 de la sección de configuraciones básicas del amplificador operacional.
- Concluir con base a los resultados obtenidos.

3.2.2.4. Laboratorio 4 – Sumador de señales

Laboratorio desarrollado para analizar el comportamiento de un amplificador en modo sumador de señales.

3.2.2.4.1. Objetivos

- Comprender el funcionamiento de un sumador de tensiones, basado en un amplificador inversor.

- Analizar y comparar el resultado práctico en software con el desarrollo teórico de la suma de tensiones de corriente directa, bajo el contexto de una aplicación directa.

3.2.2.4.2. Material y equipo

- Software de simulación MultiSim.
- Fuente de alimentación de $+12V$ y $-12V$.
- Amplificador operacional UA741.
- Multímetro con medición de VDC.
- Elementos eléctricos del diagrama experimental, figura 82.

3.2.2.4.3. Instrucciones

- Observar las variaciones de tensión de salida en un sumador del tipo inversor, con base en el funcionamiento de un sumador de tensiones. Las tres tensiones de entrada que se muestran en la figura 82 serán de $1V$, $2V$ y $3V$, respectivamente. Cuando las 3 señales se encuentren, en suma, la tensión de salida será máxima.
- Variar las tensiones de entrada para observar las características del sumador. Con ello, realizar una tabla de datos experimentales de las entradas y salida en el circuito.
- La tabla debe describir cada combinación las señales de entrada, para poder observar el valor máximo y mínimo en la salida del circuito.
- Desarrollar este circuito en MultiSim con la ayuda del amplificador operacional UA741.
- Comparar la respuesta teórica desarrollada en el problema 7 de la sección de configuraciones básicas del amplificador operacional. (Tomar nota que

las tensiones de entrada utilizadas en el desarrollo teórico son diferentes a las del laboratorio).

- Concluir con base en los resultados obtenidos.

3.2.2.5. Laboratorio 5 – Sumador de señales con ganancia variable

Laboratorio desarrollado para analizar el comportamiento de un amplificador en modo sumador de señales con ganancia variable.

3.2.2.5.1. Objetivos

- Comprender el funcionamiento de un sumador de señales de ganancia variable.
- Analizar y comparar el resultado práctico en software con el desarrollo teórico de la suma de tensiones de corriente directa, con la aplicación de ganancia variable a partir de un resistor de ajuste.

3.2.2.5.2. Material y equipo

- Software de simulación MultiSim.
- Fuente de alimentación de +12V y –12V.
- Amplificador operacional UA741.
- Multímetro con medición de VDC.
- Elementos eléctricos del diagrama experimental de la figura 84.

3.2.2.5.3. Instrucciones

- Determinar el rango de tensiones que posee el sumador no inversor del problema 9, figura 84.
- Analizar la diferencia de voltaje en el circuito. Deberán determinar la tensión de salida cuando la resistencia variable toma el valor mínimo posible y luego cuando alcanza su valor máximo. Con ello se puede encontrar la primera tensión de salida. Para la variación de resistencia se podrá determinar la siguiente tensión de salida.
- Desarrollar este circuito en MultiSim con la ayuda del amplificador operacional UA741.
- Comparar la respuesta teórica desarrollada en el problema 9 de la sección de configuraciones básicas del amplificador operacional.
- Desarrollar una tabla comparativa de las tensiones de entrada contra tensión de salida, cuando la resistencia de ajuste se encuentra en el valor más pequeño; y caso contrario, una tabla comparativa de las mismas características, cuando la resistencia de ajuste se encuentra en su valor máximo.
- Concluir con base en los resultados obtenidos.

3.2.2.6. Laboratorio 6 – Sumador ponderado

Laboratorio desarrollado para analizar el comportamiento de un amplificador en modo sumador ponderado.

3.2.2.6.1. Objetivos

- Determinar y analizar la tensión de salida en un sumador ponderado.

- Analizar y comparar el resultado práctico en software con el desarrollo teórico de la suma de tensiones de corriente directa, con el sumador ponderado.
- Comparar el sumador ponderado en modo inversor con el sumador inversor de funcionamiento estándar.

3.2.2.6.2. Material y equipo

- Software de simulación MultiSim.
- Fuente de alimentación de $+12V$ y $-12V$.
- Amplificador operacional LM324.
- Multímetro con medición de VDC.
- Elementos eléctricos del diagrama experimental, figura 85.

3.2.2.6.3. Instrucciones

- Desarrollar el análisis práctico del sumador ponderado de la figura 85. Obtener la tensión de salida de este sumador particular, tabular las tensiones de entrada contra la tensión de salida, destacar el valor resistivo y definir las propiedades de este circuito.
- Desarrollar este circuito en MultiSim con la ayuda del amplificador operacional LM324.
- Comparar la respuesta teórica desarrollada en el problema 10 de la sección de configuraciones básicas del amplificador operacional.
- Luego realizar una comparación general en el funcionamiento de este sumador ponderado y el sumador estándar, comparar los valores resistivos de diseño.
- En cuestiones de diseño se puede distinguir el funcionamiento entre uno y otro.

- Concluir con base a los resultados obtenidos.

3.3. Aplicaciones en instrumentación para un amplificador operacional

En esta sección analizaremos diferentes problemas aplicados a los temas de amplificador de instrumentación y el procesamiento de señales, como acondicionamiento de señales, convertidores de señal, detectores de tensión, amplificador diferencial y aplicaciones directas del amplificador de instrumentación. Así mismo se incluye laboratorios virtuales y material audiovisual de los temas mencionados, como complemento práctico para entender y desarrollar los temas descritos en la conceptualización del curso.

3.3.1. Ejercicios de análisis

Cada problema presenta el enunciado correspondiente y luego se desarrolla la solución del mismo.

3.3.1.1. Problema 1 – Amplificador diferencial

El amplificador operacional en modo diferencial puede estar configurado con ganancia a lazo abierto o lazo cerrado. Determinar el voltaje de salida para las siguientes configuraciones de lazo abierto y cerrado que se muestran en la figura 90. Considere la ganancia de lazo abierto igual a 1 000 unidades

Solución: lo primero es determinar qué tipo de lazo posee cada configuración para determinar la ganancia de tensión. Para el primer inciso de la figura 90, inciso a, se muestra un amplificador diferencial de lazo abierto. Su definición matemática indica que se trata de la diferencia entre señales multiplicada por la ganancia a lazo abierto, ganancia de 1 000 unidades.

$$V_{sal} = G_{ol}(V_a - V_b)$$

$$V_{sal} = (1\ 000)(5V - 2V) = 3\ 000V$$

Para el inciso b, podemos observar que nuevamente se trata de un amplificador diferencial en lazo abierto. La única diferencia es que esta vez solo existe una señal diferencial. La otra entrada posee un valor de referencia de 0V.

$$V_{sal} = G_{ol} V_a$$

$$V_{sal} = (1\ 000)(4mV - 0V) = 4V$$

Para el inciso c y d, cabe destacar que el circuito ya tiene una retroalimentación, por lo que la ganancia se encuentra controlada en el arreglo de resistores; es decir, es un circuito de ganancia a lazo cerrado.

Una vez que determinamos que se trata de un circuito de ganancia a lazo cerrado, debemos analizar el arreglo de resistores y verificar si es un circuito inversor o no inversor.

El primero de estos, inciso c, describe un circuito no inversor de tensión, aplicamos la definición para un circuito de estas características, donde la señal de salida aumentará su magnitud debido a la ganancia del mismo.

$$V_{sal} = G_{cl} V_a$$

$$V_{sal} = \left(1 + \frac{20k\Omega}{10k\Omega}\right) (4mV) = 12mV$$

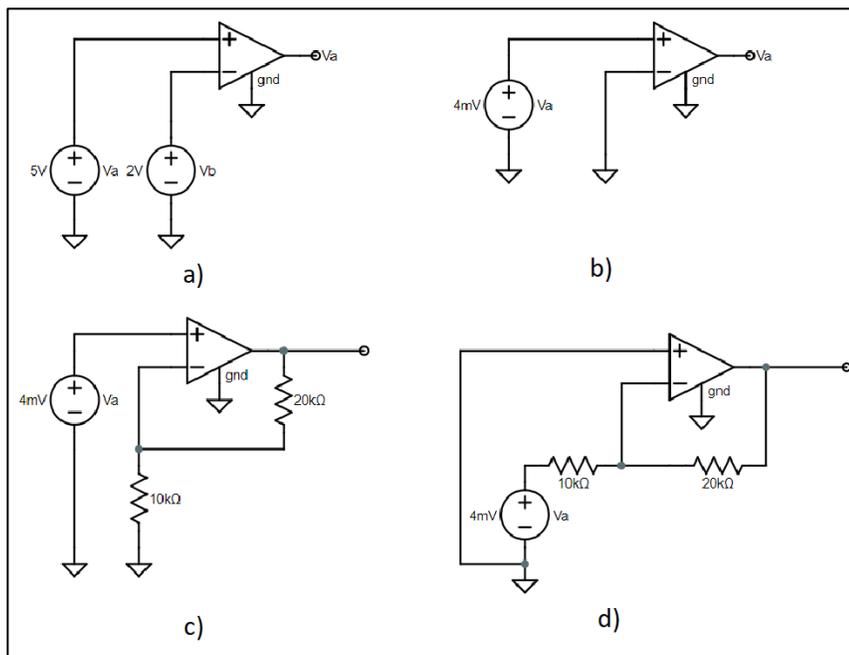
El último de los circuitos de la figura 90, inciso d, describe circuito de ganancia en lazo cerrado, una ganancia inversora de voltaje. La señal será modificada no solo en magnitud sino también en polaridad.

$$V_{sal} = G_{cl} V_a$$

$$V_{sal} = -\left(\frac{20k\Omega}{10k\Omega}\right) (4mV) = -8mV$$

Este ejercicio permite destacar las diferencias entre las ganancias de lazo abierto y lazo cerrado, bajo las características de las señales de entrada y sus configuraciones para controlar la ganancia, en el caso de un lazo cerrado.

Figura 90. **Amplificador operacional inversor de lazo abierto y lazo cerrado**



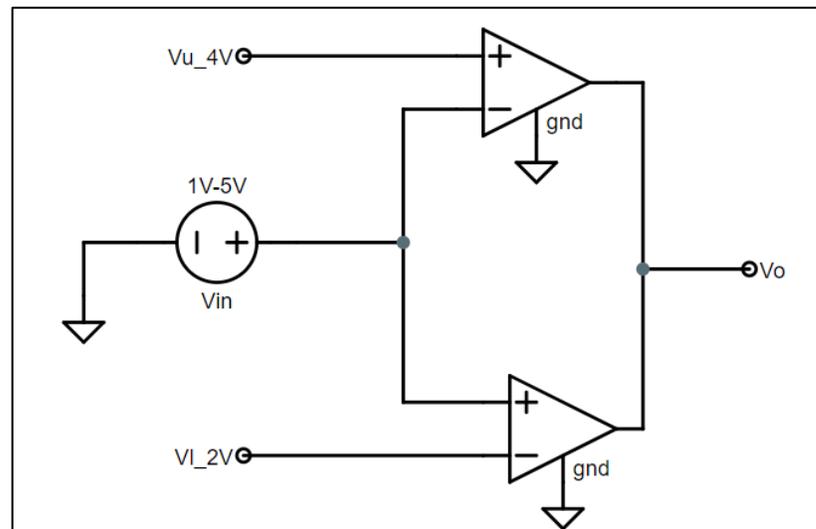
Fuente: elaboración propia

3.3.1.2. Problema 2 – Comparador de ventana

Determinar la gráfica de tensión de salida para el circuito comparador de ventana de la figura 91. Comparar las tensiones de salida y entrada de dicho comparador.

Solución: para determinar la gráfica de tensión de salida con respecto de tiempo, debemos recordar la característica principal del comparador ventana. Este circuito produce una salida en alto cuando la señal de entrada variable entra en el rango estipulado de voltajes permitidos; es decir, existirá tensión de salida siempre y cuando la señal de entrada pase por el intervalo requerido.

Figura 91. Comparador ventana, problema 1



Fuente: elaboración propia

Tabularemos los valores de voltaje en la señal de entrada que varía de 0V a 5V, para luego contrastarlos con los valores de voltaje en la señal de salida,

la cual debe ser un estado alto siempre que la entrada esté en el rango de 2V a 4V.

Se puede observar que mientras que la tensión de entrada no se encuentre en el rango de operación, el comparador tendrá una tensión de salida igual a 0V; caso contrario, cuando dicha señal de entrada se halla en ese intervalo, podemos observar que el comparador cambia su salida a un estado alto, con la magnitud de la fuente de alimentación que se conecta al amplificador, (tabla III).

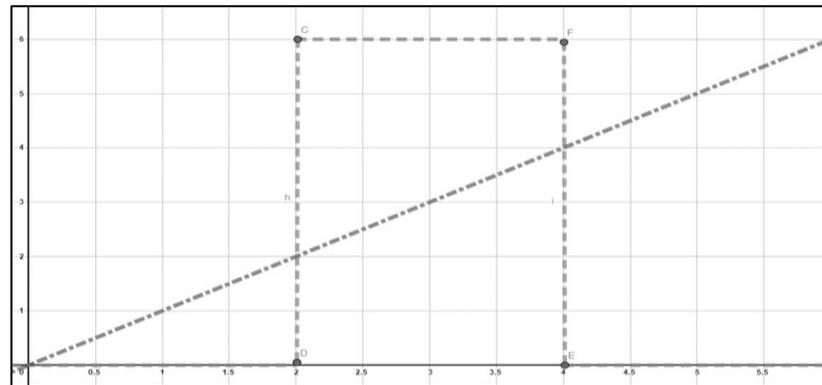
Tabla III. **Valores de tensión entrada vs salida en comparador ventana**

Voltaje de entrada 1V – 5V	Voltaje de salida
1V	0V
2V	6V
3V	6V
4V	6V
5V	0V

Fuente: elaboración propia

Una vez tabulado el análisis de magnitudes, podemos proceder a graficar los voltajes tanto de entrada como de salida, (figura 92). La curva de puntos continuos nos muestra la tensión de carácter lineal en la entrada del circuito y la curva de puntos discontinuos describe el voltaje de salida del comparador. Justamente cuando la entrada alcanza 2V, podemos observar que la salida toma los 6V y viceversa cuando la entrada supera los 4V, la salida pasa a estado bajo.

Figura 92. **Gráfica de tensión de entrada contra tensión de salida en el comparador ventana del amplificador operacional**



Fuente: elaboración propia

3.3.1.3. Problema 3 – Convertidor análogo a digital

Para un circuito convertidor analógico digital, determinar la frecuencia necesaria de muestreo para digitalizar la voz humana a partir de un micrófono de alta impedancia, así como el tiempo que utiliza el dispositivo para cada muestra.

Solución: un circuito convertidor analógico digital necesita digitalizar la señal de entrada. Para ello es necesario obtener muestras del audio y luego codificar las mismas. El primer paso es determinar la frecuencia de muestreo del dispositivo, el cual debe cumplir con el criterio de Nyquist.

$$f_{\text{muestreo}} \geq 2 f_{\text{audio}}$$

La frecuencia del audio, que procede de la voz humana, puede variar entre 0Hz hasta 22kHz, por lo que se tomará el valor máximo que esta puede alcanzar, y con ello determinar la frecuencia de muestreo.

$$f_{muestreo} \geq 2 (22kHz)$$

$$f_{muestreo} \geq 44kHz$$

La frecuencia máxima de muestreo para una señal de audio proveniente de la voz humana, debe manejar una magnitud de $44kHz$. Con lo cual, ahora se puede obtener el periodo entre muestras que debe procesar el dispositivo convertidor analógico digital.

$$T_{muestra} = \frac{1}{f_{muestra}} = \frac{1}{44kHz} = 0,227\mu s$$

El tiempo que utiliza el convertidor para tomar muestra por muestra es de aproximadamente $0,227\mu s$.

3.3.1.4. Problema 4 – Digitalización de señales y tiempo de muestreo

Se desea digitalizar una señal de $6kHz$, para poder obtener un análisis discreto de la señal, ¿qué tiempo mínimo debe utilizar el microcontrolador para ejecutar las instrucciones de muestreo?

Solución: para obtener el tiempo mínimo de muestreo, debemos determinar la frecuencia de Nyquist que debe utilizar el controlador para ejecutar las instrucciones de muestreo.

$$f_{muestreo} \geq 2 (6kHz)$$

$$f_{muestreo} \geq 12kHz$$

Conociendo la frecuencia de muestro, se podrá obtener el tiempo más corto que el controlador debe utilizar para obtener muestras de la señal, si no se cumple con este tiempo mínimo, se obtienen pérdidas de información en la señal digital.

$$T_{muestra} = \frac{1}{f_{muestra}} = \frac{1}{12kHz} = 16,7ms$$

El tiempo mínimo que debe utilizar el controlador para tomar muestras es de aproximadamente 16,7 ms.

3.3.1.5. Problema 5 – Digitalización de señales y niveles de cuantización

Un circuito digitalizador de señales debe cumplir con el proceso de conversión analógico digital. Para ello se toman muestras de la señal y se asocian con un determinado valor binario, y es necesario determinar los niveles que se asignarán. Esto depende de las capacidades del convertidor de señal, a esto le llamamos proceso de cuantización. ¿Cuántos niveles de cuantización tiene un microcontrolador que posee una resolución de 8 bits y a su vez, cuál es la resolución que posee este controlador a una tensión de entrada máxima de 3,3 V?

Solución: los niveles de cuantización delimitan cuantos valores podemos asignar para codificar las muestras. Un circuito con de 8 bits de resolución permite asignar una cantidad finita de valores.

$$niveles\ de\ cuantización = 2^8 = 256$$

Este número indica la cantidad máxima de valores representativos que podemos asignar, pero a nivel de operación debemos diferenciar ese valor con uno, esto debido a que se considera la posición 0 de los niveles, como el primer nivel posible para cuantizar.

$$\text{niveles de cuantización para operar} = 0 \rightarrow (2^8 - 1) = 0 \rightarrow 255$$

Basados en esto, podemos obtener la resolución para cada uno de estos niveles. Esto se determina mediante el voltaje máximo de entrada que puede ingresar al controlador.

$$\text{Resolución} = \frac{3,3V}{256} = 12,89 \frac{mV}{\text{nivel}}$$

La resolución que posee el microcontrolador para 8 bits es de $12,89 \frac{mV}{\text{nivel}}$.

3.3.1.6. Problema 6 – Digitalización y resolución

Para el problema anterior, ahora cambia la capacidad del microcontrolador para muestrear. Con una resolución de 12 bits, determinar los niveles de cuantización y la resolución para cada uno de los niveles.

Solución: nuevamente, aplicamos la definición de valores binarios para determinar el número total de niveles que puede asociar el microcontrolador para cada muestra.

$$\text{niveles de cuantización} = 2^{12} = 4\,096 \text{ niveles}$$

Al conocer estos niveles de cuantización podemos obtener la resolución de cada nivel, a partir de la tensión máxima de entrada que el microcontrolador puede captar.

$$Resolución = \frac{3,3V}{4\ 096} = 806 \frac{\mu V}{nivel}$$

Para este microcontrolador en especial, con una resolución de 12 bits, se puede tener una resolución de $806 \frac{\mu V}{nivel}$. Podemos concluir que, a mayor cantidad de bits, podemos obtener una mejor resolución en el microcontrolador.

3.3.1.7. Problema 7 – Digitalización, cuantización y resolución de 12 bits

Obtener los valores el nivel de cuantización o valor digital asociado a las muestras obtenidas por un microcontrolador a partir de la tensión de la señal analógica de entrada, tabla IV. Considerar que el dispositivo posee una tensión máxima permisible de entrada de $3,3V$ y una resolución de 12 bits.

Tabla IV. **Valores de la tensión de entrada analógica**

Tensión de entrada
1,1 V
2,3 V
4,5 V
5,1 V
6,4 V
7,2 V
8,9 V
9,4 V

Fuente: elaboración propia

Solución: la primera etapa para completar la tabla V de tensiones de entrada, es determinar el voltaje de resolución para cada nivel de cuantización.

$$\text{niveles de cuantización} = 2^{12} = 4\,096 \text{ niveles}$$

Para dichos niveles de cuantización sabemos que la tensión de resolución $3,3\text{ V}$ permite incrementos de $806 \frac{\mu\text{V}}{\text{nivel}}$. Mediante una regla de valores porcentuales se puede determinar el valor de tensión equivalente en la entrada del microcontrolador.

$$\text{nivel digital} = \frac{V_{in}}{V_{\text{resolución}}}$$

Con esta ecuación podemos determinar cada valor digital asociado a una tensión de entrada.

Tabla V. **Tensiones de entrada y su nivel digital asociado**

Tensión de entrada	Nivel digital asociado
1,18 V	1 464
2,32 V	2 878
0,95 V	1 110
3,15 V	3 908
1,36 V	1 687
0,72 V	893

Fuente: elaboración propia

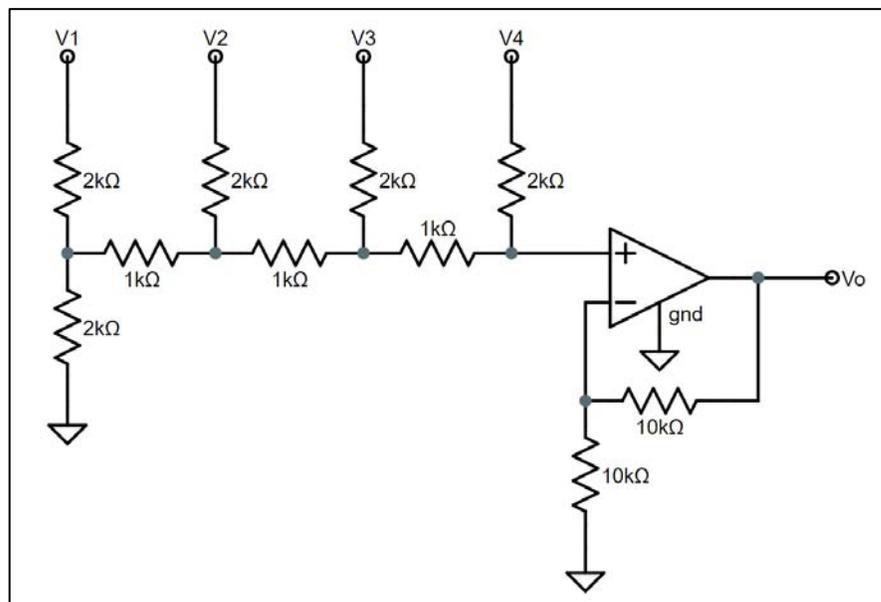
3.3.1.8. Problema 8 – Convertidor digital analógico

Los convertidores digital-analógicos utilizan métodos diferentes para ejecutar el cambio de señal. Para un convertidor del tipo R2R, determinar la señal

analógica a partir de una señal binaria en las entradas del convertidor, (figura 93). Use como referencia la tabla VI.

Solución: para determinar el voltaje de entrada en el convertidor debemos analizar las entradas individuales que lo constituyen. Las cuatro señales de entrada son completamente digitales, por lo que una señal en 1 representa todo el voltaje del microcontrolador y un 0 representara la señal más baja de voltaje en el microcontrolador.

Figura 93. **Convertidor digital analógico, tipo R2R**



Fuente: elaboración propia

Para determinar el voltaje de salida analizamos la definición del circuito R2R, donde la tensión de salida depende de las n entradas que posee el mismo; es decir la resolución que permite el circuito convertidor.

Las tensiones de entrada de la primera a la cuarta, varían dependen si el estado es 1 o 0, ya que de esto indica el voltaje que se encuentra en dicha entrada.

$$V_{out} = \frac{V_0 \times 2^0 + V_1 \times 2^1 + V_2 \times 2^2 + V_4 \times 2^3}{2^4}$$

Figura 94. **Señales binarias de entrada en el convertidor R2R**

Señales de entrada
1001
0101
0011
1111
0001

Fuente: elaboración propia

Al aplicar las señales en la respectiva ecuación del R2R podremos determinar la salida, considerando que el mismo circuito convertidor posee una aplicación de ganancia en su salida, con el fin de aumentar la tensión de salida que manejan las entradas. Se ejemplifica a continuación para la primera señal binaria de entrada.

$$V_o = \left(1 + \frac{10k\Omega}{10k\Omega}\right) \left(\frac{5V \times 2^0 + 0V \times 2^1 + 0V \times 2^2 + 5V \times 2^3}{2^4}\right)$$

$$V_o = (2) \left(\frac{5V \times 1 + 0V \times 2 + 0V \times 4 + 5V \times 8}{16}\right) = 5,625V$$

Figura 95. **Señales binarias y su valor analógico de salida**

Señales de entrada	Señal de salida
1001	5,625V
0101	3,125V
0011	1,875V
1110	8,750V
0001	0,625V

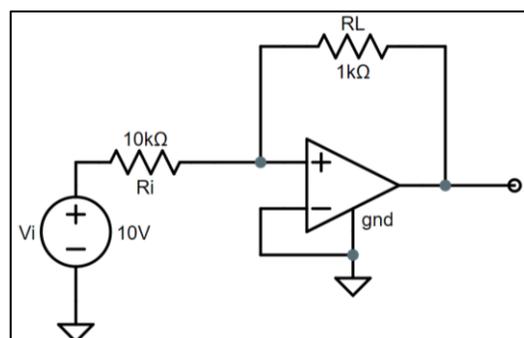
Fuente: elaboración propia

3.3.1.9. Problema 9 – Convertidor inversor de voltaje a corriente

Determinar el valor de corriente que ejecuta el convertidor de voltaje a corriente en modo inversor de la figura 94.

Solución: para determinar el factor de conversión o escala de conversión, se realiza la definición matemática para un convertidor de voltaje a corriente. El análisis de este es simple, utiliza las propiedades intrínsecas del amplificador cuando se habla de la tierra lógica que se produce en este.

Figura 96. **Convertidor de voltaje a corriente**



Fuente: elaboración propia

Entonces podemos asumir que la corriente máxima que pasará por la resistencia de entrada será la misma que la corriente que pasa por la resistencia de carga.

$$I_{Ri} = I_L$$

$$I_L = \frac{V_i}{R_i} = \frac{10V}{10k\Omega} = 1mA$$

El convertidor de voltaje a corriente ejecuta una conversión de $10V \rightarrow 1mA$.

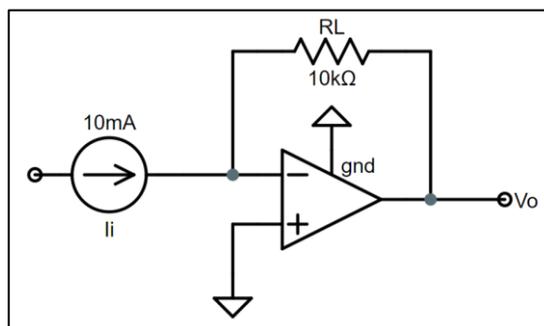
3.3.1.10. Problema 10 – Convertidor inversor de corriente a voltaje

Determinar el valor de voltaje que ejecuta el convertidor de corriente a voltaje en modo inversor de la figura 95.

Solución: la corriente que entra al amplificador será la misma que pasa por la resistencia de carga, por lo que a partir de ello podemos obtener la tensión que tendrá dicha resistencia, la cual constituye el potencial de salida del amplificador en modo convertidor.

$$I_i = I_o = -\frac{V_o}{R_L}$$

Figura 97. **Convertidor de corriente a voltaje**



Fuente: elaboración propia

El voltaje de salida no es más que la multiplicación entre la corriente de entrada por la resistencia de carga, (figura 97).

$$V_o = -I_i R_L = -(10mA)(10k\Omega) = -100V$$

El convertidor de corriente a tensión puede ejecutar una conversión máxima de $10mA \rightarrow -100V$. El signo negativo de la tensión de salida proviene de la medición de tensión que se da desde la entrada no inversora del amplificador hasta el nodo de tensión de salida.

3.3.1.11. **Problema 11 – Convertidor no inversor de voltaje a corriente**

Para el siguiente problema aplicaremos un convertidor de voltaje a corriente en modo no inversor. Determinar la conversión máxima que se puede obtener a partir del convertidor basado en amplificador operacional de la figura 98.

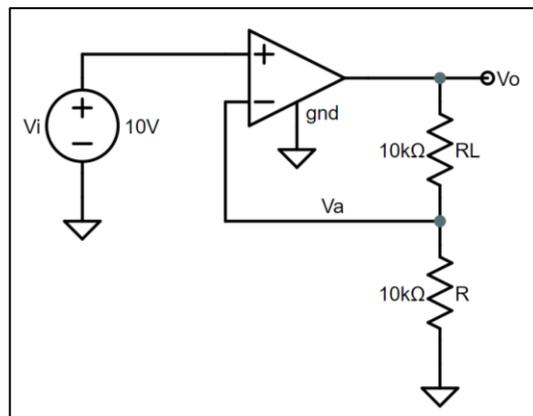
Solución: para el caso de un circuito no inversor, se sabe que la señal de tensión de salida no se verá afectada en la polaridad de la misma. Las características internas del amplificador operacional nos permiten asumir la tensión que estará entre los nodos respectivos.

$$V_a = V_i$$

La tensión V_a en el nodo A será igual a la señal de entrada, debido a la alta impedancia que posee el circuito interno del amplificador. De esta manera determinamos la corriente que existe en la resistencia R_1 por la teoría de circuitos elemental sabemos que al estar dicha resistencia R_1 en serie con la resistencia de carga R_L compartirán la misma corriente en dicha rama. Recordemos que la corriente no puede derivar por la conexión de entrada inversora del Amp Op por su alta impedancia.

$$I_L = \frac{V_i}{R_1} = \frac{10V}{10k\Omega} = 1mA$$

Figura 98. **Convertidor voltaje a corriente, modo no inversor**



Fuente: elaboración propia

El convertidor de tensión a corriente no inversor puede ejecutar una conversión máxima de $10V \rightarrow 1mA$.

3.3.1.12. Problema 12 – Salida en modo diferencial

Determinar la señal diferencial del circuito diferencial, para una entrada de tensión alterna $V_1 = 6V$ y una segunda entrada alterna $V_2 = 4V$.

Solución: para determinar el voltaje diferencial debemos aplicar únicamente la diferencia entre las dos señales de entrada. Recordemos que la propiedad de salida diferencial se da cuando ambas señales poseen una polaridad semejante, independientemente de la magnitud que ambas tengan.

$$V_{dif} = V_1 - V_2$$

$$V_{dif} = 6V - 4V = 2V$$

3.3.1.13. Problema 13 – Salida en modo común

Determinar la tensión de salida de un circuito diferencial. Este circuito tiene dos señales de entrada de igual magnitud, pero polaridad contraria; son dos señales iguales, pero de signo diferente, $V_1 = 3V$ y $V_2 = -3V$.

Solución: a diferencia del problema anterior, los signos contrarios producen un efecto de rechazo común, donde las dos señales al ser de signos contrarios, pero de igual magnitud tendrán una salida promediada; es decir, la tensión será de igual proporción.

$$V_{dif} = V_1 - (-V_2)$$

$$V_{comun} = \frac{V_1 + V_2}{2} = 3V$$

3.3.1.14. Problema 14 – Amplificador operacional de instrumentación

Para el amplificador de instrumentación de la figura 99, determinar el voltaje de salida para las entradas $V_{i1} = 5,001V$ y $V_{i2} = 5,000V$, con una resistencia de ganancia controlada de aproximadamente 50Ω y resistencia interna de $25k\Omega$. Luego analizar el mismo amplificador para las siguientes entradas $V_{i1} = -1,001V$ y $V_{i2} = -1,002V$.

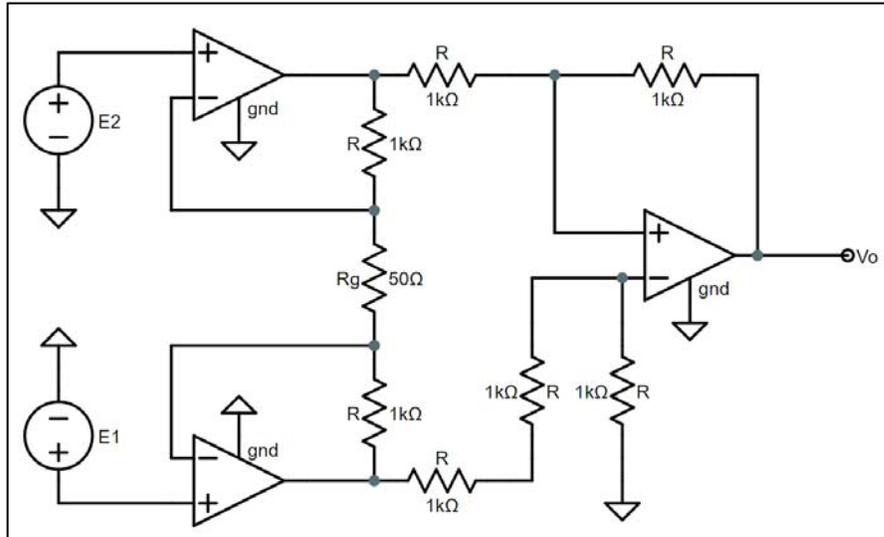
Solución: la definición puntual de la salida de tensión en el amplificador de instrumentación necesita conocer las dos entradas de tensión y la ganancia total del circuito de instrumentación.

$$G = \left(1 + \frac{2R}{R_g}\right)$$

$$G = \left(1 + \frac{2(25k\Omega)}{50\Omega}\right) = 1\ 001$$

Esta magnitud se le conoce como la ganancia del circuito de amplificador de instrumentación, por lo que ahora solo queda aplicar la diferencia de tensiones de entrada para determinar la señal de salida del amplificador.

Figura 99. **Amplificador de instrumentación, problema 14**



Fuente: elaboración propia

$$V_o = G(V_2 - V_1)$$

Para el caso en el que las entradas tienen las siguientes magnitudes $V_{i1} = 5.000V$ y $V_{i2} = 5.001V$, la señal de salida es:

$$V_o = 1\,001(5,001 - 5,000) = 1,001V$$

Para el siguiente caso en el que las entradas tienen las siguientes magnitudes $V_{i1} = -1,001V$ y $V_{i2} = -1,002V$, la señal de salida es:

$$V_o = 1\,001(-1,002 - 1,001) = -1,001V$$

3.3.1.15. Problema 15 – Amplificador operacional de instrumentación con factor de ganancia menor a la unidad

Para el circuito de la figura 100, determinar la diferencia de tensión de entrada en el amplificador de instrumentación, que posee una ganancia $a = 0,5$ y una tensión de salida $V_o = 10V$. Para mayor simplificación, la resistencia interna de diseño en el circuito de instrumentación es de $1k\Omega$.

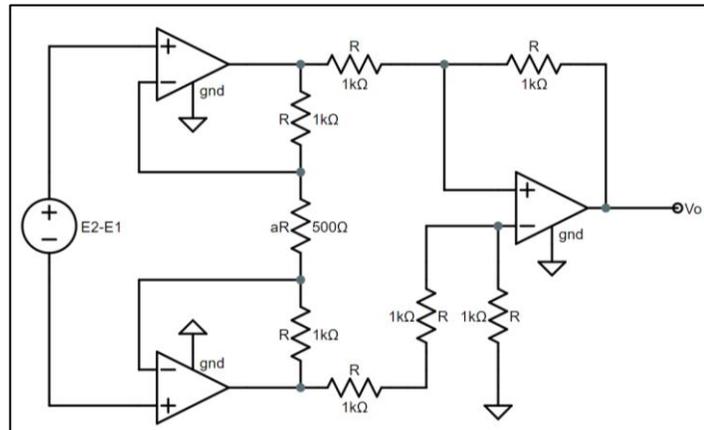
Solución: para analizar el circuito del amplificador de instrumentación, debemos analizar la ganancia del circuito, tal y como se realizó en el problema anterior.

$$G = \left(1 + \frac{2R}{R_g}\right) = \left(1 + \frac{2R}{aR}\right)$$

La expresión anterior se puede simplificar e independizar de la resistencia interna de diseño que posee el amplificador operacional. A partir de aquí podemos trabajar con la definición matemática del voltaje de salida en un amplificador de instrumentación.

$$V_o = \left(1 + \frac{2}{a}\right)(V_2 - V_1)$$

Figura 100. **Amplificador de instrumentación problema 15**



Fuente: elaboración propia

Con ello se puede determinar la tensión diferencial de entrada del circuito de amplificador de instrumentación, despejamos para la entrada diferencial y se hace la sustitución de datos respectiva.

$$10V = \left(1 + \frac{2}{0,5}\right) (V_2 - V_1)$$

$$(V_2 - V_1) = \frac{10V}{5} = 2V$$

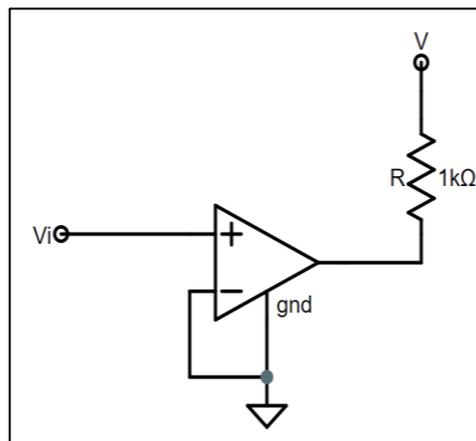
La tensión de entrada diferencial en el amplificador es de 2V.

3.3.1.16. **Problema 16 – Detector de tensión basado en amplificador de instrumentación**

El circuito de la figura 101 describe un dispositivo detector de tensión, más conocido como detector de cruce por cero.

Obtener la gráfica de tensión de entrada versus tensión de salida. La señal de entrada sinusoidal esta descrita por $v_i = 12 \text{ Sen}(t) \text{ Volts}$ y la tensión de alimentación en la carga es de $V = 12V$.

Figura 101. **Amplificador operacional como detector de cruce por cero, comparador de ventana**



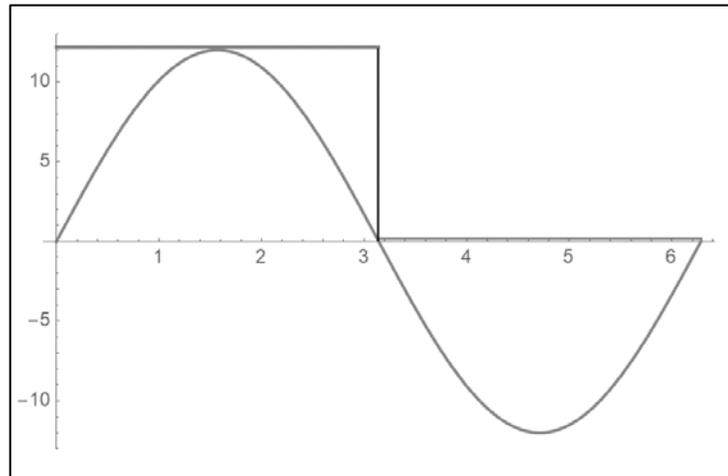
Fuente: elaboración propia

Solución: para trazar la curva de tensiones en el amplificador operacional, es necesario analizar el funcionamiento del detector de cruce por cero.

El funcionamiento es bastante básico, cuando la señal de entrada pasa por un valor de tensión igual a cero volts, la tensión de salida cambiará de estado alto a bajo o viceversa, dependiendo de donde se encuentre la señal de entrada.

Para la figura 101, el detector tendrá una salida alta, puesto que la carga está conectada a la fuente; lo que se busca es que cuando se cruce por cero volts.

Figura 102. **Tensión de entrada versus tensión de salida**



Fuente: elaboración propia

3.3.1.17. **Problema 17 – Filtro activo pasabajos**

Determinar la tensión de salida del filtro activo pasabajos de la figura 103, y consigo hallar la frecuencia de operación del filtro.

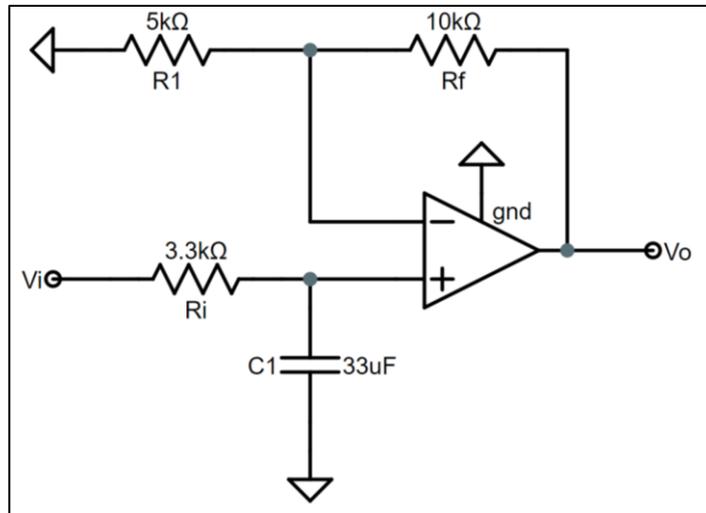
Solución: determinar la función de transferencia del circuito pasabajos es bastante sencillo, solo debemos analizar el circuito serie entre el resistor de entrada y el capacitor de entrada.

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{R + 1/j\omega C} = \frac{1}{j\omega RC + 1}$$

Puesto que el fin de este trabajo no es tratar con señales de corriente alterna, nos limitamos a obtener la expresión de transferencia para un filtro

pasabajos. Ahora analizaremos la ganancia que proporciona el circuito de amplificador operacional en modo no inversor.

Figura 103. **Filtro activo pasabajos**



Fuente: elaboración propia

$$G = 1 + \frac{R_f}{R_1} = 1 + \frac{10k\Omega}{5k\Omega} = 3$$

Ahora, teniendo tanto la función de transferencia del circuito de filtrado y la ganancia del circuito de amplificación, podremos analizar la tensión de salida del filtro activo pasabajos.

Para un filtro pasabajos, se sabe que la tensión de salida será una operación de convolución entre la señal de entrada en el filtro y la función de transferencia característica del mismo filtro.

$$v_o = H(j\omega) * v_i$$

$$V_o = G V_i$$

De este punto asumiremos que la tensión de salida del filtro se convierte en la tensión de entrada para el amplificador operacional, por lo que solo queda realizar una sustitución entre ambas expresiones.

$$V_o = G (H(j\omega) * v_i)$$

$$V_o = 3 \left(\frac{1}{j\omega(3.3k\Omega)(33\mu F) + 1} * v_i \right)$$

$$V_o = \frac{3}{0,1089 j\omega + 1} * v_i$$

De esta manera se determina la función de la tensión de salida en un filtro activo pasabajos. No analizamos el circuito de una forma más profunda, puesto que este estudio no trata de señales en corriente alterna; se analiza la ganancia del amplificador operacional como una aplicación en los filtros.

3.3.1.18. Problema 18 – Amplificador operacional en modo integrador

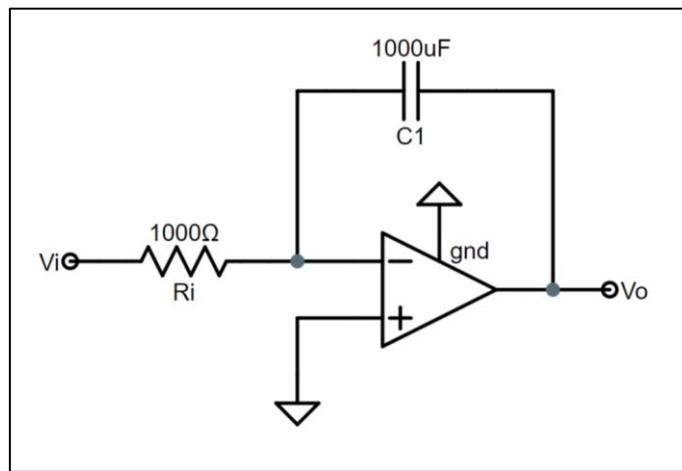
La señal de entrada de un circuito de amplificador operacional en modo integrador es constante con magnitud de $5V$. Cada cierto tiempo la señal de entrada cambia únicamente de polaridad, es decir $-5V$. Con el circuito de la figura 104, determinar la forma de onda de la tensión de salida.

Solución: para determinar la tensión de salida de un circuito integrador, debemos retomar la ecuación 91, que describe la integración con respecto del

tiempo de la señal de entrada en el circuito, y da como resultado el voltaje de salida del mismo.

$$V_{sal} = \int \frac{(5V)}{RC} dt$$

Figura 104. **Circuito integrador con amplificador operacional**



Fuente: elaboración propia

Analizaremos la tensión de salida cuando el voltaje de entrada es de 5V y cuando es $-5V$, puesto que este cambia en determinado tiempo. A partir de ello tenemos que la integración con respecto del tiempo será con base en un valor constante.

$$V_{sal} = \frac{(5V)}{(1000\Omega)(1000\mu F)} \int dt = 5t$$

$$V_{sal} = \frac{(-5V)}{(1000\Omega)(1000\mu F)} \int dt = -5t$$

Podemos observar que la tensión de salida tendrá una forma de onda similar, pero cambiará la pendiente de la curva según sea la polaridad en la tensión de entrada. Para expresar el voltaje de salida como función de tiempo, determinaremos límites de tiempo acorde a la variación que tiene la señal de entrada.

$$V_{entrada} = \begin{cases} 5V & 0 < t \leq t_1 \\ -5V & t_1 < t \leq t_2 \end{cases}$$

$$V_{salida} = \begin{cases} 5t \text{ V} & 0 < t \leq t_1 \\ -5t \text{ V} & t_1 < t \leq t_2 \end{cases}$$

El instante temporal que va de 0 a t_1 representa el instante en que la señal de entrada es de polaridad positiva, y el instante temporal que va de t_1 a t_2 , representa cuando la señal de entrada ha invertido su polaridad.

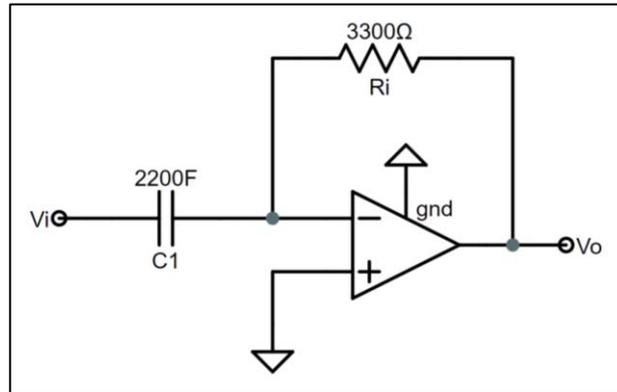
3.3.1.19. Problema 19 – Amplificador operacional en modo derivador

El circuito de la figura 105 describe un circuito derivador con amplificador operacional, este posee una señal de entrada sinusoidal $v_i = 5 \text{ Sen}\left(\frac{\pi}{4}t\right)$. Determinar la tensión de salida en dicho circuito.

Solución: para hallar la tensión de salida del derivador, debemos retomar la definición matemática que describe el voltaje de salida en un derivador, como la primera derivada de la señal de entrada, multiplicada por una constante dada por la configuración propia del circuito.

$$V_{sal} = - \left(\frac{d}{dt} 5 \text{ Sen} \left(\frac{\pi}{4} t \right) \right) RC$$

Figura 105. **Circuito derivador con amplificador operacional**



Fuente: elaboración propia

De esta manera solo queda derivar la función de la tensión de entrada con respecto del tiempo y tendremos la tensión de salida en el circuito derivador.

$$V_{sal} = - \left(\frac{d}{dt} 5 \text{ Sen} \left(\frac{\pi}{4} t \right) \right) (3\ 300\Omega)(2\ 200\mu F)$$

$$V_{sal} = -7,26 \left(\frac{d}{dt} 5 \text{ Sen} \left(\frac{\pi}{4} t \right) \right) = -7,26 \left[\frac{\pi}{4} \text{ Cos} \left(\frac{\pi}{4} t \right) \right]$$

$$V_{sal} = -1,815\pi \text{ Cos} \left(\frac{\pi}{4} t \right) = -1,815\pi \text{ Sen} \left(\frac{\pi}{4} t + \frac{\pi}{2} \right)$$

La tensión de salida del circuito está descrita por una función senoidal con un desfase de $\frac{\pi}{2}$ y menor amplitud que la propia señal de entrada, podemos notar que la frecuencia angular de la señal se mantiene para ambas señales.

3.3.2. Laboratorios

Se presenta una serie de laboratorios. Estos se fundamentan en comprobar todo lo visto en la teoría y ejercicios del tema de amplificadores de instrumentación. Se recomienda realizar cada uno de estos laboratorios con el software MultiSim. Todos los diagramas y características se encuentran desarrollados en la conceptualización del curso, en la parte antes mencionada.

3.3.2.1. Laboratorio 1 – Comparador de ventana

Laboratorio desarrollado para analizar el funcionamiento del circuito comparador de ventana.

3.3.2.1.1. Objetivos

- Comprender el funcionamiento de un circuito comparador de ventana.
- Analizar y comparar el resultado práctico en software con el desarrollo teórico de la tensión de salida que presenta el circuito comparador de ventana.

3.3.2.1.2. Material y equipo

- Software de simulación MultiSim.
- Fuente de alimentación de +12V y –12V.
- Amplificador operacional LM324 (Internamente posee más de un amplificador operacional).

- Generador de señales.
- Multímetro con medición de VDC.
- Elementos eléctricos del diagrama experimental en la figura 91.

3.3.2.1.3. Instrucciones

- Determinar la tensión de salida en el comparador de ventana. Los límites superior e inferior del comparador de ventana definen el rango de tensiones para los cuales existirá una salida de estado alto.
- Variar el voltaje de entrada entre $1V$ y $5V$, esto producirá cambios en la salida del dispositivo.
- Desarrollar este circuito práctico con la ayuda del amplificador operacional UA741.
- Comparar la respuesta teórica desarrollada en el problema 2 de la sección de amplificadores de instrumentación.
- Completar la tabla VI de tensiones de entrada contra tensión de salida para el comparador de ventana.
- Describir los cambios que se observan en los voltajes de salida, cuando las variaciones en la tensión de entrada son muy aproximadas a los voltajes referenciales.
- Determinar si existe discrepancia en los valores teóricos y, si lo hay, a qué se deben estas.
- Concluir con base en los resultados obtenidos.

Tabla VI. **Valores de tensión entrada vs salida en comparador ventana, laboratorio 1 de amplificadores de instrumentación**

Voltaje de entrada 1V – 5V	Voltaje de salida
1,0V	
1,5V	
1,8V	
2,0V	
2,5V	
3,0V	
3,2V	
3,5V	
4,0V	
4,5V	
4,7V	
5,0V	

Fuente: elaboración propia

3.3.2.2. Laboratorio 2 – Convertidor R2R

Laboratorio desarrollado para analizar el funcionamiento del circuito convertidor R2R, de señal digital a señal analógica.

3.3.2.2.1. Objetivos

- Comprender el funcionamiento de los convertidores digital analógicos R2R
- Analizar y comparar el resultado práctico en software con el desarrollo teórico de la tensión de salida que presenta un convertidor de señal digital a señal analógica.

3.3.2.2.2. Material y equipo

- Software de simulación MultiSim.
- Fuente de alimentación de $+12V$ y $-12V$.
- Amplificador operacional UA741.
- Generador de señales.
- Elementos eléctricos del diagrama experimental en la figura 93.

3.3.2.2.3. Instrucciones

- Desarrollar el circuito convertidor de la figura 93 en MultiSim. Las tres tensiones digitales son de $5V$.
- Se debe manipular los tres voltajes digitales para obtener diferentes tensiones de salida. Con ello se puede convertir una cantidad máxima de 16 entradas diferentes. Todos darán como resultado un voltaje analógico proporcional al valor binario de entrada y con ello completar la tabla VII para las diferentes entradas que se presentan.
- Concluir con base en los resultados obtenidos.

Tabla VII. **Señal binaria de entrada y señal analógica de salida**

Señales de entrada	Señal de salida
0001	
0101	
0111	
1000	
1011	
1101	

Fuente: elaboración propia

3.3.2.3. Laboratorio 3 – Convertidor de voltaje a corriente

Laboratorio desarrollado para analizar el funcionamiento de un convertidor de voltaje a corriente.

3.3.2.3.1. Objetivos

- Comprender el funcionamiento de los convertidores de voltaje a corriente
- Analizar y comparar el resultado práctico en software con el desarrollo teórico de la corriente entregada a la resistencia de carga, a partir de un voltaje de entrada.

3.3.2.3.2. Material y equipo

- Software de simulación MultiSim.
- Fuente de alimentación de $+12V$ y $-12V$.
- Amplificador operacional UA741.
- Multímetro con medición de VDC.
- Elementos eléctricos del diagrama experimental en la figura 96.

3.3.2.3.3. Instrucciones

- Se analizará en MultiSim el convertidor de tensión a corriente en modo no inversor. La corriente entregada dependerá de la carga conectada en el circuito (figura 96).
- Determinar el valor de conversión para una carga de $10k\Omega$, $20k\Omega$ y $25k\Omega$ cuando existe una tensión de $10V$ en la entrada.

- Comparar estos valores con el análisis teórico descrito en el problema 9 de la sección de aplicaciones en instrumentación para el amplificador de operacional y completar la tabla de rangos de conversión.
- Concluir con base en los resultados obtenidos.

Tabla VIII. **Rangos de conversión de voltaje a corriente**

Resistencia de carga	Rango de conversión
10kΩ	
17kΩ	
20kΩ	
21kΩ	
25kΩ	

Fuente: elaboración propia

3.3.2.4. Laboratorio 4 – Convertidor de corriente a voltaje

Laboratorio desarrollado para analizar el funcionamiento de un convertidor de corriente a voltaje.

3.3.2.4.1. Objetivos

- Comprender el funcionamiento de los convertidores de corriente a voltaje.
- Analizar y comparar el resultado práctico en software con el desarrollo teórico de la tensión entregada a la resistencia de carga, a partir de una corriente de entrada.

3.3.2.4.2. Material y equipo

- Software de simulación MultiSim.
- Fuente de alimentación de $+12V$ y $-12V$.
- Amplificador operacional UA741.
- Multímetro con medición de VDC.
- Elementos eléctricos del diagrama experimental en la figura 97.

3.3.2.4.3. Instrucciones

- Se analizará en MultiSim el convertidor de corriente a tensión en modo inversor. La corriente entregada dependerá de la carga conectada en el circuito (figura 97).
- Determinar el valor de conversión para una carga de $15k\Omega$, $22k\Omega$ y $30k\Omega$ cuando existe una corriente de $10mA$ en la entrada.
- Comparar estos valores con el análisis teórico descrito en el problema 10 de la sección de aplicaciones en instrumentación para el amplificador de operacional y completar la tabla IX de rangos de conversión.
- Concluir con base en los resultados obtenidos.

Tabla IX. **Rangos de conversión de corriente a voltaje para 10mA**

Resistencia de carga	Rango de conversión
$15k\Omega$	
$22k\Omega$	
$30k\Omega$	

Fuente: elaboración propia

3.3.2.5. Laboratorio 5 – Amplificador diferencial

Laboratorio desarrollado para analizar el funcionamiento de un amplificador en modo diferencial.

3.3.2.5.1. Objetivos

- Comprender el funcionamiento del voltaje diferencial en un amplificador operacional.
- Analizar y comparar el resultado práctico en software con el desarrollo teórico de la tensión diferencial que se presenta en un amplificador operacional, para diferentes señales de entrada.

3.3.2.5.2. Material y equipo

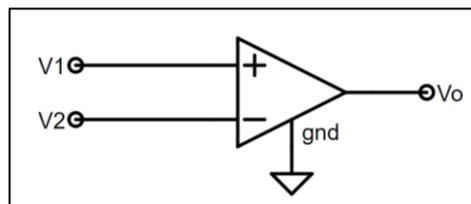
- Software de simulación MultiSim.
- Fuente de alimentación de $+12V$ y $-12V$.
- Amplificador operacional UA741.
- Generador de señales de 2 canales.
- Multímetro con medición de VDC.

3.3.2.5.3. Instrucciones

- Determinar la señal de salida para un amplificador operacional, en modo diferencial. Las dos tensiones de entrada son V_1 y V_2 . El generador de señales que se utilizará debe tener dos canales de salida para poder obtener las diferentes señales en el amplificador operacional. Las entradas deben cumplir con las funciones de la tabla X.

- Armar el circuito de la figura 103 en MultiSim y comprobar su análisis práctico con la teoría desarrollada en el problema 12 y 13, de los ejercicios de análisis de la sección de aplicaciones en instrumentaciones para el amplificador operacional.

Figura 106. **Laboratorio 5, amplificador operacional en modo diferencial**



Fuente: elaboración propia

- Se presenta la tabla de tensiones de entrada, las tensiones de entrada deben cumplir con las características que se presentan, el generador de señales debe poseer la capacidad de modificar la amplitud, frecuencia y fase de las señales, con el fin de obtener un análisis experimental amplio.
- Concluir con base en los resultados obtenidos.

Tabla X. **Voltajes diferenciales entrada**

Señales de entrada	Señal de salida
$v_1 = 5 \text{ Sen}(600\pi t)$ $v_2 = -5 \text{ Sen}(600\pi t)$	
$v_1 = 4 \text{ Sen}(600\pi t)$ $v_2 = 2 \text{ Sen}(600\pi t)$	
$v_1 = 5 \text{ Sen}(600\pi t)$ $v_2 = 5 \text{ Sen}(600\pi t)$	

Fuente: elaboración propia

3.3.2.6. Laboratorio 6 – Funcionamiento interno de un amplificador de instrumentación

Laboratorio desarrollado para comprender el funcionamiento intrínseco de un amplificador de instrumentación.

3.3.2.6.1. Objetivos

- Comprender el funcionamiento interno de un amplificador de instrumentación.
- Analizar y comparar el resultado práctico en software con el desarrollo teórico de la ganancia de un amplificador de instrumentación, construido con amplificadores operacionales.

3.3.2.6.2. Material y equipo

- Software de simulación MultiSim.
- Fuente de alimentación de $+12V$ y $-12V$.
- Amplificadores operacionales UA741.
- Multímetro con medición de VDC.
- Elementos eléctricos del diagrama experimental en la figura 99.

3.3.2.6.3. Instrucciones

- Se busca comprender el funcionamiento interno de un amplificador de instrumentación, y para ello se armará de forma conceptual, con ayuda de amplificadores operacionales de tipo estándar.
- Desarrollar el circuito de la figura 99 en MultiSim. Los elementos eléctricos del circuito deben cumplir, en su mayoría, con los indicados en dicho

diagrama, con el fin de obtener mucha semejanza con un amplificador de instrumentación de fábrica.

- Las dos señales de entrada son $1,000V$ y $1,050V$ respectivamente; utilizar un multímetro de alta resolución para obtener los valores de tensión más aproximados en la fuente.
- Determinar la tensión de salida y comparar el desarrollo práctico con el análisis teórico del problema 14.
- Concluir con base en los resultados obtenidos.

3.3.2.7. Laboratorio 7 – Ganancia variable en un amplificador de instrumentación.

Laboratorio desarrollado para comprender el funcionamiento de un amplificador de instrumentación con ganancia variable.

3.3.2.7.1. Objetivos

- Comprender el funcionamiento de un amplificador de instrumentación de ganancia variable.
- Analizar y comparar el resultado práctico en software con el desarrollo teórico de la ganancia variable de un amplificador de instrumentación, construido con amplificadores operacionales.

3.3.2.7.2. Material y equipo

- Software de simulación MultiSim.
- Fuente de alimentación de $+12V$ y $-12V$.
- Amplificadores operacionales UA741.
- Multímetro con medición de VDC.
- Elementos eléctricos del diagrama experimental en la figura 99.

- Resistor variable para aR, esto con el fin de modificar la ganancia del amplificador de instrumentación.

3.3.2.7.3. Instrucciones

- El desarrollo de este laboratorio es semejante el anterior, pero basado en el mismo circuito que se armó, se busca variar la ganancia del mismo.
- El resistor aR, que tiene un valor de 50Ω , debe tener la característica de poder modificar su valor resistivo; esto se consigue con una resistencia variable.
- Modificar el circuito, cambiar el resistor aR por una resistencia variable de $0\Omega \rightarrow 1k\Omega$.
- Medir la tensión de salida para las variaciones del resistor de la tabla XI.
- Las tensiones de entrada deben tener la misma magnitud que las del laboratorio 6, con el fin de obtener la ganancia para cada valor de resistencia.
- Comparar el desarrollo en MultiSim con la teoría del problema 14 y 15, y describir el comportamiento de la ganancia en el amplificador de instrumentación.
- Concluir con base en los resultados obtenidos.

Tabla XI. **Ganancia en el amplificador de instrumentación**

aR Resistor de ajuste de ganancia	Ganancia
50 Ω	
150 Ω	
500 Ω	
850 Ω	
1k Ω	

Fuente: elaboración propia

3.3.2.8. Laboratorio 8 – Aplicación para un amplificador de instrumentación

Laboratorio desarrollado para comprender la aplicación principal para un amplificador de instrumentación.

3.3.2.8.1. Objetivos

- Comprender el funcionamiento de un amplificador de instrumentación con una aplicación directa.
- Analizar el resultado práctico en software de un amplificador de instrumentación con medición de sensores.

3.3.2.8.2. Material y equipo

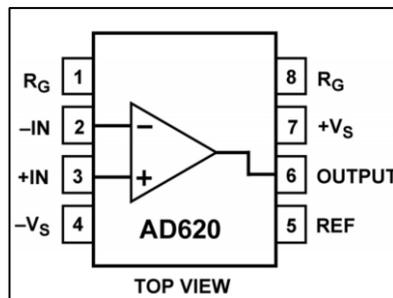
- Software de simulación MultiSim.
- Fuente de alimentación de $+12V$ y $-12V$.
- Amplificador de instrumentación AD620.
- Multímetro con medición de VDC.
- Micrófono.
- Resistor variable de $1k\Omega$.
- Elementos eléctricos del diagrama experimental en la figura 108.

3.3.2.8.3. Instrucciones

- Determinar la amplificación que produce el amplificador de instrumentación sobre una señal de baja tensión.

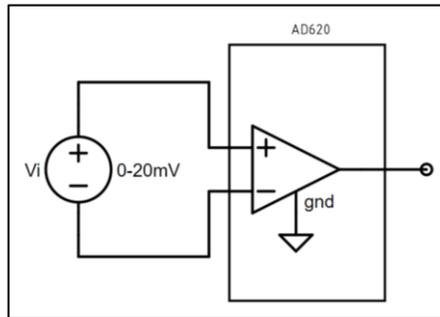
- El micrófono produce un voltaje para cada vibración incidente, pero estas señales son de escala muy pequeña, por lo que se hace necesario manipular dicha señal y cambiar sus características eléctricas.
- Las dos salidas del micrófono se conectan directamente en $-in$ y en $+in$. Ahí será la señal de entrada, el voltaje de salida se hará presente en *output*.
- Solo debemos ajustar la resistencia de ganancia, conectaremos el resistor variable de $1k\Omega$, a los pines Rg ; es decir, la resistencia se conectará entre el pin 1 y el pin 8, figura 107.
- Medir el voltaje del micrófono, que entra al amplificador de instrumentación, y la salida del mismo.
- Determinar la ganancia de tensión que se produce en el circuito.
- Concluir con base en los resultados obtenidos.

Figura 107. **Conexiones físicas del amplificador de instrumentación AD620 para el laboratorio 8**



Fuente: Electrónica y Robótica. (2018). *Amplificador de instrumentación*. Recuperado en <http://i2celectronica.com/amplificadores/262-amplificador-de-instrumentacion-ad620an.html>.

Figura 108. **Diagrama esquemático del laboratorio 8**



Fuente: elaboración propia

3.3.2.9. Laboratorio 9 – Simulación de osciloscopio

Laboratorio desarrollado para la simulación de un osciloscopio mediante software.

3.3.2.9.1. Objetivos

- Comprender el funcionamiento básico de un osciloscopio mediante la simulación de un amplificador de instrumentación.
- Analizar las tensiones de entrada y salida para el amplificador de instrumentación a través de un método visual para las señales continuas.

3.3.2.9.2. Material y equipo

- Software de simulación MultiSim.
- Fuente de alimentación de +12V y -12V.
- Amplificador de instrumentación AD620.
- Multímetro con medición de VDC.

- Micrófono.
- Resistor variable de $1k\Omega$.
- Elementos eléctricos del diagrama experimental en la figura 107.
- Osciloscopio digital de dos canales.

3.3.2.9.3. Instrucciones

- Se analizará el mismo circuito de amplificador de instrumentación del laboratorio 8. Seguir las instrucciones del mismo.
- Una vez armado el circuito, se hará uso del osciloscopio. Esta herramienta puede ser localizada en la barra lateral derecha del entorno de trabajo, justamente donde se localiza la herramienta de multímetro. Una vez seleccionado se podrá modificar las características del mismo.
- En MultiSim utilizar el osciloscopio de dos canales, y calibrar el mismo mediante el conector de pruebas. Una vez calibrado ajustar las escalas X y Y en el mismo rango para ambas entradas del osciloscopio.
- Luego de ello se conectará una entrada del osciloscopio a la señal de entrada del amplificador de instrumentación, una conexión en paralelo.
- La siguiente entrada del osciloscopio la conectaremos a la salida del amplificador. Con ello podremos registrar la señal de tensión que sale del micrófono y la señal amplificada que sale del dispositivo de instrumentación.
- Para mayor comodidad se puede ajustar las escalas de ambas entradas del osciloscopio, a manera que se pueda observar la figura de onda.
- Con eso podemos trazar las curvas con mayor facilidad. No olvidar las escalas de tiempo y amplitud. Graficar la tensión de entrada y tensión de salida para una ganancia de 10, 100 y 1 000 unidades.

- Recuerde que la salida del micrófono produce un voltaje del orden de milivoltios, por lo que es posible alcanzar una amplificación de 1 000 unidades.
- Concluir con base en los resultados obtenidos.

3.4. Mediciones con puentes en corriente directa

En esta sección analizaremos diferentes problemas aplicados a los temas de las mediciones con puentes de corriente directa. Así mismo se incluye laboratorios virtuales y material audiovisual de los temas mencionados, como complemento práctico para entender y desarrollar los temas descritos en la conceptualización del curso.

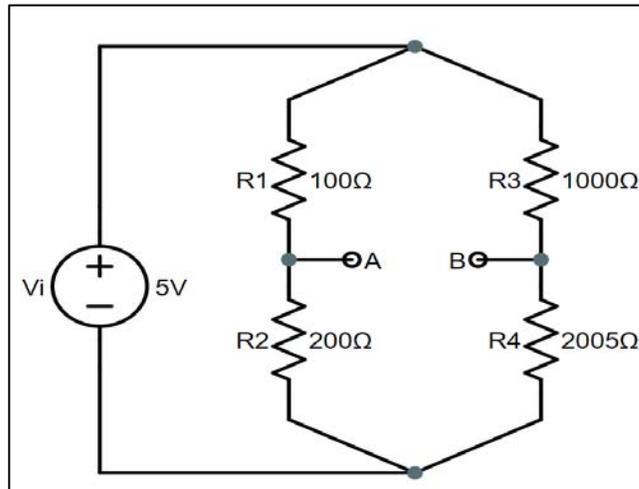
3.4.1. Ejercicios de análisis

Cada problema presenta el enunciado correspondiente y luego se desarrolla la solución del mismo.

3.4.1.1. Problema 1 – Puente de *Wheatstone*

La figura 109 muestra un puente de *Wheatstone*. El voltaje de la fuente es de 5V con resistencia interna demasiado baja para producir algún efecto. Determinar la deflexión del galvanómetro para los desequilibrios de la tabla XII si este tiene una sensibilidad de $\frac{15mm}{\mu A}$, con resistencia interna de 100Ω.

Figura 109. Circuito puente de *Wheatstone*, problema 1



Fuente: elaboración propia

Solución: para desarrollar este problema debemos recordar el funcionamiento del puente de *Wheatstone*. Para ello determinaremos la resistencia equivalente de *Thevenin* y el voltaje equivalente de *Thevenin* en los nodos del galvanómetro, nodos A y B respectivamente. El voltaje de *Thevenin* correspondiente se define como:

$$V_{Th} = V_{in} \left(\frac{R_1}{R_1 + R_3} - \frac{R_2}{R_2 + R_4} \right)$$

$$V_{Th} = 5V \left(\frac{100\Omega}{100\Omega + 200\Omega} - \frac{1\ 000\Omega}{1\ 000\Omega + (2\ 000 + x)\Omega} \right)$$

La ecuación anterior define el voltaje de *Thevenin* para los diferentes desequilibrios que se presentan en el puente DC.

El valor de x representa el valor resistivo que presenta la resistencia de sensor. Ahora se necesita determinar resistencia equivalente de *Thevenin* para los diferentes valores de desequilibrio.

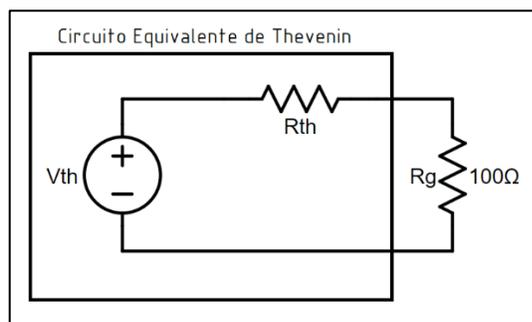
$$R_{Th} = \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3} + \frac{R_2 R_4}{R_2 + R_4}$$

$$R_{Th} = \frac{(100\Omega)(200\Omega)}{100\Omega + 200\Omega} + \frac{(1\,000\Omega)(2\,000 + x)\Omega}{1\,000\Omega + (2\,000 + x)\Omega}$$

Con estas dos ecuaciones podemos analizar cualquier circuito equivalente de *Thevenin* que presente un desequilibrio de $x\ \Omega$ en el puente *Wheatstone*.

Solo queda determinar la corriente en el galvanómetro para cada resistencia y voltaje de *Thevenin*.

Figura 110. **Circuito equivalente de *Thevenin* para el puente *Wheatstone* DC, problema 1**



Fuente: elaboración propia

$$I_g = \frac{V_{Th}}{R_{Th} + R_g} = \frac{V_{Th}}{R_{Th} + 100\Omega}$$

Con estas ecuaciones podemos completar la tabla XII que se presenta a continuación.

Tabla XII. **Desequilibrio y deflexión en el galvanómetro, problema 1**

Valor de desequilibrio ($x \Omega$)	Voltaje <i>Thevenin</i>	Resistencia <i>Thevenin</i>	Corriente Galvanómetro	Deflexión
1 Ω	733,4 Ω	0,55 mV	0,66 μ A	9,9 mm
5 Ω	733,8 Ω	2,77 mV	3,32 μ A	49,8 mm
10 Ω	734,4 Ω	5,54 mV	6,64 μ A	99,6 mm
12 Ω	734,6 Ω	6,64 mV	7,96 μ A	119,4 mm

Fuente: elaboración propia

3.4.1.2. Problema 2 – Puente doble *Kelvin*

Con base en la figura 58, analizar el circuito en puente doble *Kelvin* y determinar el valor de R_x para la condición de equilibrio y cuando R_1 y R_2 son 200 Ω y 50 Ω , respectivamente. Las condiciones de diseño del puente doble *Kelvin* son las siguientes:

- $E = 2,2V$
- $I_1 = I_2 = 10mA$
- $a = b = 100\Omega$
- $R_3 = 0,1\Omega$
- $R_y = 0,001\Omega$

Solución: para analizar este tipo de puente, debemos regresar a su definición matemática.

$$R_x = \frac{R_1 R_3}{R_2} + \frac{b R_y}{a + b + R_y} \left(\frac{R_1}{R_2} - \frac{a}{b} \right)$$

Podemos notar que se hace necesario determinar el valor de R_1 y R_2 . Con ello podremos encontrar el valor de la resistencia de ajuste, conocemos la corriente sobre estas resistencias, por lo que podemos analizar la caída de tensión que estas dos resistencias presentan.

$$E = V_1 + V_2$$

$$E = I_1 R_1 + I_2 R_2$$

Con ello obtenemos la relación que existe entre la suma de ambas resistencias. Podemos asumir que, como se trata de la condición de equilibrio R_1 y R_2 serán iguales, por lo que la relación se resume al doble del valor de un solo resistor.

$$2,2V = 10mA (R_1 + R_2)$$

$$(R_1 + R_2) = \frac{2,2V}{10mA} = 220\Omega$$

$$R_1 + R_2 = 2R_1 = 2R_2 = 220\Omega$$

El valor de las resistencias de equilibrio es igual a 110Ω respectivamente. A partir de aquí se puede hallar el valor de R_x .

$$R_x = \frac{110\Omega * 0,1\Omega}{110\Omega} + \frac{100\Omega * 0,001\Omega}{100\Omega + 100\Omega + 0,001} \left(\frac{110\Omega}{110\Omega} - \frac{100\Omega}{100\Omega} \right)$$

$$R_x = 0,1\Omega$$

El valor de R_x para un análisis de equilibrio en el puente doble *Kelvin*, es $0,1\Omega$. Conociendo el valor de la resistencia de ajuste para un valor de equilibrio, se compara cuando este se encuentra en desequilibrio; es decir, en desajuste. Analizamos el desajuste para los valores de R_1 y R_2 cuando son 200Ω y 100Ω , respectivamente.

$$R_x = \frac{200 * 0,1\Omega}{100\Omega} + \frac{100\Omega * 0,001\Omega}{100\Omega + 100\Omega + 0,001} \left(\frac{200\Omega}{100\Omega} - \frac{100\Omega}{100\Omega} \right)$$

$$R_x = 0,2005\Omega$$

Podemos observar que cuando la resistencia de ajuste se encuentra en equilibrio, tomo el valor del resistor R_y ; es decir, si está en equilibrio el circuito se obtiene muchos valores resistivos semejantes, mientras que cuando se halla en desequilibrio el valor de ajuste puede ser mayor o menor, dependiendo de la relación que exista entre R_1 y R_2 .

3.4.1.3. Problema 3 – Puente *Wheatstone* y su calibración

Un puente de *Wheatstone* (figura 111), tiene la capacidad de calibrar su salida cuando el resistor R_x , que en la mayoría de casos funciona como un sensor, cambia su valor óhmico de manera considerable y desequilibra la diferencia de potencial entre los nodos A y B.

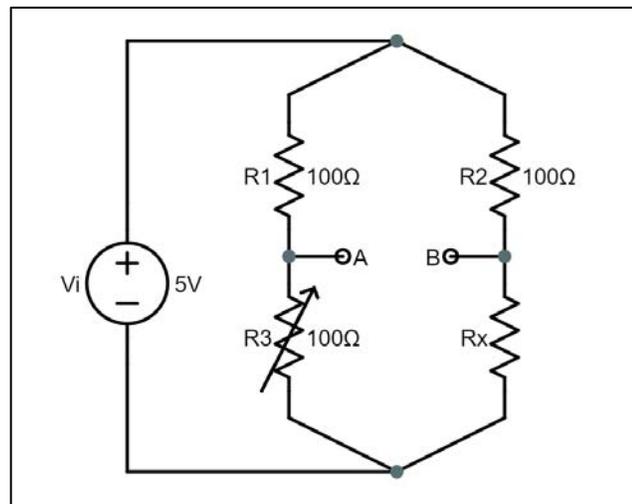
Determinar el valor de R_3 para calibrar las variaciones en el sensor del puente *Wheatstone*. Las variaciones se encuentran en la tabla XIII.

Solución: para determinar el valor de R_3 debemos utilizar la ecuación 109, con ello solo es necesario conocer las variaciones óhmicas del sensor.

$$R_x = \frac{R_1 R_3}{R_2}$$

Los valores de las otras dos resistencias fijas deben ser complementarias, con el fin de mantener una tensión en equilibrio para el galvanómetro de los nodos.

Figura 111. **Puente de *Wheatstone*, problema 3**



Fuente: elaboración propia

A continuación, se presenta las variaciones registradas por un sensor óhmico en la tabla XIII. Este ha obtenido un rango entre 0 a 100 ohms. Se analizará los primeros tres valores del sensor y se hallará los valores necesarios de la resistencia variable para equilibrar la tensión en los nodos.

$$R_{3_1} = \frac{1\,000\Omega}{100\Omega}(16\Omega) = 160\Omega$$

$$R_{3_2} = \frac{1\,000\Omega}{100\Omega}(22\Omega) = 220\Omega$$

$$R_{3_3} = \frac{1\,000\Omega}{100\Omega}(48\Omega) = 480\Omega$$

Para los valores en el sensor, la resistencia variable debe ajustarse a las magnitudes calculadas, con el fin de mantener en equilibrio el puente y la tensión entre los nodos.

Esta es una de las aplicaciones más destacadas para una medición con puente de corriente directa, determinar el valor de una resistencia desconocida. Podemos notar que los cálculos son bastante simplificados. La tabla XIII demuestra todos los valores para la resistencia tres, a partir de los valores del sensor óhmico.

Tabla XIII. **Valores en un sensor óhmico conectado al puente de *Wheatstone***

R_x	R_3
16Ω	160Ω
22Ω	220Ω
48Ω	480Ω
59Ω	590Ω
66Ω	660Ω
71Ω	710Ω
88Ω	880Ω
90Ω	900Ω
98Ω	980Ω

Fuente: elaboración propia

3.4.2. Laboratorios

Se presenta una serie de laboratorios, para comprobar todo lo visto en la teoría, y ejercicios del tema medición de puentes en corriente directa. Se recomienda realizar cada uno de estos laboratorios con el software MultiSim, Todos los diagramas y características se encuentran desarrollados en la conceptualización del curso, en la parte antes mencionada.

3.4.2.1. Laboratorio 1 – Puente de *Wheatstone* con sensor lineal

Laboratorio desarrollado para realizar mediciones con el circuito del puente de *Wheatstone* con un sensor lineal.

3.4.2.1.1. Objetivos

- Comprender el funcionamiento del puente de *Wheatstone* aplicado a sensores.
- Analizar y comparar el resultado práctico en software con el desarrollo teórico del funcionamiento de un puente de *Wheatstone* utilizado con sensores de temperatura.

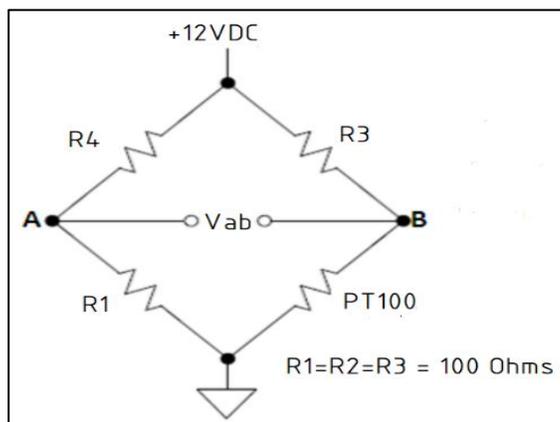
3.4.2.1.2. Material y equipo

- Software de simulación MultiSim.
- Fuente de alimentación de +12VDC.
- Multímetro con medición de VDC.
- Termoresistencia PT100.
- Elementos eléctricos del diagrama experimental en la figura 112.

3.4.2.1.3. Instrucciones

- Una vez armado el circuito de la figura 112 en MultiSim, se procederá a medir la diferencia de tensión entre los nodos A y B. Esto puede ser comparado con el cálculo teórico referente a un puente de este tipo.
- Determinar la diferencia de tensión para las temperaturas de la tabla XIV, luego se procederá a realizar el cálculo matemático de dicha tensión a partir de la ecuación de resistencia en un PT100 descrita como $R_{PT100} = 100(1 + \alpha T)$. El valor de la constante de temperatura debe ser hallada en la hoja de datos de la termorresistencia que se utilice.
- Para someter la termorresistencia a las temperaturas indicadas, utilizar un dispositivo que pueda graduar su temperatura. Para controlar la temperatura, utilizar un termómetro.
- Graficar los valores de voltaje del punto a al punto b con respecto del tiempo, tanto con valores experimentales como con valores teóricos.
- Concluir con base en los resultados obtenidos.

Figura 112. **Circuito puente de *Wheatstone*, laboratorio 1**



Fuente: elaboración propia

Tabla XIV. **Valores de temperatura, laboratorio 1**

Temperatura	V_{ab_experimental}	R_{PT100}	V_{ab_teórico}
40°			
60°			
75°			
90°			
100°			

Fuente: elaboración propia

3.4.2.2. Laboratorio 2 – Puente de *Wheatstone* con sensor exponencial

Laboratorio desarrollado para realizar mediciones con el circuito del puente de *Wheatstone* con un sensor exponencial.

3.4.2.2.1. Objetivos

- Comprender el funcionamiento del puente de *Wheatstone* aplicado a sensores.
- Analizar y comparar el resultado práctico en software con el desarrollo teórico del funcionamiento de un puente de *Wheatstone* con sensores de temperatura.

3.4.2.2.2. Material y equipo

- Software de simulación MultiSim.
- Fuente de alimentación de +12VDC.
- Multímetro con medición de VDC.

- Termorresistencia NTC 10K.
- Elementos eléctricos del diagrama experimental en la figura 112.

3.4.2.2.3. Instrucciones

- Una vez armado el circuito de la figura 112 en MultiSim, se procederá a medir la diferencia de tensión entre los nodos A y B. Esto puede ser comparado con el cálculo teórico referente a un puente de este tipo.
- Determinar la diferencia de tensión para las temperaturas de la tabla XV.
- Luego se procederá a realizar el cálculo matemático de dicha tensión a partir de la ecuación de resistencia en un NTC 10K descrita en la tabla XV.
- El valor de la constante de temperatura T_i debe ser hallada en la hoja de datos de la termorresistencia que se utilice, el valor de T_0 es correspondiente al valor de temperatura ambiente.
- Para someter la termorresistencia a las temperaturas indicadas, utilizar un dispositivo que pueda graduar su temperatura. Para controlar la temperatura utilizar un termómetro.
- Graficar los valores de voltaje del punto a al punto b con respecto del tiempo, tanto con valores experimentales como con valores teóricos.
- Concluir con base en los resultados obtenidos.

Tabla XV. **Valores de temperatura, laboratorio 2**

<i>Temperatura</i>	<i>V_{ab_experimental}</i>	$R_{NTC} = 100e^{(T_0 - T_i)\left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_0}\right)}$	<i>V_{ab_teórico}</i>
2°			
8°			
10°			
13°			
16°			
21°			
25°			
32°			
36°			

Fuente: elaboración propia

3.4.2.3. Laboratorio 3 – Puente de *Wheatstone* con sensor de temperatura positivo

Laboratorio desarrollado para realizar mediciones con el circuito del puente de *Wheatstone* con un sensor de temperatura positivo.

3.4.2.3.1. Objetivos

- Comprender el funcionamiento del puente de *Wheatstone* aplicado a sensores.
- Analizar y comparar el resultado práctico en software con el desarrollo teórico del funcionamiento de un puente de *Wheatstone* utilizado con sensores de temperatura.

3.4.2.3.2. Material y equipo

- Software de simulación MultiSim.
- Fuente de alimentación de $+12VDC$.
- Multímetro con medición de VDC.
- Termoresistencia NTC27.
- Elementos eléctricos del diagrama experimental en la figura 112.

3.4.2.3.3. Instrucciones

- Una vez armado el circuito de la figura 112 en MultiSim, se procederá a medir la diferencia de tensión entre los nodos A y B. Esto puede ser comparado con el cálculo teórico referente a un puente de este tipo.
- Determinar la diferencia de tensión para las temperaturas de la tabla XVI, luego se procederá a realizar a medir la resistencia experimental del termistor para luego calcular el valor de tensión empírico correspondiente al valor de temperatura ambiente.
- Para someter la termorresistencia a las temperaturas indicadas, utilizar un dispositivo que pueda graduar su temperatura. Para controlar la temperatura se utiliza un termómetro.
- Graficar los valores de voltaje del punto a al punto b con respecto del tiempo, tanto con valores experimentales como con valores teóricos.
- Concluir con base en los resultados obtenidos.

Tabla XVI. **Valores de temperatura, laboratorio 3**

<i>Temperatura</i>	<i>V_{ab_experimental}</i>	<i>R_{NTC27}</i>	<i>V_{ab_experimental}</i>
26°			
28°			
30°			
32°			
35°			

Fuente: elaboración propia

3.4.2.4. Laboratorio 4 – Puente de *Wheatstone* y el porcentaje de error en mediciones

Laboratorio desarrollado para realizar mediciones con el circuito del puente de *Wheatstone* y determinar el error en mediciones.

3.4.2.4.1. Objetivos

- Comprender el funcionamiento del puente de *Wheatstone*.
- Analizar y comparar el resultado práctico en software con el desarrollo teórico del funcionamiento de un puente de *Wheatstone* comercial o de características estándar.

3.4.2.4.2. Material y equipo

- Software de simulación MultiSim.
- Fuente de alimentación de +12VDC.
- Multímetro con medición de VDC.

- Elementos eléctricos del diagrama experimental, figura 56. (Los valores de resistencia deben ser correspondientes a un puente de *Wheatstone* estándar)

3.4.2.4.3. Instrucciones

- Utilizando el puente de Wheatstone comercial, detectar o medir el valor de diez resistencias desconocidas, y comparar estas con el valor nominal que éstas poseen.
- Determinar el error o desviación porcentual entre mediciones
- Completar la tabla XVII que se presenta.
- Concluir con base a los resultados obtenidos sobre la eficiencia que puede tener la medición por puente de corriente directa, con respecto a un instrumento de medición resistiva; es decir, un óhmetro.

Tabla XVII. **Valores de resistencia, laboratorio 1**

No. Resistencia	Valor_{teórico}	Valor_{medido}	Error_%
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			

Fuente: elaboración propia

3.5. Introducción a la metrología eléctrica

En esta sección analizaremos diferentes problemas aplicados a la introducción de la metrología eléctrica. Así mismo se incluye laboratorios virtuales y material audiovisual de los temas mencionados, como complemento práctico para entender y desarrollar los temas descritos en la conceptualización del curso.

3.5.1. Ejercicios de análisis

Cada problema presenta el enunciado correspondiente y luego se desarrolla la solución del mismo.

3.5.1.1. Problema 1 – Error porcentual en mediciones teóricas y experimentales

Determinar el error porcentual que producen las mediciones con un óhmetro. En la tabla XVIII se encuentran los valores teóricos y experimentales de diez resistencias diferentes, completar la tabla XIX.

Solución: las mediciones con ohmímetros siempre tendrán cierta desviación con respecto a los valores teóricos de las resistencias; esto se debe muchas veces a la incertidumbre que poseen estos instrumentos. Calcular un error porcentual es relativamente práctico, se debe obtener el valor de referencia entre la medición teórica y la medición experimental.

$$Error \% = \left| \frac{Dato_{teórico} - Dato_{experimental}}{Dato_{teórico}} \right| \times 100 \%$$

Tabla XVIII. **Valores teóricos y experimentales, problema 1**

<i>R_{teórica}</i>	<i>R_{experimental}</i>
1 000Ω	1 098Ω
220Ω	118Ω
6 800Ω	6 912Ω
120Ω	121Ω
3 300Ω	3 280Ω
480Ω	475Ω
5 500Ω	5 360Ω

Fuente: elaboración propia

Teniendo los valores teóricos y experimentales, solo queda determinar los errores porcentuales para cada caso. Esto nos permite determinar qué tanto se han desviado los valores reales de los valores teóricos en los que se diseñaron dichos resistores. Ejemplificaremos los errores porcentuales para los primeros tres casos de la tabla XVI.

$$Error \% = \left| \frac{1\ 000\Omega - 1\ 098\Omega}{1\ 000\Omega} \right| \times 100 \% = 9,8 \%$$

$$Error \% = \left| \frac{200\Omega - 118\Omega}{200\Omega} \right| \times 100 \% = 41 \%$$

$$Error \% = \left| \frac{6\ 800\Omega - 6\ 912\Omega}{6\ 800\Omega} \right| \times 100 \% = 1,6 \%$$

De esta manera obtenemos los errores porcentuales que nos permiten determinar que tanto se modifican los valores reales con los esperados. Estas diferencias pueden surgir por el uso o exceso de potencia consumida por los resistores.

La tabla XVII muestra los datos de resistencias teóricas, experimentales y sus respectivos errores porcentuales.

Tabla XIX. **Valores teóricos, experimentales y errores porcentuales, problema 1**

<i>R_{teórica}</i>	<i>R_{experimental}</i>	<i>Error</i> %
1 000Ω	1 098Ω	9,8 %
220Ω	118Ω	41,0 %
6 800Ω	6 912Ω	1,6 %
120Ω	121Ω	0,8 %
3 300Ω	3 280Ω	0,6 %
480Ω	475Ω	1,0 %
5 500Ω	5 360Ω	2,5 %

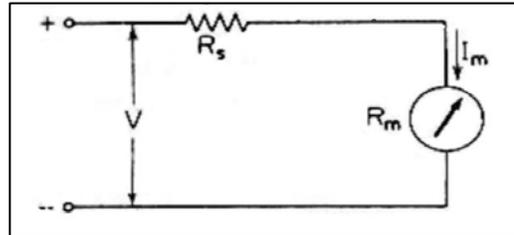
Fuente: elaboración propia

3.5.1.2. Problema 2 – Circuito interno de un voltímetro

Determinar el valor de resistencia complementaria que utiliza el circuito interno de un voltímetro, figura 113. Tomar como referencia las diferentes escalas a las que este trabaja, tabla XX, y los valores de operación del galvanómetro bajo condiciones mínimas, que son de aproximadamente $I_m = 100\mu A$ y $R_{int} = 100\Omega$.

Solución: para obtener el valor de la resistencia complementaria para las escalas de la tabla XVIII, debemos tomar como punto de partida la ecuación 128. Este despeje matemático surge de analizar el divisor de tensión que se produce internamente en el voltímetro, (figura 113).

Figura 113. **Circuito interno de un voltímetro, problema 2**



Fuente: Anónimo. (2014). *Fundamentos de electricidad*. Recuperado en <http://electricidadipl.blogspot.com/2014/06/disenio-de-un-amperimetro.html>

$$R_{comp} = \frac{V_{escala}}{I_m} - R_{int}$$

Para los valores de la resistencia complementaria únicamente debemos sustituir el valor de la escala de tensión que se muestran en la tabla XVIII. Recordar que la corriente mínima de operación y la resistencia interna del galvanómetro son constantes, independientemente de la escala.

Tabla XX. **Escala de tensión para el voltímetro.**

V_{escala}
20 000 μV
200 mV
2V
20V
50V

Fuente: elaboración propia

Hallaremos el valor de la resistencia complementaria para los 5 casos que se presentan en la tabla anterior; luego se definirán ciertas conclusiones sobre este diseño de voltímetro.

$$R_{comp1} = \frac{20\,000\mu V}{100\mu A} - 100\Omega = 100\Omega$$

$$R_{comp2} = \frac{200mV}{100\mu A} - 100\Omega = 1\,900\Omega$$

$$R_{comp3} = \frac{2V}{100\mu A} - 100\Omega = 19,9k\Omega$$

$$R_{comp4} = \frac{20V}{100\mu A} - 100\Omega = 199,9k\Omega$$

$$R_{comp5} = \frac{50V}{100\mu A} - 100\Omega = 499,9k\Omega$$

Con estos valores podemos completar la tabla XXI. De esta manera se concluye que este es el principio de un voltímetro con selector de escala por medio de perilla o interruptor de varias posiciones.

Habitualmente los multímetros trabajan de esta manera, se selecciona la posición adecuada de la perilla, internamente cambian los valores resistivos para adecuarse a los valores de corriente, voltaje o bien otro tipo de medición eléctrica.

Tabla XXI. **Escalas de tensión para el voltímetro con su resistencia complementaria o de protección**

<i>V_{escala}</i>	<i>R_{complementaria}</i>
20 000μV	100Ω
200mV	1 900Ω
2V	19,9kΩ
20V	199,9kΩ
50V	499,9kΩ

Fuente: Elaboración propia

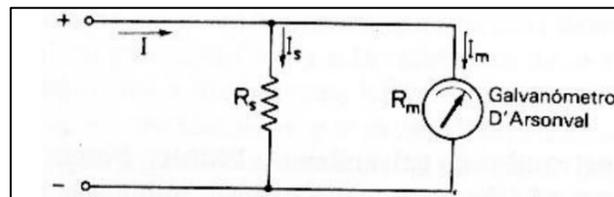
3.5.1.3. Problema 3 – Circuito interno de un amperímetro

Determinar el valor de resistencia complementaria que utiliza el circuito interno de un amperímetro, figura 114. Tomar como referencia las diferentes escalas a las que este trabaja, (tabla XXII), y los valores de operación del galvanómetro bajo condiciones mínimas, que son de aproximadamente $I_m = 330\mu A$ y $R_{int} = 250\Omega$.

Solución: el problema es completamente igual al anterior; la diferencia es que esta vez se trata de un amperímetro. Analizaremos las diferentes escalas de corriente a las que opera este dispositivo. Para definir la resistencia complementaria utilizaremos la ecuación 124, desarrollada a partir del divisor de corriente en el diseño de amperímetros analógicos.

$$R_{comp} = \frac{R_{int} i_m}{i_{escala} - i_m}$$

Figura 114. **Circuito interno de un voltímetro, problema 3**



Fuente: Anónimo. (2014). *Fundamentos de electricidad*. Recuperado en <http://electricidadipl.blogspot.com/2014/06/diseño-de-un-amperímetro.html>

Para los valores de la resistencia complementaria únicamente debemos sustituir el valor de la escala de corriente que se muestran en la tabla XX.

Recordar que la corriente mínima de operación y la resistencia interna del galvanómetro son constante, independientemente de la escala.

Tabla XXII. **Escalas de corriente para el amperímetro**

Amp_{escala}
20mV
200mV
2A
20A

Fuente: elaboración propia

Hallaremos el valor de la resistencia complementaria para los 4 casos que se presentan en la tabla anterior. Luego se definirán ciertas conclusiones sobre este diseño de amperímetro.

$$R_{comp1} = \frac{250\Omega * 330\mu A}{20mA - 330\mu A} = 4,1942\Omega$$

$$R_{comp2} = \frac{250\Omega * 330\mu A}{200mA - 330\mu A} = 0,4132\Omega$$

$$R_{comp3} = \frac{250\Omega * 330\mu A}{2A - 330\mu A} = 0,0413\Omega$$

$$R_{comp4} = \frac{250\Omega * 330\mu A}{20A - 330\mu A} = 0,0041\Omega$$

Estos valores nos permiten completar la tabla XXIII y definir el comportamiento de un amperímetro con interruptor o perilla de selección. Cada valor resistivo corresponde a cada etapa de selección. El amperímetro se adapta

en cada interruptor para evitar sobrepasar la corriente mínima de operación y dañar el instrumento.

Tabla XXIII. **Escalas de corriente para el amperímetro**

V_{escala}	$R_{complementaria}$
$20mA$	$4,1942\Omega$
$200mA$	$0,4132\Omega$
$2A$	$0,0413\Omega$
$20A$	$0,0041\Omega$

Fuente: elaboración propia

3.5.2. Laboratorios

Se presenta una serie de laboratorios virtuales que se fundamentan en comprobar todo lo visto en la teoría y ejercicios del tema introducción a la metrología. Se recomienda realizar cada uno de estos laboratorios con el software MultiSim. Todos los diagramas y características se encuentran desarrollados en la conceptualización del curso, en la parte mencionada.

3.5.2.1. Laboratorio 1 – Comparaciones de mediciones teóricas y experimentales

Laboratorio desarrollado para medir y comparar las mediciones que se presentan entre magnitudes teóricas y experimentales.

3.5.2.1.1. Objetivos

- Determinar el valor teórico y experimental en software de diferentes resistores.

- Analizar y comparar los resultados para determinar el error porcentual de las mediciones.

3.5.2.1.2. Material y equipo

- Ocho resistores varios, diferentes magnitudes.
- Multímetro con medición de resistencia.
- Código de colores para resistencias.

3.5.2.1.3. Instrucciones

- Observar los ocho resistores y determinar su valor teórico con base en el código de colores.
- A sí mismo, medir de forma experimental dichos resistores con el multímetro digital, siempre realizar cada medición en la escala adecuada para evitar añadir demasiada incertidumbre; con ambos valores obtener el error porcentual y verificar si este porcentaje entra en la tolerancia teórica de los resistores y con los datos recabados completar la tabla XXIV.
- Concluir con base a los resultados obtenidos

Tabla XXIV. **Valores resistivos teóricos y experimentales, laboratorio 1**

No. Resistencia	Valor teórico	Valor experimental	Error porcentual	Rango de tolerancia
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				

Fuente: elaboración propia

3.5.2.2. Laboratorio 2 – Construcción y diseño de un voltímetro

Laboratorio desarrollado para construir el circuito interno de un voltímetro y analizar su funcionamiento.

3.5.2.2.1. Objetivos

- Determinar el valor de resistencia necesario para construir un voltímetro de varias escalas.
- Analizar y registrar el funcionamiento del voltímetro bajo condiciones de diseño en software.

3.5.2.2.2. Material y equipo

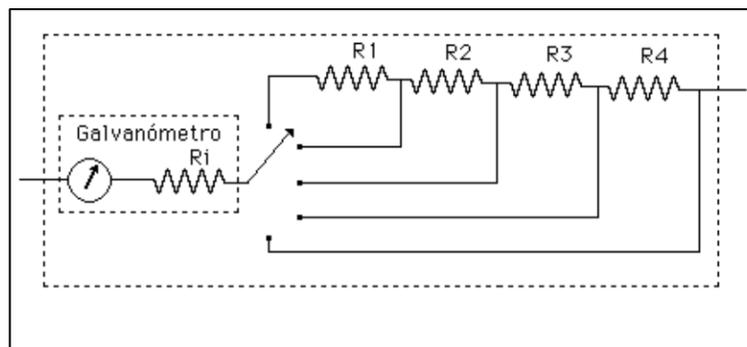
- Software de simulación MultiSim.
- Fuente de voltaje de 0 a 20 voltios.
- Galvanómetro.
- Multímetro con medición de VDC.
- Elementos eléctricos del diagrama experimental, resistores variables tipo precisión en la figura 115.

3.5.2.2.3. Instrucciones

- La figura 115 muestra el circuito equivalente de un voltímetro con selección de escala. Se debe calcular los valores de las resistencias complementarias o protección según las condiciones de operación del galvanómetro.

- Se debe revisar las características del fabricante para el galvanómetro que se utilice, con el fin de poder diseñar bien el circuito selector.
- Utilizar las escalas de $20mV$, $200mV$, $2V$ y $20V$.
- Con los valores calculados, ajustar estas magnitudes con ayuda de resistores variables de precisión, para reducir los errores en el galvanómetro.
- Comparar el funcionamiento real con la simulación en MultiSim, con los valores teóricos que se calcularon y concluir cómo reducir las desviaciones de tensión que se presentarán en el galvanómetro.
- Concluir con base en los resultados obtenidos.

Figura 115. **Circuito de voltímetro con selector de escala**



Universidad Simón Bolívar. (2018). *Amperímetro, voltímetro, óhmetro y multímetro*. Recuperado en: <http://www.labc.usb.ve/paginas/mgimenez/EC12812013/contenido/PRELABORATORIO1.pdf>

3.5.2.3. Laboratorio 3 – Construcción y diseño de un amperímetro

Laboratorio desarrollado para construir el circuito interno de un amperímetro y analizar su funcionamiento.

3.5.2.3.1. Objetivos

- Determinar el valor de resistencia necesario para construir un amperímetro de varias escalas.
- Analizar y registrar el funcionamiento del amperímetro bajo condiciones de diseño en software.

3.5.2.3.2. Material y equipo

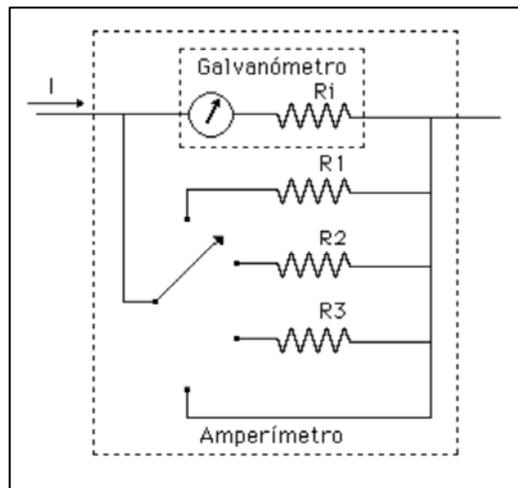
- Software de simulación MultiSim.
- Fuente de voltaje de 0 a 20 voltios.
- Galvanómetro.
- Multímetro con medición de VDC.
- Elementos eléctricos del diagrama experimental, resistores variables tipo precisión en la figura 116.

3.5.2.3.3. Instrucciones

- La figura 116 muestra el circuito equivalente de un amperímetro con selección de escala.
- Se debe calcular los valores de las resistencias complementarias o protección según las condiciones de operación del galvanómetro. Se debe revisar las características del fabricante para el galvanómetro que se utilice, con el fin de diseñar bien el circuito selector.
- Utilizar las escalas de $2mA$, $20mA$, $200mA$ y $1A$.
- Con los valores calculados, ajustar estas magnitudes con la ayuda de resistores variables de precisión, para reducir los errores en el galvanómetro.

- Comparar el funcionamiento real con la simulación en MultiSim, con los valores teóricos que se calcularon y concluir cómo reducir las desviaciones de tensión que se presentarán en el galvanómetro.
- Utilizar un circuito de divisor de corriente externo para poder usarlo como fuente variable de corriente. Utilizar un circuito equivalente de Norton como fuente de corriente variable.
- Concluir con base en los resultados obtenidos.

Figura 116. **Circuito de amperímetro con selector de escala**



Universidad Simón Bolívar. (2018). *Amperímetro, voltímetro, óhmetro y multímetro*. Recuperado en: http://www.labc.usb.ve/paginas/mgimenez/Lab_Circ_Electronicos_Guia_Teorica/Cap6.pdf.

4. AUTOEVALUACIONES - AMPLIFICADORES OPERACIONALES, PUENTES DC Y METROLOGÍA

4.1. Amplificadores operacionales

Se presenta una serie de pruebas conceptuales desarrolladas con base en el contenido de la conceptualización.

4.1.1. Pruebas conceptuales

- ¿Qué es un amplificador operacional?
- ¿Qué beneficios obtiene un amplificador operacional, al tener alta impedancia de entrada?
- Enumere las terminales físicas de un amplificador operacional
- ¿Qué es el corto circuito virtual entre la entrada inversora y la entrada no inversora?
- ¿Qué número de serie o identificación utilizan los amplificadores operacionales?
- Mencione los tipos de encapsulados de un amplificador operacional.
- Comparar las diferencias que posee un amplificador real con respecto a su funcionamiento ideal.

- ¿Qué características internas posee un amplificador operacional?
- Mencionar las características principales de la etapa de entrada en un amplificador operacional.
- ¿Cuál es la principal característica de una la etapa intermedia del amplificador operacional?
- ¿Qué es el offset en la etapa final o de salida del amplificador operacional?
- ¿Por qué se asume una impedancia elevada en la entrada del amplificador operacional?
- ¿Cómo beneficia la baja impedancia de salida del amplificador operacional a la tensión amplificada?
- ¿Cómo se determinan los voltajes de saturación en un amplificador operacional?
- ¿Existe algún valor nominal de corriente de saturación para polarizar las entradas del amplificador?
- ¿Qué es el *offset* en la señal de salida de un amplificador operacional?
- ¿El *slew rate* depende directamente de la fabricación del amplificador operacional?
- ¿Qué tipos de realimentación existen?

- ¿Qué tipo de realimentación permite el principio de oscilación?
- Comparar la ganancia en lazo abierto y lazo cerrado que se presentan en el amplificador operacional.
- ¿Cuál es el valor de fase producido por la realimentación negativa?
- Realizar una tabla comparativa entre las diversas conexiones de la realimentación negativa. Tomar en cuenta las características de impedancia, funcionamiento y relación de magnitudes eléctricas.
- ¿Cómo se puede obtener la máxima transferencia de tensión en un circuito con retroalimentación negativa?
- ¿Cómo se puede obtener la máxima transferencia de corriente en un circuito con retroalimentación negativa?
- ¿Cómo obtener un ancho de banda estable para redes eléctricas con *feedback*?

4.2. Configuraciones básicas del amplificador operacional

Se presenta una serie de pruebas conceptuales y prácticas desarrolladas con base en el contenido de la conceptualización.

4.2.1. Pruebas conceptuales

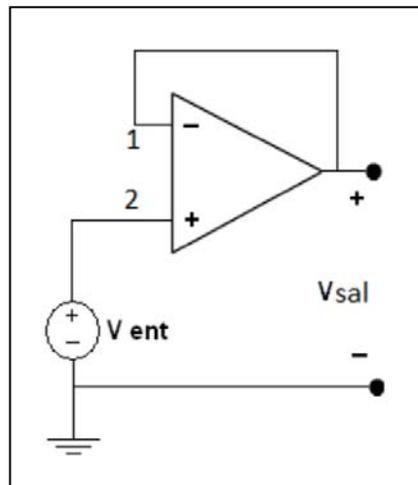
- Mencionar las características que presenta la señal de salida en un amplificador inversor.

- Comprobar la linealidad que posee la ganancia de voltaje en un amplificador inversor.
- Definir la diferencia principal entre la ganancia del amplificador inversor y el amplificador no inversor.
- ¿Cómo se delimita la ganancia de un amplificador inversor y no inversor?
- ¿Cuál es la aplicación principal de un mezclador de señales?
- ¿Cómo se puede construir un sumador de señales?
- ¿De qué dependen las ganancias individuales de cada señal que se anida a un sumador inversor?
- ¿Cuál es la función principal de un seguidor de voltaje?
- ¿Qué significa, tener una retroalimentación negativa el 100%?
- ¿Cuál es la aplicación más habitual para un amplificador operacional como fuente de voltaje?
- ¿Cuáles son los beneficios de la tierra virtual producida entre las entradas del amplificador operacional?
- ¿De qué depende la potencia que entrega un amplificador operacional?

4.2.2. Pruebas de aplicación

- Deducir la ecuación de la tensión de salida en el seguidor unitario que se muestra en la figura 117.
 - Realizar la simulación necesaria para comparar su funcionamiento.
 - Definir sus aplicaciones y ventajas.

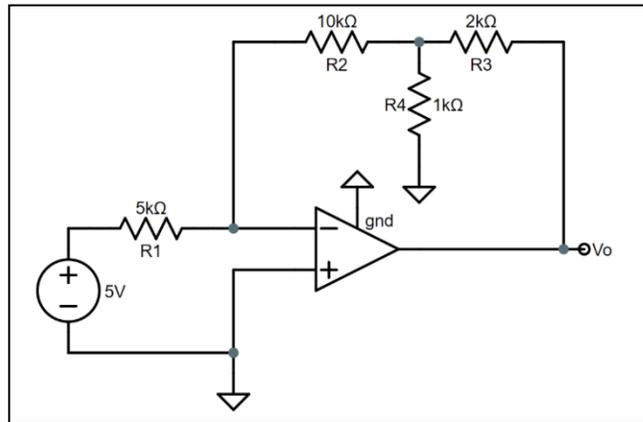
Figura 117. Circuito seguidor de tensión del ejercicio 1



Fuente: Quintana, D. (2013). *Materiales complementarios y aplicación de Matlab y Simulink para solución de ejercicios de circuitos eléctricos con amplificadores operacionales ideales*.p.25.

- Determinar la tensión de salida en el circuito de amplificador operacional de la figura 118.
 - Realizar la simulación necesaria para comparar su funcionamiento.
 - Definir sus aplicaciones y ventajas.

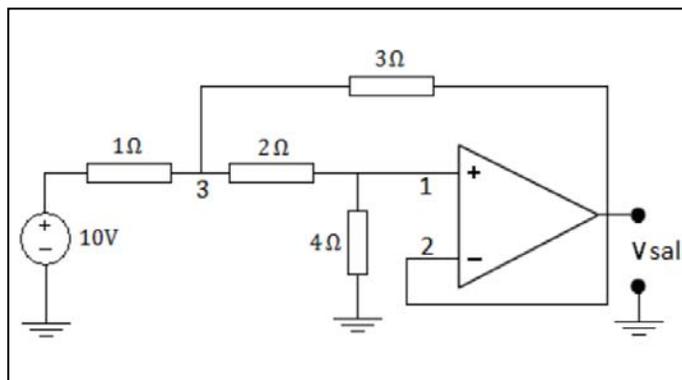
Figura 118. **Circuito del ejercicio 2**



Fuente: elaboración propia

- Determinar la tensión de salida en el circuito de la figura 119.
 - Realizar la simulación necesaria para comparar su funcionamiento.
 - Definir sus aplicaciones y ventajas.

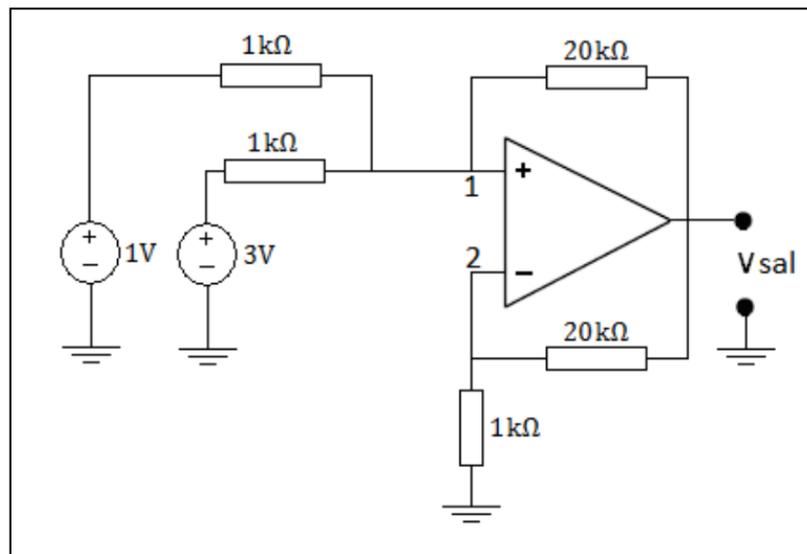
Figura 119. **Circuito del ejercicio 3**



Fuente: Quintana, D. (2013). *Materiales complementarios y aplicación de Matlab y Simulink para solución de ejercicios de circuitos eléctricos con amplificadores operacionales ideales*.p.41.

- Determinar la tensión de salida en el circuito de sumador inversor con ganancia no inversora de la figura 120.
 - Realizar la simulación necesaria para comparar su funcionamiento.
 - Definir sus aplicaciones y ventajas.

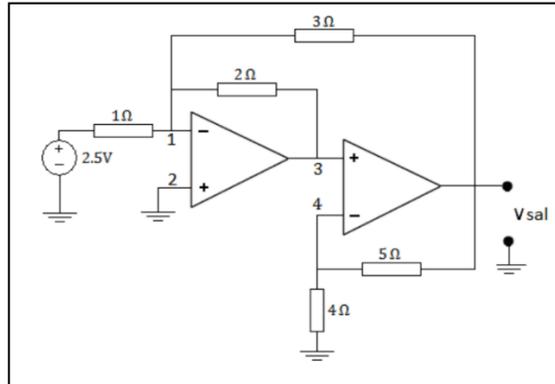
Figura 120. **Circuito del ejercicio 4**



Fuente: Quintana, D. (2013). *Materiales complementarios y aplicación de Matlab y Simulink para solución de ejercicios de circuitos eléctricos con amplificadores operacionales ideales*.p.43.

- Determinar la tensión de salida y ganancia total del circuito de la figura 121.
 - Realizar la simulación necesaria para comparar su funcionamiento.
 - Definir sus aplicaciones y ventajas.
 - Proponer un circuito equivalente que cumpla con las características de operación.

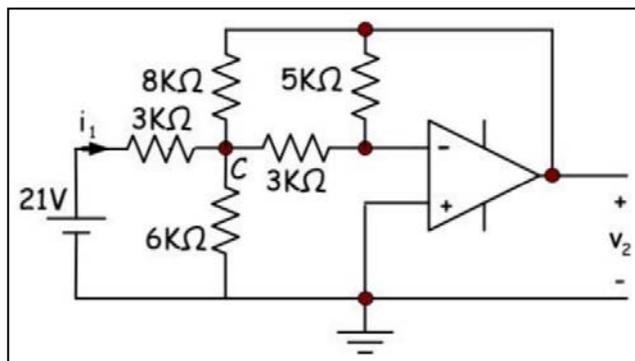
Figura 121. **Circuito del ejercicio 5**



Fuente: Quintana, D. (2013). *Materiales complementarios y aplicación de Matlab y Simulink para solución de ejercicios de circuitos eléctricos con amplificadores operacionales ideales*.p.45.

- Hallar la magnitud del voltaje de salida en el circuito de la figura 122.
 - Realizar la simulación necesaria para comparar su funcionamiento.
 - Definir sus aplicaciones y ventajas.

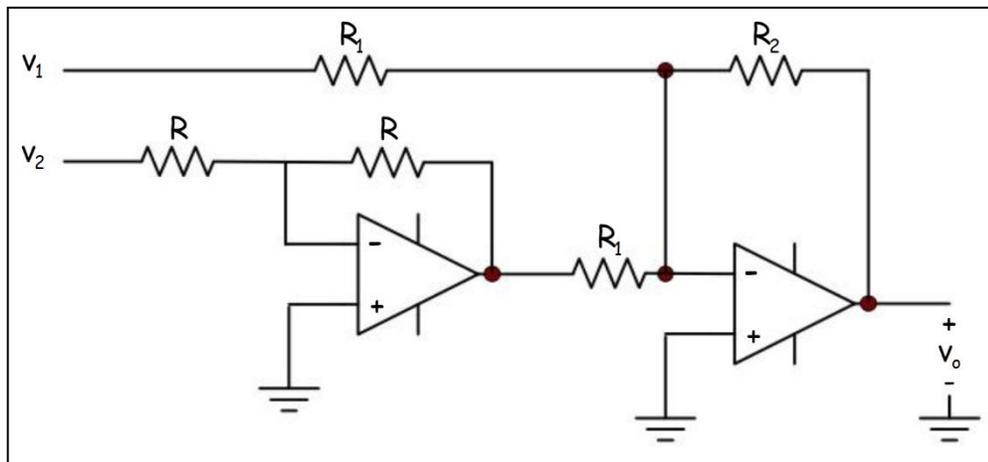
Figura 122. **Circuito del ejercicio 6**



Fuente: Hernández, J. (2010). *Amplificador operacional*. Recuperado en <https://issuu.com/fjcanals/docs/ejerciciosresueltosamplificadoresoperacionales>

- Deducir la expresión del voltaje de salida de la figura 123, para las dos tensiones de entrada V_1 y V_2 , respectivamente.
 - Realizar la simulación necesaria para comparar su funcionamiento.
 - Definir sus aplicaciones y ventajas.

Figura 123. **Circuito del ejercicio 7**

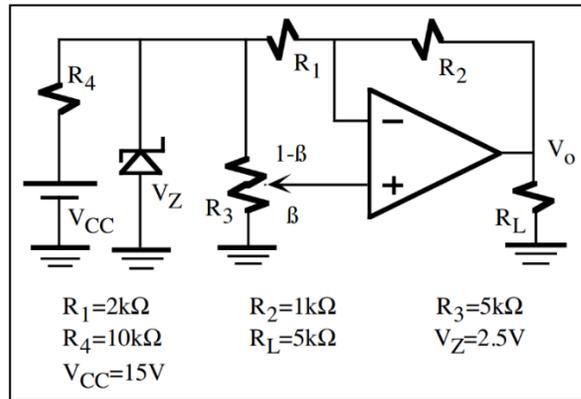


Fuente: Hernández, J. (2010). *Amplificador operacional*. Recuperado en <https://issuu.com/fjcanals/docs/ejerciciosresueltosamplificadoresoperacionales>

Consulta: 4 abril 2019

- En conjunto con los valores mostrados en la imagen 124, determinar el voltaje de salida a partir de la aplicación de un diodo zener de dicho circuito.
 - Realizar la simulación necesaria para comparar su funcionamiento.
 - Definir sus aplicaciones y ventajas.
 - Definir la función del diodo zener en el circuito.

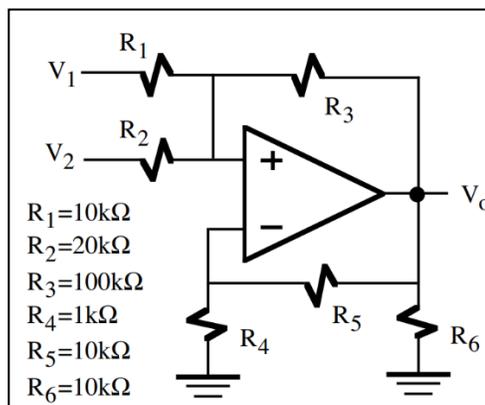
Figura 124. **Circuito del ejercicio 8**



Fuente: Ruiz, G. (2001). *Electrónica básica para ingenieros*. p.149

- En conjunto con los valores mostrados en la imagen, determinar el voltaje de salida a partir del circuito mostrado en la figura 125.
 - Realizar la simulación necesaria para comparar su funcionamiento.
 - Definir sus aplicaciones y ventajas.

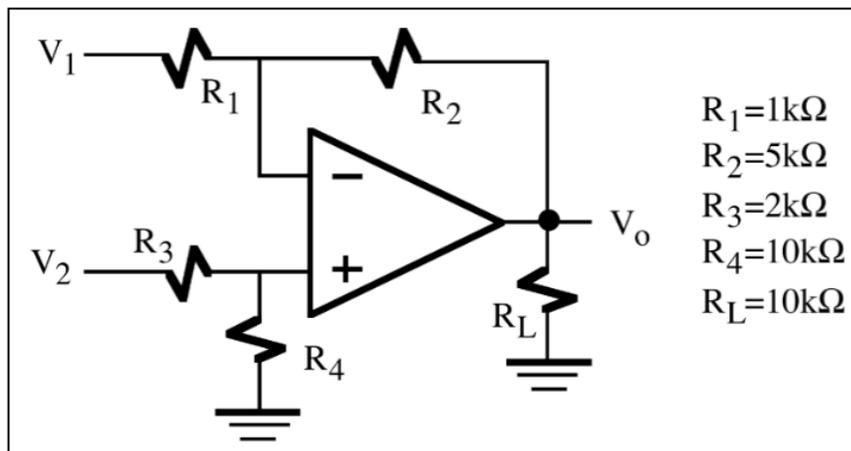
Figura 125. **Circuito del ejercicio 9**



Fuente: Ruiz, G. (2001). *Electrónica básica para ingenieros*. p.149

- Determinar el voltaje de salida sobre la resistencia de carga, a partir del circuito mostrado en la imagen 126.
 - Realizar la simulación necesaria para comparar su funcionamiento.
 - Definir sus aplicaciones y ventajas.

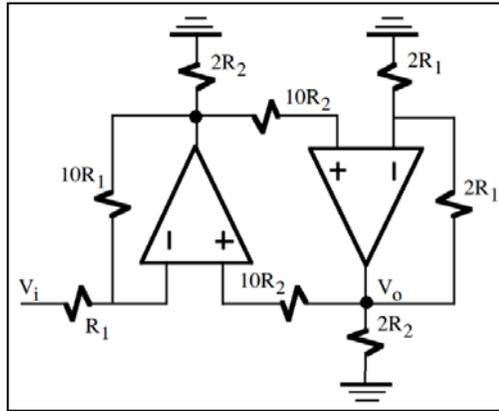
Figura 126. **Circuito del ejercicio 10**



Fuente: Ruiz, G. (2001). *Electrónica básica para ingenieros*. p.149

- Para la configuración mostrada en la figura 127, determinar la tensión de salida del arreglo de amplificadores operacionales. Los valores de resistencias son R_1 igual a $1k\Omega$ y R_2 igual a $2k\Omega$, considerando la tensión de entrada como 5V.
 - Realizar la simulación necesaria para comparar su funcionamiento.
 - Definir sus aplicaciones y ventajas.

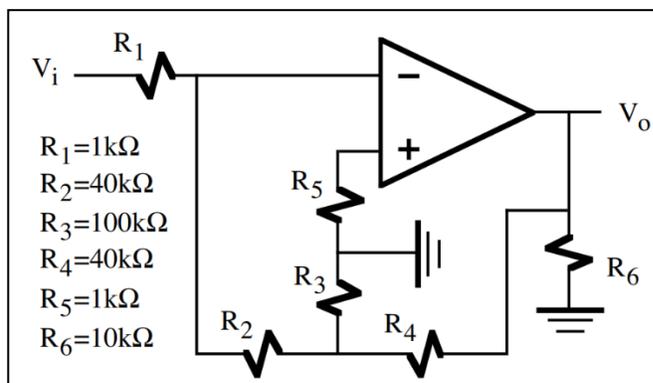
Figura 127. **Circuito del ejercicio 11**



Fuente: Ruiz, G. (2001). *Electrónica básica para ingenieros*. p.150

- Hallar la tensión que se presenta sobre la resistencia R_6 a partir de la configuración mostrada en la figura 128.
 - Realizar la simulación necesaria para comparar su funcionamiento.
 - Definir sus aplicaciones y ventajas.

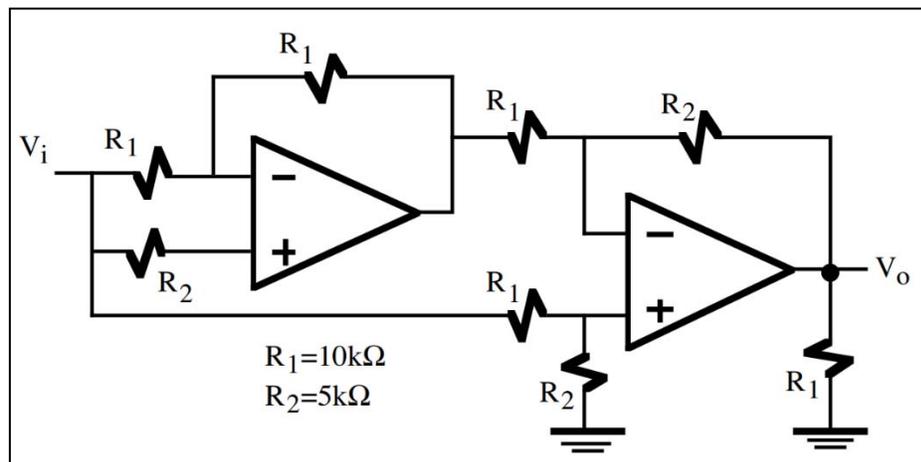
Figura 128. **Circuito del ejercicio 12**



Fuente: Ruiz, G. (2001). *Electrónica básica para ingenieros*. p.150

- Deducir el voltaje de salida en el arreglo de amplificadores operacionales que se muestra en la figura 129.
 - Realizar la simulación necesaria para comparar su funcionamiento.
 - Definir sus aplicaciones y ventajas.

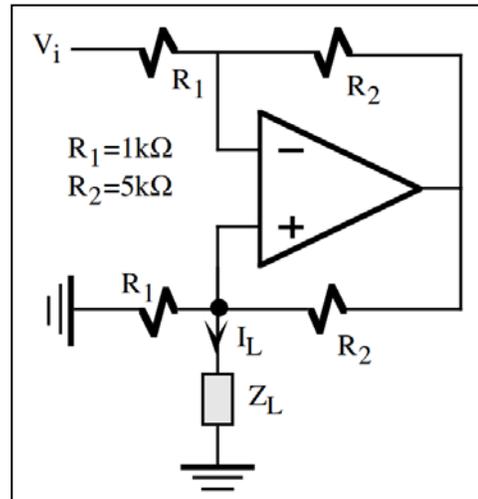
Figura 129. **Circuito del ejercicio 13**



Fuente: Ruiz, G. (2001). *Electrónica básica para ingenieros*. p.150

- Obtener el valor del voltaje de salida sobre la resistencia de carga que se presenta en el amplificador de la figura 130. La tensión de entrada es de cinco voltios.
 - Realizar la simulación necesaria para comparar su funcionamiento.
 - Definir sus aplicaciones y ventajas.
 - Definir las características de la resistencia de carga que puede ser conectado a dicho circuito, bajo las condiciones en las que fue diseñado.

Figura 130. **Circuito del ejercicio 14**



Fuente: Ruiz, G. (2001). *Electrónica básica para ingenieros*. p.150

4.3. **Aplicaciones en instrumentación para un amplificador operacional**

Se presenta una serie de pruebas conceptuales desarrolladas con base en el contenido de la conceptualización.

4.3.1. **Pruebas conceptuales**

- ¿Qué beneficios nos otorga el acondicionamiento de señales entre diferentes circuitos?
- Mencionar los diferentes tipos de acondicionamiento que se utilizan para manejar señales entre circuitos.
- ¿Cuál es la función principal del acondicionamiento por amplificación?

- ¿Qué representa la aplicación de una ganancia menor a la unidad a una determinada señal?
- ¿A qué se le denomina efecto *Aliasing*?
- ¿Qué define el criterio de Nyquist?
- ¿Qué circuitos nos permiten aplicar una linealización a una tensión de entrada variable?
- ¿Cuáles son los beneficios de un acondicionamiento por aislamiento?
- Describir la función de un acople de impedancias
- ¿Por qué el acople de impedancias permite una máxima transferencia de potencia?
- ¿Cómo un acople de impedancia reduce el efecto de reflexión y absorción en la transferencia de señales?
- ¿Cuál es la función principal de un circuito comparador con amplificador operacional?
- ¿Cómo afecta el ruido eléctrico a un comparador de tensiones basado en amplificador operacional?
- Describir la configuración especial de un comparador por cruce en cero del amplificador operacional.

- ¿Cómo se reduce el efecto que produce el ruido eléctrico en los circuitos comparadores por amplificador operacional?
- Describir los dos funcionamientos que presenta el comparador de ventana por amplificador operacional
- ¿Cuáles son las ventajas principales de la digitalización de señales continuas?
- ¿Qué tipos de conversión de información existen?
- Describir el proceso de conversión de una señal analógica a digital
- ¿Cómo se determina la frecuencia de muestreo a partir del criterio de Nyquist?
- ¿Por qué las microcomputadoras utilizan voltajes de referencia para interpretar la información?
- ¿Cómo maneja la resolución una microcomputadora?
- ¿Qué sucede en la etapa de codificación de las conversiones analógicas digitales?
- Definir el funcionamiento de un circuito R2R.
- ¿Cómo se describe el funcionamiento de un convertidor de corriente a voltaje en amplificador operacional?

- ¿Cómo se describe el funcionamiento de un convertidor de voltaje a corriente en amplificador operacional?
- ¿Cuáles son las dos principales propiedades que se presentan en las entradas del amplificador operacional?
- ¿Cuáles es la diferencia de un detector de cruce por cero y un detector de nivel de voltaje?
- ¿Cuál es la función principal de los circuitos diferenciales?
- ¿Qué características debe poseer la señal de entrada para ser procesada por un circuito de amplificador diferencial?
- Mostrar la configuración de un amplificador de instrumentación y definir su respectiva ecuación de transferencia.
- ¿Cuáles son los beneficios de un amplificador de instrumentación?
- ¿Cómo está constituido internamente un amplificador de instrumentación?
- ¿Cómo se maneja la ganancia de un amplificador de instrumentación?
- ¿Cuáles son los valores de corriente y voltaje estándar más conocidos?
- ¿Qué ventaja existe en la transmisión de señal mediante corriente en lugar de voltaje?

- ¿Cómo funciona un circuito de protección para amplificador de instrumentación?
- ¿Cómo funciona un circuito de medición de pH con amplificador de instrumentación?
- ¿Por qué el amplificador de instrumentación es ampliamente utilizado en la instrumentación biomédica?
- ¿Cuáles son los filtros de señal más utilizados?
- ¿Cuál es el fin de tener un amplificador operacional en conjunto con un filtro de señales?
- ¿Qué determina la frecuencia de corte de un filtro?
- ¿Qué define el factor de calidad de un filtro?
- ¿Cuál es la función principal de un circuito integrador por amplificador operacional?
- ¿Cuál es la función principal de un circuito derivador por amplificador operacional?

4.3.2. Pruebas de aplicación

- Diseñar un circuito convertidor de señal digital a señal analógica, capaz de amplificar la tensión de salida en 10 unidades. Las señales binarias que vienen del microprocesador son de 5V.
 - Realizar la simulación necesaria para comparar su funcionamiento.
 - Definir sus aplicaciones y ventajas.

- Diseñar un circuito mezclador de audio de 3 canales. Las tensiones de entrada poseen la misma amplitud; se desea que la ganancia sea unitaria para el mezclado, sin olvidar utilizar acople de impedancias en las tres entradas.
 - Realizar la simulación necesaria para comparar su funcionamiento.
 - Definir sus aplicaciones y ventajas.

- Construir un circuito convertidor de corriente a voltaje. Considere la tensión de entrada en el rango estándar, por lo que la salida de corriente debe estar en el valor estándar. (0 – 10V y 4 – 20mA).
 - Realizar la simulación necesaria para comparar su funcionamiento.
 - Definir sus aplicaciones y ventajas.

- Diseñar un circuito detector de ventana que opere en el rango de tensiones de 4V – 6V, pero la salida del mismo debe funcionar de forma inversa. Fuera del rango la tensión de salida será alta y dentro del rango obtendrá valores bajos en la salida.

- Realizar la simulación necesaria para comparar su funcionamiento.
- Definir sus aplicaciones y ventajas.
- Deducir la ecuación de tensión de salida de un amplificador de instrumentación.
- Diseñar un circuito de filtro pasobanda para un ancho de banda de $2kHz$. Considere el valor más bajo de dicho rango como $10kHz$. El circuito debe poseer una ganancia de 10 unidades.
 - Realizar la simulación necesaria para comparar su funcionamiento.
 - Definir sus aplicaciones y ventajas.
- Construir con ayuda de circuitos integradores y derivadores un dispositivo que sea capaz de convertir a modelos lineales las siguientes funciones:

$$f_1(t) = 5 \quad 0 < t \leq \pi$$

$$f_1(t) = 0 \quad \pi < t \leq 2\pi$$

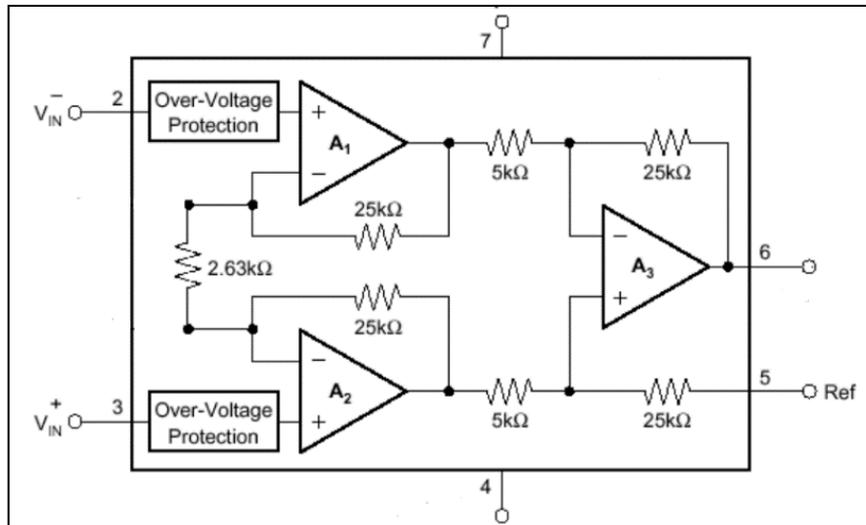
$$f_2(t) = t^2 \quad 0 < t \leq \pi$$

$$f_2(t) = -t^2 \quad \pi < t \leq 2\pi$$

- Realizar la simulación necesaria para comparar su funcionamiento.
- Definir sus aplicaciones y ventajas.
- Determinar la tensión de salida del amplificador de instrumentación conocido como Burr-Brown de la figura 131. Tomar la diferencia de tensión igual a $\Delta V = 0,1V$; el voltaje de referencia está en $1V$.

- Realizar la simulación necesaria para comparar su funcionamiento.
- Definir sus aplicaciones y ventajas.

Figura 131. **Circuito del ejercicio 8**

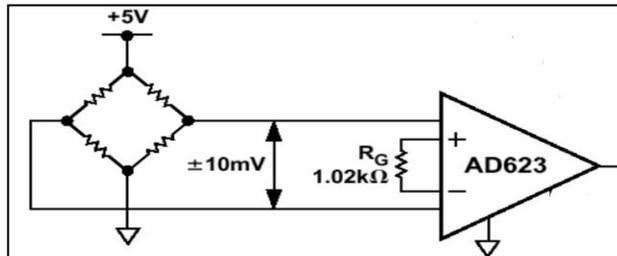


Fuente: Moreno, I. (2016). Área de tecnología electrónica.

<http://www.unet.edu.ve/~ielectro/42-AmplificadorInstrumentacion.pdf>

- La medición con puente de la figura 132 muestra una tensión de 10mV. Se necesita amplificar esta señal para ser manipulable. Determinar la tensión de salida del amplificador de instrumentación AD623.
 - Realizar la simulación necesaria para comparar su funcionamiento.
 - Definir sus aplicaciones y ventajas.

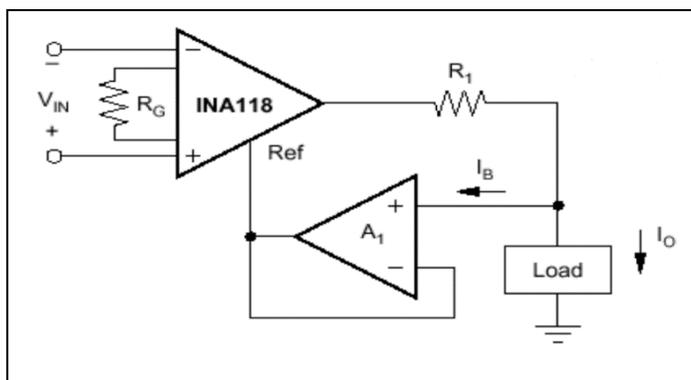
Figura 132. **Circuito del ejercicio 9**



Fuente: Moreno, I. (2016). *Área de tecnología electrónica*.
<http://www.unet.edu.ve/~ielectro/42-AmplificadorInstrumentacion.pdf>

- Deducir la expresión matemática de la corriente en la resistencia de carga del circuito de la figura 133. Este circuito describe el funcionamiento de un convertidor de tensión diferencial a corriente.
 - Realizar la simulación necesaria para comparar su funcionamiento.
 - Definir sus aplicaciones y ventajas.

Figura 133. **Circuito del ejercicio 10**



Fuente: Moreno, I. (2016). *Área de tecnología electrónica*.
<http://www.unet.edu.ve/~ielectro/42-AmplificadorInstrumentacion.pdf>

4.4. Mediciones con puentes en corriente directa

Se presenta una serie de pruebas conceptuales desarrolladas con base en el contenido de la conceptualización.

4.4.1. Pruebas conceptuales

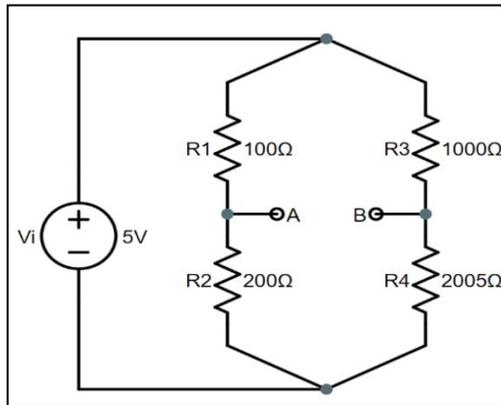
- ¿Cuál es la función principal de un circuito puente?
- Los puentes de medición, ¿se diseñan para diferentes impedancias?
- ¿Bajo qué principio se diseñan los circuitos puentes?
- ¿Qué significa cuando el puente se encuentra en equilibrio?
- ¿Cómo se diseña un puente *Wheatstone*?
- ¿Qué representa la alta sensibilidad del puente *Wheatstone*?
- ¿Qué limitaciones posee el puente *Wheatstone*?
- ¿Qué ampliaciones posee el puente Kelvin con respecto al puente *Wheatstone*?
- ¿Cuál es la función principal de los alambres conectados en el puente *Kelvin*?
- ¿Cómo funciona el puente doble de *Kelvin*?

- ¿Cómo puede afectar una corriente de fuga en las mediciones del puente Kelvin?
- ¿Cómo funciona un circuito de protección en los puentes Kelvin?
- ¿Cómo funciona la resistencia patrón en las mediciones con puente?
- Definir el factor de relación que existe en los puentes de medición en corriente directa.
- ¿Cómo afecta la impedancia interna de un galvanómetro?

4.4.2. Pruebas de aplicación

- Analizar el circuito puente que se muestra en la figura 134, y determinar su circuito equivalente de Thevenin; así mismo hallar el circuito equivalente de Norton.
 - Realizar la simulación necesaria para comparar su funcionamiento.
 - Definir sus aplicaciones y ventajas.

Figura 134. **Circuito del problema 1**



Fuente: Elaboración propia

- Mediante el circuito de la figura 58 y con ayuda del problema 2 de ejercicios resueltos de mediciones con puentes, determinar el circuito equivalente de Thevenin y determinar los valores de resistencia para los cuales se consigue un equilibrio. Tomar en cuenta que R_1 y R_2 son 2000Ω y 500Ω respectivamente.
 - Realizar la simulación necesaria para comparar su funcionamiento.
 - Definir sus aplicaciones y ventajas.
- Tomando como referencia el problema 3 de ejercicios resueltos de mediciones con puentes, analizar el sensor para un valor muy pequeño, un valor central y un valor fuera de rango; con ello comparar los tres estados del puente Wheatstone de la figura 111.
 - Realizar la simulación necesaria para comparar su funcionamiento.
 - Definir sus aplicaciones y ventajas.

4.5. Introducción a la metrología eléctrica

Se presenta una serie de pruebas conceptuales desarrolladas con base en el contenido de la conceptualización.

4.5.1. Pruebas conceptuales

- ¿Qué tipos de mediciones existen?
- ¿Qué es una medición?
- ¿Cómo se realiza una comparación de medidas con respecto a una medida estandarizada?
- ¿Cómo se producen los errores en mediciones?
- ¿Qué es una medición directa?
- ¿Qué es una medición indirecta?
- ¿Cuál es la función principal de la metrología eléctrica?
- Mencionar las diferentes mediciones eléctricas que se utilizan comúnmente
- ¿Cuál es la diferencia entre las mediciones de tiempo y frecuencia?
- ¿Qué abarcan las mediciones electromagnéticas?

- ¿Qué es un instrumento electrométrico?
- ¿Cómo funciona un galvanómetro?
- ¿Cómo se realiza la medición en un galvanómetro?
- ¿Bajo qué principio funciona internamente un voltímetro?
- ¿Bajo qué principio funciona internamente un amperímetro?
- ¿Cómo se puede construir un voltímetro o amperímetro con selección de escala?
- ¿Cómo se constituye un multímetro para las diferentes mediciones que realiza?
- ¿Cómo funciona internamente un óhmetro?
- ¿En un óhmetro con selección de escala, que magnitud varía cuando se cambia dicha escala?
- ¿En qué principios de electrodinámica se basan las mediciones eléctricas?

CONCLUSIONES

1. La estructuración de las teorías constructivistas permite un enfoque más innovador en la enseñanza del curso de instrumentación eléctrica. Crea la oportunidad de aprender en cualquier instante y en cualquier lugar para todos los estudiantes que lo cursen, otorga una herramienta dinámica que el catedrático puede utilizar en diversos momentos al asignar conceptos y ejercicios.
2. Cada tema conceptualizado del curso de instrumentación eléctrica fue clasificado y distribuido de forma lineal y progresiva. Se definió y se dedujo su funcionamiento de forma teórica. Se destaca las aplicaciones más habituales para luego ser comparados mediante ejercicios y pruebas de medición del conocimiento adquirido.
3. Los laboratorios virtuales centran su desarrollo en los conceptos, utilizan las aplicaciones más destacadas de los temas seleccionados y estructuran una metodología de prueba donde el estudiante pueda obtener conclusiones acertadas con base en los resultados obtenidos.
4. Las pruebas de autoevaluación presentan entornos conceptuales y prácticos con el fin de medir la comprensión del estudiante bajo el enfoque teórico y el manejo de conceptos importantes, para luego ser aplicados de forma efectiva en la resolución de los problemas.

RECOMENDACIONES

1. Implementar y construir manuales para el manejo de paquetes software de simulación en tiempo real, con el fin de introducir al estudiante en las diversas herramientas informáticas.
2. Tomar en consideración la implementación de herramientas virtuales, como utilizar un software de simulación para comprobar lo aprendido en el desarrollo teórico. Esto permite a los estudiantes obtener un razonamiento analítico para comparar la teoría y la práctica en la temática del curso.
3. Conceptualizar los cursos de forma progresiva otorga una mayor comprensión en los alumnos. Esto se debe a que una enseñanza lineal permite aprender los temas de forma más precisa y retener los conceptos en forma clara.
4. Implementar el programa de estructuración virtual constructivista para cada curso que se imparte dentro de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica. La disposición de la educación superior a distancia es una herramienta clave para mejorar el nivel de enseñanza.
5. El contenido multimedia permite a los alumnos visualizar los conceptos de otra forma; en ciertas ocasiones resulta más práctico aprender determinados temas mediante un audio que a través de la lectura; es un beneficio de implementar contenido virtual constructivista.

6. Utilizar un servidor propio para la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, donde se pueda alojar toda la información y material audiovisual, con acceso remoto para que los estudiantes de la escuela puedan ingresar y tener todo el recurso multimedia a su disposición

BIBLIOGRAFÍA

1. Anónimo. *Amplificadores diferenciales y de instrumentación*. [en línea] <<https://docplayer.es/12626730-Tema-9-amplificadores-diferenciales-y-de-instrumentacion.html>> [Consulta: Octubre 2018].
2. Apuntes SEC.UB. *Osciladores*. [en línea]. <http://dfs.uib.es/GTE/education/telematica/sis_ele_comunicacio/Apuntes/Capitulo%206.pdf> [Consulta: Octubre 2018].
3. Arnadillo, Javier. *Osciloscopios*. España: Fundación San Valero, Grupo San Valero, 2012. 12 p.
4. Audacity Manual. *Audio-numérique*. [en línea]. 2013. <<https://ttmanual.audacityteam.org/m/images/e/e2>> [Consulta: octubre 2018].
5. Blanco, S. *Teorías constructivistas del aprendizaje. Trabajo de graduación de profesorado en educación diferencial con mención en dificultades específicas y socioafectivas del aprendizaje escolar*. Santiago, Chile: Facultad de pedagogía, Universidad academia de humanismo cristiano, 2014. 98 p.
6. Boylestad, R. *Electrónica: Teoría de circuitos y dispositivos electrónicos*. Décima edición. México: Pearson Educación, 2009. 894 p.
7. Cooper, W. *Instrumentación electrónica moderna y técnicas de medición*. México: Pearson Educación, 1991. 450 p.

8. Coughlin, R. *Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales*. México: Prentice-hall hispanoamericana S.A., 1993. 550 p.
9. Departamento de Ingeniería de la información y comunicaciones, Murcia. *Amplificadores operacionales*. [en línea]. España, 2018. <<https://es.slideshare.net/josemiguel0215/tema-6amplificadoresoperacionales>> [Consulta: septiembre 2018].
10. Departamento de teoría de la señal y comunicaciones. *Practica 0: Equipos de medida*. [en línea]. <<http://agamenon.tsc.uah.es/Asignaturas/ittst/lcom/apuntes/Pract0-equipos%20de%20medida.pdf>> [Consulta: septiembre 2018].
11. Floyd, T. *Dispositivos electrónicos*. Octava edición. México: Pearson Educación, 2008. 982 p.
12. López Rendón, Juan F., Fernández Henao, Sergio A. y Franco, Rodrigo A. *Comparación entre el amplificador operacional real y su modelo ideal: un análisis estadístico*. En: Scientia et technica Año XV. No. 43. Colombia: Universidad tecnológica de Pereira, 2009. 7 p.
13. Martínez, B. *Amplificador operacional, electrónica analógica*. [en línea]. <<http://blog.utp.edu.co/jnsanchez/files/2014/02/Amplificadores-operacionales.pdf>> [Consulta: agosto 2018].
14. Martínez, F. *Prácticas de instrumentación eléctrica básica*. [en línea]. <<https://es.scribd.com/document/343117264/DFA-InstrumentacionElectricaBasica-pdf>> [Consulta: septiembre 2018].

15. Moreno, I. *Área de tecnología electrónica*. [en línea]. <<http://www.unet.edu.ve/~ielectro/42AmplificadorInstrumentacion.pdf>> [Consulta: agosto 2018].
16. National Instruments. *Guía de acondicionamiento de señales para ingenieros*. [en línea]. <ftp://ftp.ni.com/evaluation/signal_conditioning/23807_Engineer_s_guide_to_signal_conditioning_Spanish_localisation_HR.pdf> [Consulta: julio 2018].
17. Ramírez, L. *Convertidores digital-analógico y analógico-digital*. [en línea]. <<http://www.utm.mx/~hugo/metrologia/Metro9.pdf>> [Consulta: agosto 2018].
18. Ruiz, G. *Electrónica básica para ingenieros*. España: Servicio de Reprografía, Facultad de Ciencias, Universidad de Cantabria, 2001. 297 p.
19. Sedra, A., & Smith, K. *Circuitos microelectrónicos*. México: McGraw-Hill, 2006. 1355 p.
20. Universidad Autónoma de México. *Equipo de medición*. [en línea]. <<https://studylib.es/doc/4578032/4.1.-instrumentos-de-medicion>> [Consulta: enero 2019].
21. Universidad Nacional de Mar de Plata. *Apunte complementario I: introducción a las mediciones*. [en línea]. <http://www3.fi.mdp.edu.ar/electrica/medidas1/recursos/me1_2018_cap1.pdf> [Consulta: enero 2019].

22. Universidad Simón Bolívar, Laboratorio C. *Amperímetro, voltímetro, óhmetro y multímetro.* [en línea]. <http://www.labc.usb.ve/paginas/mgimenez/Lab_Circ_Electronicos_Guia_Teorica/Cap6.pdf> [Consulta: enero 2019].