

Diseño y construcción de un material de apoyo para el manejo de controladores analógicos con OP AMP.

Vladimir Alvarez Prieto

Universidad Pedagógica Nacional

Facultad De Ciencia Y Tecnología

Departamento De Tecnología

Licenciatura En Electrónica

Bogotá, 2014

Diseño y construcción de un material de apoyo para el manejo de controladores analógicos con OP AMP.

Vladimir Alvarez Prieto

2005103004

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de  
Licenciado en Electrónica

Director

Alexander Pareja Giraldo

Ingeniero Electrónico

Universidad Pedagógica Nacional

Facultad De Ciencia Y Tecnología

Departamento De Tecnología

Licenciatura En Electrónica

Bogotá, 2014

Nota de Aceptación:

---

---

---

---

---

---

---

---

Firma de Director

---

Firma del Jurado 1

---

Firma del Jurado 2

Bogotá Febrero de 2014

## DEDICATORIA

*En una de sus clases: "Tarde o temprano se encontraran con la piedra en el camino,...esa que evitaron atrás."*

*Profesor Oscar Holguín.*

*Solo a quienes han osado apoyarme, teniendo paciencia, acompañándome a afrontar este reto, sabiendo que no es el fin, que es solo una momento de gran intensidad y que su compañía ha bastado para hacer valer que el sentido de la vida es gozar de las conquistas luchadas y de superar de igual manera los fracasos sin miedo. De no haberlo intentado no hubiera sabido que hubiera pasado.*

*A mis dos sobrinos que los amo como si fueran mis hijos, que el contagio de su alegría infantil me dan la tranquilidad y la paz que a veces necesito.*

*Y sin discusión, en memoria a su eterna alma juvenil que ha dejado su sonrisa y sus chascarrillos, a mi hermano querido, Mateo.*

*Vladimir Alvarez Prieto*

## AGRADECIMIENTOS

*A mis padres, por su amor insuperable y por los valores que me han transmitido.*


*A mis hermanos quienes son más que amigos, el ejemplo a seguir.*

*Al profesor Alex Pareja, mi último asesor, gracias a su disposición e interés.*

*A la universidad, por haberme dado las herramientas para ser una persona dedicada para y por la sociedad.*

*Y a mis amigos, que ahora profesores, me han brindado de sus experiencias para poder crecer y reflexionar sobre el acto educativo, de ellos para mí siempre entenderé que el sacrificio es el resultado de la disciplina, el empeño, el amor y la sabiduría.*

*A todos Gracias*

	<b>FORMATO</b>	
	<b>RESUMEN ANALÍTICO EN EDUCACIÓN - RAE</b>	
<b>Código:</b>	<b>Versión:</b>	
<b>Fecha de Aprobación:</b>	<b>Página 1 de 6</b>	

<b>1. Información General</b>	
<b>Tipo de documento</b>	Trabajo de grado.
<b>Acceso al documento</b>	Universidad Pedagógica Nacional. Biblioteca Central
<b>Título del documento</b>	Diseño y construcción de un material de apoyo para el manejo de controladores analógicos con OP AMP.
<b>Autor</b>	Alvarez Prieto, Vladimir
<b>Director</b>	Pareja Giraldo, Alexander
<b>Publicación</b>	Bogotá. Universidad Pedagógica Nacional, 2014, 82 páginas.
<b>Unidad Patrocinante</b>	Universidad Pedagógica Nacional.
<b>Palabras Claves</b>	Material de apoyo; Controladores Analógicos; electrónica; Arduino; Amplificador Operacional.

<b>2. Descripción</b>
<p>El presente Trabajo de grado plantea desde el diseño, la producción de un material de apoyo educativo que sea didáctico e interesante que facilite al estudiante fortalecer las temáticas relacionadas con los controladores analógicos vistas en la asignatura de sistemas de control 1 de la Universidad Pedagógica Nacional.</p>

<b>1. Fuentes</b>
<p>[1]. BLANCO, Rosalba; VARGAS, Mónica. Impacto generado por la cartilla tecnológica en niños de segundo grado de primaria en el área de tecnología. Tesis de grado. Corporación universitaria Minuto de Dios. 2007. 57p.</p>
<p>[2]. BOYLESTAD, R. L., &amp; NASHELSKY, L. Electrónica: Teoría de</p>

Circuitos. Sexta edición. México: Prentice-Hall.1997. 949p.

- [3]. COUGHLIN, Robert. F; DRISCOLL, Frederick. Amplificadores Operacionales Y Circuitos Integrados Lineales. México: Prentice-Hall. 1993. 538p.
- [4]. CUENCA, Michel; CHAPARRO, Néstor. Material de apoyo para actividades de trabajo independiente en electrónica analógica con amplificadores operacionales. Tesis de grado. Universidad Pedagógica Nacional. 2012. 68p.
- [5]. FERRO, Yenny; GIRALDO, Christian. Diseño y construcción de un controlador PID digital para un levitador magnético. Tesis de grado. Universidad Pedagógica Nacional 2011. 72p.
- [6]. FLOYD, Thomas L. Dispositivos electrónicos. Octava edición. México: Pearson Educación. 2008. 982p.
- [7]. GABRIUNAS, Vytautas. Apuntes de electrónica. Bogotá, Bogotá D.C., Colombia: UNIVERSIDA DISTRITAL Francisco José de Caldas. 1999. 340 p.
- [8]. HERNADEZ, Ricardo. Introducción a los sistemas de control: Conceptos, aplicaciones y simulaciones con MATLAB. México: Pearson Educación. 2010. 513 p.
- [9]. HERNANDEZ, Cindy; DEL CARMEN, Adriana. Control PID de la velocidad de una banda transportadora para la clasificación de objetos. Tesis de grado. México: Universidad Autónoma De Zacatecas. 2008. 82p.
- [10]. JIMÉNEZ, Félix; RIVERO, Javier. Diseño y construcción de una tarjeta programable de adquisición, procesamiento de datos y control. Tesis de maestría en Mecatrónica México: Cenidet. 2006. 149p.
- [11]. KUO, Benjamín. Sistemas de Control. Séptima Edición. México: Prentice Hall. 1996. 897 p.
- [12]. MARTÍNEZ, Elkin. Identificación de sistemas dinámicos lineales utilizando modelos de caja negra: arx, armax, output error y box jenkins. Tesis de grado. Universidad Pedagógica Nacional. 2011. 52p.

- [13]. OGATA, Katsuhiko. Ingeniería de Control Moderna. Cuarta Edición. España: Pearson Educación. S.A. 2003. 965 p.
- [14]. PERTENCE JUNIOR, Antonio. Amplificadores Operacionales Y Filtros Activos. McGraw-Hill. 1991. 295p.
- [15]. POMPEYA, Virginia. "Blended Learning". La importancia de la utilización de diferentes medios en el proceso educativo. Tesis de Magister en Tecnología Informática aplicada en Educación. Argentina: Universidad Nacional De La Plata. 2008. 160 p.
- [16]. VARGAS, Marta. Materiales Educativos: Procesos y resultados. Bogotá, Colombia: Convenio Andrés Bello. 2003 279 p.
- [17]. VARGAS, Leidy; RUBIO, Liliana. Diseño de una estrategia didáctica, sobre seguridad industrial en las áreas de mecánica y electrónica de la modalidad de mecatrónica de la escuela tecnológica instituto técnico central. Tesis de grado. Universidad Pedagógica Nacional. 2010. 216 p.

## 2. Contenidos

El trabajo se divide en 4 capítulos

EL capítulo 0 describe el motivo por el que se desarrolla este trabajo de grado e indica los objetivos para poder afrontarlo.

El capítulo 1 muestra los conceptos teóricos que son inherentes en el proceso de desarrollo.

El capítulo 2 indica como fue el proceso de diseño y construcción de los módulos y la plataforma de acople.

El capítulo 3 verifica el comportamiento del material de apoyo y su proximidad a la teoría.

Y el capítulo 4 presenta las conclusiones generales en las que muestra los resultados al diseñar y crear un material de apoyo enfocados a los sistemas de control.

## 3. Metodología

La metodología desarrollada fue por el modelo en cascada el cual es un proceso de desarrollo secuencial en el cual el progreso es visto como el flujo descendente de actividades tipo lineal a través de cada una sus fases. En cada una existe la posibilidad de retroalimentación entre la fase actual y las fases ya desarrolladas. Las actividades desarrolladas aplicadas son:

- Concepción: buscar y clasificar la información.
- Iniciación: establecer las bases temáticas según la información e ideas recolectadas.
- Análisis: estudiar la información obtenida y clarificación de la información.
- Diseño: idear esquemas y plantear los elementos específicos necesarios según el análisis de la información.
- Construcción: plasmar las ideas de diseño surgidas a la realidad.
- Prueba: implementación, análisis, verificación de resultados y conclusiones

#### 4. Conclusiones

1. El diseño y la elaboración de un material de apoyo, como el que surgió en este trabajo de grado, debe incluir una labor de investigación docente que permita seleccionar, clasificar y ordenar los temas y los componentes mínimos para la producción de una herramienta de acompañamiento, buscando mejorar en los estudiantes la confrontación y el entendimiento de los conceptos, y al mismo tiempo logre por parte del docente el análisis y reflexión de la acción de este aprendizaje.
2. El diseño de un material de apoyo para tratar algunos temas en la asignatura de sistemas de control 1, permitió materializar un modo distinto, práctico y evidente una herramienta educativa basada en algunos kits de electrónica haciendo énfasis en la utilización de los amplificadores operacionales. Este material se compone de los elementos necesarios para una acción de control: tres módulos principales correspondientes a la acción proporcional, integral y derivativa. Dos módulos que permiten recrear la acción de retroalimentación de una acción de control, un sumador inversor, un sumador restador, y un módulo correspondiente al convertidor F-V el

cual es necesario para el tratamiento de plantas como un motor DC. Por último se resalta la inclusión de una tarjeta de adquisición de datos basado en la plataforma de Arduino con una interacción hacia el programa Matlab.

3. El comportamiento de los controladores dentro de sus módulos respectivos, se verifico haciendo cambios en los valores de sus componentes externos demostrando la efectividad en su funcionamiento, pero deja claro que los parámetros internos de los controladores analógicos solo pueden ser cambiados a partir de estos componentes externos y no pueden ser modificados a través de la tarjeta de adquisición de datos.
4. Los módulos funcionan según lo esperado a su diseño y pueden usarse para la demostración de su análisis individual y combinado, quiere decir este ultimo que se puede realizar controladores PI, PD y PID, sin embargo este tipo de configuraciones no se alcanzo a implementar con el material de apoyo diseñado.
5. El manual de usuario para el manejo de los módulos dentro de la plataforma para realizar acciones de control, es el complemento que debe incluir todo material educativo con información clara y necesaria para identificar y comprender las partes y el manejo que conforman estos desarrollos. Por más que se logre la materialización de un dispositivo, si este no contiene un soporte de su manejo no lograra su cometido, que en este caso es aumentar el interés y convertirse en una herramienta de apoyo para el aprendizaje del estudiante.
6. La tarjeta para la adquisición de datos, que fue basada en la plataforma Arduino, cumple de forma básica la función de adquirir y registrar los datos de una planta Física, para un posterior análisis. Los datos obtenidos en las pruebas demuestran que debe mejorarse algunos aspectos de configuración de la tarjeta para poder obtener datos con una mejor resolución y por consiguiente una mejor calidad en los datos.
7. La elaboración artesanal de los circuitos impresos para los módulos conlleva a aumento en el tiempo en fabricación, además la probabilidad de tener fallas como cortos eléctricos o caminos abiertos, arriesgando el

funcionamiento y la efectividad de estos. Los módulos como versión de prueba pueden, consolidarse elaborándose nuevamente en circuitos impresos hechos a máquina.

<b>Elaborado por:</b>	<b>Vladimir Alvarez Prieto</b>
<b>Revisado por:</b>	<b>Alexander Pareja Giraldo</b>

<b>Fecha de elaboración del Resumen:</b>	1	03	2014
--	---	----	------

## TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION .....	14
Planteamiento del problema .....	19
Delimitación del problema .....	20
Formulación de la pregunta de estudio.....	21
Justificación.....	21
Objetivos .....	22
1.1.1    Objetivo general .....	22
1.1.2    Objetivos específicos.....	22
Metodología.....	22
1. MARCO TEORICO.....	24
1.1    Material educativo.....	24
1.2    El amplificador operacional.....	26
1.2.1    Parámetros de los amplificadores operacionales .....	27
1.2.1 .....	29
1.2.2    Retroalimentación .....	29
1.2.3    Respuesta de frecuencia <b>Bw</b> .....	31
1.2.4    Ruido.....	31
1.2.5    Encapsulado.....	31
1.3    Controladores y configuraciones de los OP AMP en sistemas de control	31
1.3.1    Planta .....	32
1.3.2    Perturbaciones .....	32
1.3.3    Controlador proporcional.....	32
1.3.4    Controlador integral (Int).....	32
1.3.5    Controlador derivativo.....	33
1.3.6    Combinación de controladores .....	34

2.	DISEÑO Y CONSTRUCCION .....	36
2.1	Diagrama de proceso .....	36
2.2	Tarjeta arduino.....	36
2.2.1	Interfaz arduino.....	37
2.3	Adquisición de datos .....	38
2.3.1	Sketch para la tarjeta arduino: MATLAB_ARDUINO_DAQ .....	39
2.4	Software de entorno grafico interactivo: DAQ_UPN_ARD.....	40
2.4.1	Código DAQ_UPN_ARDUINO.....	41
2.5	Diseño de controladores.....	43
2.5.1	SYSTEM IDENTIFICATION <b>ident</b> .....	44
2.5.2	SISOTOOL (siso) .....	44
2.6	Diseño de módulos.....	44
2.6.1	Módulos.....	45
2.6.2	Switch de selección de encapsulado.....	46
2.6.3	Configuración offset .....	47
2.7	Construcción y configuración.....	49
2.7.1	Módulo controlador proporcional: P .....	49
2.7.2	Módulo controlador integral: Int .....	50
2.7.3	Módulo controlado derivativo: D .....	52
2.7.4	Sumador restador.....	53
2.7.5	Sumador inversor.....	55
2.7.6	Módulo de convertidor frecuencia voltaje.....	56
2.7.7	Fabricación de módulos .....	58
2.7.8	Plataforma de acople .....	58
2.7.9	Regletas de alimentación.....	59
2.7.10	Conexión de módulos.....	59
2.7.11	Guía de manejo.....	60
3.	PRUEBA Y RESULTADOS.....	61

3.1	MODULO CONTROLADOR INTEGRAL .....	63
3.2	MODULO CONTROLADOR DERIVATIVO .....	67
3.3	MODULO CONTROLADOR PROPORCIONAL.....	70
3.4	MODULO SUMADOR RESTADOR.....	71
3.5	MODULO SUMADOR INVERSOR.....	73
3.6	MODULO CONVERTOR F-V (FRECUENCIA- VOLTAJE).....	73
3.7	SOFTWARE.....	76
4.	CONCLUSIONES .....	78
	TRABAJO FUTURO .....	80
	Bibliografía .....	81
	ANEXOS.....	83

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
<b>Figura 1.</b> Tipología de la metodología tipo cascada .....	22
<b>Figura 2.</b> Proceso de construcción de saberes y conocimientos. ....	25
<b>Figura 3.</b> Etapas básicas de un OP AMP.....	26
<b>Figura 4.</b> Configuración de retroalimentación negativa del OP AMP e interpretación matemática.....	28
<b>Figura 5.</b> Diagrama de retroalimentación o lazo cerrado.....	30
<b>Figura 6.</b> Configuración Controlador P con OP AMP. ....	32
<b>Figura 7.</b> Configuración Controlador Int básico con OP AMP. ....	33
<b>Figura 8.</b> Configuración Controlador Int practico con OP AMP .....	33
<b>Figura 9.</b> Configuración Controlador D básico con OP AMP .....	34
<b>Figura 10.</b> Configuración Controlador D practico con OP AMP .....	34
<b>Figura 11.</b> Configuración Controlador PI.....	35
<b>Figura 12.</b> Configuración controlador PD .....	35
<b>Figura 13.</b> Configuración controlador PID.....	35
<b>Figura 14.</b> Diagrama de proceso del material de apoyo.....	36
<b>Figura 15.</b> Tarjeta Arduino ATmega 2560. ....	37
<b>Figura 16.</b> Ventana de un Sketch para Arduino .....	38
<b>Figura 17.</b> Interfaz DAQ_UPN_ARDUINO .....	41
<b>Figura 18.</b> Encapsulados de OP AMP de 8 y 14 pines .....	45
<b>Figura 19.</b> Configuración de encapsulados de 8 pines. ....	46
<b>Figura 20.</b> Switch de selección de encapsulado. ....	46
<b>Figura 21.</b> Jumper JP1 .....	47
<b>Figura 22.</b> Configuraciones recomendadas del offset de LF 356 y LM 741. ....	47
<b>Figura 24.</b> Resistencia de Ecuilización.....	48
<b>Figura 23.</b> Jumper JP2.....	48

<b>Figura 25.</b> Circuito del controlador proporcional P .....	49
<b>Figura 26.</b> Diseño del PCB del módulo del controlador P .....	50
<b>Figura 27.</b> Simulación 3D del módulo del controlador proporcional P. ....	50
<b>Figura 28.</b> Circuito del controlador integral Int.....	51
<b>Figura 29.</b> Diseño del PCB del módulo del controlador Int.....	51
<b>Figura 30.</b> Simulación 3D del módulo del controlador integral Int.....	52
<b>Figura 31.</b> Circuito del controlador Derivativo D. ....	52
<b>Figura 32.</b> Diseño del PCB del módulo del controlador D.....	53
<b>Figura 33.</b> Simulación 3D del módulo del controlador derivativo D. ....	53
<b>Figura 34.</b> Circuito del sumador restador. ....	54
<b>Figura 35.</b> Diseño de módulo del sumador restador. ....	54
<b>Figura 36.</b> Simulación 3D del módulo sumador restador. ....	55
<b>Figura 37.</b> Circuito del sumador inversor. ....	55
<b>Figura 38.</b> Diseño del PCB del módulo del sumador inversor.....	56
<b>Figura 39.</b> Simulación en 3D del módulo del sumado inversor.....	56
<b>Figura 40.</b> Configuración típica del LM 331.....	57
<b>Figura 42.</b> Simulación en 3D del Convertidor F-V .....	57
<b>Figura 41.</b> Diseño del PCB del Convertidor F-V.....	57
<b>Figura 43.</b> Instalación de los módulos en plataforma de acople .....	59
<b>Figura 44.</b> Cables Jumper.....	59
<b>Figura 45.</b> Regletas de Alimentación para los módulos.....	60
<b>Figura 46.</b> Portada de Guía .....	60
<b>Figura 47.</b> Primeros módulos PID .....	61
<b>Figura 48.</b> Preparación de pruebas de laboratorio para los módulos en la plataforma.....	62
<b>Figura 50.</b> Modulo Integrador a 10Hz.....	63
<b>Figura 49.</b> Configuración Controlador Integral.....	63
<b>Figura 51.</b> Muestra integrador a 50 Hz .....	64

<b>Figura 52.</b> Modulo Integrador a 192 Hz.....	64
<b>Figura 53.</b> Modulo Integrador a 207 Hz con escala de amplitud de 100 mV en Vo .....	65
<b>Figura 54.</b> Modulo integrador a 207 Hz con escala de amplitud 20 mV en Vo .....	65
<b>Figura 55.</b> Modulo Integrador usando condensador cerámico 100nf a 100 Hz .....	66
<b>Figura 56.</b> Modulo Integrador a frecuencia 500Hz .....	66
<b>Figura 57.</b> Modulo Integrador a 1KHz con escala de amplitud 1V en Vo.....	67
<b>Figura 58.</b> Modulo Integrador a 1KHz con escala de amplitud 200mV en Vo .....	67
<b>Figura 59.</b> Configuración Controlador Derivativo.....	67
<b>Figura 60.</b> Modulo Derivativo a 10 Hz.....	68
<b>Figura 61.</b> Modulo Derivativo a 50 Hz.....	68
<b>Figura 62.</b> Modulo Derivativo a 100 Hz.....	69
<b>Figura 63.</b> Modulo Derivativo a 1KHz, vista desde la experimentación y la imagen resultante.....	69
<b>Figura 64.</b> Configuración Controlador Proporcional.....	70
<b>Figura 65.</b> Modulo Proporcional a 1KHz.....	71
<b>Figura 66.</b> Señales de entrada CH1 y CH2 del modulo sumador restador .....	72
<b>Figura 67.</b> Resta de la señales de entrada mediante el osciloscopio CH1-CH2. ....	72
<b>Figura 68.</b> Señal de salida del modulo sumador inversor Vr-Vi .....	72
<b>Figura 69.</b> Funcionamiento del modulo sumador inversor con dos señales.....	73
<b>Figura 70.</b> Comparación de entrada y salida del modulo sumador inversor .....	73
<b>Figura 71.</b> Modulo convertidor F-V con Vi a 1Hz .....	74
<b>Figura 72.</b> Modulo convertidor F-V con Vi a 10Hz.....	74
<b>Figura 73.</b> Modulo convertidor F-V con Vi a 50 Hz.....	75
<b>Figura 74.</b> Modulo convertidor F-V con Vi a 100 Hz.....	75
<b>Figura 75.</b> Modulo convertidor F-V con Vi a 130 Hz.....	75
<b>Figura 76.</b> Funcionamiento de MATLAB_ARDUINO_DAQ.....	76
<b>Figura 77.</b> Tratamiento en Toolbox Ident .....	77

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
<b>Tabla 1.</b> Configuración y ecuaciones de Controlador Proporcional .....	32
<b>Tabla 2.</b> Configuración y ecuaciones de controlador Integral. ....	33
<b>Tabla 3.</b> Configuración y ecuaciones del controlador Derivativo .....	34
<b>Tabla 4.</b> Combinación de controladores .....	35
<b>Tabla 5.</b> Resistencia de Ecualización.....	48

## INTRODUCCION

La educación como proceso formativo, tiene como fin mantener los conocimientos propios de una cultura, impartiendo de manera hereditaria; por lo tanto es necesario hacerlo de modo en que el educando se sienta interesado en adquirir dicho conocimiento, dando paso a la labor del docente en el proceso de enseñanza-aprendizaje, logrando fomentar las competencias en el ámbito laboral.

Es imprescindible que el educador al llevar a cabo dicho proceso tenga en cuenta el cómo y el para quien va a ser dirigido; es por ello que en esta labor es necesario tener presente la elaboración e implementación de diferentes estrategias, las cuales deben ser pensadas directamente al contexto a quien va dirigido, puesto que la realidad es cambiante y la pedagogía<sup>1</sup> no puede ser la misma, no debe ser empleada igualmente para todos, ya que cada grupo de estudiantes posee un comportamiento social natural que los hace únicos.

Para llevar a cabo el proceso educativo, no necesariamente está debe cambiar a todo momento y en su totalidad rechazando los actos ya creados y aplicados anteriormente por los docentes, por el contrario, su importancia es tomar un punto de partida desde la observación en los avances logrados y los resultados obtenidos, para luego razonar sobre el modo en que se puede mejorar el enfoque cognitivo y aumentar la percepción de lo evidente por ende la comprensión. Es el caso de trabajos de grado que se hacen preguntas de investigación en su interés por mejorar el acto pedagógico<sup>2</sup>: “¿Cómo se puede desarrollar un aprendizaje significativo sobre la prevención de accidentes en las áreas de mecánica y electrónica en los estudiantes de grado octavo de la modalidad de mecatrónica de la Escuela Tecnológica Instituto Técnico Central?”<sup>3</sup>. Donde aquello que favorece el desarrollo del aprendizaje es la reflexión en el diseño de una estrategia didáctica, dando validez al manejo de apoyos en la educación, “El uso de materiales educativos, en el desarrollo de temáticas

---

<sup>1</sup> Pedagogía: Es la disciplina que se encarga de reflexionar transversal e interdisciplinariamente sobre la enseñanza y los elementos del acto educativo.

<sup>2</sup> Acto pedagógico: Es la relación o relaciones que se establecen entre el enseñante, el enseñado, el contenido y el contexto, en una interacción dialéctica, cognoscitiva, afectiva y social. Tomado de: <http://massaly-actopedagogico.blogspot.com/2010/05/componentes-del-acto-pedagogico-los.html>

<sup>3</sup> VARGAS, Leidy y RUBIO, Liliana. Diseño de una estrategia didáctica, sobre seguridad industrial en las áreas de mecánica y electrónica de la modalidad de mecatrónica de la escuela tecnológica instituto técnico centra. Tesis de Grado. Universidad Pedagógica Nacional. p. 16.

*técnicas, propician que el estudiante se vuelva más operativo y despectivo dentro de su entorno de trabajo, generando poca sensibilidad ante eventos inesperados”<sup>4</sup>.*

Es valorado los aportes que se hacen al fabricar artefactos que tienen inmersos los conocimientos y procesos manejados en el área de electrónica, demostrando rasgos de un desarrollo tecnológico, planteando una posible solución a una necesidad, en cuanto diseño y funcionalidad artefactual; *“Analizar e implementar los modelos de identificación de sistemas lineales ARX, ARMAX, Box Jenkins, Output Error y diseñar los circuitos de acondicionamiento de señal con una etapa de potencia para la excitación de redes eléctricas y sistemas dinámicos electromecánicos.”<sup>5</sup>*, permiten dar paso al desarrollo comprensivo y cognitivo de aquellos por quienes fueron elaborados; también *“Diseñar y construir una tarjeta programable y autónoma de adquisición, procesamiento de datos y control, con opción de conexión a la computadora o otra tarjeta similar.”<sup>6</sup>*; dejan a la expectativa el cómo este tipo de desarrollos le pueden aportar ciertas intencionalidades pedagógicas al docente para que este proponga actividades que amplíen la comprensión de sus educandos.

Lo anterior es favorable desde el punto de vista en cuanto la libertad que tendría el docente en el manejo de temas basados en el artefacto, esto llevándolo al aula de clase; pero si el estudiante desea ampliar sus conocimientos a partir del auto-aprendizaje, sería complejo si no hubiera un material de apoyo apropiado que permita manipular correctamente la función de la herramienta.

Uno de los factores que afectan el posible progreso tecnológico, es justamente la carencia de material educativo en el área de Tecnología, donde se especifique cada característica y elemento que sea propia de ella, por supuesto existe gran cantidad de herramientas, pero no un apoyo que lleve al conocimiento y comprensión de ellas; perjudicando el acto educativo puesto que el estudiante sin tener saberes con respecto a la herramienta se le dificulta su aprendizaje. Como lo afirman Rosalba Blanco y Mónica Vargas<sup>7</sup> en su trabajo de grado de donde su objetivo general es *“determinar el impacto que genera en los estudiantes el material educativo “Cartilla tecnológica” desarrollada frente el aprendizaje de conceptos relativos a la tecnología”<sup>8</sup>* donde uno de los datos consultados en esta tesis aclara que *“En el mercado no existe una oferta significativa de material educativo para el área de Tecnología, por lo tanto los*

---

<sup>4</sup> *Ibíd.*, p. 112.

<sup>5</sup> MARTÍNEZ, Elkin. Identificación de sistemas dinámicos lineales utilizando modelos de caja negra: arx, armax, output error y box jenkins. Tesis de grado. Universidad Pedagógica Nacional. 2011. p. 8.

<sup>6</sup> JIMÉNEZ, Félix y RIVERO, Javier. Diseño y construcción de una tarjeta programable de adquisición, procesamiento de datos y control. Tesis de Maestría en Mecatrónica. México: Cenidet, 2006. p. 9.

<sup>7</sup> BLANCO, Rosalba y VARGAS Mónica. Impacto generado por la cartilla tecnológica en niños de segundo grado de primaria en el área de tecnología. Tesis de grado. Corporación Universitaria Minuto de Dios, 2007. 57 p.

<sup>8</sup> *Ibíd.*, p. 11.

*maestros no disponen de medios que enriquezcan su labor teniendo como consecuencia determinados efectos en la calidad del aprendizaje*<sup>9</sup>.

Para elaborar un material educativo óptimo que garantice el acto pedagógico, es necesario tener en cuenta ciertas características, tales como “¿Cuáles son los medios más apropiados para cada necesidad educativa para promover el aprendizaje?”<sup>10</sup>. Para garantizar la formación del estudiante teniendo de apoyo un material educativo, se deben analizar los diferentes componentes implicados ya sean económicos, sociales, culturales entre otros, articulándolos entre sí, reflexionando pedagógicamente para brindar la posibilidad de abordar un tema con el cómo y con qué recursos se puede abordar, esto es, reflexionar sobre la didáctica<sup>11</sup>.

Es entonces que a partir de identificar y seleccionar el grupo a quien irá dirigido se puede diseñar todo un plan formativo que incluya material didáctico -la intencionalidad del aprendizaje- el cual al ser aplicado, debe cumplir a cabalidad el propósito para el que fue ideado. En carreras afines a la electrónica, se puede evidenciar que se han usado este tipo de formación perceptible en el cual buscan generar en el estudiante la apropiación del conocimiento de una forma didáctica, como lo muestra el proyecto “Material de Apoyo para actividades de trabajo independiente en electrónica analógica con amplificadores operacionales<sup>12</sup>”<sup>13</sup> que busca “Diseñar un material que apoye el proceso de aprendizaje en las horas de trabajo independiente de los estudiantes.”<sup>14</sup>. Esta y otras propuestas para electrónica pueden ser apropiadas para los estudiantes siempre y cuando brinde las herramientas con su respectivo material de apoyo suficientemente claro y enriquecedor para que pueda convertirse en un proceso de auto-aprendizaje como se recalco anteriormente.

Ahora bien, en la electrónica por ser un área de múltiples temáticas, se hace evidente que el docente debe elegir minuciosamente cuales de éstas se relacionan y

---

<sup>9</sup> *Ibíd.*, p. 8.

<sup>10</sup> POMPEYA, Virginia. “Blended Learning”. La importancia de la utilización de diferentes medios en el proceso educativo. Tesis de Magister en Tecnología Informática aplicada en Educación. Argentina: Universidad Nacional De La Plata, 2008. p. 18.

<sup>11</sup> Didáctica: es la rama de la Pedagogía que se encarga de buscar métodos y técnicas para mejorar la enseñanza, definiendo las pautas para conseguir que los conocimientos lleguen de una forma más eficaz a los educados. Tomado de: <http://definicion.de/didactica/>

<sup>12</sup> Ampliadores operaciones es un circuito integrado que posee dos entradas y una salida, donde la salida permite obtener la diferencia entre las entradas multiplicado por un factor de ganancia G

<sup>13</sup> CUENCA, Michel; CHAPARRO, Néstor. Material de apoyo para actividades de trabajo independiente en electrónica analógica con amplificadores operacionales. Tesis de grado. Universidad Pedagógica Nacional. 2012. 68 p.

<sup>14</sup> *Ibíd.*, p. 19.

pueden asimismo incluirlas según sea el propósito en el plan de estudios<sup>15</sup>, además, con que herramientas las puede respaldar, y de este modo establecer los lapsos de tiempo a emplear para poder abordarlas con plenitud. Está es una de las situaciones complicadas más comunes a la hora de impartir una asignatura en electrónica, pues se busca idealmente que se pueda ver y completar bien cada una de las temáticas en el tiempo que se programo inicialmente.

Hay que resaltar el papel importante que pueden tener la apropiación y el uso de los materiales educativos, debido a que pueden aportar en gran medida un auxilio, un apoyo, una alternativa que busque ante todo acercar al estudiante a la comprensión de cualquier temática. Por eso para iniciar este trabajo de grado se debe dejar claros cuales son los ejes en el que se enfocara su desarrollo. Uno de ellos será la rama de la electrónica que tiene que ver con los sistemas de control<sup>16</sup>, que tiene a su vez ligada intrínsecamente el tema de los amplificadores operacionales correspondientes a la parte analógica de los controladores automáticos<sup>17</sup>, por lo cual este será el segundo eje.

Los proyectos que son dirigidos hacia los sistemas de control que tienen un carácter pedagógico que incluya e implemente un material educativo, escasean, ya que la línea a desarrollar en los trabajos de grado en los programas académicos de electrónica es más común ver que se encaminen a un proceso artefactual y no a un desarrollo pedagógico, de manera que se considere la reducción de trabajos de este tipo de enfoque, lo que no desmerita el valor e importancia que tiene el enfoque artefactual acostumbrado. Por ejemplo a la pregunta “¿Es posible hacer un modelado matemático de la banda transportadora, el motor y los circuitos electrónicos, todo el sistema en conjunto?”<sup>18</sup>, en esté su interés se centra en el uso apropiado de los conceptos vistos en clase de sistemas de control para poder llegar a plasmar en un artefacto el conocimiento adquirido en el aula. Esa es como tal la finalidad, mostrar la aplicación de los conceptos y es afirmado manifestando que, “también se comprueba

---

<sup>15</sup> Plan de estudios: es el esquema estructurado de las áreas obligatorias y fundamentales y de áreas optativas con sus respectivas asignaturas que forman parte del currículo de los establecimientos educativos. Tomado de: <http://www.mineducacion.gov.co/1621/article-79419.html>

<sup>16</sup> Sistemas de control: es un tipo de sistema que se caracteriza por la presencia de una serie de elementos que permiten influir en el funcionamiento del sistema. La finalidad es conseguir, mediante la manipulación de las variables de control, un dominio sobre las variables de salida, de modo que estas alcancen unos valores prefijados. Tomado de: <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3330/5/34059-5.pdf>.

<sup>17</sup> Controladores automáticos: en un sistema de control se encargan de comparar el valor real de salida de una planta con la entrada (valor de deseado), detectan los desvíos existentes, y producen una señal de control que reducen los desvíos a cero o aun valor pequeño (acción de control). Tomado de: OGATA, Katsuhiko. Modelado matemático de sistemas dinámicos. En: Ingeniería de Control Moderna. España: Pearson Educación. S.A. 2003. p 62.

<sup>18</sup> HERNANDEZ, Cindy; DEL CARMEN, Adriana. Control PID de la velocidad de una banda transportadora para la clasificación de objetos. Tesis de grado. México: Universidad Autónoma De Zacatecas. 2008. p. 2.

*la utilidad de la modelación matemática y simulación computacional para la sintonización de aquellos sistemas en que la experimentación directa no es viable*<sup>19</sup>.

Visto el enfoque que se presenta frecuentemente en los proyectos dirigidos hacia los sistemas control, se da a conocer el trabajo “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN CONTROLADOR PID DIGITAL PARA UN LEVITADOR MAGNÉTICO”<sup>20</sup> su proyección se dirige a la creación de un artefacto, que se puede usar como herramienta educativa, sin embargo carece de ese apoyo didáctico que oriente tanto al docente como al estudiante a replantear, descubrir y aclarar los conceptos que están inmersos al interactuar con éste. Por eso dejan dicho “*La planta de levitación magnética es un sistema muy útil para la enseñanza de la teoría de control digital y analógico, ya que las prácticas y futuros proyectos que se pueden implementar en base a ésta son variados e integran diferentes temáticas de control, potencia y otras áreas relacionadas con electrónica, siendo entonces una herramienta de aprendizaje practico-teórico*”<sup>21</sup>, enfatizando que no es un material didáctico completamente, por el contrario es un prototipo de ejemplo que sirve para mostrar el manejo de los controladores digitales.

Se ha puesto en evidencia la forma en que son enfocados los trabajos de grado hacia los sistemas de control, los cuales casi por tradición deben elaborar artefactos tecnológicos, los cuales buscan satisfacer varias necesidades. Si bien, están encaminados hacia la comprensión y el manejo de los controladores analógicos y digitales, deben ser incluidos en un diseño electrónico para que su implementación muestre la funcionalidad del artefacto.

No obstante, debe entenderse que estas elaboraciones artefactuales que están para suplir un sin número de necesidades, que no siempre contemplan dar un paso a la comprensión de su contenido, deben fortalecer el proceso de aprendizaje de los conceptos y por ende la formación en los estudiantes, pues conlleva, por un lado, a brindar un espacio de exploración y verificación y por otro, a tener un material cuerdo en el proceso. Lo que quiere decir que aproximaría al estudiante a las temáticas y conceptos relacionados, bajo la supervisión del docente, quien será el encargado de valorar la enseñabilidad, la interacción y el beneficio al usar un apoyo didáctico para las asignaturas relacionadas a los sistemas de control.

El proyecto se desarrollo sobre la metodología por modelo en cascada permitiendo ir de fase en fase retro alimentado hasta lograr llegar hasta su finalidad.

---

<sup>19</sup> *Ibíd.*, p. 64.

<sup>20</sup> FERRO, Yenny y GIRALDO, Christian. Diseño y construcción de un controlador PID digital para un levitador magnético. Tesis de grado. Universidad Pedagógica Nacional. 2011. 72 p.

<sup>21</sup> *Ibíd.*, p. 9.

El presente documento se estructura en 5 capítulos de la siguiente forma:

0. INTRODUCCIÓN
1. MARCO TEÓRICO.
2. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN.
3. PRUEBA Y RESULTADOS.
4. CONCLUSIONES.

EL capitulo 0 Describe el motivo por el que se desarrolla este trabajo de grado e indica los objetivos para poder afrontarlo.

El capitulo 1 Muestra el los conceptos teóricos que son inherentes en el proceso de desarrollo.

El capitulo 2 Indica como fue el proceso de diseño y construcción de los módulos y la plataforma de acople.

El capitulo 3 Verifica el comportamiento del material de apoyo y su proximidad a la teoría.

Y el capitulo 4 presenta las conclusiones generales en las que muestra los resultados al diseñar y crear un material de apoyo enfocados a los sistemas de control.

## **Planteamiento del problema**

Al culminar la educación media, los estudiantes bachilleres deben continuar el trayecto hacia la educación superior, donde se deben orientar a una proyección académica y profesional mediante un programa que tenga las condiciones establecidas por la ley<sup>22</sup>, y sea impartido por instituciones de educación superior avaladas y reconocidas para que se les pueda garantizar un proceso de desarrollo educativo de calidad.

En el programa de licenciatura en electrónica<sup>23</sup> de la Universidad Pedagógica Nacional, se tiene preparado un currículo que permite abordar diferentes temáticas que van desde la formación pedagógica hasta los fundamentos inherentes propios del área de la electrónica. Estas se agrupan y se plantean en asignaturas según las áreas del saber, su relación y similitud, y se clasifican conforme al tipo de espacio académico designado, el cual puede estar entre básico común, complementario, electiva, profesional ó de contexto.

---

<sup>22</sup> En Colombia, en la Ley general de educación se estableció en el decreto 2566 de 2003 el Desarrollo de programas académicos de la educación superior.

<sup>23</sup> Anexo E: Plan de estudios de licenciatura en electrónica de Universidad Pedagógica Nacional

Cada espacio académico tiene un propósito diferente, lo que le brinda al estudiante una variedad de conocimientos generales y específicos que se irán complementando y fortaleciendo a medida que aprueba y pasa por todos y cada uno de ellos, forjando un futuro docente para la sociedad, así como lo propone la misión establecida en el programa, *“Formar Licenciados en Electrónica, con las competencias disciplinares y educativas requeridas para desempeñarse en la componente tecnológica de los niveles básico y medio articulando propósitos de formación integral con las potencialidades educativas asociadas a la naturaleza de las disciplinas tecnológicas”*<sup>24</sup>.

Naturalmente, las asignaturas pertenecientes al espacio académico ‘profesional’ conforman la parte principal del programa de la licenciatura en electrónica, es esa columna vertebral que permite darle a esta licenciatura una articulación de carácter tecnológico. En estas se ubican las temáticas que son los ejes de orientación dentro del campo del saber de la electrónica y que se consideran esenciales para el propósito del programa académico, pues la importancia que tienen este tipo de asignaturas indican que deben ser las de mayor interés y empeño por parte de los estudiantes, y a su vez, deben ser las de mejor preparación por parte de los docentes encargados, estableciendo las temáticas, los materiales, los espacios y las herramientas necesarias para poder enriquecer el acto educativo.

El artículo 6º de la ley 30 de 1992 determina que *“los objetivos de la educación superior y de sus instituciones es trabajar con la creación, el desarrollo y la transmisión del conocimiento en todas sus formas y expresiones y promover su utilización en todos los campos para solucionar las necesidades del país”*<sup>25</sup>. Es entonces un propósito mejorar la forma de educar y de orientar, y para ello en las metodologías que se acostumbran a emplear deben tener una constante adaptación tanto en la enseñanza como en el aprendizaje para fortalecer los aspectos débiles que obstaculizan y alteran el normal desarrollo de este proceso de formación.

## **Delimitación del problema**

En las asignaturas de sistemas de control, espacios ubicados en la fase de profundización en los últimos semestres (8, 9 y 10) del programa de electrónica, los estudiantes deben cursarlas teniendo los conceptos claros referentes a circuitos, diseño y programación visto en asignaturas previas a estas. El énfasis se centra en el control analógico, el control digital y el control difuso respectivamente, teniendo en cada nivel un grado de conocimiento propio de su orientación.

---

<sup>24</sup> Misión de la licenciatura en electrónica de la Universidad Pedagógica Nacional, Tomado de: <http://cienciaytecnologia.pedagogica.edu.co/vercontenido.php?idp=373&idh=378>

<sup>25</sup> COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Ley 23 (28, Diciembre, 1992). Por la cual se organiza el servicio público de la Educación Superior. Diario oficial. Bogotá, 1992.

En el primer nivel, Sistemas de control 1, se imparte la introducción hacia los controladores analógicos y sus aplicaciones. Es normal que sea una asignatura que exige tiempo, concentración, uso de conocimientos y habilidades por parte de los estudiantes. Las aplicaciones implementadas físicamente de los controladores analógicos son siempre la mejor muestra que el docente puede usar para evidenciar el aprendizaje de los estudiantes sobre los conceptos dados en clase. Sin embargo la profundización en el manejo y uso de los componentes fundamentales como lo son los amplificadores operacionales no se refuerza, por parte del docente hacia los estudiantes, ignorando conceptos como la velocidad de respuesta, ancho de banda, y las diferencias entre topologías paralelo y serie y uso de diferentes amplificadores operacionales.

### **Formulación de la pregunta de estudio**

Si bien la planificación y el tiempo dado en el plan de estudios de la asignatura de sistemas de control 1 no permite introducir temáticas inherentes a los controladores analógicos con amplificadores operacionales surge la siguiente pregunta: **¿Cómo se podría abordar más temáticas sobre los controladores analógicos y el manejo de los amplificadores operacionales para que refuerce los conceptos en los estudiantes sin alterar el plan de estudios de la asignatura de Sistemas de Control I?**

### **Justificación**

En los últimos años en la Universidad Pedagógica Nacional han surgido materiales de apoyo en el área de sistemas de control con un enfoque, demostrativo, exponiendo las diversas aplicaciones en las que se pueden llegar a crear a partir de los conceptos base del área. Sin embargo, estando en una institución que se centra en el pensar del acto educativo, carece de trabajos y propuesta que se centren en potencializar la forma de enseñar y aprender las temáticas, por eso se desea diseñar y crear un material didáctico de apoyo que permita aumentar el entendimiento de fenómenos y conceptos de los sistemas de control que se pueden manejar a partir de los controladores analógicos con amplificadores operacionales dirigido principalmente a los estudiantes de la licenciatura en electrónica que estén asistiendo o vayan cursar la asignatura de sistemas de control 1.

## Objetivos

### 1.1.1 Objetivo general

Diseñar un material didáctico de apoyo que permita mostrar el manejo de los controladores analógicos con amplificadores operacionales dirigido a los estudiantes de la asignatura Sistemas de Control 1 del programa de Licenciatura en Electrónica de la Universidad Pedagógica Nacional.

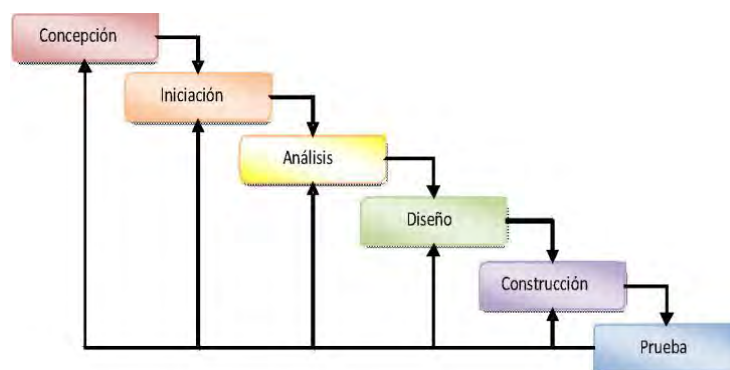
### 1.1.2 Objetivos específicos

- Mostrar algunas formas de implementación de controladores analógicos por medio de amplificadores operacionales.
- Mostrar el comportamiento de los controladores, modificando sus parámetros por medio de una tarjeta de adquisición de datos.
- Desarrollar una guía para la experimentación y el manejo los módulos de los controladores analógicos con amplificadores operacionales tomando como ejemplo el control de posición de un motor.

## Metodología

La metodología desarrollada fue por el modelo en cascada el cual es un proceso de desarrollo secuencial en el cual el progreso es visto como el flujo descendente de actividades tipo lineal a través de cada una sus fases. En cada una existe la posibilidad de retroalimentación entre la fase actual y las fases ya desarrolladas, véase en la figura 1.

Figura 1. Tipología de la metodología tipo cascada



Fuente: Elaborada por el autor.

Ahora se da una breve descripción de las acciones desarrolladas en cada etapa dentro de la metodología de cascada.

- *Concepción*: buscar y clasificar la información.
- *Iniciación*: establecer las bases temáticas según la información e ideas recolectadas.
- *Análisis*: estudiar la información obtenida y clarificación de la información.
- *Diseño*: idear esquemas y plantear los elementos específicos necesarios según el análisis de la información.
- *Construcción*: plasmar las ideas de diseño surgidas a la realidad.
- *Prueba*: implementación, análisis, verificación de resultados y conclusiones

## 1. MARCO TEORICO

En el siguiente marco se dan las temáticas que permitirán darle la orientación necesaria para el desarrollo del proyecto, en tres ejes principales que son material de educativo, Amplificadores Operacionales y Controladores Analógicos.

### 1.1 Material educativo

*“El maestro dedica gran parte de su tiempo a elaborar el material didáctico para explicar un tema en clase. Esto lo convierte en un artesano de los materiales”.*

*Marta Vargas.*

Un material educativo es una herramienta diseñada a partir de la reflexión del maestro para facilitar el aprendizaje del estudiante bajo su orientación, el decide que es lo que el estudiante debe comprender, a que ideas o conceptos debe afrontar y que competencias desea que el estudiante supere. El material diseñado no debe disminuir la intención del aprendizaje, por el contrario debe facilitar la construcción de los saberes que le permita al estudiante avanzar en su formación permitiéndole al docente reflexionar sobre el acto educativo.

En el enfoque de las metodologías cognitivas, el aprendizaje se concibe como un proceso para la construcción de saberes desde el contexto en que se establecen las relaciones conceptuales, luego se construyen los significados y se realimentan éstos con las experiencias anteriores, mientras *“la enseñanza es un proceso donde se confronta y se intercambiar significados entre los estudiantes, los docentes y los diferentes contextos”*<sup>26</sup>. Esto se puede interpreta gráficamente de la siguiente manera en la figura 2.

---

<sup>26</sup> VARGAS, Martha. Materiales Educativos: Procesos y resultados. Convenio Andrés Bello. 2003. p. 55-56

Figura 2. Proceso de construcción de saberes y conocimientos.



Fuente: Elaborada por el autor.

Los materiales educativos como permiten la confrontación de saberes, actúa, como un desequilibrador de conocimientos porque “Los materiales desencadenan procesos de aprendizaje que atiende los ritmos particulares de los estudiantes y proporcionan oportunidades para trabajo individual y grupal”<sup>27</sup>, con ellos se busca una retroalimentación continua, generando posibilidades más claras de transferencias de aprendizajes a la práctica educativa, no por eso quiere decir que al implementar el material educativo se obtendrá resultados inmediatos, por el contrario pueden empezar a aportar y cumplir ciertos propósitos, como aquellos que describe Vargas Avella cuando distingue la función de estos:

*Servir de apoyo al proceso de enseñanza del maestro desde el punto de vista de desarrollo de los contenidos y del proceso metodológico, recrear el aprendizaje del estudiante, incorporarse a el proceso de aprendizaje particular, estimular la curiosidad, el deseo de descubrir por sí mismo, formular hipótesis, elaborar preguntas comparar, expresar qué y cuanto saben sobre lo que observaron con ayuda del material, expresar como aprendieron aquello que el material contribuyó a desarrollar.*<sup>28</sup>

Se propone en este trabajo obtener el diseño de un material de apoyo para abordar los temas de control analógico que permita generar en los estudiantes un acercamiento a los contenidos del área de control. Al generar nuevos materiales brinda nuevas alternativas en el proceso de aprendizaje, pero esto lo determina por un lado el docente quien es el que legitima la validez de los procesos didácticos y el estudiante quien es el que determina y valora en si los procesos de aprendizaje.

<sup>27</sup>Ibíd., p. 149.

<sup>28</sup>Ibíd., p. 150.

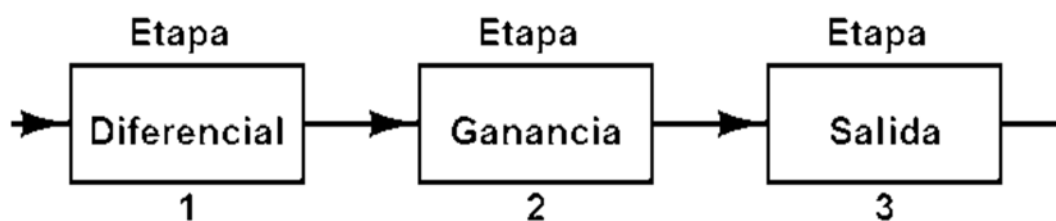
## 1.2 El amplificador operacional

A mediados del siglo XIX se empezó la creación y desarrollo de este circuito integrado a manos de destacadas empresas como Philbrick Associates de George Philbrick, Fairchild y National Semiconductor como pioneros en el desarrollo de los amplificadores operacionales. Su nombre es dado por su aplicación inicial que era para construir circuitos para realizar operaciones matemáticas, entre estas se destacan inicialmente la de sumar, restar, multiplicar y resolver ecuaciones diferenciales pero también ya se ha utilizado en múltiples aplicaciones electrónicas lo que lo convierte en un elemento multifuncional y fascinante.

Si bien es cierto el material educativo a diseñar se enfoca en temas de los sistemas de control analógico, también está directamente relacionado y toca el tema de los amplificadores operacionales, conocidos por su acrónimo y usado de aquí en adelante como "OP AMP", siglas establecidas internacionalmente que deben ser reconocidas y respetadas como lo comenta el profesor Gabriunas<sup>29</sup>. En el plan de estudios de la universidad pedagógica nacional estos dispositivos electrónicos son tratados con profundidad en asignaturas relacionadas con el diseño electrónico.

Este dispositivo activo que funciona con fuente DC, posee dos entradas: inversora (-) y no inversora (+), y una salida. En su interior posee múltiples etapas las cuales se resaltan en tres clases, en la figura 2 la primera sección es una etapa diferencial en donde se determina la diferencia entre sus entradas. La segunda etapa, es la que proporciona una alta ganancia y la del extremo final es la etapa que proporciona una impedancia baja de salida.

Figura 3. Etapas básicas de un OP AMP



Fuente: Elaborada por el autor

---

<sup>29</sup> GABRIUNAS, Vytautas. Amplificadores operacionales. En: Apuntes de Electrónica. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, 1999. p. 11.

### 1.2.1 Parámetros de los amplificadores operacionales

Los parámetros que contienen los OP AMP que se muestran en sus hojas técnicas, permiten caracterizar sus funciones, diferenciarlos y clasificarlos. Es común usarlos en aplicaciones como osciladores, comparadores, en circuitos de filtros o para el cambio de amplitudes de voltaje. Todas estas formas de uso se hacen teniendo en cuenta el valor de alimentación, la ganancia y otros parámetros. Algunos de estos se tendrá en cuenta por su naturaleza y serán relevantes en el desarrollo del proyecto, para un posterior análisis a partir de los módulos creados dentro del diseño del material de apoyo. A continuación se realiza un resumen de estos parámetros.

- *Corriente de polarización de entrada **ibias***: son pequeñas corrientes que se sitúan en la impedancia de entrada son necesarias para polarizar el amplificador diferencial. Se obtiene promediando las corrientes de sus entradas.

$$I_B = \frac{I_+ + I_-}{2}$$

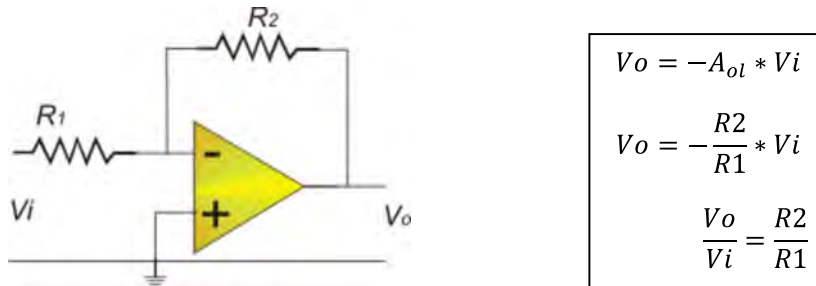
- *Corriente offset **Ios***: es la diferencia de las corrientes de entrada cuando la salida en 0.

$$I_{os} = I_- - I_+$$

- *Voltaje offset de entrada **Vos***: también conocido de desvío, es el voltaje aplicado en una de las entradas del OP AMP mientras que la otra este en tierra, y pueda existir un equilibrio interno ideal a 0v, que en la realidad se presenta a la salida valores de mV. Este voltaje puede ser corregido ya sea por los pines dispuestos en algunos OP- AMP ó mediante configuraciones externas. Este parámetro será tenido en cuenta en la etapa de desarrollo, de cada módulo desarrollado para el material educativo.
- *Ganancia de voltaje en lazo abierto **Gv** o **Av***: Es la cantidad que representa la razón de voltaje de salida al de entrada producida cuando el OP AMP está sin retroalimentación, teóricamente se dice idealmente que su valor es infinito, pero en la realidad puede llegar 200.000, esto supone una situación inestable, porque un voltaje pequeño de ruido en la entrada puede amplificarse hasta el punto de voltaje de saturación Vol.
- *Ganancia de voltaje en lazo cerrado **Aol***: Aun cuando no es mostrado específicamente en hojas de datos. Parte de una configuración externa que recibe el nombre de amplificador inversor el cual aplica la *Retroalimentación*

*Negativa*, donde su ganancia se determina por los valores de los componentes externos.

Figura 4. Configuración de retroalimentación negativa del OP AMP e interpretación matemática.



Fuente: Elaborada por el autor.

Dentro de esta configuración se manejan dos conceptos que influyen en el comportamiento de un OP AMP, el primero es el *corto circuito virtual* que es cuando la diferencia es nula entre la entrada inversora (-) y la no inversora (+). Y la segunda es la *tierra virtual*<sup>30</sup>, que a partir del corto virtual en forma similar, se presenta cuando la entrada no inversora (+) está puesta a tierra y produce que la el potencial de la entrada inversora (-) también sea nula.

- **Slew rate SR:** Es la propiedad que proporciona la velocidad de respuesta del amplificador, es la máxima variación del voltaje de salida Vo por unidad de tiempo. Su unidad es Voltios por unidad de tiempo:

$$\frac{V}{\mu S}, \text{ ó también } \frac{V}{mS}$$

“El amplificador será mejor cuanto mayor sea el valor SR”<sup>31</sup>, para ello se considera trabajar con aquellos OP AMP que tenga un valor significativo para poder obtener mejores resultados por ejemplo para aquellos que tenga un valor aproximado de 5V/ms se consideran lentos, pero para aquellos con un valor menor a 50V/μ se consideran rápidos.

- **Saturación:** Es el alcance del voltaje de salida a un nivel determinado a partir del cual la señal de salida llega a un 90% del voltaje de alimentación y no puede variar la amplitud.

<sup>30</sup> El término ‘VIRTUAL’ es un término usado para indicar algo que existe como propiedad intrínseca, pero sin efecto real.

<sup>31</sup> PERTENCE JUNIOR, Antonio. Realimentación negativa (RN). En: Amplificadores Operacionales Y Filtros Activos. McGraw-Hill. 1991. P. 23.

- *Rechazo de modo común (CMRR - Common Mode Rejection Ratio)*: Se llama rechazo de modo común<sup>32</sup> cuando a las señales indeseables (ruido), se desea que no aparezcan en la salida para distorsionar las señales deseadas. Estas señales deseadas aparecen cuando solo se aplican en una entrada la señal o en las dos pero con polarización opuesta. En un OP AMP real se genera una ganancia muy pequeña usualmente menor que 1 en comparación al ideal donde aquí su amplificador diferencial su ganancia daría 0. Se describe de la siguiente forma:

$$CMRR = \frac{A_d}{A_c} = \frac{\text{Ganancia diferencial}}{\text{Ganancia en modo comun}}$$

Se debe tener en cuenta que los parámetros anteriores pueden ser tratados experimentalmente en los módulos a diseñar, por eso se realiza una breve descripción de los parámetros más relevantes para que estos se tenga en cuenta al momento de trabajar con los controladores analógicos.

### 1.2.2 Retroalimentación

La retroalimentación es una configuración que dependiendo del modo en que se realice cambia el comportamiento de los OP AMP. El primer modo es cuando la salida  $V_o$  se conecta con la entrada no inversora ( $v_+$ ), logrando desestabilizar el circuito. Esta forma se llama *retroalimentación positiva*, y su aplicación sirve para realizar circuitos osciladores. El segundo modo es la más usada y es *retroalimentación negativa*, que contraria a la positiva, conecta la salida  $V_o$  a la entrada inversora ( $v_-$ ) proporcionando estabilidad y generando mayores beneficios, algunos de ellos son:

- Aplicaciones en configuraciones como sumador, diferenciador, filtros, etc.
- La retroalimentación negativa es utilizada para controlar variables físicas como la velocidad, la temperatura, la posición, la presión, la viscosidad y proximidad entre otras.
- La ganancia negativa “-” y el ancho de banda puede ser controladas por medio de elementos exteriores al OP AMP sin depender de sus parámetros de tolerancia y temperatura.

---

<sup>32</sup> El término ‘modo común’ se refiere que en las dos entradas de un amplificador diferencial se aplica una misma señal.

- *Impedancia de entrada* aumenta a partir de:

$$Z_i = R_i (1 + BA_{V_o})$$

Donde  $R_i$  y  $A_{V_o}$  son parámetros dados por el fabricante.

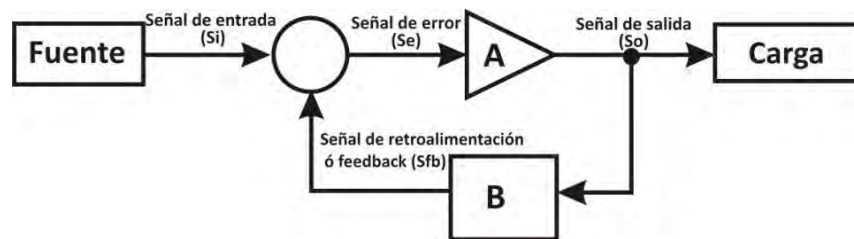
- *Impedancia de salida* disminuye a partir de

$$Z_o = \frac{R_o}{1 + BA_{V_o}}$$

Es válida también para la Retroalimentación Positiva.

En la figura 5 presenta el modelo grafico mostrado del sistema de retroalimentación y posteriormente viene el análisis matemático de como se concibe su comportamiento dándole validez a lo expuesto anteriormente.

Figura 5. Diagrama de retroalimentación o lazo cerrado



Fuente: Elaborada por el autor.

$$S_o = A * S_e$$

$$S_{fb} = S_o * B$$

$$S_e = S_i - S_{fb}$$

$$S_e = S_i - S_o * B$$

$$S_o = A * S_i - S_o * B$$

$$1 - B * A \quad S_o = A * S_i$$

$A \rightarrow$  Ganancia en lazo cerrado

$$A_f = \frac{S_o}{S_i} = \frac{A}{1 + B * A}$$

$$A_f = \frac{A}{1 + L};$$

$$L = \frac{S_{fb}}{S_e}; \quad L \rightarrow \text{ganancia de lazo}$$

### 1.2.3 *Respuesta de frecuencia Bw*

El proyecto no alcanzara en profundidad este tema sin embargo es de vital importancia nombrarlo para dar una vista amplia en los temas que tienen relación a los controladores analógicos que más adelante se trataran.

En los OP AMP reales a frecuencias bajas la ganancia no se altera, todo lo contrario si son altas, acá la ganancia disminuye. Esto establece que su mejor condición de trabajo es con un rango de frecuencias de cero hasta una frecuencia de corte a aproximadamente 10Hz. Los parámetros que traen las hojas de datos son ancho de banda máximo (Bandwidth) y la Ganancia por ancho de banda *GBP* (Gain-bandwidth product).

### 1.2.4 *Ruido*

Señales eléctricas indeseables que pueden aparecer en los terminales de cualquier dispositivo electrónicos como los motores eléctricos. Para disminuir sus efectos de los ruidos en los circuitos electrónicos concite en ponerlos a tierra de forma efectiva, ósea a conexión a la tierra real.

### 1.2.5 *Encapsulado*

Los fabricantes de los circuitos integrados realizan diferentes OP AMPs en silicio donde varía dependiendo de su finalidad. Los más utilizados comúnmente los de caja metálica y los doble línea DIP de 14 y 8 patas que vienen en cajas de plástico o cerámica. Más adelante en la parte del desarrollo se tendrá en cuenta para definir sobre qué tipo de amplificadores se va profundizar.

## **1.3 Controladores y configuraciones de los OP AMP en sistemas de control**

Los controladores son un conjunto de configuraciones que permiten cambiar el comportamiento natural de un sistema, que cumpla las especificaciones de diseño en cada una de sus etapas. Cada controlador analiza la señal de error y determina la salida necesaria para corregir la inestabilidad. Se realizara a continuación una descripción de los tres controladores manejados típicamente y se dará su configuración análoga mediante los OP AMP. Pero antes de ello una definición de planta y de las perturbaciones

### 1.3.1 Planta

Es un sistema compuesto por uno o más elementos físicos interconectados que posee un comportamiento característico que es objeto de análisis que busca la modificación de estos mediante una acción de control.

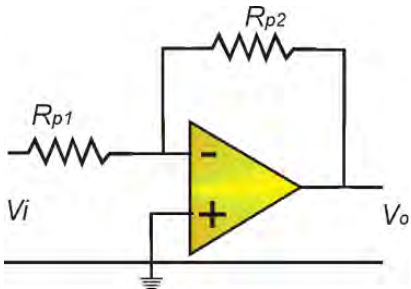
### 1.3.2 Perturbaciones

Son señales que pueden ser externas o internas al sistema afectando la estabilidad y el valor de la salida de este. Es considerado como una entrada.

### 1.3.3 Controlador proporcional

Acción por la cual la salida del controlador es proporcional al error  $e(t)$ . El factor  $K_p$  es la constante de error. En la configuración con OP AMP también denominada Amplificador inversor, esta usa la retroalimentación negativa mediante la resistencia de referencia  $R_{p2}$ . A continuación se presenta un cuadro con los conceptos a tener en cuenta.

Tabla 1. Configuración y ecuaciones de Controlador Proporcional

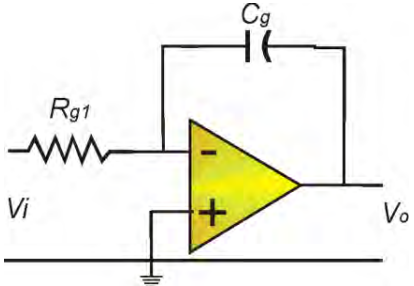
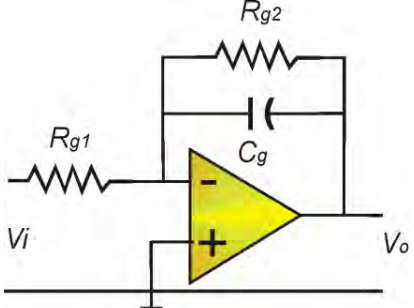
Ecuaciones relevantes	Configuración con OP AMP
$u t = K_p * e t$ $K_p = \frac{V_o}{V_i} = - \frac{R_{p2}}{R_{p1}}$	<p data-bbox="884 1211 1433 1267">Figura 6. Configuración Controlador P con OP AMP.</p>  <p data-bbox="1011 1554 1308 1576">Fuente: Elaborada por el autor.</p>

### 1.3.4 Controlador integral (Int)

Es cuando la salida de un controlador es proporcional a la integral de los errores acumulados. En la configuración práctica con OP AMP se le agrega paralelamente al condensador la resistencia  $R_{g2}$ . A continuación se presenta la tabla 2, la forma

básica (teórica) y la forma práctica de la configuración del controlador Integral con sus respectivas ecuaciones.

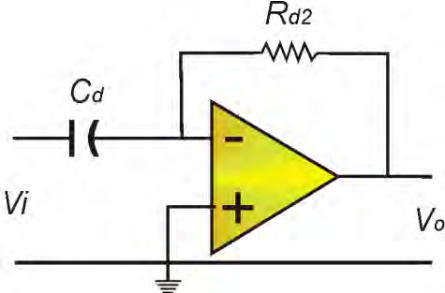
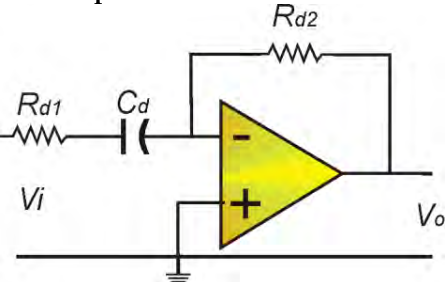
Tabla 2. Configuración y ecuaciones de controlador Integral.

Ecuaciones relevantes	Configuración con OP AMP
$u(t) = K_i \int e(t) dt$ $U(s) = \frac{K_i}{s} * E(s)$	<p>Figura 7. Configuración Controlador Int básico con OP AMP.</p>  <p>Fuente: Elaborada por el autor.</p>
$\frac{V_o}{V_i} = \frac{K_i}{s} = \frac{K_p}{T_i s}$ <p>Donde <math>T_i</math> es el tiempo de integración el cual es ajustable</p>	<p>Figura 8. Configuración Controlador Int practico con OP AMP</p>  <p>Fuente: Elaborada por el autor.</p>
$\frac{K_i}{s} = - \frac{R_{g2}}{R_{g1}} * \frac{1}{C_g s \cdot R_{g2} + 1}$ <p>Donde <math>R_{g2} &gt; R_{g1}</math></p>	

### 1.3.5 Controlador derivativo

Es cuando la salida de un controlador es proporcional a la derivada del error  $e(t)$ , en la configuración práctica con OP AMP se le agrega en serie al condensador  $C_d$  la resistencia  $R_{d1}$ . A continuación se presenta en la tabla 3 el controlador derivativo de forma básica (teórica) y la forma práctica con sus respectivas ecuaciones.

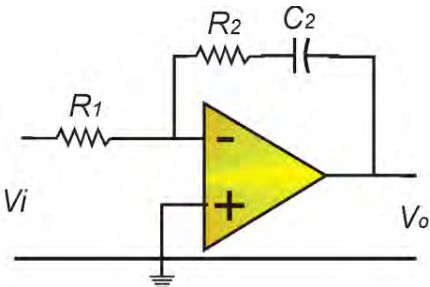
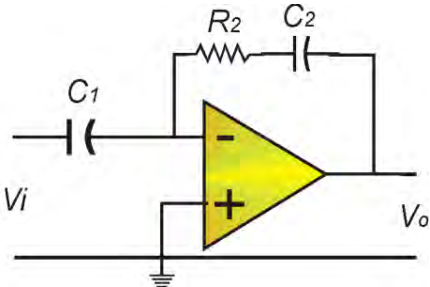
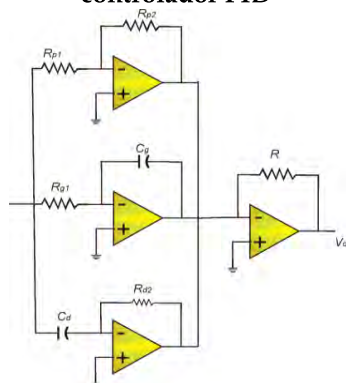
Tabla 3. Configuración y ecuaciones del controlador Derivativo

Ecuaciones relevantes	Configuración con OP AMP
$u t = K_d * \frac{de t}{dt}$ $U s = K_d S * E(s)$	<p>Figura 9. Configuración Controlador D básico con OP AMP</p>  <p>Fuente: Elaborada por el autor.</p>
$\frac{V_o}{V_i} = K_d S = K_p \cdot T_d S$ <p>Donde Td es el tiempo de derivación el cual es ajustable</p>	
$K_d S = - \frac{R_{d1} \cdot C_d S}{R_{d2} \cdot C_d S + 1}$ <p>Donde <math>R_{d2} \gg R_{d1}</math></p>	<p>Figura 10. Configuración Controlador D practico con OP AMP</p>  <p>Fuente: Elaborada por el autor.</p>

### 1.3.6 Combinación de controladores

Visto los controladores analógicos individualmente de forma resumida se quiere hacer claridad que el objetivo es que al realizar la implementación en cada uno de los controladores mediante el material didáctico diseñado, logre aplicar diferentes tipologías y diferentes combinaciones de los controladores analógicos como PI, PD y PID partiendo desde los más básico a lo más complejo permitiendo al usuario analizar, diferenciar y comprobar los fenómenos involucrados en cada practica propuesta en clase de sistemas de control 1. Véase la tabla 4 en el cual se muestra las configuraciones y ecuaciones a tener en cuenta al manejarse en cada combinación.

Tabla 4. Combinación de controladores

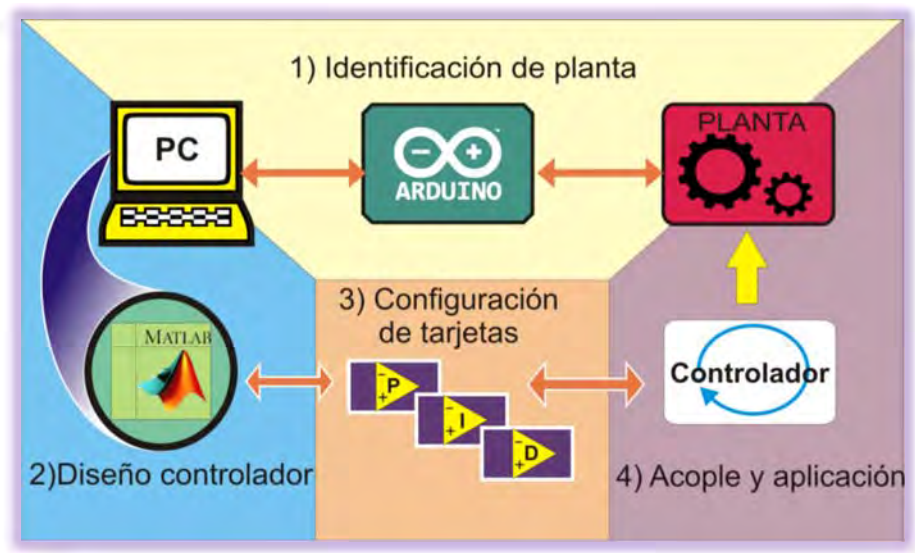
Combinación	Ecuaciones	Configuración con OP AMP
<p style="text-align: center;">PI</p>	$U s = K_p \cdot E(s) + \frac{K_p}{T_i s}$ $G_{pi} = \frac{-K s - z}{s}$ $K = \frac{R_2}{R_1} ; z = \frac{1}{R_2 C_2}$	<p style="text-align: center;"><b>Figura 11. Configuración Controlador PI</b></p>  <p style="text-align: center;">Fuente: Elaborada por el autor.</p>
<p style="text-align: center;">PD</p>	$U s = K_p \cdot E s + K_p \cdot T_d s \cdot E s$ $G_{pd} = \frac{-K s - z}{s}$ $K = R_2 C_1; z = \frac{1}{R_2 C_2}$	<p style="text-align: center;"><b>Figura 12. Configuración controlador PD</b></p>  <p style="text-align: center;">Fuente: Elaborada por el autor.</p>
<p style="text-align: center;">PID</p>	$U s = K_p \cdot E s + \frac{K_p}{T_i s} E s + K_p \cdot T_d s \cdot E s$ $G_{pid} = - \frac{R_2}{R_1} + \frac{1}{R_1 C_2 s} + R_2 C_1 s$	<p style="text-align: center;"><b>Figura 13. Configuración controlador PID</b></p>  <p style="text-align: center;">Fuente: Elaborada por el autor.</p>

## 2. DISEÑO Y CONSTRUCCION

### 2.1 Diagrama de proceso

El diseño del material de apoyo establece cuatro etapas en las cuales cada una aporta una función, en ellas se basan dispositivos (hardware) y programación (software) que serán clarificados y desarrollados en este capítulo.

Figura 14. Diagrama de proceso del material de apoyo.



Fuente: Elaborada por el autor.

### 2.2 Tarjeta arduino

Arduino es un proyecto que permite crear prototipos electrónicos, para lo cual presenta un hardware con entradas y salidas y un microprocesador ATmega, que es el centro de control, que permite interactuar con casi todos los fenómenos físicos exteriores por medio de sensores, y dar respuesta a estas percepciones mediante diversos actuadores. Esta tarjeta está basada en lenguaje de programación Writing<sup>33</sup> y en el entorno de programación Processing<sup>34</sup>.

<sup>33</sup> Wiring es un proyecto de código abierto iniciado por el colombiano Hernando Barragan en Instituto de diseño e interacción Ivrea. Tomado de <http://wiring.org.co>

<sup>34</sup> Processing es un entorno de desarrollo integrado de programación basado en Java. Tomado de: <http://processing.org>

Para este proyecto se ha elegido la tarjeta Arduino MEGA 2560, en la siguiente figura 15 se muestran sus principales características:

Figura 15. Tarjeta Arduino ATmega 2560.



Fuente: <http://netram.co.za/1010-arduino-mega-2560-r3.html>

**CARACTERISTICAS ARDUINO MEGA 2526**

**Microcontrolador:** ATmega 2560

**Voltaje de operación:** 5V

**Voltaje de entrada (recomendada):** 7-12V

**Voltaje de entrada (límite):** 6-20V

**Pines E/S Digitales:** 54 (de los cuales 15 permiten pwm)

**Pines de Estrada Analógica:** 16

**Corriente DC en E/S de Pines:** 40 mA

**Corriente DC para pin 3.3V:** 50 mA

**Memoria Flash:** 256 KB

**SRAM :** 8KB

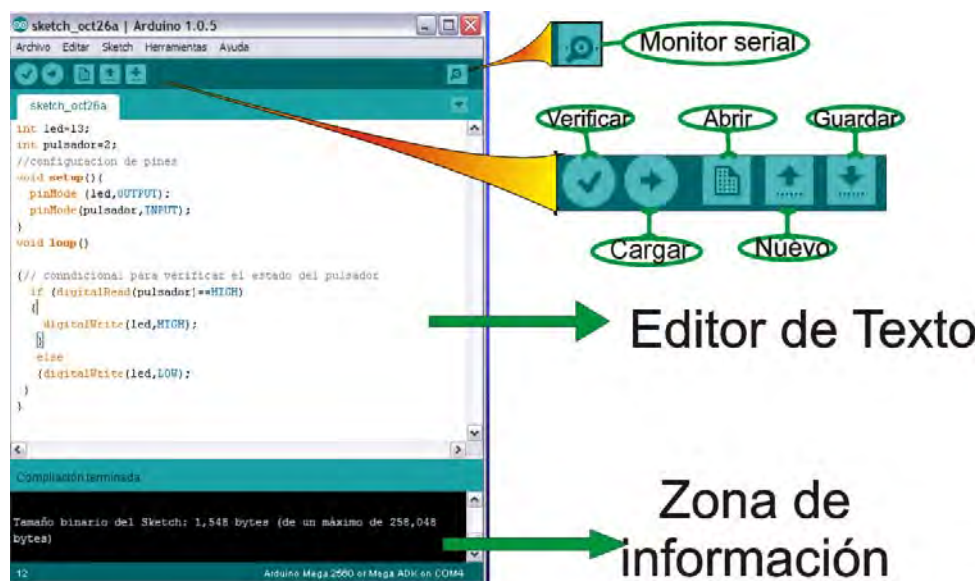
**EEPROM:** 4 KB

**Velocidad de reloj:** 16MHz

### 2.2.1 Interfaz arduino

El programa Arduino 1.0.5, tiene una interfaz de programación mostrada en la figura 16, trae en su barra de herramientas botones que permiten verificar la programación, carga los archivos a la tarjeta, abre, crea y guarda programas, y puede también visualizar los datos leídos o enviados en el puerto serial mediante el botón de monitor serial. Contiene un editor de texto en el cual se realiza la programación bajo su propio lenguaje y el tipo de archivo que genera se denomina "sketch". Por último en la parte inferior se muestra una zona que informa sobre el estado del puerto serial, si hay errores en la sintaxis cuáles son sus posibles causas e indica si se cargó el programa en la tarjeta.

Figura 16. Ventana de un Sketch para Arduino



Fuente: Elaborada por el autor.

## 2.3 Adquisición de datos

Si bien el proceso de identificar una planta se hace habitualmente con dispositivos de uso común en el ámbito electrónico como el manejo de pics o de tarjetas DAQ como la 6008 de National Instruments, para este proyecto se ha cambiado, se ha querido implementar el uso de la tarjeta arduino, su precio asequible y su facilidad en su manejo y de implementación permite que sea una buena opción para programar y aplicar. Además ya ha sido implementada en algunos trabajos de grado de la universidad pedagógica nacional enfocados a los controladores y también en proyectos enfocados a la electrónica en general.

Para un sistema de adquisición de datos que incluya el uso de la tarjeta Arduino ya ha sido implementado informalmente con desarrollos diferentes, no se ha establecido un proceso como tal, que indique la mejor manera de ejecutar dicho proceso. Para ello en este proyecto se ha diseñado un sistema que involucra el uso de esta tarjeta mediante un entorno interactivo creado en GUIDE de Matlab.

Para hacer real este primer paso se visualiza dos puntos, el primero es establecer un Sketch que permita en la tarjeta Arduino pueda recibir los datos de la señal analógica y enviarlos al computador. El segundo punto es crear un entorno grafico interactivo en Matlab en donde el usuario pueda recibir, obtener y visualizar los datos.

### 2.3.1 Sketch para la tarjeta arduino: MATLAB\_ARDUINO\_DAQ

Para el Sketch se estableció dos estradas (A0 y A1) para recibir los datos mediante el puerto Analógico, los cuales a su vez deben ser enviados por el puerto serial al computador. Para ello se establece la velocidad de transmisión de 9600 Baudios. El nombre dado al sketch es Matlab\_Arduino\_DAQ y su código es el siguiente:

```
//*****PROGRAMA MATLAB_ARDUINO_DAQ *****  
  
//Definición de variables que guardaran los datos de entrada  
  
int out1 = 0; //Se inician variables vacios  
  
int out2 = 0;  
  
// Se inicia procesos configuración inicial  
  
void setup() {  
  
  // Puerto serial activado  
  
  // Velocidad de transmisión de datos en (bits/segundo). Para la transmisión de  
  // Datos en serie se puede especificar velocidades de 300 1200, 2400, 4800,  
  // 9600, 14400, 19200, 28800, 38400, 57600 ó 115200  
  
  Serial.begin (9600) ;}  
  
  // Ciclo infinito de procesos  
  
void loop() {  
  
  // Leer pines A0 y A1  
  
  out1 = analogRead(A0);  
  
  out2 = analogRead(A1);  
  
  // Envía a monitor los datos  
  
  Serial.print(out1);  
  
  Serial.print(",");  
  
  Serial.println(out2);  
  
  delay(20); } // Se espera un tiempo ms, el tiempo puede variarse.
```

El anterior código se copia mediante el botón verificar y se carga a la tarjeta Arduino. Las características de este código es, la asignación de dos entradas A0 y A1, los cuales son en pines de señal analógica que permiten una resolución de 10 bits, quiere decir que son 1024 datos diferentes que deben obtener y pasar por una conversión que identifique los valores equivalentes en unidades de Voltios. Y otra es la velocidad de transmisión de datos al que fue asignado, su valor es de 9200 Baudios.

## 2.4 Software de entorno grafico interactivo: DAQ\_UPN\_ARD

Para el segundo punto, el cual era crear un entorno para el usuario donde pudiera recibir los datos de la tarjeta Arduino, comenzó inicialmente a desarrollarse por medio del software FLASH por ser un programa especial para realizar entornos interactivos sin embargo, su complejidad en su manejo y el desconocimiento de varios procesos hizo que se desistiera. Se decidió usar entonces GUIDE que es el entorno de programación que dispone el software Matlab.

Se diseña la interfaz grafica DAQ\_UPN\_ARDUINO en GUIDE, acá el usuario configura el puerto serial donde esta asignada la tarjeta arduino, el número de datos que desea obtener y la frecuencia de muestreo. Después de obtener los datos se grafican y automáticamente se enviaban al workspace de Matlab y aquí se trabajaba con los toolbox habituales para los sistemas de control como lo es System identification y Sisotool. El código se ha basado en otros que ya han sido usados para este propósito mediante la utilización de la tarjeta DAQ 6008, de pics y tarjetas Arduino, pero se deja claro que es un código autentico diseñado y generado propiamente para este proyecto.

Después de superar la etapa de diseño en la que se elaboro la programación en Matlab y el entorno con GUIDE, se genero su ejecutable, sin embargo culminado este paso al probarlo presentó un inconveniente. Al empezar su ejecución, se analizo el comportamiento del código del programa DAQ\_UPN\_ARDUINO el cual actuaba según lo inicialmente establecido, pero al momento de enviar los datos a workspace de Matlab producía un error el cual nunca fue evidenciado en la etapa de diseño.

El problema radicaba específicamente en el último paso de la adquisición que era el envió de datos del ejecutable a Matlab, se intento hallar las rutinas de programación necesarias para efectuarlo pero no se obtuvo los resultados esperados. Entonces se opto por una opción válida y practica la cual consiste en que el programa a partir de los datos obtenidos genere un archivo tipo *.mat*<sup>35</sup>

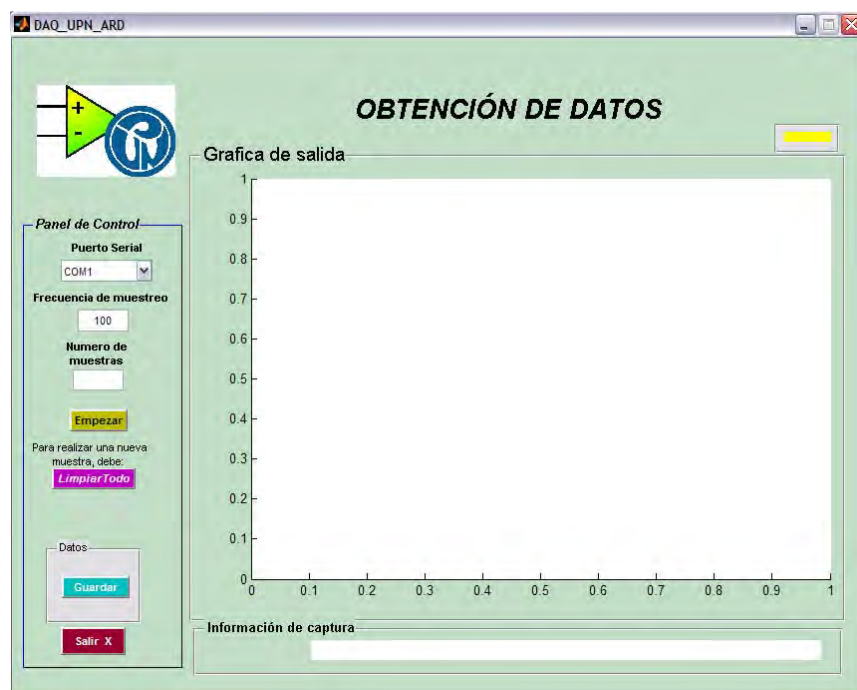
---

<sup>35</sup> Matlab genera los archivos *.mat* en los cuales guarda varias variables de diferentes tipos como vectores y matrices.

mediante la acción de guardar y así posteriormente importarlo al workspace de Matlab, y de este modo se contrarresta este inconveniente.

Culminado el sistema de adquisición de datos de este proyecto se muestra a continuación en la figura 16 la interfaz del programa DAQ\_UPN\_ARDUINO seguidamente de su código, en el cual se omiten algunas líneas de programación que no tienen relevancia.

Figura 17. Interfaz DAQ\_UPN\_ARDUINO



Fuente: Elaborada por el autor.

#### 2.4.1 Código DAQ\_UPN\_ARDUINO

```
%Configuración del puerto serial
delete(instrfind({'Port'},{handles.PUERTO}));
cs=serial(handles.PUERTO);%Asignación del puerto a la variable
set(cs,'BaudRate',9600);%Velocidad de muestreo en baudios
set(cs,'DataBits',8);%Numero de bits a transmitir:8bits
set(cs,'Parity','none');%tipo de paridad: Ninguna
set(cs,'Terminator','CR/LF');%Carácter de finalización de envío de datos
```

```

set(cs,'StopBits',1);% numero de Bit usado pada la parada:1
set(cs,'FlowControl','none');
set(cs,'Timeout',10); %Tiempo de espera 10 seg
warning('off','MATLAB:serial:fscanf:unsuccessfulRead');

Fs=str2double(get(handles.DATO_F,'String'));
Tm=1/Fs;
numero_datos=str2double(get(handles.DATO_T,'String'));% Datos recibidos de
interfaz
fopen(cs) %abre el puerto configurado.

a=tic;%iniciando tiempo del proceso
for i=1:numero_datos
    p=fscanf(cs,'%d,%d');% Valores en matriz transpuesta
    m(i)=p(1)*5/1024; %Señal de entrada A0
    n(i)=p(2)*5/1024; %Señal de salida A1
end
T_Proceso=toc(a);% la variable guarda el tiempo en segundos

% Terminación
L=size(n);%tamaño del vector filas columnas
L=L(1,1);%Asignación de solo columnas como el valor de interés
tfinal=L*Tm; %tiempo total de adquisición
tiempo=[0:Tm:tfinal-Tm];% Vector que va de 0 hasta tfinal-Tm donde tm es el
tiempo de muestreo
fclose(cs);% cierra el puerto
delete(cs);% borra la configuración del puerto
clear cs;
m=m'; %entrada de la señal a la planta A0 "línea de color AZUL"
n=n'; %Salida de la planta A1 "línea de color ROJO"
Promedio=numero_datos/T_Proceso;% Datos estadísticos
set(handles.Salida1,'String',['Tiempo estimado: ',num2str(T_Proceso),' s capturando
a ',num2str(Promedio),' cap/s '])
set(handles.Av1,'BackgroundColor',[0 1 0]);

%Impresión
axes(handles.grafica)
plot(tiempo,m,'b',tiempo,n,'r','LineWidth',1.5)
xlabel('Tiempo(s)')
ylabel('Voltaje (V)')
title('Grafica de salida')

```

```

grid on
handles.Tm=Tm;
handles.m=m;
handles.n=n;
guidata(hObject,handles);

function Guardar_Callback(hObject, eventdata, handles)
%las variable estructurada A guarda los valores obtenidos
A.Tm=handles.Tm;
A.m=handles.m;
A.n=handles.n;
[file,path] = uiputfile(*.mat','Guardar como')
save(fullfile(path,file),'-struct','A');% -struct es el modo de guardar
msgbox('Datos Guardados !exitosamente!','MENSAJE');
guidata(hObject, handles);

% --- Executes on selection change in sel.
function sel_Callback(hObject, eventdata, handles)
fun =get(handles.sel,'Value');
switch fun
case 1
handles.PUERTO='COM1';
case 2
handles.PUERTO='COM2';
case 3
handles.PUERTO='COM3';
case 4
handles.PUERTO='COM4';
end

```

## 2.5 Diseño de controladores

Continuando el proceso, después que el usuario finalice la primera parte donde adquiere los datos de la planta, ahora pasa la segunda etapa que trata diseñar los controladores según sea su aplicación. Generalmente en Matlab ya hay programas (conocidos como toolbox), que permiten dar trato a estos datos, por eso no será necesario crear otro programa, que cumpla este mismo propósito, además en clase magistral se da inducción a estos programas y el estudiante igual debe profundizar en su manejo para sacar un mayor provecho.

### 2.5.1 SYSTEM IDENTIFICATION *ident*

Es un programa con una interfaz que permite primordialmente construir sistemas dinámicos para identificar plantas lineales y no lineales a partir de datos de entrada y salida del sistema en el dominio del tiempo, los cuales son los mismos dados en la primera etapa del proceso. Al ser usado permitirá identificar matemáticamente el comportamiento de un sistema a partir del cálculo de su función de transferencia.

### 2.5.2 SISOTOOL (*siso*)

Es uno de los programas más completos que incluye Matlab, tiene una interfaz para el análisis y diseño de los sistemas en control de una entrada y una salida (Single Input, Single Output), y es por medio de este que se puede diseñar los controladores a partir de distintos métodos. Sus características principales son:

- Selección de distintas estructuras de control.
- Obtención de lugar de las raíces.
- Generación de respuestas al escalón o al impulso.
- Visualización de las señales que intervienen en el sistema.
- Ajuste gráfico de polo, ceros y del factor de ganancia.
- Obtención de diagramas de bode, de Nysquist y de Nichols.
- Generación automática del diagrama de bloques para desarrollar en Simulink.
- Conversión de un sistema continuo a discreto y viceversa.

El usuario que no tenga manejo sobre algunos de estos programa podrá guiarse del manual GUIA\_TES el cual esta anexo al documento, allí se indica los pasos que debe tener en cuenta para obtener la identificación del sistema.

## 2.6 Diseño de módulos

Después de describir la etapa uno y dos que consistían en el diseño de código e interfaz de usuario para comenzar a dar forma a este material de apoyo, se debe pasar a la etapa tres que trata sobre la configuración de cada controlador de forma física. Para ello se propone realizar una plataforma de acople, que contenga los diferentes componentes necesarios involucrados en el proceso de una acción de control analógico como el sumador inversor, sumador-restador y los controladores

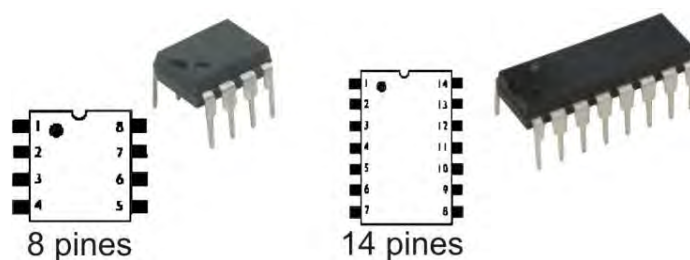
proporcional integral y derivativo (PID), donde se pueda experimentar de una forma individual y en otra forma colectiva los comportamientos de cada uno de estos. Este tipo de diseño se inspira en los materiales didácticos<sup>36</sup> educativos que se han desarrollado en el campo de la electrónica.

### 2.6.1 Módulos

Cada controlador analógico (Proporcional, Integral y Derivativo) tiene un arreglo característico que debe ser ajustado para el uso del OP AMP, para que su función y su respuesta de salida sea acorde a su finalidad. Por eso se debe tener en cuenta que hay una gran variedad de referencias en donde cada circuito integrado (CI) tiene propiedades y configuraciones distintas. La proyección ideal sería que el material de apoyo trabajara con todas las referencias de OP AMP existentes pero debe limitarse y elegirse algunos que cumplan con las exigencias establecidas y para ello se muestran a continuación los puntos tenidos en cuenta para realizar dicha elección.

Estos CI vienen encapsulados en forma DIP (doble línea) en los cuales pueden tener de 1 hasta 4 OP AMP incorporados internamente dependiendo del número de pines (8 a 14). El tamaño y su configuración interna permite observar en ellos ciertas similitudes como la posición de los pines de salida ( $V_o$ ) y los pines de entrada (inversora “-” y no inversora “+”), también diferencias como el sistema de offset en donde en algunos está incorporado mediante pines especiales para este propósito como es en el caso del LM 741.

Figura 18. Encapsulados de OP AMP de 8 y 14 pines

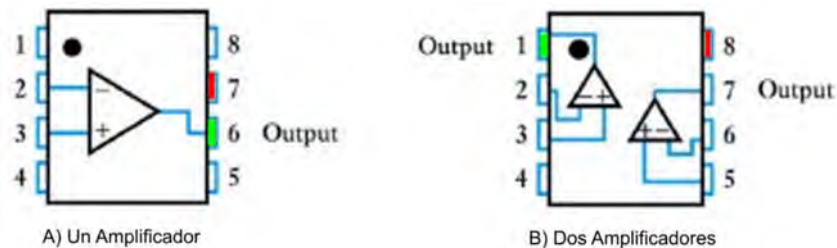


Fuente: <http://www.tiendaelectronica.com.ve/533-hcf4017.html>

<sup>36</sup> La empresa estadounidense de juguetes didácticos Elenco Electronics, produce kits de electrónica básica para experimentación “Snap Circuits”, están constituidos de varios componentes y guías de armado que permiten realizar diversos circuitos electrónicos. Tomado de: <http://www.elenco.com>

Haciendo un análisis sobre en el tema de los encapsulados, se determina continuar únicamente con circuitos integrados de solo 8 pines, una razón es porque se busca tener un OP AMP por cada controlador en su respectivo módulo, en cambio si se utiliza un chip de 14 pines como por ejemplo el LM 324 se estaría desaprovechando el uso de los otros tres OP AMPs que contiene el CI. Por otro lado en los encapsulados de 8 pines puede haber hasta máximo dos OP AMP, en la figura 19 se identifican los de una sola unidad (A) y los que tienen dos unidades (B), se puede observar en ellos que tienen una configuración similar, solo se tiene dos diferencias: el pin positivo de alimentación, en A es el pin 7 y en B es el pin 8, y la otra diferencia es que el pin de salida en A es el pin 6, y en B al tener dos OP AMP son los pines 1 y 7 pero solo se usara el uno o sea el primero.

Figura 19. Configuración de encapsulados de 8 pines.



Fuente: Elaborada por el autor.

En la anterior imagen nos damos cuenta que estas dos configuraciones pueden ser usadas en los módulos sin inconvenientes al implementar en el diseño de los módulos un sistema de selección donde el usuario elija el encapsulado al cual pertenece el amplificador a usar, teniendo en cuenta que la única condición es que CI sea de 8 pines.

### 2.6.2 Switch de selección de encapsulado

Incorporando un switch (conmutador a pulsador) con enclavamiento de dos posiciones a doble canal, se logra con una acción sencilla al oprimir, el cambio de la salida del pin 6 al pin 1 y del pin 7 al pin 8, permitiendo el cambio de encapsulado generando una ventaja para aceptar varias clases de referencias de OP AMP que contenga alguno de estos dos encapsulados. Para tener una muestra valida en cada módulo se elegirán únicamente cuatro referencias que tenga un porcentaje de Slew Rate significativo, entre ellos está el LM 741, el TL 082, LF 356 y el LM 358.

Figura 20. Switch de selección de encapsulado.



Fuente: <http://www.electronicaembajadores.com>

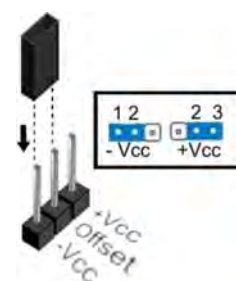
### 2.6.3 Configuración offset

Continuando, otro punto que hay que tener en cuenta es que los amplificadores tienen sistemas y/o configuraciones que permiten disminuir el voltaje offset de salida ya bien sea por el uso de los pines diseñados para este propósito o mediante la resistencia de ecualización<sup>37</sup>, sea cualquiera de los dos sistemas serán incluidos en cada uno de los módulos con el fin de que el usuario tenga la posibilidad de realizar experimentos y poder visualizar los cambios de voltaje offset en la salida si se requiere. Al incluir esta opción, se brinda la opción para el análisis y estudio de esta propiedad en los OP AMP dadas en otras asignaturas de profundización como lo es Diseño electrónico III<sup>38</sup>.

Si el usuario va a modificar el voltaje offset mediante el uso del potenciómetro mediante los pines 1 y 5 para aquellos OP AMP que tienen los pines habilitados para este propósito, para ello se debe tener en cuenta hacia qué polaridad de la fuente de alimentación deben ser orientada, por ejemplo en el LM 741va V+ y en el LF 356 es hacia V-, según muestra sus hojas de datos en la figura 22.

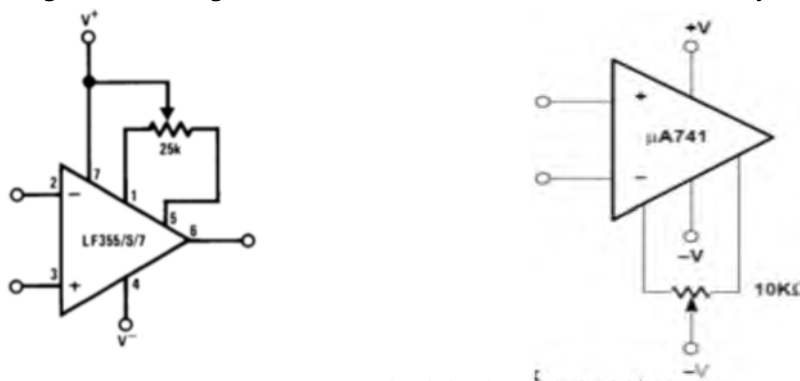
Para definir la polaridad de la fuente se implementa un dispositivo de selección basado en el jumper (JP1) y este automáticamente configura la base para posicionar el potenciómetro como muestra la figura 21.

Figura 21. Jumper JP1



Fuente: Elaborada por el autor.

Figura 22. Configuraciones recomendadas del offset de LF 356 y LM 741.



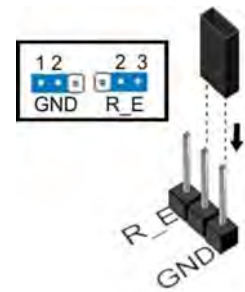
Fuente: tomados de los datasheet respectivos

<sup>37</sup> La resistencia de ecualización se usa para disminuir la tensión offset  $V_{os}$  producida por la diferencia de sus entradas  $V^-$  y  $V^+$ , esta se sitúa entre la entrada no inversora y tierra para equilibrar el error interno del OP AMP.

<sup>38</sup> En el Anexo E, la asignatura Diseño Electrónico III está incluida en el plan de estudios del currículo de la Licenciatura en Electrónica de la Universidad Pedagógica Nacional.

Ahora, si el amplificador a usar no tiene pines para modificar el voltaje offset entonces se implementa de forma externa la resistencia de ecualización ( $R_E$ ) la cual está conectada entre la entrada no inversora y tierra, resaltada en la figura 24. En caso que el usuario desee implementarla debe recordar que el valor de esta resistencia puede variar, en la tabla 5 se muestra el valor que toma  $R_E$  según el modo en que se vaya a usar. Para activar y manipular esta opción de offset, también será implementado un dispositivo de selección con jumper (JP2) para el potenciómetro ( $R_E$ ) como se ve en la figura 23.

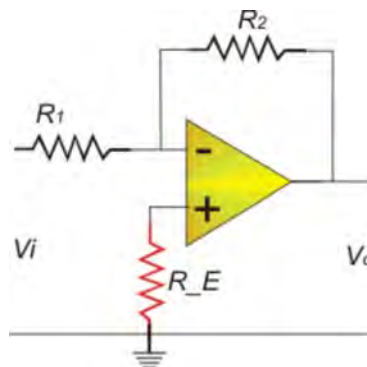
Figura 23. Jumper JP2



Fuente: Elaborada por el autor.

Sea la opción elegida, se debe recordar que en ninguno se podrá anular por completo la tensión offset de salida, pero debe permitir disminuirla considerablemente.

Figura 24. Resistencia de Ecuación.



Fuente: Elaborada por el autor.

Tabla 5. Resistencia de Ecuación

Configuración	Valor de $R_E$
- Controlador Proporcional. - Controlador Integral	$R_E = R_f \parallel R_1 = \frac{R_f * R_1}{R_f + R_1}$
Controlador Derivativo	$R_E = R_f$
Sumador inversor	$R_E = R_f \parallel R_1 \parallel R_2 \parallel R_3$

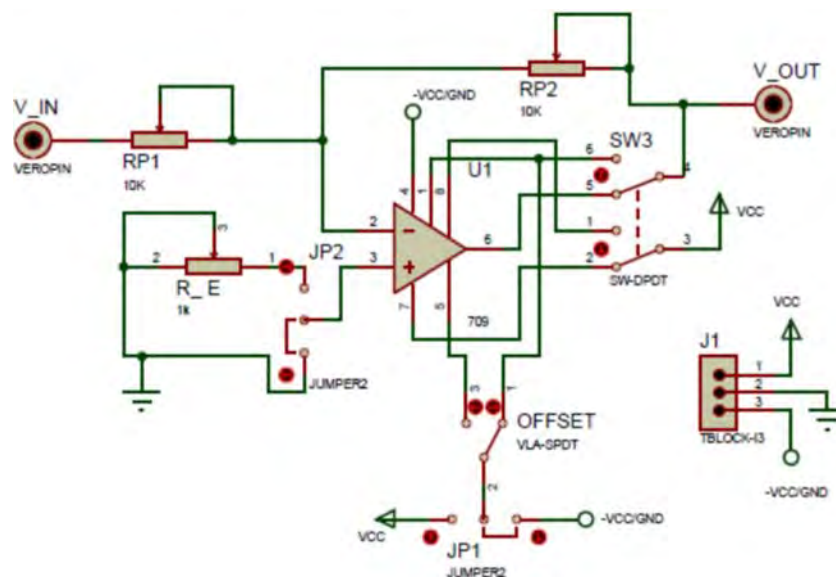
## 2.7 Construcción y configuración

A continuación se explicara la elaboración de los circuitos que conforman cada uno de los módulos, que fueron diseñados en el software Proteus por su entorno y aplicación al sistema CAD<sup>39</sup> para la realización de los PCB<sup>40</sup>, en sus programas Isis y Ares. Posteriormente se indicara el proceso de elaboración para las báquelas en los módulos.

### 2.7.1 Módulo controlador proporcional: P

Este módulo parte desde la configuración del circuito del amplificador inversor que este caso será el controlador P donde se identifica la resistencia de entrada (RP1) y la de referencia de referencia (RP2) las cuales determinan la ganancia en el voltaje de salida (V\_OUT). Hay que recordar que estos módulos incluyen el switch de selección de encapsulado, los jumper para el voltaje de salida offset y las bases de los potenciómetros R\_E y OFFSET. Al realizar el diseño de la PCB en Ares, no había plantillas del switch de selección de encapsulado, y para ello se tuvo que crear la plantilla para que permitiera publicar el diseño en todos los módulos.

Figura 25. Circuito del controlador proporcional P



#### CARACTERÍSTICAS

**Pines de Entada:** 5

**Pines de salida:** 5

**Voltaje de Operación  
valido:**

De

(Máx.) -12V a 12V

hasta

(Mín.) 0V a 5V

**Voltaje de Entrada:**

-12 a 12 v

**Voltaje de Salida:**

-11V a 11V

**Sistemas de Voltaje**

**Offset:** 2

<sup>39</sup> Las Siglas CAD es referido a *Computer-Aided Design* o diseño asistido por computadora

<sup>40</sup> Las Siglas PCB es referido a *Printed Circuit Board* o tarjeta de circuito impreso

Figura 26. Diseño del PCB del módulo del controlador P

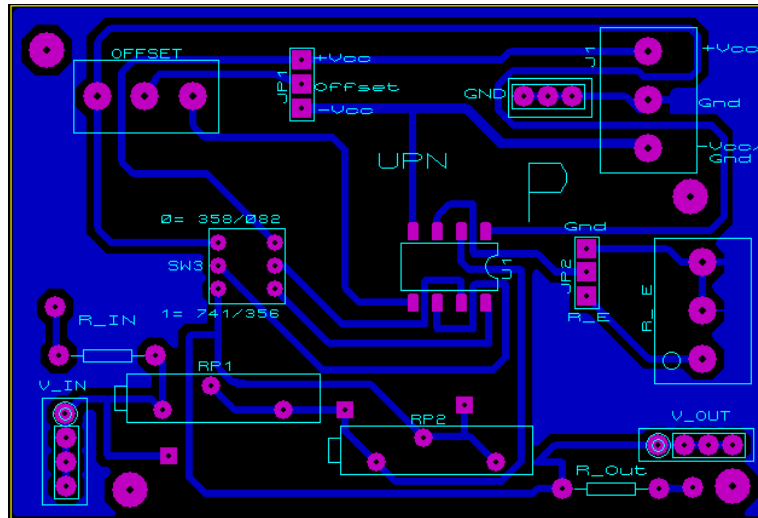
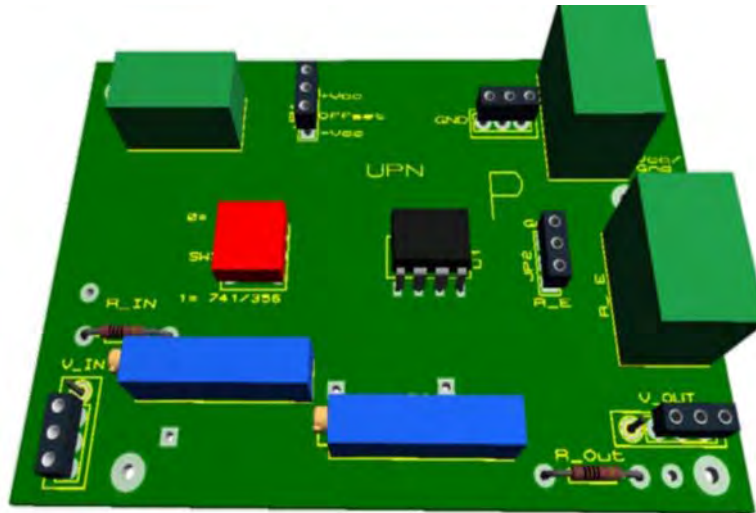


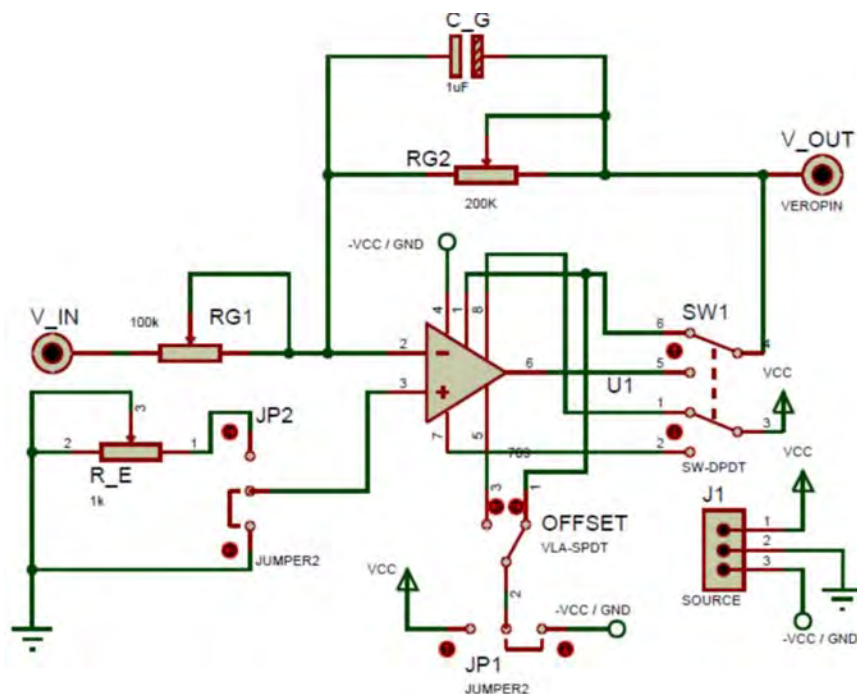
Figura 27. Simulación 3D del módulo del controlador proporcional P.



### 2.7.2 Módulo controlador integral: Int

Igual que el módulo proporcional, en el módulo para el control integral, los componentes de interés son la resistencia de entrada (RG1), la resistencia de referencia (RG2) y el condensador (C\_G), los permiten modificar la integración de la señal salida. Posee los dos sistemas para la modificación del voltaje offset. Se presenta el circuito el diseño del PCB y la simulación en 3D.

Figura 28. Circuito del controlador integral Int.



**CARACTERÍSTICAS**

- Pines de Entada: 5
- Pines de salida: 5
- Voltaje de Operación válido: De (Máx.) -12V a 12V hasta (Mín.) 0V a 5V
- Voltaje de entrada: -12V a 12 v
- Voltaje de Salida: -11V a 11V
- Sistemas de Voltaje Offset: 2

Figura 29. Diseño del PCB del módulo del controlador Int.

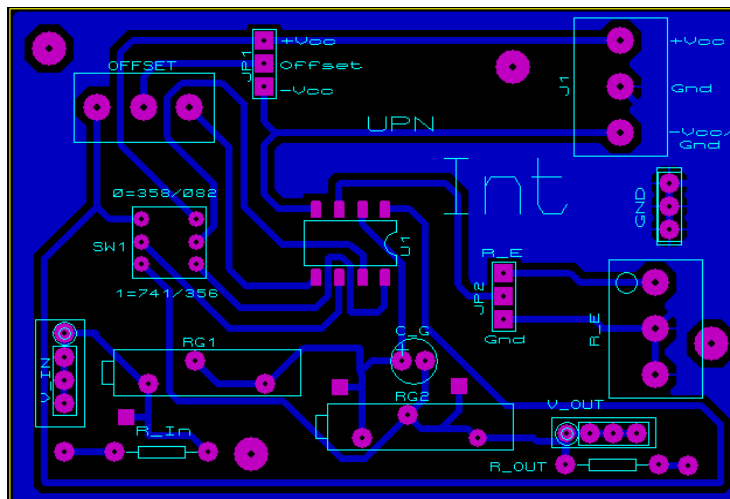
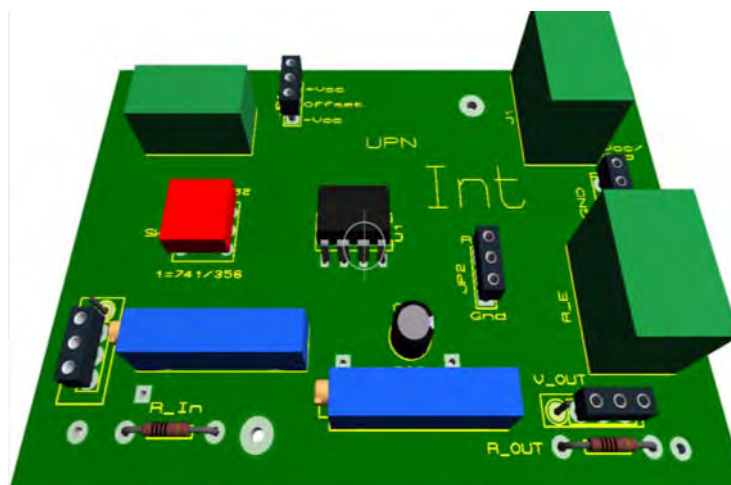


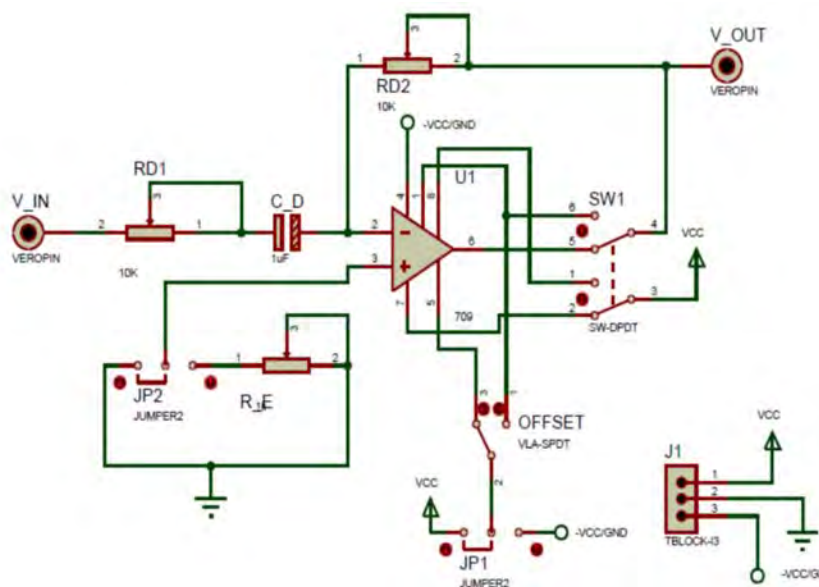
Figura 30. Simulación 3D del módulo del controlador integral Int.



### 2.7.3 Módulo controlado derivativo: D

En el módulo para el control integral, los componentes de interés son la resistencia de (RD1), el condensador de entrada (C\_D) y la resistencia de referencia (RD2) y, los permiten modificar la integración de la señal salida. Posee los dos sistemas para la modificación del voltaje offset. Se presenta el circuito el diseño del PCB y la simulación en 3D.

Figura 31. Circuito del controlador Derivativo D.



#### CARACTERÍSTICAS

**Pines de Entada:** 5

**Pines de salida:** 5

**Voltaje de operación  
valido:**

De

(Máx.) -12V a 12V

hasta

(Mín.) 0V a 5V

**Voltaje de Entrada:**

-12V a 12V

**Voltaje de Salida:**

-11V a 11V

**Sistemas de Voltaje**

Offset: 2

Figura 32. Diseño del PCB del módulo del controlador D

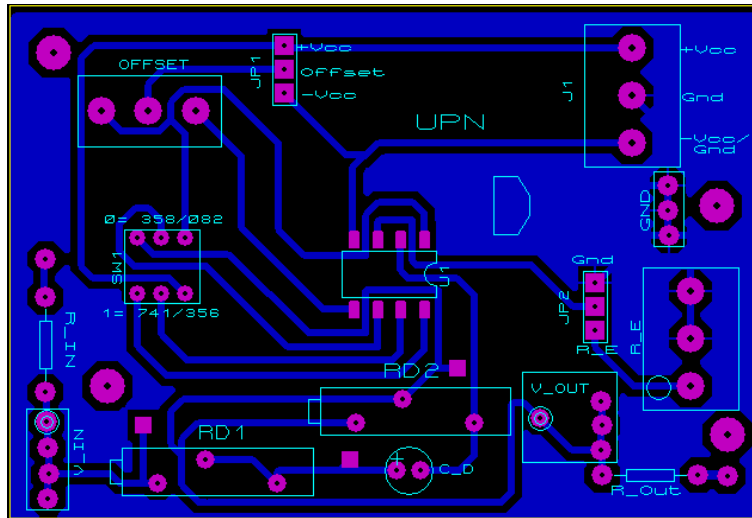
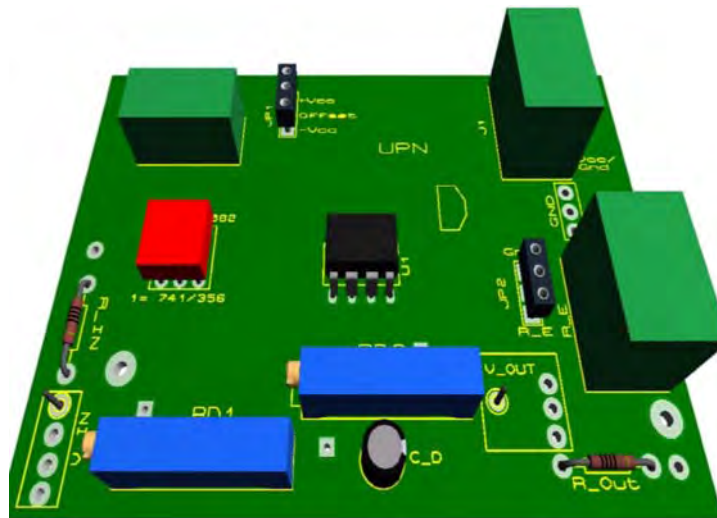


Figura 33. Simulación 3D del módulo del controlador derivativo D.

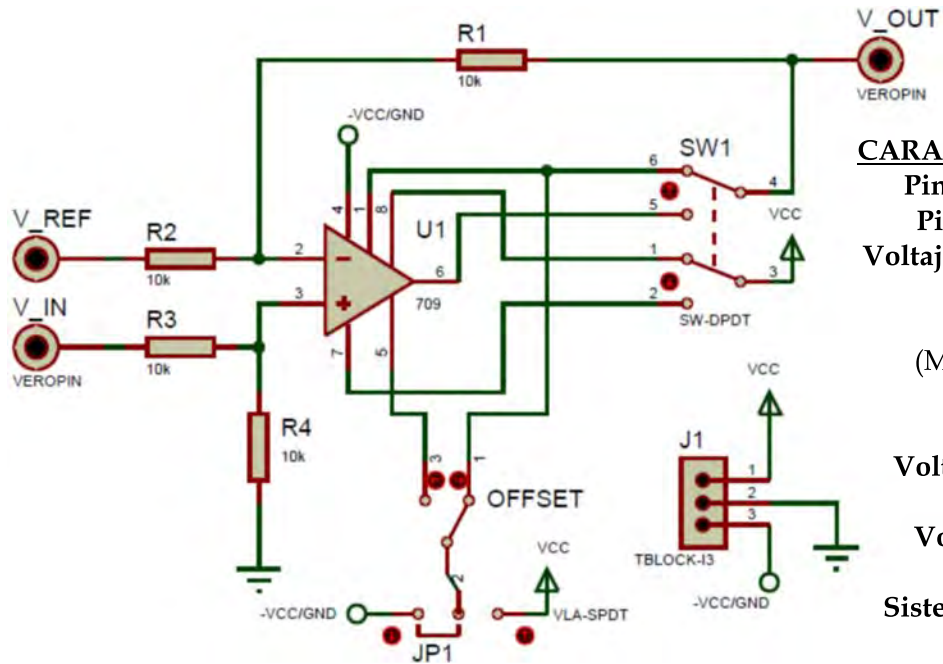


#### 2.7.4 Sumador restador

Este módulo consta de cuatro resistencias del mismo valor, su función será la de restar la señal de salida generada por el sensor de la planta, con la señal de referencia. Este solo posee un jumper para el manejo del voltaje offset. Posee un solo sistema para la modificación del voltaje offset el cual es para usar con los

pinos especiales nombrados anteriormente. Se presenta el circuito el diseño del PCB y la simulación en 3D.

Figura 34. Circuito del sumador restador.



**CARACTERÍSTICAS**

- Pines de Entada: 6
- Pines de salida: 4
- Voltaje de Operación valido: De (Máx.) -12V a 12V hasta (Mín.) 0V a 5V
- Voltaje de entrada: -12V a 12V
- Voltaje de salida: -11V a 11V
- Sistemas de Voltaje Offset: 1

Figura 35. Diseño de módulo del sumador restador.

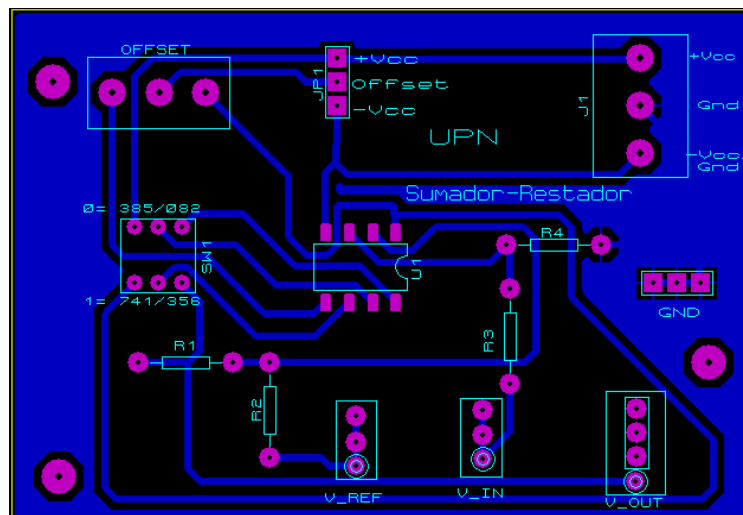
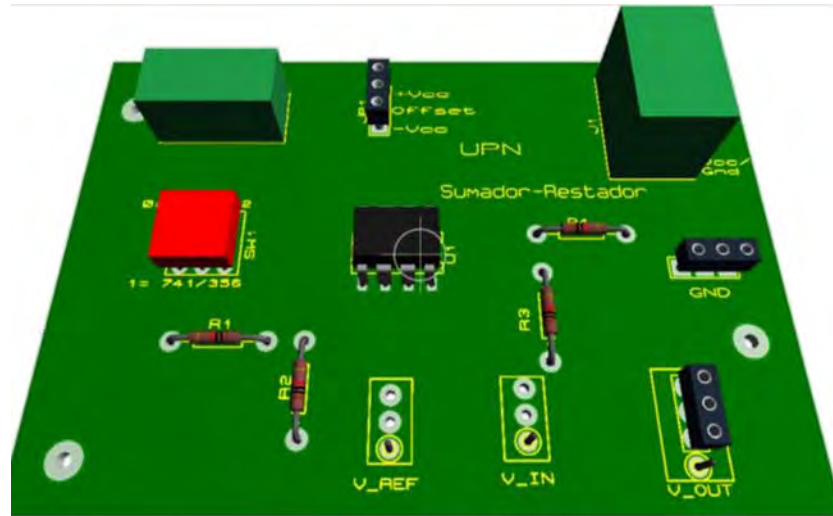


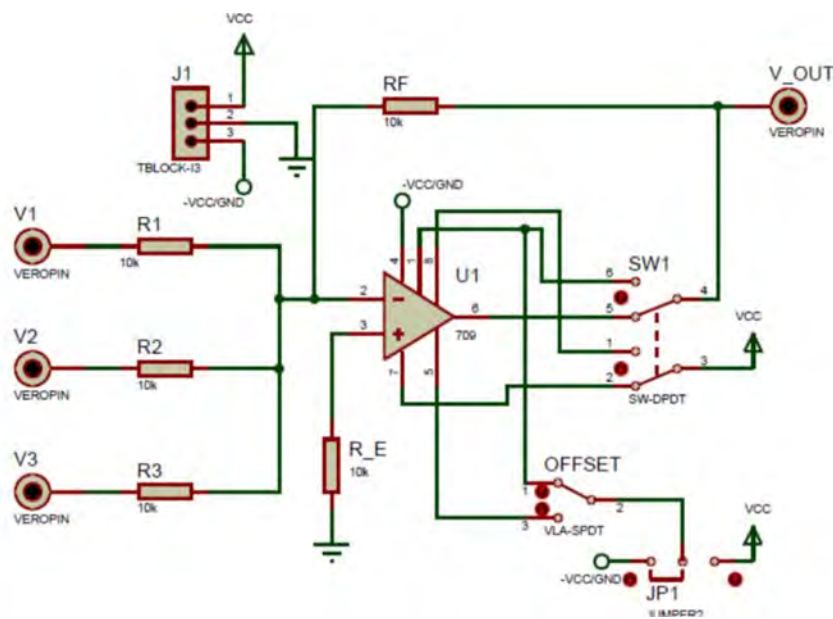
Figura 36. Simulación 3D del módulo sumador restador.



### 2.7.5 Sumador inversor

Este módulo suma las señales de entrada y genera un voltaje contrario al a la polaridad de estas. Maneja tres resistencia de entrada (R1, R2 y R3), la resistencia de referencia (RF), y viene incluida la de resistencia de ecualización (R\_E) por ende solo maneja un sistema de voltaje offset manejado con el jumper JP1.

Figura 37. Circuito del sumador inversor.



#### CARACTERÍSTICAS

**Pines de Entrada:** 6

**Pines de Salida:** 4

**Voltaje de operación**

**valido:**

De

(Máx.) -12V a 12V

hasta

(Mín.) 0V a 5V

**Voltaje de Entrada:**

-12V a 12V

**Voltaje de Salida:**

-11V a 11V

**Sistemas de Voltaje**

**Offset:** 1

Figura 38. Diseño del PCB del módulo del sumador inversor

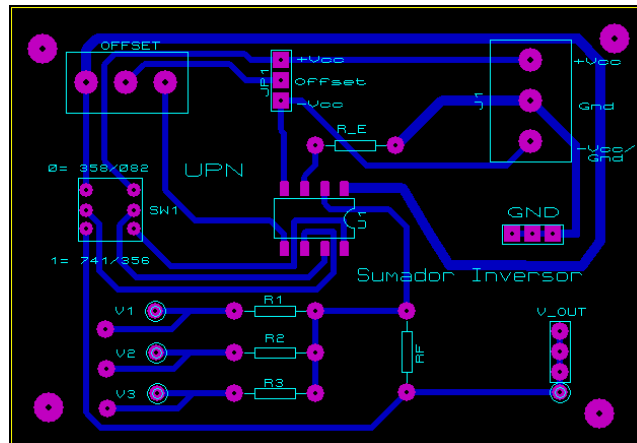
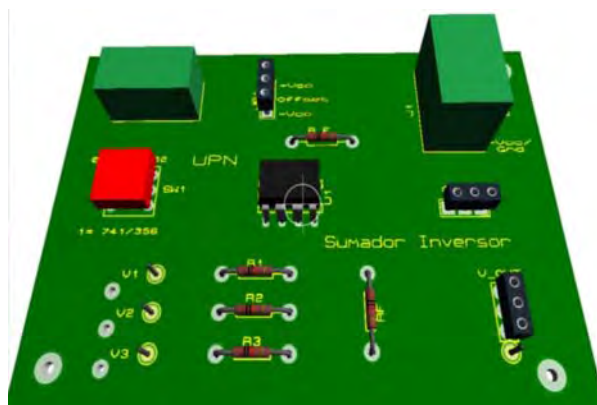


Figura 39. Simulación en 3D del módulo del sumado inversor



### 2.7.6 Módulo convertidor frecuencia voltaje

Este módulo se realiza para facilitar el proceso de identificación del sistema como un motor DC que contenga un encoder, no necesariamente es obligación usarlo, es solo una herramienta que se puede tener en cuenta para este tipo de plantas. Los CI LM 331 y el LM 2907 sirven para realizar el proceso de convertir una frecuencia en un valor de voltaje. Se opta por realizar el módulo para la configuración con el CI LM 331 que permite hasta 100KHz y con la ecuación general dada en las hojas de datos de fábrica, se eligen los valores necesarios para los componentes a utilizar.

En esta ecuación la resistencia ( $R_t$ ) será la única movible para variar los valores de salida en el módulo.

$$V_{out} = f_{in} \times 2.09 \times \frac{R_L}{R_S} \times (R_t \times C_t)$$

Figura 40. Configuración típica del LM 331.

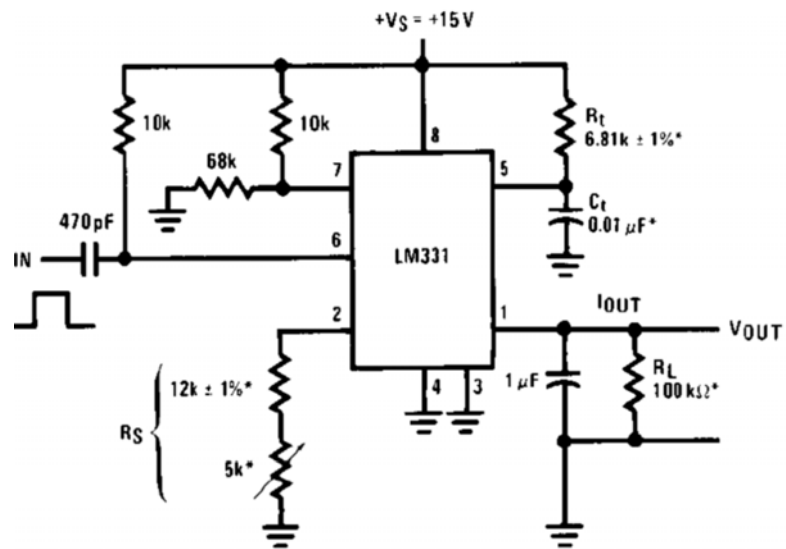


Figura 41. Diseño del PCB del Convertidor F-V

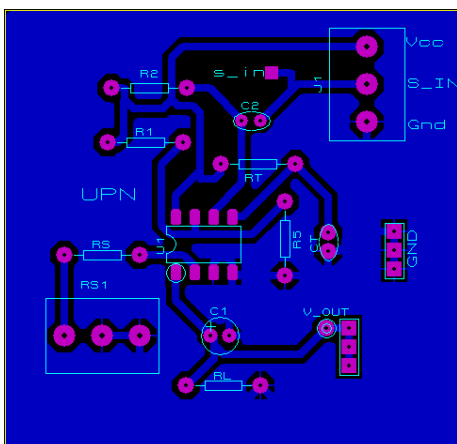
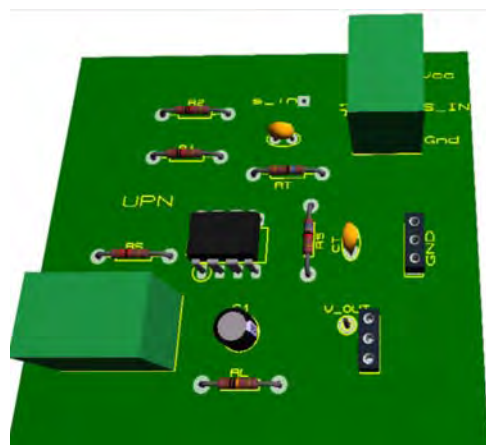


Figura 42. Simulación en 3D del Convertidor F-V



### 2.7.7 *Fabricación de módulos*

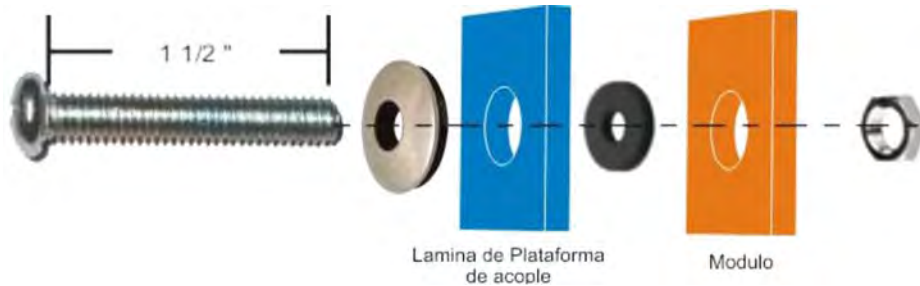
Todos los módulos diseñados fueron elaborados de la misma forma, de forma casi artesanal siguiendo un proceso de elaboración como se presenta a continuación:

1. Se imprime en impresora laser el diseño PCB con efecto espejo en papel propalcote o satinado de bajo gramaje.
2. En una baquelita limpia y cortada casi al tamaño del circuito impreso, por medio del proceso de transferencia de calor se traspasa el diseño PCB a la baquelita. Se introduce en agua fría hasta que despegue el papel solo.
3. Se limpia cuidadosamente la baquelita dejando únicamente los caminos cubiertos por la impresión del circuito.
4. Se deja la baquelita en un recipiente en agua con ácido férrico hasta que el cobre desaparezca.
5. Se saca del recipiente se limpia, y dispone a continuar con apertura de orificios con brocas de 1 mm de grosor.
6. Se imprime en papel calcomanía la distribución de espacios de cada elemento. Se pega la calcomanía en la parte contraria al circuito
7. Por último se instala los componentes y se soldan y la baquelita está lista para usar.

### 2.7.8 *Plataforma de acople*

Los módulos tienen que interactuar entre sí, ellos deben ser manejados dentro de un espacio que permita realizar configuraciones posicionales mostrando diferentes modelos de controladores como en serie o paralelo como si se tratara de manejar en diagrama de bloques pero con la diferencia que serán en los módulos físicos. Se diseñó una plataforma con pines móviles para que mantenga una ubicación deseada. En el proceso de elaboración se usó dos láminas de poliestireno de 50cm x 30cm en calibre 50. En su superficie fueron perforados varios puntos simétricos al tamaño de los módulos. Para los pines se instalaron atreves de la superficie, tornillos micrométricos de 1 1/2" de longitud con arandela de neopreno zincada con goma y un empaque de goma para que pueda elevar un poco los módulos sobre la superficie evitando rayarla. Se puede ajustar los módulos con una tuerca al final.

Figura 43. Instalación de los módulos en plataforma de acople



Fuente: Elaborada por el autor.

### 2.7.9 Regletas de alimentación

Para la alimentación de los módulos dentro de la plataforma de acople (VCC+, Gnd y -VCC/GND) se implemento unas baquéelas como regletas de conexión. Estas contienen de 6 a 7 puertos tipo mox macho y una bornera para las entradas de alimentación principales. Para que se conecten los módulos se deben primero ubicar primero en el espacio de la plataforma y seguidamente se usa el cable de alimentación que contiene la terminal mox hembra y se conecta a la regleta, que finalmente será alimentada a las fuentes de energía principal. En la figura 45 se resaltan dos regletas dentro de la plataforma de acople.

### 2.7.10 Conexión de módulos

Figura 44. Cables Jumper.



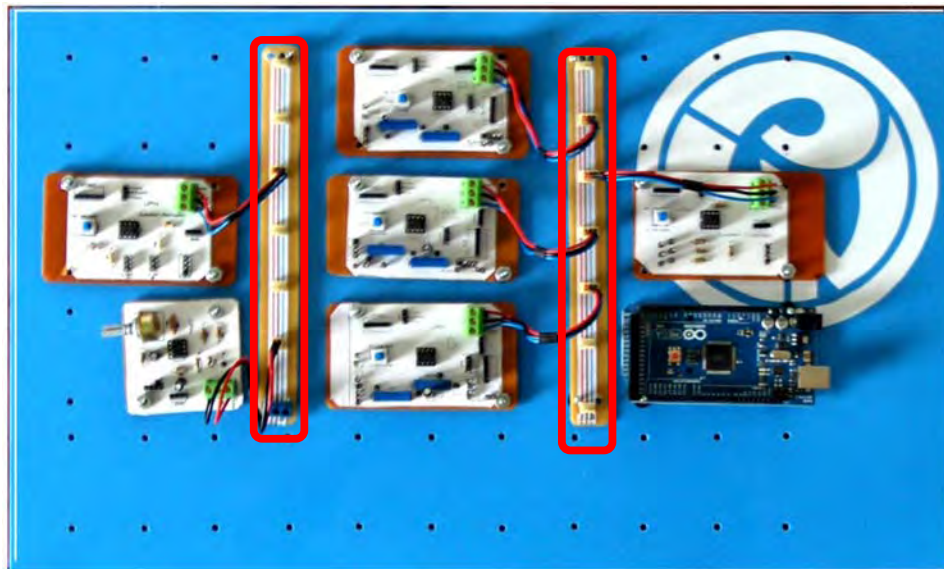
Fuente: <http://www.tweaking4all.com/hardware/breadboard/>

El material de apoyo busca manejar un modo de interacción diferente a la llevada en la práctica con el uso de la protoboard, en el cual se pueda experimentar el comportamiento de los OP AMPs de forma interesante y atractiva dentro del área del control analógico.

El usuario que quiera empezar a experimentar con este material, debe tener ante todo disposición de dispositivos básicos como fuentes de voltaje, generador de señales, multímetro y osciloscopio, después puede establecer que desea trabajar y que se requiere evidenciar, ya sea el comportamiento individual de algún módulo o el comportamiento

en conjunto de todos ellos, después debe introducir las regletas de alimentación y acoplar a la plataforma los módulos, luego debe identificar entradas y salidas de cada módulo, y finalmente conectarlas mediante cables jumper con terminales macho-macho y/o hembra-hembra y se puede empezar la exploración y la experimentación con este material de apoyo

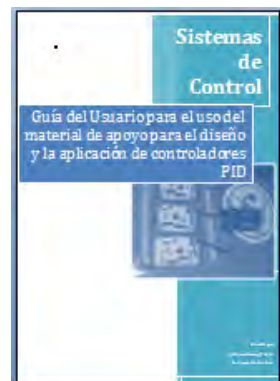
Figura 45. Regletas de Alimentación para los módulos.



### 2.7.11 Guía de manejo

Como este trabajo arroja un material de apoyo, se brinda la guía de manejo de los componentes que conforman este material. Esta guía tiene como nombre *Sistemas de control. Guía del Usuario para el uso del material de apoyo para el diseño y la aplicación de controladores PID*, en ella se menciona los objetivos y elementos necesarios para su desarrollo. Su contenido lo conforman 7 pasos, en ellos de forma clara se lleva al estudiante a aprender a manejar este material diseñado para experimentar las temáticas que contienen los sistemas de control. Esta se incluye en los anexos de este trabajo.

Figura 46. Portada de Guía



### 3. PRUEBA Y RESULTADOS

En el desarrollo de esta etapa se ha confrontado los estados ideales con los estados reales que aparecen al realizar pruebas experimentales en los prototipos desarrollados por el planteamiento y propuestas surgidas del estudio y el trabajo realizado. Este es el espacio de reflexión, modificación y registro del diseño aplicado a partir del rendimiento obtenido que a continuación se va a describir.

Para comenzar, el material de apoyo construido consta de dos partes: la parte de hardware que son los módulos en la plataforma de acople y la parte de software que se divide en dos desarrollos que son la programación de la tarjeta Arduino y la interfaz de usuario para la visualización de los datos obtenidos y posterior análisis en los toolbox de Matlab.

En la primera parte se lleva a cabo el análisis del hardware, para eso organizo una serie de pruebas que constataran el comportamiento real de los módulos. El proceso permitió identificar las fallas que fueron posteriormente corregidas y así establecer una base sólida, confiable, que diera garantías al momento de ser implementado hacia los controladores analógicos.

La primera versión de los módulos, que inicialmente eran tres, muestra las primeras falencias de diseño en baquelitas de doble cara como caminos muy delgados, diferencia en el tamaño de los componentes y el espacio asignado en el diseño de la baquelita, caminos incompletos o faltantes, entre otros errores identificados. La figura 47 muestra estos primeros módulos, se puede apreciar en la imagen inferior la forma errónea de usar marcaciones en la doble cara de cobre, lo que podría causar cortos entre los componentes y un mal funcionamiento.

Figura 47. Primeros módulos PID



Después de replantear nuevamente los diseños, se realizaron nuevamente estos tres módulos con los otros tres módulos complementarios, quedando elaborados los módulos para cada controlador (P, I y D), los sumadores (inversor y restador) y el módulo convertidor frecuencia a voltaje.

Al tener todos los elementos culminados se realizaron algunas pruebas en laboratorio con el uso del generador de señales, el osciloscopio digital y fuentes de voltaje dual según como se ve en la figura 48. Las Pruebas aplicadas fueron para mirar el comportamiento en amplificación y en repuesta de algunas señales como la cuadrada y la triangular. En el desarrollo de estas pruebas se comprobó el funcionamiento del switch de selección de encapsulado según la referencia utilizada, para las pruebas se usaron los OP AMPs LM 724 y TL 082 ya que tienen diferentes configuraciones y permiten demostrar la validez al diseño. Por otro lado se descarto otras referencias de OP AMP con encapsulados de 8 pines como el LM 358 y similares que solo tengan alimentación sencilla V+ y GND, porque estos no pueden generar una señal negativa óptima por no tener alimentación negativa V- lo que resume que no pueden ser tenidos en cuenta para este tipo de aplicaciones. A continuación se presentaran las muestras realizadas a cada modulo dentro de la plataforma de acople.

**Figura 48. Preparación de pruebas de laboratorio para los módulos en la plataforma**



### 3.1 MODULO CONTROLADOR INTEGRAL

Se inicia las muestras según el diagrama de la figura 49 con los componentes y su configuración y se utilizan los siguientes valores:

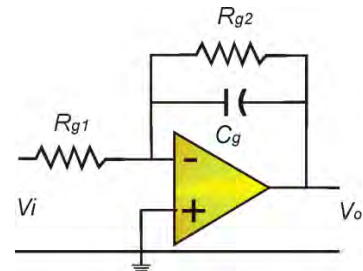
$$R_{g1} = 10K\Omega$$

$$R_{g2} = 100K\Omega$$

$$C_g = 1\mu f$$

OPAMP=LM 741, habilitando su tipo de encapsulado mediante el switch de selección de encapsulado en la posición 1.

Figura 49. Configuración Controlador Integral

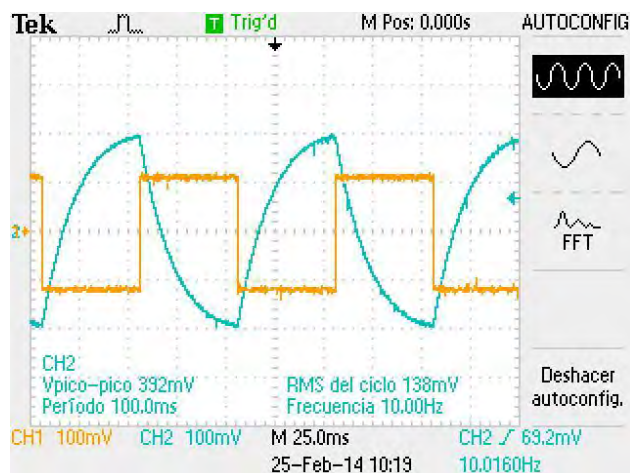


Fuente: Elaborada por el autor.

En las muestras, la señal de entrada  $V_i$  es una señal cuadrada, en color Amarillo (CH1) y la señal de salida  $V_o$  está en color Azul. (CH2)

*Muestra 1:* Se ingresa una señal de entrada  $V_i$  p-p<sup>41</sup>: 200mV a 10 Hz; se obtiene una señal de salida  $V_o$  p-p: 392mV en forma semi triangular.

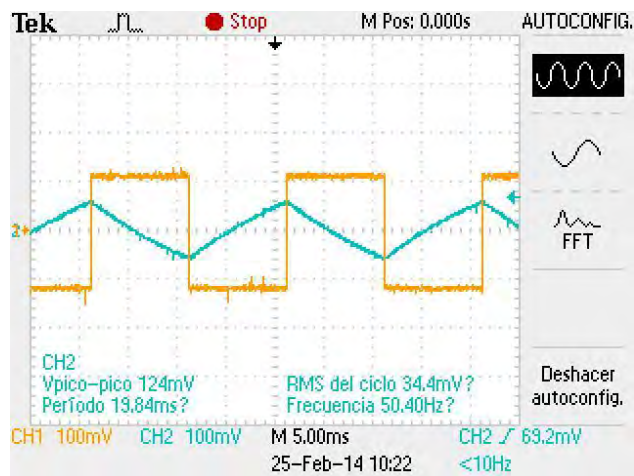
Figura 50. Modulo Integrador a 10Hz



*Muestra 2:* Se aumenta la frecuencia de entrada a 50 Hz; se obtiene una señal de salida  $V_o$  p-p: 124mV con forma triangular más definida. Véase figura 51.

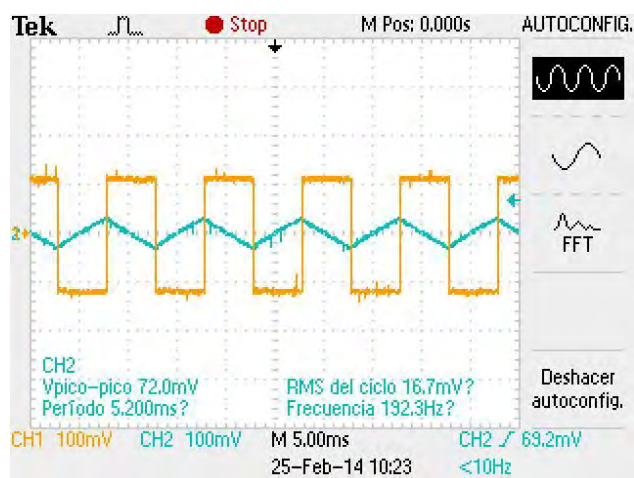
<sup>41</sup> V p-p: Voltaje pico a pico.

Figura 51. Muestra integrador a 50 Hz



Muestra 3: Se aumenta la frecuencia: 192Hz; se obtiene una señal de salida  $V_o$  p-p: 72 mV, en forma triangular con una amplitud menor a las anteriores muestras.

Figura 52. Modulo Integrador a 192 Hz.



Muestra 4: Se aumenta frecuencia: 207 Hz; señal de salida  $V_o$  p-p: 44 mV aproximadamente, la señal aparente mente pierde su forma véase figura 53, para ello en la figura 54, en el osciloscopio se cambia el valor de la perilla de amplitud de la salida, de 100mV a 20mV, evidenciando que aun se mantiene la forma triangular con un leve ruido en la señal.

Figura 53. Modulo Integrador a 207 Hz con escala de amplitud de 100 mV en Vo

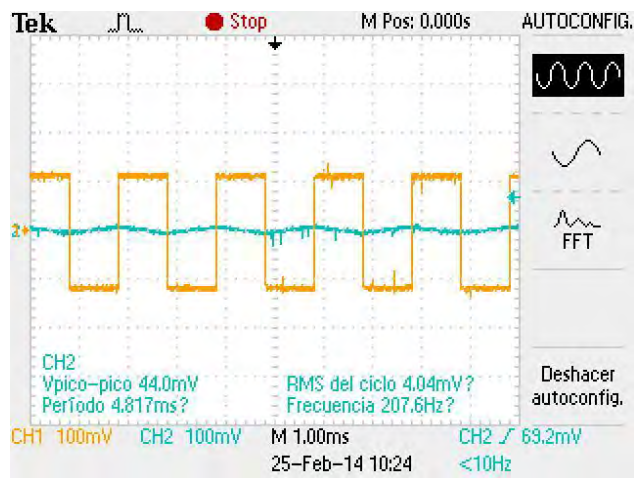
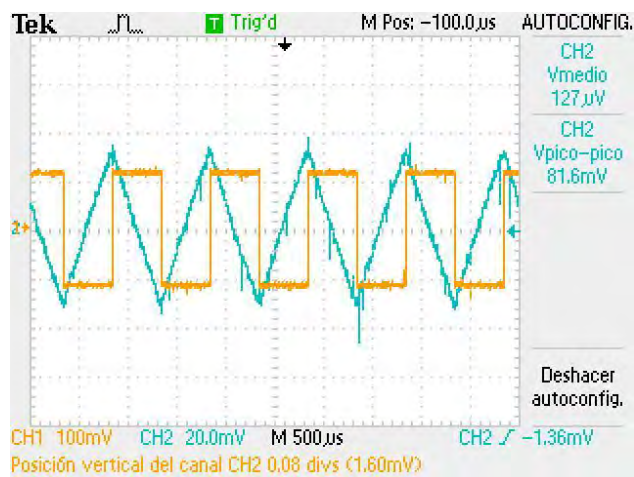
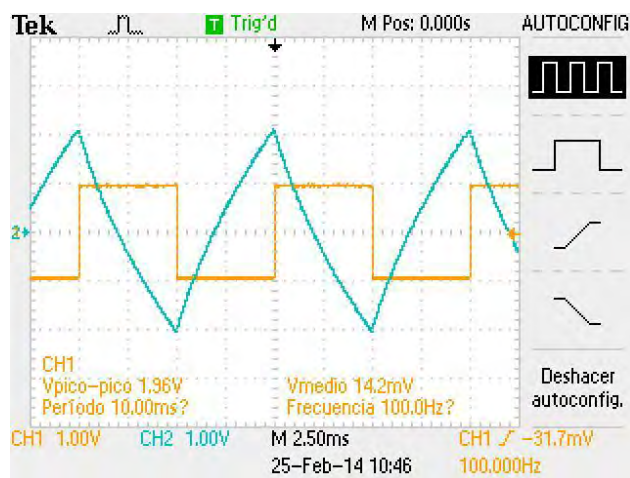


Figura 54. Modulo integrador a 207 Hz con escala de amplitud 20 mV en Vo



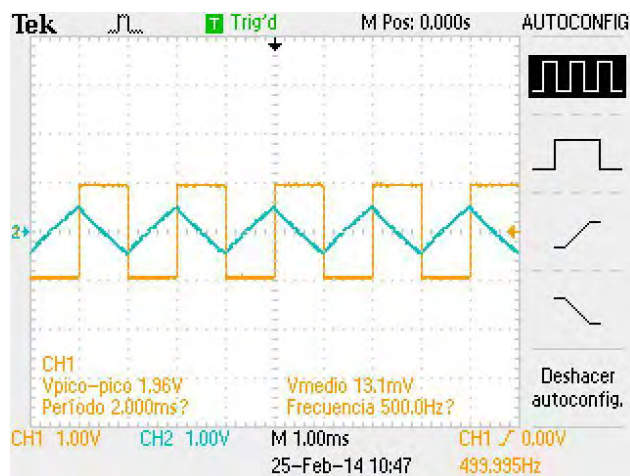
*Muestra 6.* Se cambia el condensador electrolítico de  $1\mu\text{f}$  por uno cerámico  $100\text{nF}$  se inicia a Frecuencia desde  $100\text{ Hz}$  y se cambia en las dos señales la escala de amplitud a un  $1\text{V}$ , por ende  $V_i$  p-p:  $2\text{V}$  y la señal de salida  $V_o$  p-p:  $4\text{V}$  aproximadamente. A partir de estas muestras se evidencia la mejoría de la señal de salida.

Figura 55. Modulo Integrador usando condensador cerámico 100nf a 100 Hz



Muestra 7. Se aumenta Frecuencia a 500 Hz;  $V_i$  p-p: 2 V;  $V_o$  p-p: 1V aproximadamente. La señal de salida disminuye aproximadamente  $\frac{3}{4}$  a comparación de la anterior muestra.

Figura 56. Modulo Integrador a frecuencia 500Hz



Muestra 8. Se aumenta la Frecuencia a 1KHz; la señal de salida  $V_o$  p-p es de 500mV aproximadamente véase figura 57. En la figura 58 se cambia en el osciloscopio la escala de amplitud a 200mV y se evidencia que no pierde su forma. Aun cuando la señal de salida es más pequeña, es evidente que puede responder mejor a señales más rápidas con el uso de condensadores cerámicos. Las pruebas demuestran que el modulo integrador funciona correctamente según lo esperado.

Figura 57. Modulo Integrador a 1KHz con escala de amplitud 1V en Vo

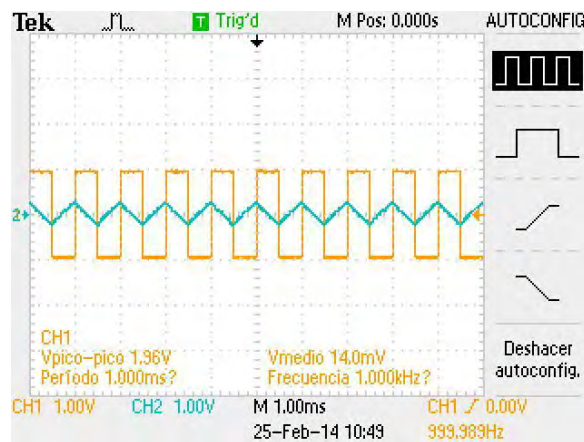
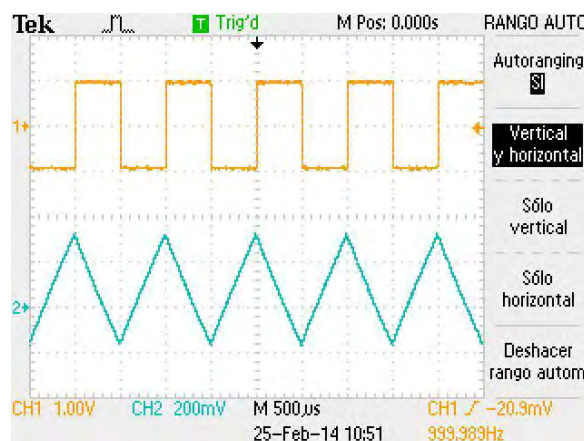


Figura 58. Modulo Integrador a 1KHz con escala de amplitud 200mV en Vo



### 3.2 MODULO CONTROLADOR DERIVATIVO

A partir de su diagrama representativo mostrado en la figura 59 se realizan las pruebas a este modulo con los siguientes valores en sus elementos:

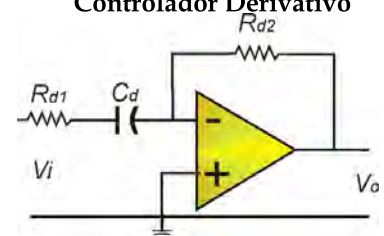
$R_{d1} = 100\Omega$

$R_{d2} = 20K\Omega$

$C_d = 1\mu f$

OPAMP=TL 082, habilitando su tipo de encapsulado mediante el switch de selección de encapsulado en la posición 0.

Figura 59. Configuración Controlador Derivativo

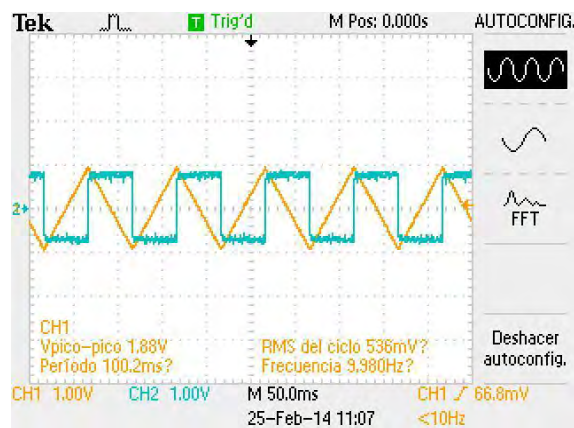


Fuente: Elaborada por el autor.

La señal de entrada  $V_i$ : color Amarillo (CH1) será una señal triangular. La señal de salida  $V_o$  es de color Azul (CH2).

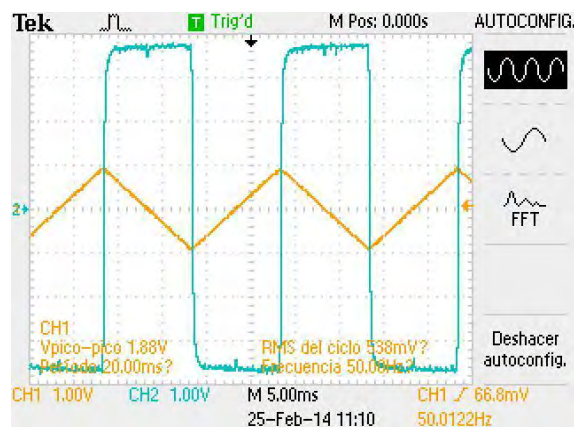
*Muestra 9.* Se usa una señal triangular en la entrada con  $V_i$  p-p: 2V a 10 Hz; se obtiene una señal cuadrada en la salida con  $V_o$  p-p: 1.7V aproximadamente, en forma de señal cuadrada, véase figura 60.

Figura 60. Modulo Derivativo a 10 Hz



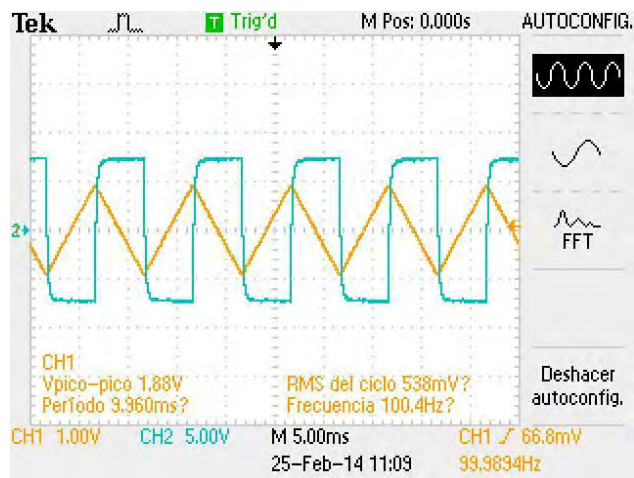
*Muestra 10.* Se incrementa la frecuencia de entrada a 50 Hz; se obtiene una señal cuadrada en la salida de  $V_o$  p-p: 8V aproximadamente, aumentando 4 veces su amplitud en comparación a la muestra anterior, véase figura 61.

Figura 61. Modulo Derivativo a 50 Hz



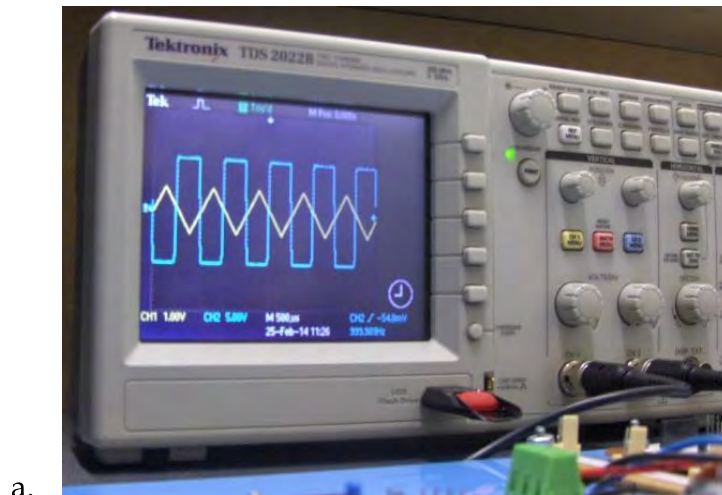
*Muestra 11.* Se incrementa la frecuencia de entrada a 100 Hz; se obtiene una señal cuadrada en la salida  $V_o$  p-p: 15V aproximadamente, véase figura 62.

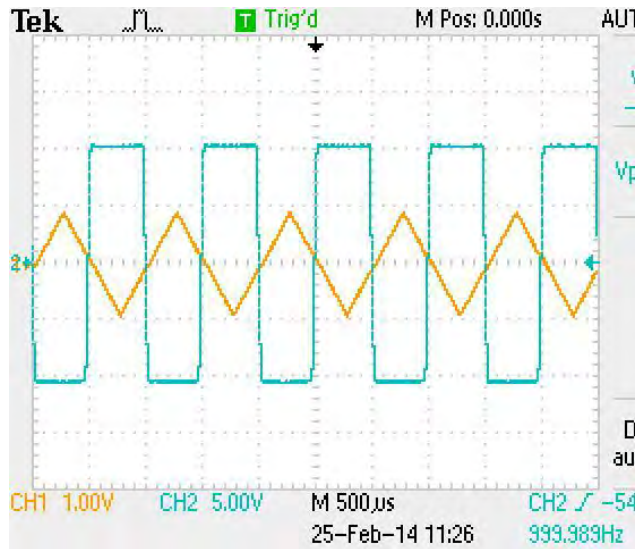
Figura 62. Modulo Derivativo a 100 Hz



*Muestra 12.* Se incrementa la frecuencia de entrada a 1KHz; se obtiene una señal de salida con  $V_o$  p-p: 20V, este valor de amplitud es el máximo que puede ofrecer el modulo derivador en cual se tiene en estado de saturación al amplificador. El modulo derivador se comporta bien según lo requerido. En la parte superior de la figura 63 se muestra la acción desde la experimentación externa (a) y seguida, la imagen resultante de esta imagen elaborada por el osciloscopio (b).

Figura 63. Modulo Derivativo a 1KHz, vista desde la experimentación y la imagen resultante.





b.

### 3.3 MODULO CONTROLADOR PROPORCIONAL

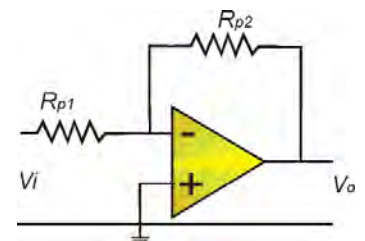
Para este módulo se realiza una sola muestra. La configuración de la figura 64, lo conforman los siguientes valores en sus componentes:

$R_{p1} = 50K\Omega$   
 $R_{g2} = 150K\Omega$   
 OPAMP=TL 082

Los valores de las resistencias deben generar una señal de salida (CH2) amplificada 3 veces a la señal de entrada (CH1) pero invertida. La señal es sinusoidal.

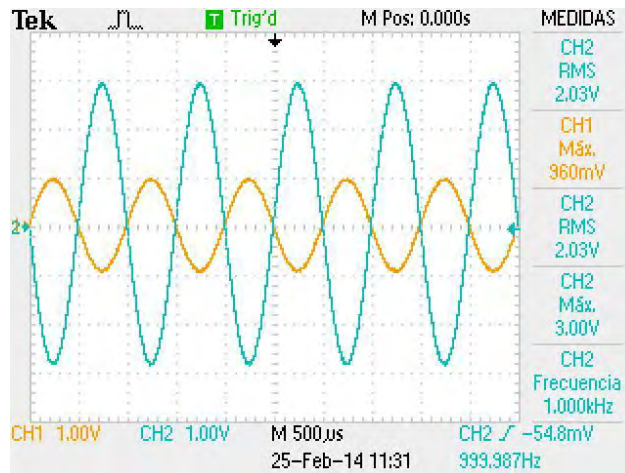
*Muestra 13.* Se ingresa una señal sinusoidal de  $V_i$  p-p: 2V a 1KHz; se obtiene a la salida una señal sinusoidal invertida incrementada 3 veces,  $V_o$  p-p: 6V. El módulo de proporcional funciona según lo requerido.

Figura 64. Configuración Controlador Proporcional.



Fuente: Elaborada por el autor.

Figura 65. Modulo Proporcional a 1KHz



### 3.4 MODULO SUMADOR RESTADOR

El modulo sumador restador sirve en un sistema de control para comparar la señal de entrada con la señal de retroalimentación, realizando una operación de resta entre las dos señales ( $V_i - V_r$ ). La señal de entrada  $V_i$  va por CH1 y la señal de retroalimentación  $V_r$  va por CH2. Se utiliza para este modulo el OP AMP TL082.

*Muestra 14.* En la figura 66 muestra las dos señales a comparar. La señal  $V_i$  (CH1) presenta una señal sinusoidal de 2V p-p a 1KH y la señal  $V_r$  (CH2) es una señal DC de 2V. Seguidamente en la figura 67 se restan estas dos señales por medio de la función matemática del osciloscopio mostrando una señal sinusoidal en color rojo de 1Vp-p sobre un offset de -2V, esto permite dar una idea de como debe ser la señal de salida. Lo anterior se rectificaba al mirar la salida real, pero no se tuvo en cuenta a tiempo que en el modulo el  $V_i$  (CH1) era la señal que estaba restando y no era a quien se le restaba, véase en la figura 68. Por consiguiente en el osciloscopio se realizo la operación teorica  $V_i - V_r$  pero en el modulo sumador restador se realizo  $V_r - V_i$ . Pero esto no evidencia error, por el contrario demuestra que funciona según su principio que es la de restar las señales ingresadas en sus entradas.

Figura 66. Señales de entrada CH1 y CH2 del modulo sumador restador

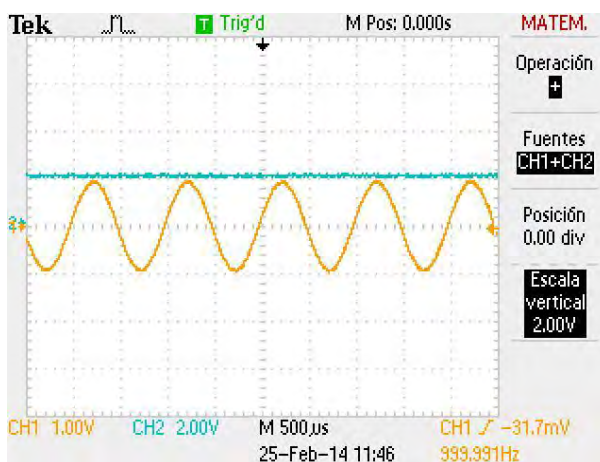


Figura 67. Resta de la señales de entrada mediante el osciloscopio CH1-CH2.

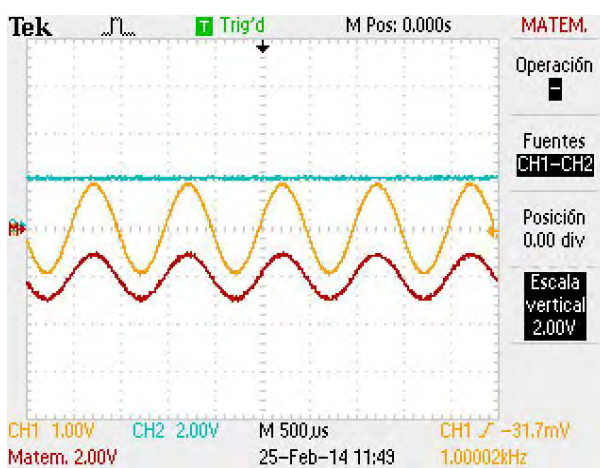
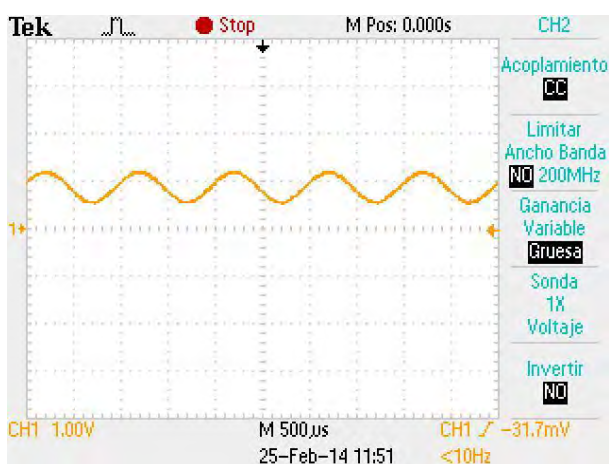


Figura 68. Señal de salida del modulo sumador inversor Vr-Vi .



### 3.5 MODULO SUMADOR INVERSOR

El siguiente modulo realiza la suma de dos a tres señales en la entrada, necesario para cuando se realiza una topología de controladores en paralelo. La salida en él será una señal invertida. Para éste se utilizara el OP AMP LM 741. Se utilizaran solo dos entradas y las mismas señales que se usaron en el modulo anterior, la Señal DC a 2V ira por CH1 y la señal sinusoidal de 1 Vp-p a 1KHz ira por CH2.

*Muestra 15.* Para esta muestra se utiliza la función matemática de suma del osciloscopio para las dos señales de entrada y da como resultado una señal roja de 2 V p-p dando la idea de que es lo que debe generar a la salida pero teniendo en cuenta que esta debe estar invertida, véase figura 69. Lo cual se rectifica en la figura 70 cuando se observa que la señal de entrada sinusoidal es la misma a la salida pero invertida sobre offset negativo de -2V.

Figura 69. Funcionamiento del modulo sumador inversor con dos señales

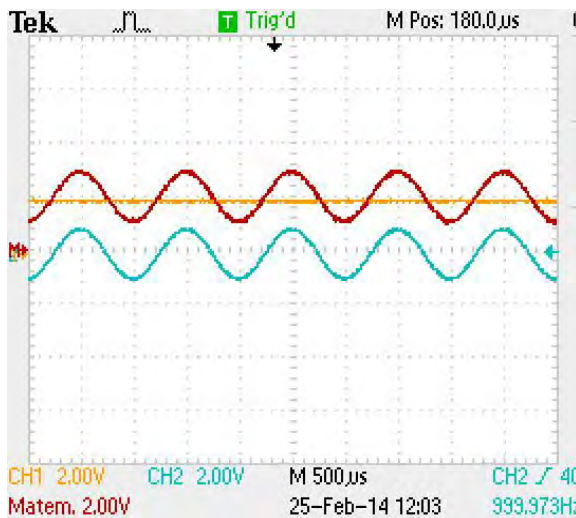
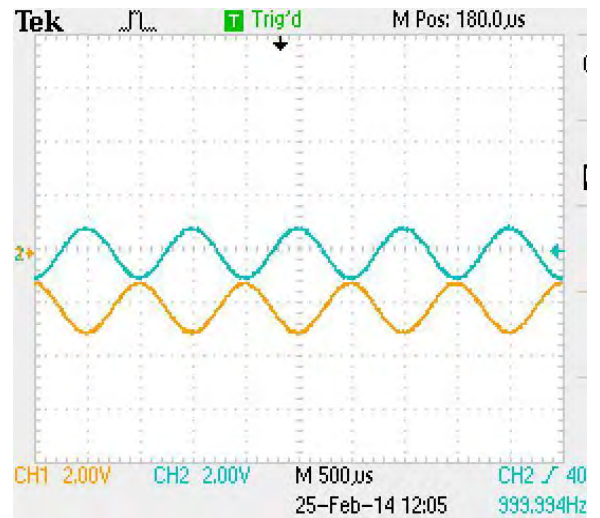


Figura 70. Comparación de entrada y salida del modulo sumador inversor



### 3.6 MODULO CONVERTIDOR F-V (FRECUENCIA- VOLTAJE)

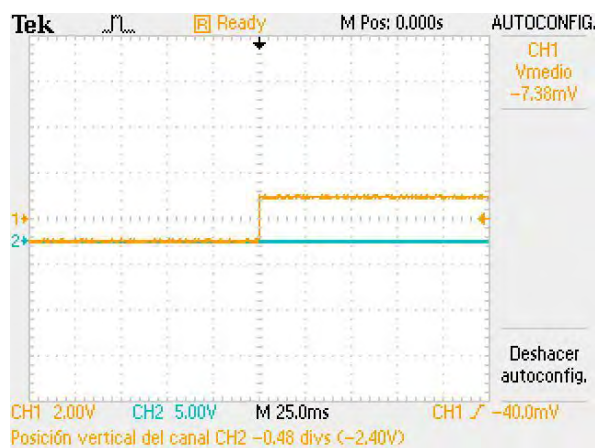
El modulo F-V recibe la señal del encoder del motor (planta) lo cual lleva una frecuencia proporcional a la velocidad del rotor y el modulo arroja un valor de voltaje DC que correspondiente a esta frecuencia.

Los elementos utilizados en este modulo son:

CI = LM 331.  
Rt = 6.8K $\Omega$

Las siguientes imágenes muestran el comportamiento de la salida Vo (CH2) con respecto a la entrada Vi (CH1) la cual sera una señal cuadrada con diferentes frecuencias, dejando en evidencia su correcto funcionamiento.

Figura 71. Modulo convertidor F-V con Vi a 1Hz



Se empieza a aumentar la frecuencia a 10 Hz y se observa el comportamiento de convertidor F-V en la figura 72. Después frente a valores de frecuencias de 50Hz y 100Hz. Y por ultimo logra recibir la señal Vi con un máximo 130 Hz los cuales representan a la salida Vo: 10 V DC, véase en la figura 75. El valor de la frecuencia Vi puede variar si se cambia el valor de Rt en el modulo convertidor F-V.

Figura 72. Modulo convertidor F-V con Vi a 10Hz

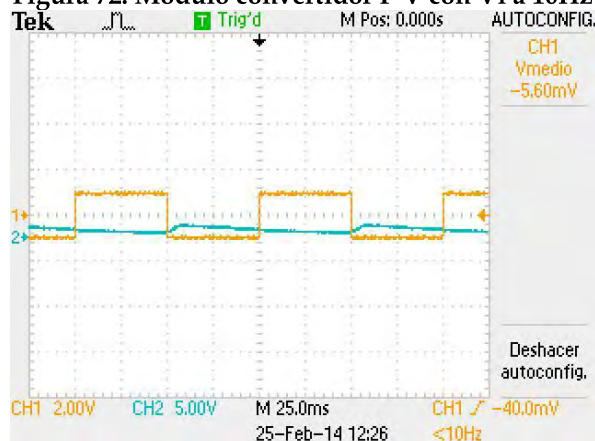


Figura 73. Modulo convertidor F-V con Vi a 50 Hz

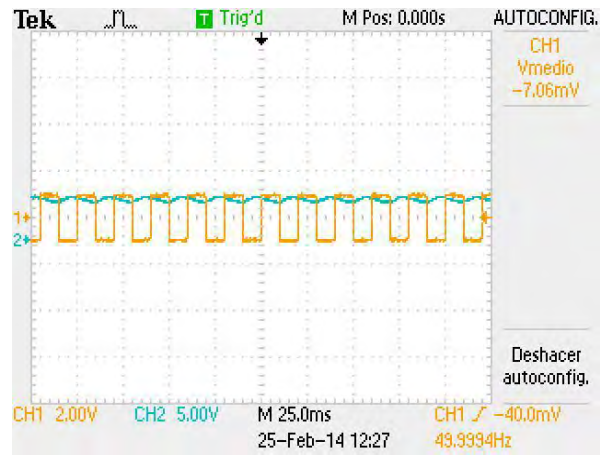


Figura 74. Modulo convertidor F-V con Vi a 100 Hz

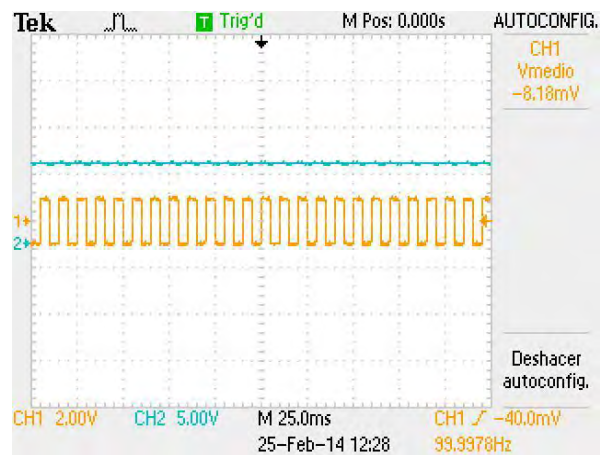
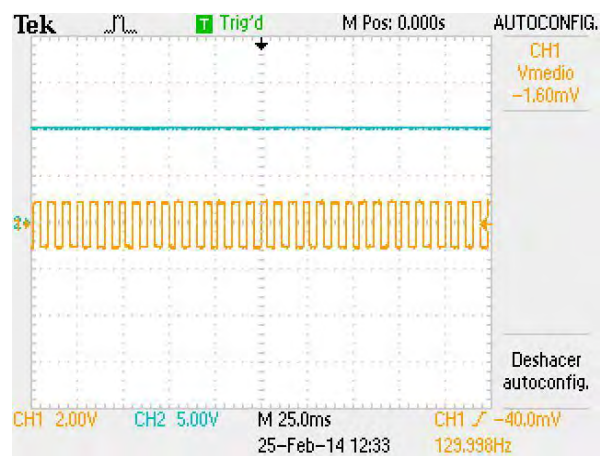


Figura 75. Modulo convertidor F-V con Vi a 130 Hz



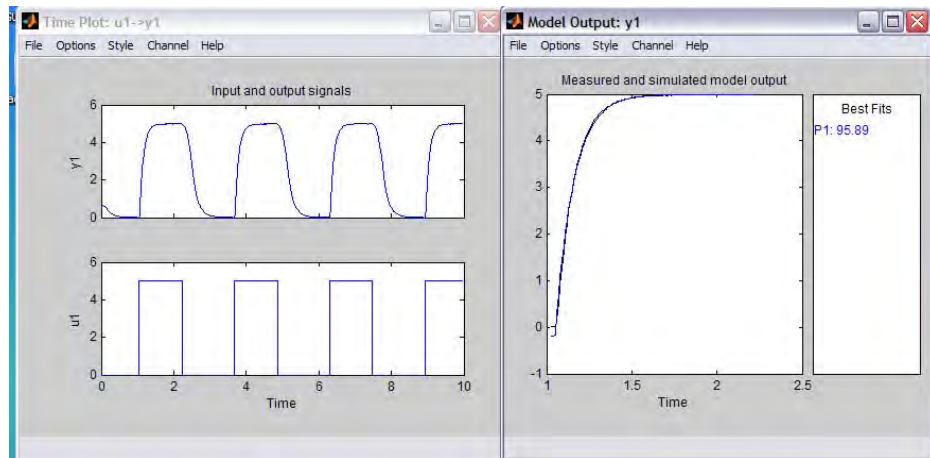
### 3.7 SOFTWARE

El software creado para este proyecto, MATLAB\_ARDUINO\_DAQ y DAQ\_UPN\_ARDUINO al ser implementados, permite obtener gráficamente el comportamiento de un sistema desde la interfaz diseñada, operando según las órdenes básicas creadas para la interacción del usuario con la tarjeta Arduino. En este proceso se logra digitalizar los datos para obtener el modelo matemático de la planta. Se realizó pruebas con un motor DC con encoder y una señal pulso de aproximadamente de 0.5 Hz, la figura 76 muestra el entorno de MATLAB\_ARDUINO\_DAQ y la grafica de comportamiento de la planta logrando obtener sus datos que posteriormente fueron guardados en un archivo .mat. Estos datos obtenidos se llamaron desde workspace de Matlab y se evidencia que hay una similitud en los datos pero estos al ser tratados con *ident* no logra tener un porcentaje cercano al 98% lo que es el ideal para un trabajo de precisión, pero se obtiene un 95% que también es válido, véase figura 77, lo que deja claro que se puede dejar como un primer alcance y en el cual se puede realizar mejoras.

Figura 76. Funcionamiento de MATLAB\_ARDUINO\_DAQ



Figura 77. Tratamiento en Toolbox Ident



En general en el desarrollo de este capítulo se deja claro que en la parte de hardware:

- Al realizar mejoras al diseño inicial de los módulos, estos no se recalientan por causa de cortos o mal funcionamiento. Sin embargo es necesario crear un sistema de protección más eficaz en caso de corto causados por malas conexiones.
- El diseño permite ser utilizado con OP AMP que tengan alimentación dual ( $V+$  y  $V-$ ) y sean de 8 pines sin importar su configuración interna.
- Los modulo pueden amplificar señales y actuar según su configuración establecida sin inconvenientes.

En la parte del software queda establecido que:

- los programas bases, logran obtener datos de una planta física que luego pueden ser posteriormente analizados por medio de diferentes toolbox de Matlab.
- Estos programas se puede mejorar sus características, como aumentar la velocidad de transferencia en los datos de subida parametrizar las entradas, y así tener una herramienta de precisión para obtener un análisis de datos más cercano a la teoría.

## 4. CONCLUSIONES

- El diseño y la elaboración de un material de apoyo, como el surgido en este trabajo de grado, debe incluir una labor de investigación docente que permita seleccionar, clasificar y ordenar los temas y los componentes mínimos para la producción de una herramienta de acompañamiento, buscando mejorar en los estudiantes la confrontación y el entendimiento de los conceptos, y al mismo tiempo logre por parte del docente el análisis y reflexión de la acción de este aprendizaje.
- El diseño de un material de apoyo para tratar algunos temas en la asignatura de sistemas de control 1, permitió materializar un modo distinto, práctico y evidente una herramienta educativa basada en algunos kits de electrónica haciendo énfasis en la utilización de los amplificadores operacionales. Este material se compone de los elementos necesarios para una acción de control: tres módulos principales correspondientes a la acción proporcional, integral y derivativa. Dos módulos que permiten recrear la acción de retroalimentación de una acción de control, un sumador inversor, un sumador restador, y un módulo correspondiente al convertidor F-V el cual es necesario para el tratamiento de plantas como un motor DC. Por último se resalta la inclusión de una tarjeta de adquisición de datos basado en la plataforma de Arduino con una interacción hacia el programa Matlab.
- El comportamiento de los controladores dentro de sus módulos respectivos, se verifico haciendo cambios en los valores de sus componentes externos demostrando la efectividad en su funcionamiento, pero deja claro que los parámetros internos de los controladores analógicos solo pueden ser cambiados a partir de estos componentes externos y no pueden ser modificados a través de la tarjeta de adquisición de datos.
- Los módulos funcionan según lo esperado a su diseño y pueden usarse para la demostración de su análisis individual y combinado, quiere decir este ultimo que se puede realizar controladores PI, PD y PID, sin embargo este tipo de configuraciones no se alcanzo a implementar con el material de apoyo diseñado.
- El manual de usuario para el manejo de los módulos dentro de la plataforma para realizar acciones de control, es el complemento que debe

incluir todo material educativo con información clara y necesaria para identificar y comprender las partes y el manejo que conforman estos desarrollos. Por más que se logre la materialización de un dispositivo, si este no contiene un soporte de su manejo no lograra su cometido, que en este caso es aumentar el interés y convertirse en una herramienta de apoyo para el aprendizaje del estudiante.

- La tarjeta para la adquisición de datos, que fue basada en la plataforma Arduino, cumple de forma básica la función de adquirir y registrar los datos de una planta Física, para un posterior análisis. Los datos obtenidos en las pruebas demuestran que debe mejorarse algunos aspectos de configuración de la tarjeta para poder obtener datos con una mejor resolución y por consiguiente una mejor calidad en los datos.
- La elaboración artesanal de los circuitos impresos para los módulos conlleva a aumento en el tiempo en fabricación, además la probabilidad de tener fallas como cortos eléctricos o caminos abiertos, arriesgando el funcionamiento y la efectividad de estos. Los módulos como versión de prueba pueden, consolidarse elaborándose nuevamente en circuitos impresos hechos a máquina.

## **TRABAJO FUTURO**

Como propuesta se puede diseñar un material de apoyo para los controladores digitales que permita evidenciar las características similares y diferentes que se tienen frente a los controladores analógicos, aprovechando la plataforma realizada en este trabajo, enfocándose en el uso de la tarjeta Arduino, ya que incluye en el entorno de Simulink de Matlab versión 2012 una librería para la tarjeta MEGA 2560 en la que facilita la creación de estos controladores digitales.

## BIBLIOGRAFÍA

- BLANCO, Rosalba; VARGAS, Mónica. Impacto generado por la cartilla tecnológica en niños de segundo grado de primaria en el área de tecnología. Tesis de grado. Corporación universitaria Minuto de Dios. 2007. 57p.
- BOYLESTAD, R. L., & NASHESKY, L. Electrónica: Teoría de Circuitos. Sexta edición. México: Prentice-Hall.1997. 949p.
- COUGHLIN, Robert. F; DRISCOLL, Frederick. Amplificadores Operacionales Y Circuitos Integrados Lineales. México: Prentice-Hall. 1993. 538p.
- CUENCA, Michel; CHAPARRO, Néstor. Material de apoyo para actividades de trabajo independiente en electrónica analógica con amplificadores operacionales. Tesis de grado. Universidad Pedagógica Nacional. 2012. 68p.
- FERRO, Yenny; GIRALDO, Christian. Diseño y construcción de un controlador PID digital para un levitador magnético. Tesis de grado. Universidad Pedagógica Nacional 2011. 72p.
- FLOYD, Thomas L. Dispositivos electrónicos. Octava edición. México: Pearson Educación. 2008. 982p
- GABRIUNAS, Vytautas. Apuntes de electrónica. Bogotá, Bogotá D.C., Colombia: UNIVERSIDA DISTRITAL Francisco José de Caldas. 1999. 340 p.
- HERNADEZ, Ricardo. Introducción a los sistemas de control: Conceptos, aplicaciones y simulaciones con MATLAB. México: Pearson Educación. 2010. 513 p
- HERNANDEZ, Cindy; DEL CARMEN, Adriana. Control PID de la velocidad de una banda transportadora para la clasificación de objetos. Tesis de grado. México: Universidad Autónoma De Zacatecas. 2008. 82p.
- JIMÉNEZ, Félix; RIVERO, Javier. Diseño y construcción de una tarjeta programable de adquisición, procesamiento de datos y control. Tesis de maestría en Mecatrónica México: Cenidet. 2006. 149p.
- KUO, Benjamín. Sistemas de Control. Séptima Edición. México: Prentice Hall. 1996. 897 p.
- MARTÍNEZ, Elkin. Identificación de sistemas dinámicos lineales utilizando modelos de caja negra: arx, armax, output error y box jenkins. Tesis de grado. Universidad Pedagógica Nacional. 2011. 52p.

OGATA, Katsuhiko. Ingeniería de Control Moderna. Cuarta Edición. España: Pearson Educación. S.A. 2003. 965 p.

PERTENCE JUNIOR, Antonio. Amplificadores Operacionales Y Filtros Activos. McGraw-Hill. 1991. 295p

POMPEYA, Virginia. "Blended Learning". La importancia de la utilización de diferentes medios en el proceso educativo. Tesis de Magíster en Tecnología Informática aplicada en Educación. Argentina: Universidad Nacional De La Plata. 2008. 160 p.

VARGAS, Marta. Materiales Educativos: Procesos y resultados. Bogotá, Colombia: Convenio Andrés Bello. 2003 279 p.

VARGAS, Leidy; RUBIO, Liliana. Diseño de una estrategia didáctica, sobre seguridad industrial en las áreas de mecánica y electrónica de la modalidad de mecatrónica de la escuela tecnológica instituto técnico central. Tesis de grado. Universidad Pedagógica Nacional. 2010. 216 p.

## ANEXOS

ANEXO A- Guía del Usuario para el uso del material de apoyo para el diseño y la aplicación de controladores PID.

ANEXO B- Stectc MATLAB\_ARDUINO\_DAQ para programar tarjeta.

ANEXO C- Software de entorno grafico interactivo DAQ\_UPN\_ARD

ANEXO D- Fotos de material de apoyo

ANEXO E- Plan de estudios de licenciatura en electrónica de Universidad Pedagógica Nacional.