

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
SEDE VIÑA DEL MAR – JOSÉ MIGUEL CARRERA

MÓDULO INTERACTIVO PARA CONTROL DE PROCESOS

Trabajo de Titulación para optar al Título
Profesional de Ingeniero de Ejecución en
CONTROL E INSTRUMENTACIÓN INDUSTRIAL

Alumno:

Álvaro Enrique Morales Pinto

Profesor Guía:

Ing. Sergio Riquelme Bravo

2019

RESUMEN

KEYWORDS: SISTEMAS – SOFTWARE NI MULTISIM – SOFTWARE PROTEUS

Este informe expone la manera en que se puede mejorar el traspaso de información desde el docente hacia el alumno de alguna manera práctica, sólida, aterrizada y digerible, es decir, explicar y detallar la forma en que se puede realizar una maqueta o módulo, que para esta situación simulará sistemas de proceso industrial de orden 1 y 2, en donde el alumnado podrá interactuar con dicha maqueta, para poder observar los resultados que en clases se respaldan en papel y ahora se respaldarán en la memoria práctica e interactiva de cada alumno.

Exponer y explicar no es el único propósito de este informe, sino también demostrar que se puede lograr una simulación correcta y exacta por medio de electrónica (circuito diseñado a base de componentes electrónicos, específicamente amplificadores operacionales) resultando una maqueta que puede ser intervenida y modificada por el usuario para respaldar los temas teóricos en temas prácticos o aterrizados gracias a este módulo interactivo, que puede ser modificado físicamente, reflejando sus cambios en la función de transferencia equivalente a los sistemas estudiados.

ÍNDICE

Resumen	
SIGLAS Y SIMBOLOGÍA	
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1: MÓDULO DEMOSTRATIVO PARA CONTROL DE PROCESOS	2
1. ANTECEDENTES GENERALES	3
1.1. LA UNIVERSIDAD (UTFSM)	3
1.1.1. Casa Central Valparaíso	4
1.1.2. Sede Viña del Mar	4
1.1.3. Campus Vitacura, Santiago	4
1.1.4. Campus San Joaquín, Santiago	4
1.1.5. Sede Concepción	5
1.1.6. Campus Guayaquil (Ecuador)	5
1.2. PROGRAMAS VESPERTINOS EN LA SEDE VIÑA DEL MAR	5
1.2.1. Ingeniería en Construcción, con Licenciatura en Ingeniería	7
1.2.2. Ingeniería en Prevención de Riesgos Laborales y Ambientales, con Licenciatura en Ingeniería	7
1.2.3. Ingeniería de Ejecución en Gestión de la Calidad	7
1.2.4. Ingeniería de Ejecución en Gestión Industrial	7
1.2.5. Ingeniería de Ejecución en Mantenimiento Industrial	8
1.2.6. Ingeniería de Ejecución en Sistemas Computacionales	8
1.2.7. Nivelación Ciencias Básicas para Técnicos de Nivel Superior (TNS)	8
1.2.8. Ingeniería (E) en Control e Instrumentación Industrial	8
1.2.8.1. Control de Procesos	10
1.3. PROBLEMÁTICA ACTUAL	13
1.3.1. Definición del problema	13
1.4. SOLUCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA	14
1.4.1. Amplificador Operacional	15
1.5. SISTEMAS DE CONTROL	17
1.5.1. Sistemas de primer orden	18
1.5.2. Sistemas de segundo orden	20

1.6.	COMENTARIOS ADICIONALES	22
1.7.	OBJETIVOS	23
1.7.1.	Objetivo general	23
1.7.2.	Objetivos específicos	23
CAPÍTULO 2: FUNCIONES Y CIRCUITOS SIMULADORES DEL MÓDULO		24
2.	DESARROLLO TÉCNICO DE LA SOLUCIÓN	25
2.1.	SISTEMAS INCORPORADOS EN EL MÓDULO DEMOSTRATIVO	25
2.2.	DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SISTEMA DE SEGUNDO ORDEN	26
2.2.1.	Circuito electrónico del sistema de segundo orden	27
2.2.1.1.	Bloque sumador inversor	29
2.2.1.2.	Bloque integrador 1	29
2.2.1.3.	Bloque de retroalimentación con ganancia variable	30
2.2.1.4.	Bloque integrador 2	31
2.2.1.5.	Bloque de retroalimentación unitaria	31
2.3.	DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SISTEMA DE PRIMER ORDEN	32
2.3.1.	Circuito electrónico del sistema de primer orden	33
2.3.1.1.	Bloque sumador	35
2.3.1.2.	Bloque RC	36
2.3.1.3.	Bloque inversor	37
2.4.	CIRCUITO GENERAL	37
CAPÍTULO 3: RESULTADOS OBTENIDOS Y COSTOS ASOCIADOS		40
3.	RESULTADOS OBTENIDOS Y COSTOS ASOCIADOS	41
3.1.	RESULTADOS OBTENIDOS	41
3.1.1.	Resultados obtenidos en modelación de los sistemas	42
3.1.2.	Resultados obtenidos en la simulación virtual de los sistemas	43
3.1.3.	Resultados de la implementación real y prueba de los sistemas	45
3.2.	ESTUDIOS DE COSTOS	47
3.2.1.	Costos de estudio y desarrollo del proyecto	47
3.2.2.	Costos de material, componentes e implementación del proyecto	48
3.2.2.1.	Base del diseño	49
3.2.2.2.	Estructura externa	50
3.2.2.3.	Componentes electrónicos	51

3.2.2.3.1. Amplificador Operacional LM741	52
3.2.2.3.2. Resistencias y Potenciómetros	53
3.2.2.3.3. Condensadores y Trimmers	54
3.2.2.3.4. Switches	56
3.2.2.4. Elementos de conexión	56
CONCLUSIONES	58
BIBLIOGRAFÍA	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Procedencia de estudiantes que entran a los programas vespertinos.	6
Figura 1-2. Malla curricular de Ing. (e) en Control e Instrumentación Industrial.	9
Figura 1-3. Programa oficial de Control de Procesos.....	12
Figura 1-4. Estructura típica de un sistema de control.....	17
Figura 1-5. Control de luminaria pública.....	18
Figura 1-6. Respuestas de sistemas de 1° orden a entradas escalón e impulso, respectivamente	20
Figura 1-7. Respuestas de sistemas de 2° orden con sus correspondientes $sh_i(\xi)$	21
Figura 2-1. Función de transferencia típica de los sistemas de segundo orden.....	26
Figura 2-2. Desglose de la función modelo de sistemas de segundo orden para equivalencia electrónica y posterior simulación del sistema.	27
Figura 2-3. Descomposición final en diagrama de bloques del Sist. de segundo orden.	28
Figura 2-4. Diagrama de bloques traducido a equivalencia electrónica.....	28
Figura 2-5. Equivalencia electrónica (amplificador operacional) del diagrama del bloque sumador.	29
Figura 2-6. Equivalencia electrónica (amplificador operacional) del diagrama del bloque integrador 1.....	30
Figura 2-7. Equivalencia electrónica (amplificador operacional) del diagrama de retroalimentación con ganancia regulable.	30
Figura 2-8. Equivalencia electrónica (amplificador operacional) del diagrama de bloque del integrador 2.....	31
Figura 2-9. Equivalencia electrónica del diagrama de bloque de retroalimentación unitaria.	32
Figura 2-10. Desglose de la función modelo de sistemas de primero orden para equivalencia electrónica y posterior implementación.	32
Figura 2-11. Circuito RC para modelación del sistema de primer orden.....	33
Figura 2-12. Diagrama de bloques traducido a equivalencia electrónica ($RC=\tau$).	35
Figura 2-13. Análisis equivalente del diagrama de bloques a ecuación del voltaje en la fuente (V_f).	36
Figura 2-14. Equivalencia del diagrama de bloques a la malla RC.....	36
Figura 2-15. Circuito del amplificador inversor con ganancia unitaria.....	37

Figura 2-16. Circuito completo, simulador de sistema de primer orden.....	38
Figura 2-17. Circuito completo, simulador de sistema de segundo orden.....	38
Figura 2-18. Circuito completo incorporado en el módulo, simulador de sistema de primer y segundo orden.....	39
Figura 3-1. Resultado final de la descomposición de la función de transferencia de primer orden, para equivalencia en circuito electrónico.	42
Figura 3-2. Resultado final de la descomposición de la función de transferencia de segundo orden, para equivalencia en circuito electrónico.....	42
Figura 3-3. Respuesta del circuito simulador de 1° orden, simulado en Multisim.	44
Figura 3-4. Respuesta del circuito simulador de 2° orden, simulado en Multisim.	44
Figura 3-5. Resultado de las placas PCB diseñada en Proteus.....	45
Figura 3-6. Resultado final de todo el proceso, respuestas del módulo a ambos sistemas y módulo físico con sus elementos de interacción.	46
Figura 3-7. Estilos de placas PCB con circuitos impresos a modo de ejemplos.....	49
Figura 3-8. Estilo de caja o carcasa que contendrá toda la electrónica del módulo.	51
Figura 3-9. Amplificador Operacional LM741 de propósitos generales.	52
Figura 3-10. Resistencias y potenciómetros utilizados en el circuito diseñado.	54
Figura 3-11. Condensadores y trimmers utilizados para el circuito.	55
Figura 3-12. Switches utilizados en el circuito para carga y descarga.	56
Figura 3-13. Bornes de conexión múltiples para módulo demostrativo.	57

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1. Requerimientos del proyecto.....	48
Tabla 3-2. Costos asociados a la fabricación de placas PCB.	50
Tabla 3-3. Costos estándares de cajas modulares plásticas.	51
Tabla 3-4. Comparación de Amplificadores Operacionales.....	53
Tabla 3-5. Costos asociados y comparación de elementos resistivos.	54
Tabla 3-6. Costos asociados a condensadores y arreglos capacitivos.	55
Tabla 3-7. Costos de switches necesarios para el inicio y conmutación del sistema.	56
Tabla 3-8. Bornes necesarios para la interconexión del módulo.....	57

SIGLAS Y SIMBOLOGÍA

A. SIGLA

UTFSM	: Universidad Técnica Federico Santa María.
USM-JMC	: Universidad Santa María, Sede José Miguel Carrera.
TNS	: Técnico de nivel superior.
PSU	: Prueba de selección Universitaria.
Ing	: Ingeniería.
A.O.	: Amplificador Operacional.
CLP	: Peso chileno.
US\$: Dólar estadounidense.
UF	: Unidad de Fomento.
PCB	: Board Circuit Printed, placa de circuito impreso.
Te	: Tiempo de estabilización.

B. SIMBOLOGÍA

Ω , $K\Omega$, $M\Omega$: Ohm, unidad de medida de Resistencia eléctrica.
$>$, $<$ o $=$: Mayor, menor o igual que.
mm^2	: Milímetros cuadrados.
V (+, -)	: Voltaje, positivo, negativo.
(s)	: Función de Laplace.
(t)	: Función del tiempo.
\$: Peso Chileno.

INTRODUCCIÓN

El presente informe tiene enfoque en el sector pedagógico que envuelve la Universidad Federico Santa María, en la sede de Viña del mar, específicamente en la carrera Vespertina de Ingeniería en Control e Instrumentación, la que imparte un ramo llamado "Control de Procesos", donde la función principal del ramo es explicar, analizar y comprender los procesos en los cuales participa el control, es decir, cualquier proceso industrial y no industrial que es controlado de alguna forma para obtener los resultados esperados, lo que en conjunto se denomina sistemas.

Las características principales de estos sistemas son resumidos en dos grandes ramas: los sistemas de primer orden y los sistemas de segundo orden, ya que los siguientes (de tercer, cuarto,...n orden) se pueden modelar efectivamente a los sistemas de segundo orden, estos responden de similar manera y es una aproximación bastante exacta.

Para continuar, se presenta la manera en que estos sistemas se podrían simular con algún medio interactivo, pero físico (tangible) para permitir la mejor interacción del alumnado frente a este importante ramo que presenta materias bastante abstractas, dando paso a la equivalencia desde Diagramas de Bloques hasta la electrónica aplicable para la simulación de estos sistemas dentro de un módulo descrito en el segundo capítulo del informe.

Finalmente se demuestra y compara visualmente los resultados que cada sistema simulado puede ofrecer, que para términos pedagógicos, permite la fácil observación de las respuestas de estos sistemas y la forma en que varía dependiendo los parámetros que se modifican en la electrónica utilizada y así aterrizar los conocimientos escritos en papel, de manera práctica para digerir de mejor manera temas como: cambio del valor del escalón de entrada (para observar seguimiento de la referencia), modificación del ζ (factor de amortiguación), variación de polos (tiempo de estabilización, overshoot y undershoot).

CAPÍTULO 1: MÓDULO DEMOSTRATIVO PARA CONTROL DE PROCESOS

1. ANTECEDENTES GENERALES

En este capítulo se introducirá el contexto general de la propuesta que nace en la necesidad de reforzar una asignatura de gran relevancia en la Carrera de Ing. (e) en Control e Instrumentación, comenzando por el desglose de la estructura principal de la Institución hasta lograr enfocar la propuesta en la asignatura de Control de Procesos explicando su estructura y promoviendo la necesidad de una mejora útil a la labor del profesor frente a la demostración de ciertas materias en esta asignatura.

1.1. LA UNIVERSIDAD (UTFSM)

Universidad técnica Federico Santa María, un legado dejado por el gran patriota Federico Santa María Carrera nacido un 15 de agosto de 1845 en la antes llamada calle El Cabo hoy Esmeralda, sector de la elite porteña, sexto hermano de nueve, hijo de Juan Santa María hombre de negocios y Magdalena Carrera Aguirre perteneciente a uno de los clanes más destacados en la emancipación de nuestra nación, por otra parte su abuelo paterno era primo hermano del prócer de la patria Don José Miguel Carrera Verdugo de quien hereda sus ideales plasmados más tarde en sus hermosas obras.

Esta universidad, campus de Casa Central fue inaugurada en 1931 por el Albacea de Don Federico Santa María Carrera quien trajo por los 10 primeros años a profesores únicamente extranjeros por petición de Federico. Inicialmente la Universidad contaría con una Escuela de Artes y Oficios, una Escuela de Contramaestre de Obras, un colegio de Ingenieros y un Instituto Superior de Investigación Científica, en las cuales cuatro facultades se harían cargo de la universidad: Matemáticas, Comercio, Finanzas y Ciencias (Físicas, Químicas y Biológicas).

Hoy en día el tradicional sello de la Universidad Santa María atrae estudiantes de diferentes partes del mundo, actualmente consta con alrededor de 18.514 alumnos entre sus distribuidas sedes y campus (encuesta del 2012) además de 250 profesores de planta y otros 100 de jornada parcial.

Como es de saber esta Institución busca la excelencia académica, sin complicar la admisión de aquellos que reúnan las condiciones (actitudes y aptitudes) considerando alguna dificultad socioeconómica. Al igual que la mayoría de la Universidades tradicionales, su admisión se basa en los resultados de la PSU (prueba de selección universitaria).

La Institución actualmente dirigida por su Rector Darcy Fuenzalida O'Shee, cuenta con variadas sedes a lo largo de nuestro país e incluso sede en Ecuador Guayaquil.

1.1.1. Casa Central Valparaíso

Ubicada a los pies del cerro Placeres de Valparaíso, frente al mar, con alrededor de 7 hectáreas de espacio para desarrollar sus conocimientos y recibiendo cerca de 5.000 estudiantes. Campus más importante en términos de cantidad de alumnos e infraestructura docente en el cual se imparten todos los doctorados dictados en esta Universidad.

- Ingeniería Civil
- Ingeniería
- Arquitectura
- Licenciaturas

1.1.2. Sede Viña del Mar

Conocida como la sede José Miguel Carrera ubicada en La Avenida Federico Santa María 6090 en el límite de las comunas Quilpué y Viña del Mar. Cuenta con 2.800 alumnos entre carreras técnicas, Ingenierías y Pos-títulos. Imparte las siguientes carreras:

- Técnicos Universitarios
- Ingeniería con licenciatura/ejecución
- Ingenierías en Ejecución
- PEIV (Programa de Ingenierías Vespertinas)

1.1.3. Campus Vitacura, Santiago

Ubicado en la comuna de Vitacura Santiago alberga más de 1700 estudiantes, también posee en su interior la Academia de Ciencias Aeronáuticas (ACA) alianza suscrita por la Universidad con LAN Airline. Cuenta con carreras como:

- Ingeniería Civil
- Ingeniería
- Ing. en Aviación Comercial / Piloto Comercial
- Técnico Universitario en Mantenimiento Aeronáutico

1.1.4. Campus San Joaquín, Santiago

Instalado en la localidad de San Joaquín, avenida Vicuña Mackenna 3939, años atrás ubicadas las instalaciones de Standart Electric Chile. Actualmente se encuentra en proceso de expansión con una dote de 2100 estudiantes aproximadamente, consta de

un edificio A y uno B los cuales contienen salas, edificios, departamentos y auditorios, laboratorios, bibliotecas y oficinas respectivamente. Dicta las siguientes carreras:

- Ingeniería Civil
- Ingeniería ejecución
- Licenciaturas
- Ingenierías

1.1.5. Sede Concepción

Ubicada en calle Arteaga Alemparte 943 en la Comuna de Hualpén, Talcahuano, nombrada sede “Rey Balduino de Bélgica” por los aportes recibidos antiguamente por el Rey de Bélgica; imparte una variedad de carreras como:

- Ingenierías
- Continuidad de Estudios
- Técnico Universitario

1.1.6. Campus Guayaquil (Ecuador)

Creado en 1996 Ecuador con propósitos de internacionalización de la Universidad Federico Santa María cuenta con más de 1.300 estudiantes insertos en distintos niveles. En este campus se imparten las siguientes carreras:

- Ingeniería
- Licenciaturas

1.2. **PROGRAMAS VESPERTINOS EN LA SEDE VIÑA DEL MAR**

Ya creada la Universidad Técnica Federico Santa María (Casa Central), esta comienza con sus planes de expansión que en conjunto con el Banco Internacional del Desarrollo (BID), Fundación Ford, Dunwoody Industrial e INDAP logrando en 1971 construir y equipar la hoy conocida sede de Viña del Mar “ José Miguel Carrera”.

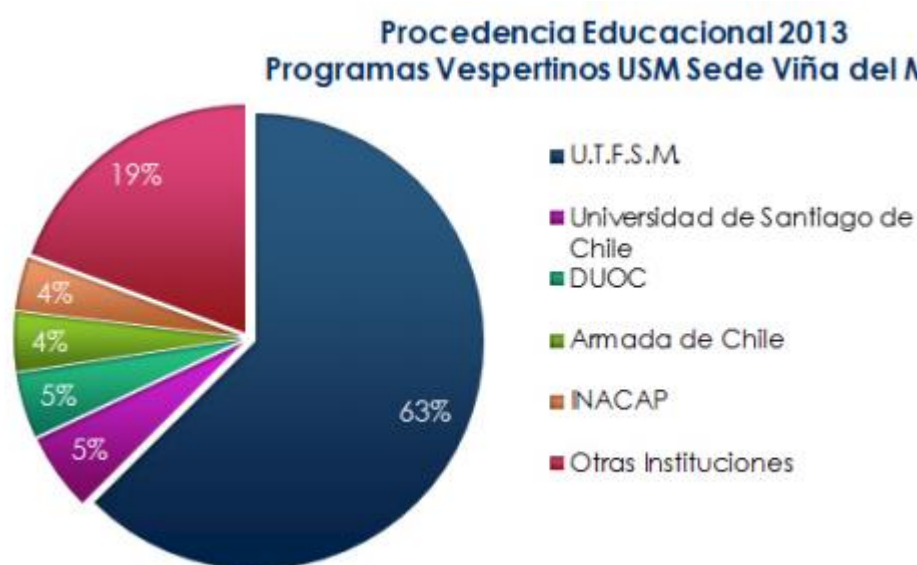
La Universidad Santa María Sede Viña del Mar cuenta actualmente con un directorio formado por 4 integrantes donde el director de Sede es don Bruno Dondero Lencioni , y otros 7 integrantes dedicados a secretarías y jefaturas de la sede, ofrece a los alumnos la posibilidad (al igual que las demás sedes de la Universidad) de formarse completa e integralmente con un marcado y reconocido sello científico tecnológico además de una sólida componente humanista. Consta de una lista de primer nivel en lo que respecta a Docentes y Académicos, por otra parte posee el mejor apoyo en material e infraestructura de estudio y trabajo, todo esto fomentando y permitiendo pilares fundamentales en la formación profesional de sus alumnos.

Entre los programas que presenta y ofrece la USM en JMC se extiende a horarios Vespertinos para sus estudiantes que desean un mayor nivel de conocimiento integrándolos a Ingenierías de Ejecución Vespertinas las que hace referencia a horarios entre las 18:45 y 22:00 horas, para la adaptación a su alumnos la Universidad también ofrece distintas modalidades, entre ellas:

- Modalidad Residencial, clases viernes y sábados (mañana y tarde) cada dos semanas.
- Modalidad Modular, clases sábados (mañana y tarde).
- Modalidad Executive.

En el caso que el alumno pertenezca a alguna sede o campus de la Universidad, esta le permitirá realizar sus estudios ingenieriles en un tiempo de 3 años referente a la malla curricular que posee, a diferencia de los alumnos que vengan de alguna otra universidad o Institución de educación superior deben realizar 4 años de los cuales el primer año corresponde a un estándar de nivelación para poder desenvolverse de mejor manera en las asignaturas de ciencias básicas que imparte la carrera que este haya decidido.

Estos programas de Ingeniería han evolucionado positivamente en el tiempo logrando un aumento del 23% desde el año 2009. Una de las características más destacables de estos programas es que se origina en base a la necesidad de los estudiantes de continuar sus estudios, donde el 63% de la totalidad de matriculados en estos programas son de carreras técnicas de la sede JMC, como muestra la figura 1-1.



Fuente: Departamento de gestión de la UTFSM

Figura 1-1. Procedencia de estudiantes que entran a los programas vespertinos.

En los programas impartidos por la Universidad se tiene una variedad de carreras del ámbito científico tecnológico enumeradas a continuación:

1.2.1. Ingeniería en Construcción, con Licenciatura en Ingeniería

Genera Profesionales de la Ingeniería, con sólidos conocimientos en Construcción, tecnológica y administrativa. Este profesional puede desempeñar cargos como Ing. Residente, Director de Obras, Director de Personal o Recursos humanos. Capaz de establecer procedimientos en temas de recursos humanos, materiales y financieros que permitirán el mejor rendimiento en la obra de construcción, todo esto planificando, programando, controlando, administrando y dirigiendo de forma óptima.

1.2.2. Ingeniería en Prevención de Riesgos Laborales y Ambientales, con Licenciatura en Ingeniería

Genera Profesionales con sólida formación en temas de tecnología, que puede diseñar, mantener e implementar Sistemas Integrados de Gestión en cualquier tipo de organización. Líder frente al entorno, flexible y ocurrente de iniciativas para gestionar proyectos de su especialidad. Este profesional tiene cabida en cualquier ambiente, empresa, institución y servicios públicos o privados.

1.2.3. Ingeniería de Ejecución en Gestión de la Calidad

Este profesional participa y lidera los procesos de control y gestión de calidad tanto a nivel de producción o calidad, incorporando un valor agregado por medio de mejoras continuas, monitoreando y evaluando las variables que afectan el desempeño proponiendo mejoras y utilizando normativas internas, nacionales e internacionales en proceso de gestión y control de calidad.

1.2.4. Ingeniería de Ejecución en Gestión Industrial

Ingeniero del área de administración, su formación le permite desenvolverse en ámbitos administrativos e industriales, puede asumir cargos como Jefe administrativo, de Personal o de Departamento. De igual manera puede trabajar con recursos humanos, materiales y financieros permitiéndole responder a los cambios que sufre la empresa.

1.2.5. Ingeniería de Ejecución en Mantenimiento Industrial

Netamente su campo se enfoca en las empresas industriales de la región y del país, se desempeñan como técnico, pero su título les permite nuevas oportunidades de desarrollo profesional. Este Ingeniero puede planificar, programar y controlar las actividades de mantenimiento de máquinas y equipos con alto grado de eficiencia y responsabilidad.

1.2.6. Ingeniería de Ejecución en Sistemas Computacionales

Forma Profesionales con formación tecnológica y elementos de gestión, capacitado para integrar y/o dirigir equipos computacionales, para ello debe aplicar los principios de ingeniería planificando, evaluando, seleccionando, instalando, adaptando y administrando sus configuraciones en lo que respecta a hardware, comunicaciones y software de sistemas asociados. Estos Ingenieros se distinguen notablemente en el énfasis de su plan de estudios, quienes pueden comprender y utilizar nuevos conocimientos generados en la especialidad.

1.2.7. Nivelación Ciencias Básicas para Técnicos de Nivel Superior (TNS)

Este curso de nivelación en Matemáticas y Física se dispone para alumnos que tengan alguna carrera técnicas del área científica y/o tecnológica con el fin de que puedan continuar sus estudios en alguna ingeniería vespertina.

1.2.8. Ingeniería (E) en Control e Instrumentación Industrial

Como se informó en el punto 1.2, la Universidad imparte la carrera de Ingeniería en Control e Instrumentación, la cual ofrece condiciones bastante beneficiarias al estudiante de esta institución como lo son los sólidos conocimientos de procesos industriales que usen distintos tipos de instrumentación y cualquier tipo de control ya sea manual y más importante y actual aún el control automático, reconociendo su formación tecnológica e integral le permite desenvolverse en cualquier entorno de ambiente relacionado a electrónica, tecnología, procesos y avances constantes. Además la institución prepara a sus profesionales para que puedan ofrecer asistencia técnica, asesorías y puedan moldearse a cualquier cambio, modificación o avance en los procesos

involucrados en su área permitiendo la máxima eficacia y/o eficiencia según lo requiera la Industria con el permiso de evaluar, seleccionar y adaptar cualquier tecnología a los procesos nuevos integrados en el campo laboral.

La malla curricular que contiene este programa, permite a la institución formar el nivel de ingenieros que necesita nuestra sociedad para el progreso y constante evolución con las tecnologías, en un periodo de 3 años dividida en 6 semestres como lo indica la figura 1-2.

1° SEMESTRE	2° SEMESTRE	3° SEMESTRE
Matemática	Física	Análisis de Sistemas Lineales
Computación Aplicada	Análisis de Redes Eléctricas	Instrumentación y Automatización
Estadística Aplicada	Estructura de Computadores	Electrónica Análoga-Digital
4° SEMESTRE	5° SEMESTRE	6° SEMESTRE
Control de Procesos	Control Programado	Proyecto y Titulación
Micro procesadores y Micro controladores	Comunicación de Datos	Redes Computacionales
Electro Hidroneumática	Evaluación de Proyectos	Administración de Empresas
	Gestión y Control de Calidad	

Fuente: Base de datos informativos de la UTFSM

Figura 1-2. Malla curricular de Ing. (e) en Control e Instrumentación Industrial.

La malla que presenta la figura 1-2 contiene asignaturas de carácter administrativos como Estadística Aplicada, Administración de Empresas, entre otros y también dicta asignaturas de especialidad como lo son computación aplicada, Instrumentación y Automatización, Control de Procesos, Control programado, entre otros, en lo cuales se entregan variados conocimientos sobre cada área abarcada en su malla curricular, por lo tanto se espera una conformidad de parte del estudiante que normalmente se logra en todos los cursos, pero que nunca está cerrada a observaciones constructivas que puedan aportar al crecimiento y progreso de la pedagogía universitaria y en pos del mejoramiento de la calidad de cada una de sus asignaturas, permitiendo así la propuesta de mejora a alguna asignatura que presente alguna dificultad demostrativa o que por sus características de estudio no sean fáciles de discernir y necesiten un mayor

tiempo de procesamiento para lograr su comprensión y así trabajar sobre bases sólidas fundadas en una pedagogía entregable, entendible, en el que se pueda observar claramente su desarrollo y propósito, para finalmente lograr un correcto y limpio traspaso de información entre estudiante y docente, un ejemplo claro de ello es la asignatura “Control de Procesos”, esta asignatura entrega un conocimiento bastante interesante y sólido, sobre el funcionamiento de los sistemas y sus aplicaciones, además de otros contenidos que pudieran ser apoyados por mejoras realizables.

1.2.8.1. Control de Procesos

Como fundamental base de la Ingeniería en Control e Instrumentación industrial, los estudiantes cursan una asignatura de relevante importancia en la preparación que necesita cualquier ingeniero relacionado a las ciencias tecnológicas. Esta asignatura corresponde a “Control de Procesos”, la que enfoca el conocimiento en el “Control” que es parte de la profesión que ejerce este Ingeniero (e) en Control e Instrumentación Industrial, por lo tanto es una asignatura de particular relevancia que debe ser completamente transmitible, procesable, entendible y aplicable, es decir, se debería tratar con especial connotación dentro del currículo que posee el ingeniero que se pretende formar.

En rasgos generales el Control de Procesos permite desarrollar ideas, conceptos y soluciones de ingeniería para la industria, la ciencia y la salud dependiendo del ámbito que se desee desarrollar. Esta busca la automatización de procesos, máquinas u otros sistemas con la mínima intervención de personas permitiendo mayor seguridad, mejoramiento de calidad y precisión en la entrega y recepción de información (datos) e implementación de controles o sistemas tecnológicos.

El objeto de esta asignatura es demostrar y enseñar que los procesos buscan generar un producto final, ya sea directo o indirecto frente al producto que ofrece la industria en la que se esté trabajando, cumpliendo con las especificaciones y niveles de calidad exigidos por el mercado y establecidos por la industria con anterioridad. Todo lo anterior es gracias al exhaustivo control de todas las condiciones que afecten el proceso en el tiempo, términos simples, la misión es corregir todas las desviaciones en relación a valores preestablecidos, buscando resultados óptimos requeridos en el producto. Esta asignatura busca y enseña:

- Mantener el sistema estable, independiente de perturbaciones y desajustes.
- Conseguir las condiciones de operación objetivo de forma rápida y continua.
- Trabajar correctamente bajo un amplio abanico de condiciones operativas y en distintos puntos de operación.
- Manejar las restricciones de equipo y proceso de forma precisa.

El bucle de control típico estará formado por los siguientes elementos, a los que habrá que añadir el propio proceso.

- Elementos de medida (Sensores): Generan una señal indicativa de las condiciones de proceso.
- Elementos de control lógico (Controladores): Leen la señal de medida, comparan la variable medida con la deseada (punto de consigna) para determinar el error, y actúan sobre el sistema realizando el ajuste necesario para reducir o eliminar el error.
- Elementos de actuación (Válvulas y otros elementos finales de control): Reciben la señal del controlador y actúan sobre el elemento final de control, de acuerdo a la señal recibida.

El programa que sigue la asignatura de Control de Procesos se presenta a continuación:

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
INGENIERIA DE EJECUCIÓN EN CONTROL E INSTRUMENTACIÓN INDUSTRIAL

Símbolo Asignatura:	CPR000	Símbolo Carrera:	PIECII	Hr. Teóricas semana:	4
Asignatura :	CONTROL DE PROCESOS			Hr. Prácticas semana:	0
Requisito(s):	Análisis de Sistemas Lineales			Hr. Total semana:	4

OBJETIVO(s) Al aprobar la asignatura, el alumno será capaz de:

1. Aplicar y evaluar procesos de control de ingeniería.
2. Desarrollar principios de control de procesos en industrias.

CONTENIDOS:

1. Introducción al control de procesos.
2. Características del proceso.
3. Control de dos posiciones. Tipos de controladores.
4. Control integral, proporcional y derivativo.
5. Principios de sintonización.
6. Métodos avanzados de control. Sistemas de control digital.
7. Control continuo analógico y digital.

METODOLOGÍA DE TRABAJO:

Expositiva, con análisis de casos prácticos.

EVALUACIÓN:

Certámenes.

BIBLIOGRAFÍA:

1. Phillips, Charles L., Troy Tagle, H. "Sistemas de control digital". Edit. Gustavo Gili, 1987
2. Dorf, Richard C. "Sistemas modernos de control". Edit. Addison-Wesley Iberoamericana, 1989
3. Stephanopoulos, George. "Chemical process controls an introduction to theory and practice". Edit. Prentice-Hall, 1984
4. Ogata, Katsuhiko. "Ingeniería de Control Moderna". Edit. México: Prentice Hall, 2003.
5. International Conference and Chemical Process Control. Rawlings, James B., ed.; "Chemical process control -VI: assessment and new control directions for research". Edit. New York: American Institute of Chemical Engineers, 2002.

Elaborado por: Juan Bravo Mardones – Oscar Medel Hidalgo
Aprobado por: Consejo Normativo de Sedes, 21 Abril de 2005
Actualizado por:
Observaciones:



Fuente: Departamento administrativo de la UTFSM, programa PIECII

Figura 1-3. Programa oficial de Control de Procesos.

Como se observó en la figura 1-3 este programa contiene 4 horas totales por semana, y estas cuatro horas son únicamente teóricas, por lo tanto, la pretensión de los contenidos del programa (Contenidos 4, 5, y 6.) no pudiesen ser concretadas en su totalidad, por ende, nacen intenciones e ideas para aportar al mejoramiento de la forma en que se transmite el conocimiento aplicándolo de forma práctica.

1.3. PROBLEMÁTICA ACTUAL

Como se señaló en el punto anterior, acerca de la programación en la asignatura de Control de Procesos, se identifica una serie de falencias y/o ligereza frente a la entrega de conocimientos sólidos (prácticos) como los son la clara transmisión de contenidos en base a la fácil demostración de sus procesos, la observación visual de los cambios que se producen en el área trabajada y la indudable aplicación de esta área de la ciencia a su entorno de utilidad. Esta asignatura carga un elemental contenido para los estudiantes que se desempeñen en estas labores o estudien esta carrera de ingeniería, ya que tiene directa relación con lo que pretenden formar estas carreras profesionales, más aún, considerando que la carrera en cuestión se denomina: “Ing (e) en Control e Instrumentación Industrial”. Por este motivo es que es necesario que esta asignatura sea completamente digerible para los estudiantes de esta carrera especialmente, ya que será una parte fundamental de su labor como profesional en su entorno laboral. Por el mismo motivo es que se vuelve una necesidad la manera de poder demostrar práctica y visualmente los modelos presentados en la asignatura ya sean con fines explicativos, demostrativos y/o comparativos.

1.3.1. Definición del problema

Entonces, la principal consideración en la materia es la falta de algún medio por el cual el estudiante pueda aterrizar las explicaciones recibidas, entender los propósitos de cada contenido, y comprender en qué ambiente y de qué forma reaccionan algunos sistemas a ciertos estímulos o excitaciones, logrando ubicar claramente el lugar de aplicación y como proceder frente a alguna situación de este tipo, es decir, qué hacer a qué contenido recurrir, qué parámetros modificar, qué valores variar, etc, para lograr el control completo del proceso sin dudar de la consecuencia que traerá dicha alteración. En consecuencia antes de enfrentarse al campo laboral este estudiante ya debe haber tenido alguna relación cercana con el estudio, análisis, modelaje y posterior control del proceso en cuestión.

En el caso de las materias que comprende la asignatura de control de procesos, existen contenidos que no necesitan de una mayor demostración como lo pueden ser la transformada de Laplace y su inversa, álgebra de bloques, representaciones en variables de estados (matrices), entre otras. Pero también se debe considerar que hay materias dentro de la asignatura que sí requieren necesario contacto con el tema en cuestión, es

decir, necesitan aterrizar el conocimiento teórico en algún elemento donde se pueda visualizar el propósitos de todo el tema, como lo son las siguientes materias dentro de la asignatura: Teoremas del valor inicial y final (demostrado en gráficas), respuesta frente a excitaciones como escalón, impulso, etc..., que de alguna manera si se intenta demostrar por medio de imágenes las formas en que estos sistemas responden a algunas entradas. Sin embargo, hay contenidos que simplemente no tienen una manera eficiente de ser demostrados y visualizados en clases, por lo que el docente encargado tiene una misión bastante compleja en tratar de transmitir un contenido poco común y lejano a la realidad de los estudiantes (abstracto), lo que da paso a proponer una útil solución a esta problemática que está presente puntualmente en la materia de: sistemas, variación de parámetros, corrimiento de polos y ceros, sintonización de controladores, entre otros relacionados.

Entonces se presenta la problemática entorno a la falta de algún medio, instrumento o apoyo que permita al estudiante poder relacionarse de forma directa con un sistema que emule algún proceso quizá no industrial, pero si conocido para el alumno, permitiendo un contacto con el tema de manera sólida y física dejando fuera la especulación y posibles intentos de relaciones erradas, sino que un exacto contacto con el tema que se pretende aprender para la mejor comprensión y manejo de este.

1.4. SOLUCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA

En consecuencia a la problemática planteada anteriormente se busca una solución que permita crecer valiosamente en los valores de entrega de conocimiento frente a la población estudiantil. La respuesta a este problema lleva a pensar de qué manera el alumno puede relacionarse “dialogar” de la mejor forma posible con estos temas que parecen tan lejano en un comienzo, es decir, como se puede aportar al mejoramiento de la entrega de conocimientos relacionados a la asignatura de control de procesos dentro de la sala de clases y en conjunto con la teoría del programa.

La Idea/solución que se pretende aplicar para dicha mejora es un módulo netamente electrónico que permitirá al estudiante poder relacionarse (contacto) con alguna aparato que simule un sistema de procesos, para poder así intervenirlo modificando sus valores por medios físicos como lo pueden ser potenciómetros, condensadores ajustables o trimmers incluso inductancias variables, mostrando así el corrimiento de algún valor de sistema ya sea la relación del Shi (ξ), parámetros de ceros y polos, el W_n entre otros, y observando visualmente y en tiempo real lo que sucede con

el sistema en cuestión que se está variando, para entender de la mejor manera posible el sentido y horizonte que tiene cada factor dentro del estudio del control de procesos.

Este módulo contiene elementos electrónicos como resistencias, condensadores fijos y ajustables, potenciómetros, fuentes de alimentación y también de entrada para producir alguna excitación deseada e incluso algún ruido incorporado a la planta de simulación de sistemas, y por último y no menos importante, trabajará en base a Amplificadores Operacionales (A.O.) quienes son los encargados junto con la demás electrónica de poder simular distintos sistemas dentro de una “caja negra” pudiendo observar al igual que en la industria sólo la entrada y las posibles formas de regulación en el control para finalmente observar una salida por medio de algún osciloscopio y ver como esta responde a las variaciones que el alumno aplicará a este módulo o sistema simulado.

Este módulo contendrá un circuito electrónico interno que consta de 4 etapas: la primera sería un sumador, la segunda sería un integrador, la tercera otro integrador y la cuarta y última simularía la retroalimentación en lazo cerrado, obteniendo como resultado final un circuito electrónico simulador de sistemas además de regulable para demostraciones.

1.4.1. Amplificador Operacional

Los Amplificadores Operacionales (A.O.) se pueden considerar como los amplificadores universales por preferencia y excelencia, debido a su gran versatilidad y la manera en la que se puede cambiar o modificar a una gran variedad de configuraciones discretas que permiten distintas utilidades. Estos A.O. se comienzan a desarrollar de mejor manera cuando nace la tecnología de circuitos integrados, con lo que logran alcanzar bajo costo, pequeños tamaños, y notable eficiencia, es decir, excelente características funcionales.

Estos son dispositivos electrónicos de alta ganancia, acoplado en corriente continua, que trabajan bajo tres etapas típicas:

1. Amplificador diferencial: Etapa de entrada que tiene baja amplificación de ruido y gran impedancia
2. Amplificador de tensión: Proporciona ganancia de voltaje
3. Amplificador de salida: Administra la corriente necesaria, baja impedancia, algunos presentan protección a cortocircuito y proporcionan ganancia adicional = 1

El dispositivo consta de 2 entradas: una no inversora (+) la cual asume una tensión V_+ y otra inversora (-) que asume una tensión V_- . De manera ideal este A.O. amplifica la diferencia de tensión entre ambas entradas (+, -) llamado voltaje diferencial, por otra parte tiene una salida V_o en la que se obtiene el valor amplificado de tensión o la corriente dependiendo la configuración utilizada. También cuenta con dos terminales de polarización y en algunos casos usado para compensaciones, para términos de análisis no se consideran estos últimos dos terminales

Las características generales de este dispositivo son:

- Trabaja como dispositivo analógico lineal
- Ofrece ganancia (Voltaje) prácticamente infinita
- La entrada inversora produce a la salida una señal en contrafase respecto a la entrada (180°)
- La entrada no inversora produce en la salida una señal en fase con la aplicada en la entrada
- Impedancia de salida casi nula (cero)
- Impedancia de entrada infinita

Las aplicaciones más usuales que pueden tener y simular los amplificadores operacionales son:

- | | |
|----------------------------|-------------------------------------|
| * Comparador | * Integrador Ideal |
| * Seguidor de voltaje | * Derivador Ideal |
| * Amplificador Inversor | * Conversor de Corriente a Tensión |
| * Amplificador No-Inversor | * Función Exponencial y logarítmica |
| * Sumador Inversor | * Convertidor Digital-Analógico |
| * Restador Inversor | |

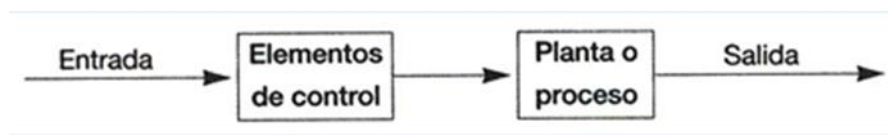
En consecuencia con la combinación e integración de algunas de estas aplicaciones se pueden realizar variadas funciones, desde una básica computadora análoga, hasta amplificadores de instrumentación usados en la medicina para lograr máxima precisión. De esta manera se implementará un módulo que mezcle alguna de las funciones antes nombradas con el propósito de generar un circuito simulador de sistemas de procesos.

1.5. SISTEMAS DE CONTROL

Los sistemas de control se entienden como un conjunto de elementos que trabajan en un mismo ciclo y que están controlados por algún dispositivo dedicado a ello. Dentro de la Ingeniería un sistema corresponde a todos los dispositivos encargados de administrar, ordenar, dirigir, o regular el comportamiento de otros sistemas o directamente un proceso que busca reducir las fallas y obtener el mejor resultado sin intervención humana directa (físicamente presente en el terreno de trabajo), esto se conoce como sistema de control industrial, donde se monitorea y ordenan acciones a maquinarias o equipos normalmente de gran envergadura.

Dentro de la variedad de sistemas existen 2 diferenciaciones claras y generales, que son: sistemas en lazo abierto, los cuales tienen una salida dependiendo del valor de la entrada, y también hay sistemas en lazo cerrado donde la salida depende del control y la retroalimentación que este tipo de sistemas posee, también conocidas como sistemas de control con realimentación. En la actualidad los sistemas más modernos automatizan procesos en base a varios parámetros y se denominan Controladores de Automatización Programables (PAC).

La estructura típica de un sistema de control es: la entrada, un elemento de control, una planta o proceso y finalmente una salida, algunos en lazo abierto o cerrados. El esquema de sistema de control en lazo abierto sería como lo presenta la figura 1-4.

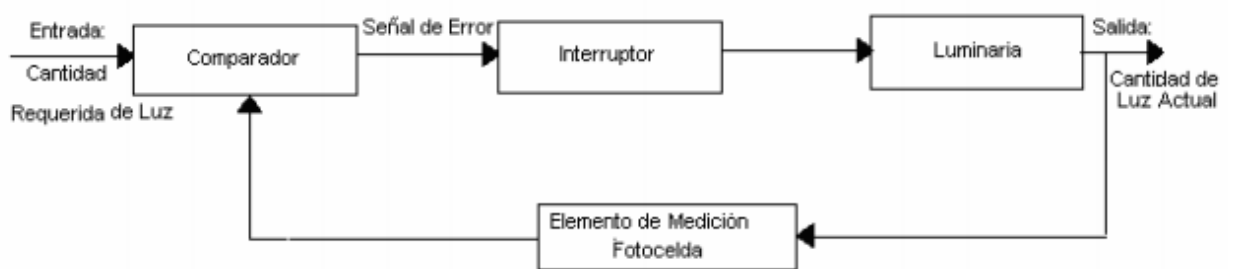


Fuente: Google sistemas de proceso

Figura 1-4. Estructura típica de un sistema de control.

Dentro de estos sistemas es posible encontrar procesos de lo más común a los más inimaginables, por ejemplo, un básico sistema de control de temperatura del calefactor de la casa donde se activa dependiendo de la T° ambiente para lograr la T° deseada (lazo cerrado), otro ejemplo es el control del alumbrado público donde se activa un sensor que detecte la luz ambiente para indicar si es necesario prender o no el alumbrado público, como se muestra en la figura 1-5 siendo este otro lazo cerrado, también un ejemplo cotidiano es el de una lavadora donde existe un programa interno que controla el proceso cronológico que esta realiza, es decir, existe un proceso que

condiciona los pasos que continúan pero no tiene un sensor que evalúe la calidad del lavado por lo que no es un lazo cerrado, sino abierto y solo realiza el programa. Por último un caso de gran magnitud podría ser el proceso de chancado de una minera donde participa un chancado primario y uno secundario (por tamaños), en donde si el material a moler (chancar) no logra ser reducido al tamaño óptimo para pasar al siguiente chancado (secundario), es masado por un sensor que lo vuelve a integrar a una línea de retorno al primer chancador, aquí es posible entender el sistema controlado en lazo cerrado ya que por sí solo el sistema pudo detectar un material no deseado (tamaño) y devolverlo al proceso para cumplir con lo requerido.



Fuente: Google imágenes, cátedra universidad nacional de san Juan

Figura 1-5. Control de luminaria pública.

Todos estos procesos se pueden analizar y estudiar como sistemas y estos son variados desde primer orden hasta cualquier orden necesario. Mayoritariamente los procesos industriales pueden analizarse y reflejarse en sistemas de 1° orden según el grado de su polinomio característico o más concreto aún corresponde a la cantidad de elementos que puedan almacenar energía en dicho sistema o proceso, que en este caso corresponde a 1, y sistemas de 2° orden donde su polinomio o ecuación característica contiene 2 elementos que pueden almacenar energía incluso se identifican porque en su ecuación diferencial contiene una segunda derivada, todo esto se especificará en el siguiente punto.

1.5.1. Sistemas de primer orden

Un sistema de primer orden puede reconocerse luego de determinar la ecuación diferencial que corresponde a su comportamiento cuando está bajo funcionamiento ($t > 0$), esta ecuación diferencial hará referencia o responderá a la modelación de los sistemas o variables físicas que actúen en el proceso. Luego de determinar dicha ecuación se observará que su ecuación diferencial solo posee la

primera derivada de la variable que afecta el proceso, por lo tanto, esta condición hace alusión a que el proceso tiene un solo elemento que puede almacenar energía.

Como se expuso anteriormente los sistemas poseen una ecuación característica que está en función del tiempo, ahora, una función de transferencia se debe trabajar en el plano de Laplace, entonces se debe pasar del dominio del tiempo (t) al dominio de Laplace (s), esta función es muy útil para trabajar las ecuaciones sin importar su grado, pero más útil aún para el concepto de función de transferencia $T(s)$.

El concepto de función de transferencia es un modelo matemático que para el caso de los sistemas, relaciona la salida o respuesta de un sistema con la entrada de este mismo. Para cualquier proceso generalmente la entrada se define como $u(t)$ y la respuesta como $y(t)$ ambas en el tiempo, si se transforman a Laplace se reasignan como $U(s)$ e $Y(s)$, respectivamente. Esta relación entre la entrada/salida se denomina Función de Transferencia y se representa como $G(s)$.

$$\text{Función de Transferencia} \rightarrow \frac{Y(s)}{U(s)} = G(s)$$

Donde:

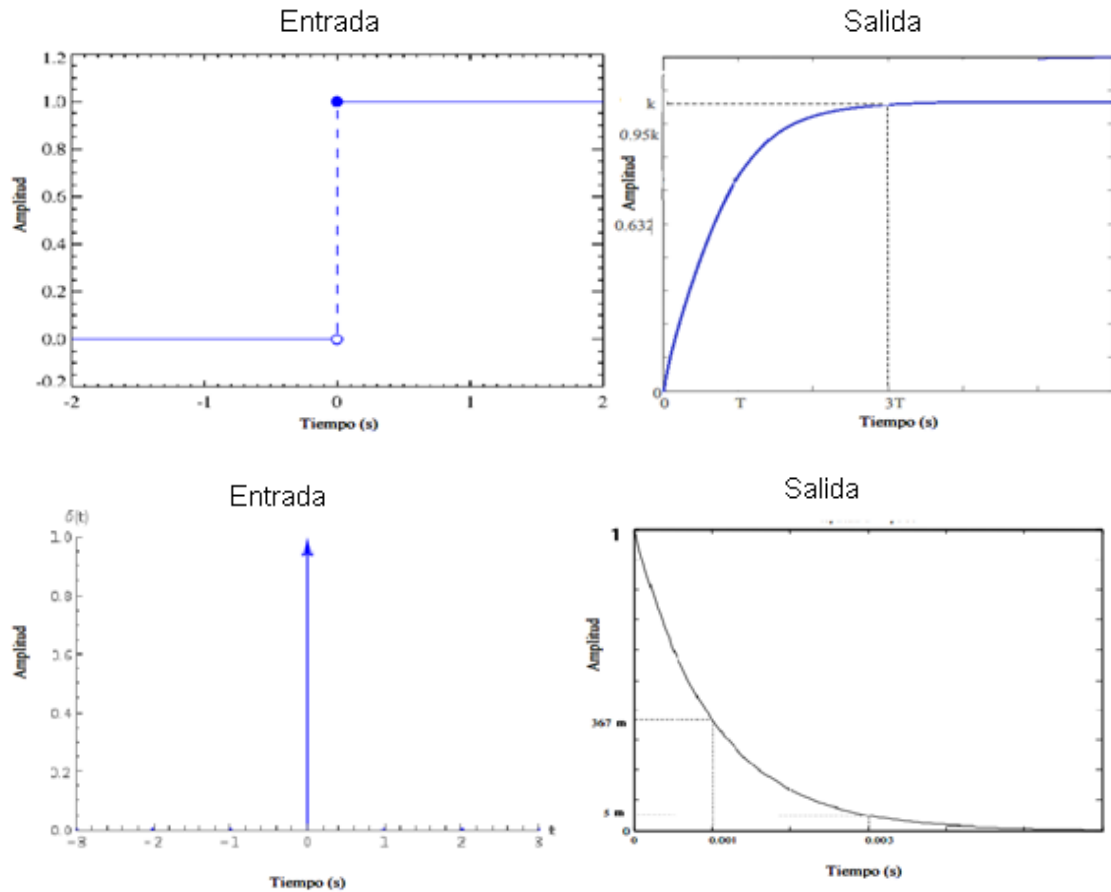
$$\text{Y su modelo es } G(s) = \frac{K}{1 + \tau s}$$

K = Ganancia del sistema
(salida/entrada)

τ = Constante de tiempo

También los sistemas tienen una respuesta con una curva característica relativa al tipo de entrada que se aplique, como la descrita en la figura 1-6:

Los ejemplos más típicos de estos sistemas de 1° orden son los procesos de control de nivel de algún estanque o piscina industrial, el control de temperatura de un horno o caldera, también puede ser la carga de un condensador en un circuito serie RC (fuente, resistencia, condensador), etc...



Fuente: Análisis en el dominio del tiempo de sistemas de primer orden y segundo orden

Figura 1-6. Respuestas de sistemas de 1° orden a entradas escalón e impulso, respectivamente

1.5.2. Sistemas de segundo orden

Los sistemas de segundo orden a diferencia de los de primer orden tienen una ecuación diferencial que responde a la condición física de un proceso, pero que consta de 2 elementos que permiten el almacenamiento de energía, es decir, en dicha ecuación contiene una segunda derivada.

De la misma manera que el sistema anterior, este se puede trabajar y analizar por medio de la transformada de Laplace, la cual permite una función de transferencia $G(s)$ del siguiente tipo:

$$G(s) = \frac{K Wn^2}{s^2 + 2\xi Wn s + Wn^2}$$

Donde:

K = ganancia estática continua de la planta

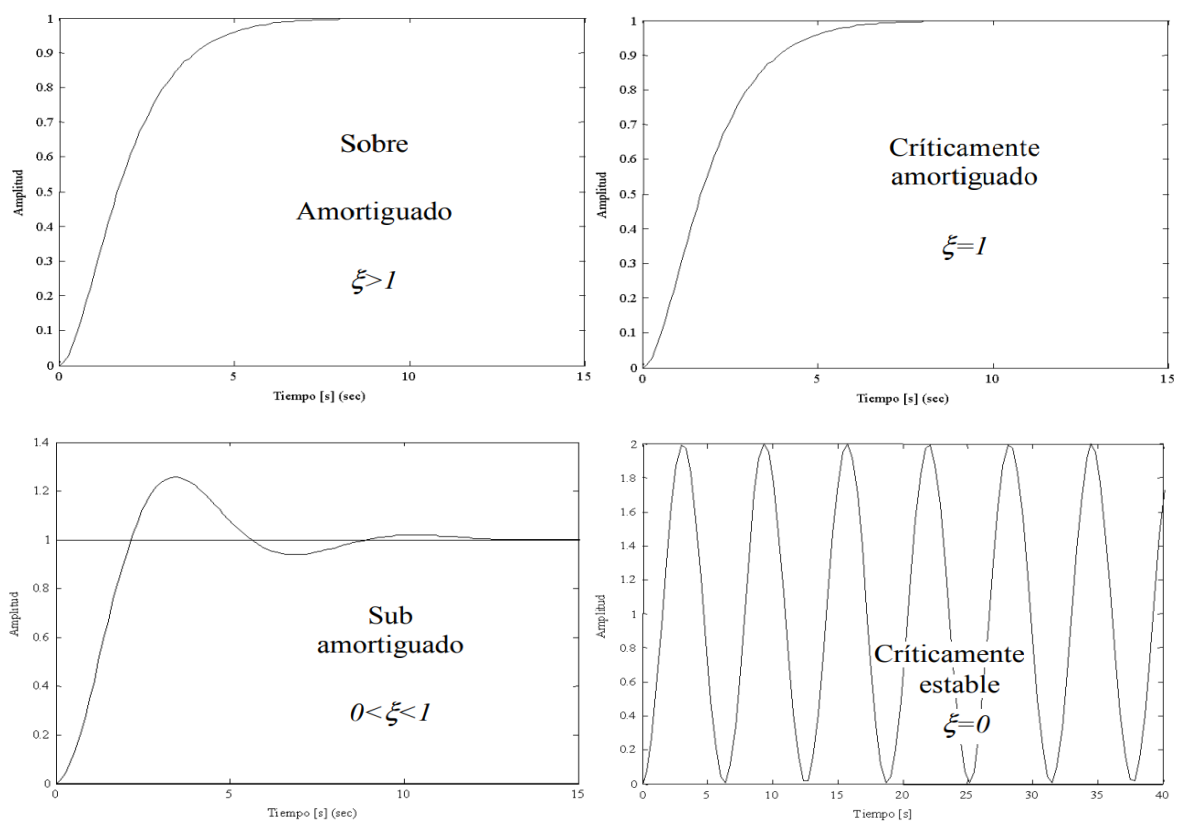
ξ = factor de amortiguamiento

Wn = frecuencia natural

Los sistemas de segundo orden presentan diferentes tipos de respuestas gráficas frente a su factor de amortiguación (ξ) donde:

Oscilatorio puro $\rightarrow \xi = 0$	Subamortiguado $\rightarrow 0 < \xi < 1$
Sobreamortiguado $\rightarrow \xi > 1$	Críticamente amortiguado $\rightarrow \xi = 1$

En la figura 1-7 se muestran las curvas características de los sistemas de segundo orden dependiendo el valor del ξ , en respuesta a una entrada de tipo escalón unitario:



Fuente: Análisis en el dominio del tiempo de sistemas de primer orden y segundo orden

Figura 1-7. Respuestas de sistemas de 2° orden con sus correspondientes ξ .

En los sistemas de segundo orden hay ejemplos típicos como el control de caudal (flujo) que circula por algún medio, en donde su modelación matemática contiene una segunda derivada de alguna variable en el proceso, también la presión posee una modelación de segundo orden por lo que es un claro ejemplo de estos sistemas.

1.6. COMENTARIOS ADICIONALES

En consecuencia a todo lo indicado y demostrado en la información previa entregada acerca de la carrera de Ing. (e) en Control e Instrumentación Industrial, específicamente en la asignatura: "Control de Procesos", se puede notar la clara necesidad y deber de transmitir la información y conocimiento de dicha asignatura en forma sólida, clara, completa y entendible, esto último, enfocado a lo visual donde el estudiante tenga la posibilidad de poder visualizar e interactuar con la materia en desarrollo, logrando así, proponer una interacción del alumno con un sistema donde él pueda tener contacto físico con algún elemento explicativo y demostrativo.

Por este motivo es que se pretende desarrollar un módulo físico, que en su interior contenga un circuito electrónico, implementado en una placa PCB impresa para su máxima eficiencia, este circuito estará diseñado con el fin de simular alguna posible planta de primer orden, incluso de segundo orden, las cuales podrán ser modificadas manualmente por los alumnos por medio de elementos regulables como potenciómetros, observando en su salida física (conectada a un osciloscopio) la forma de la curva de respuesta de este sistema, frente a la variación de estos elementos. La estructura interna del circuito simulador estará compuesta por los siguientes componentes electrónicos:

- Resistencias
- Potenciómetros
- Condensadores de valor fijo
- Condensadores de valor ajustable
- Amplificadores Operacionales

Este módulo tendrá disponible una entrada para ingresar la señal de excitación que en cuestión puede ser una señal escalón, una señal impulso, una señal rampa, entre otras. También tendrá potenciómetros colocados en la cara superior del módulo de forma que permita su fácil regulación, y como se indicó anteriormente una salida para visualizar la respuesta del sistema.

1.7. **OBJETIVOS**

1.7.1. Objetivo general

-Diseñar un módulo que permita modificar los coeficientes de una función de transferencia implementada con circuitos electrónicos.

1.7.2. Objetivos específicos

- 1) Contextualizar el ambiente actual de aprendizaje de la asignatura de Control de Procesos.
- 2) Confeccionar un circuito electrónico conformado principalmente por amplificadores operacionales.
- 3) Fabricar una PCB con el circuito electrónico diseñado y su maqueta correspondiente.
- 4) Realizar pruebas prácticas en lazo abierto y cerrado para corroborar el funcionamiento del proyecto.

CAPÍTULO 2: FUNCIONES Y CIRCUITOS SIMULADORES DEL MÓDULO

2. DESARROLLO TÉCNICO DE LA SOLUCIÓN

En este capítulo se detallará toda la temática técnica de la solución planteada en el capítulo anterior, dando paso a la explicación del funcionamiento electrónico que tiene este módulo, para poder simular una planta y permitir la modificación de sus parámetros mediante electrónica basada en amplificadores operacionales además de otros componentes electrónicos necesarios para lograr dicha propuesta. También se indicará cada evaluación matemática y modelo utilizado respectivamente, en forma de diagramas de bloque general e independiente para su necesario análisis, pudiendo así representar sistemas de primer y segundo orden de coeficientes regulables, variando ciertos parámetros dentro de sus posibles rangos.

Los elementos que permitirán variar los rangos de estos parámetros serán potenciómetros y trimmers dependiendo la utilidad que tenga en la configuración del amplificador operacional y por ende en el bloque que esté dispuesto.

En conjunto, a la salida del sistema se obtendrá una respuesta que será consecuente del tipo de excitación que se incorpore en la entrada del sistema, de manera que ésta se podrá observar por medio de algún instrumento visual, para notar la forma de señal con la que responde el sistema a dicha excitación, visualizando la gráfica en un osciloscopio, o almacenando imágenes de la respuesta para observarlas en un ordenador.

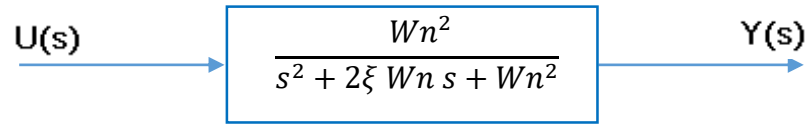
2.1. SISTEMAS INCORPORADOS EN EL MÓDULO DEMOSTRATIVO

En este módulo se incorporaron circuitos diferenciados, por una parte para simulación de un sistema de primer orden y por otra parte un circuito simulador de sistema de segundo orden. Ambos circuitos constan de diferentes bloques. En el caso del de primer orden posee 2 bien marcados, uno es amplificador con ganancia unitaria (similar función que un seguidor de tensión) y el otro corresponde a un bloque de malla RC (resistencia y condensador) para la carga del sistema y otra R para la descarga del sistema, logrando una respuesta característica de sistemas de primer orden.

En el caso del de segundo orden presenta 5 bloques diferentes, siendo el primer bloque un sumador, seguido de 2 integradores intermediados por una retroalimentación con ganancia variable y por último una última retroalimentación de ganancia unitaria.

2.2. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SISTEMA DE SEGUNDO ORDEN

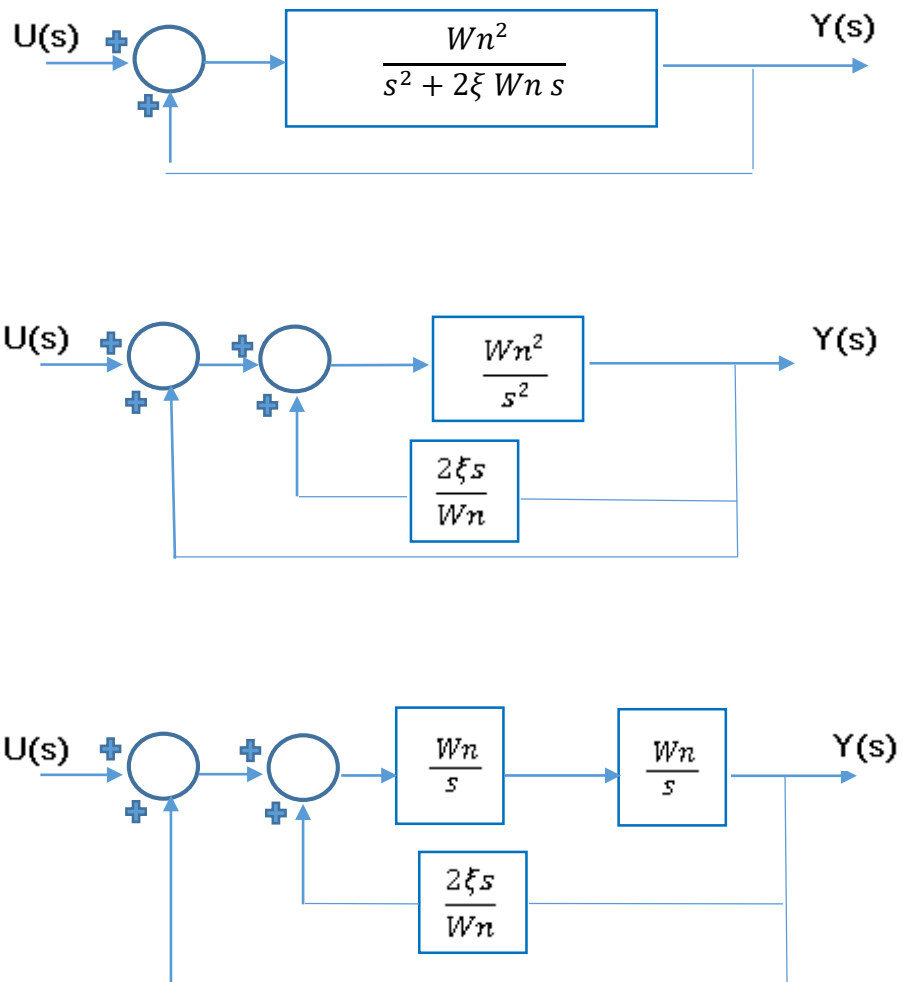
Para comenzar con el entendimiento y análisis de los sistemas de segundo orden debemos recordar que la Función de Transferencia $G(s)$ típica de estos sistemas es como lo muestra la figura 2-1.

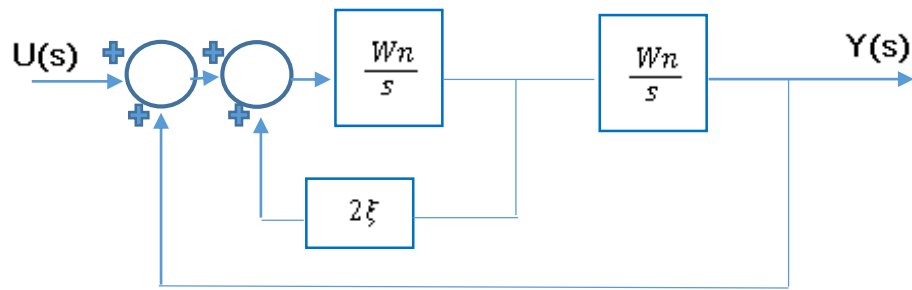


Fuente: elaboración propia

Figura 2-1. Función de transferencia típica de los sistemas de segundo orden.

Por lo tanto en base a este modelo se debe realizar un desglose de los parámetros que intervienen en el, es decir, se diseñará un diagrama de bloques correspondiente a dicho modelo para poder simularlo por medio de electrónica de manera correcta. En la figura 2-2, podemos observar la siguiente descomposición del modelo oficial:



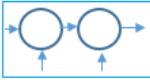


Fuente: elaboración propia

Figura 2-2. Desglose de la función modelo de sistemas de segundo orden para equivalencia electrónica y posterior simulación del sistema.


Ya resuelta la descomposición de la ecuación modelo equivalente de los sistemas de segundo orden, como se señaló en la figura 2-2, se procede a realizar la equivalencia en circuitos electrónicos.

2.2.1. Circuito electrónico del sistema de segundo orden

El bloque  corresponde a un sumador compuesto por 2 sumas que electrónicamente equivale a un amplificador operacional configurado como amplificador sumador inversor, donde la ecuación de salida que responde al valor de V_o es:


$$V_o = -(V_1 + V_2 + \dots + V_n)$$

Considerando que todas las R son iguales = 10K

También  es el primer integrador del sistema, el que será representado por un amplificador operacional configurado como amplificador integrador respondiendo a la siguiente ecuación de salida para V_o :

$$V_o(t) = -\frac{1}{RC} \int V_{in} dt$$

$$V_o(s) = -\frac{1}{RCS} * v_{in}$$

Seguido de  donde el bloque equivale a la retroalimentación con ganancia variable del primer integrador, otorgando la variación del shi (ξ) para el tipo de respuesta respectiva a un sistema oscilatorio, subamortiguado, sobreamortiguado o críticamente amortiguado, respondiendo a la siguiente ecuación de salida para V_o :

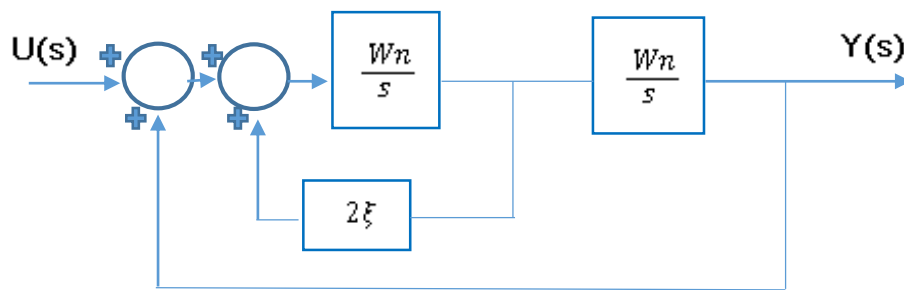
$$V_o(t, s) = V_{in} * \left(-\frac{R_f}{R}\right)$$

El segundo bloque $\frac{Wn}{s}$ corresponde al segundo integrador del sistema. También representado por un amplificador operacional configurado como amplificador integrador, al igual que el anterior responde a la siguiente ecuación de salida para Vo:

$$V_o(t) = -\frac{1}{RC} \int V_{in} dt \qquad V_o(s) = -\frac{1}{RCS} * v_{in}$$

Y por último se tiene una retroalimentación directa, que se puede representar por un valor unitario que incorpora la salida de todo el sistema en el bloque sumador para corregir el error final.

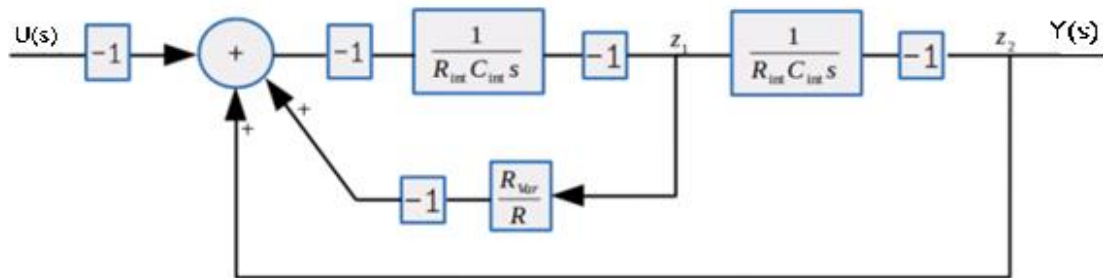
Entonces se obtiene el diagrama de bloques descompuesto anteriormente, representado de la siguiente manera, como lo muestra la figura 2-3.



Fuente: elaboración propia

Figura 2-3. Descomposición final en diagrama de bloques del Sist. de segundo orden.

Podemos traducirlo a circuitos electrónicos tomando los 4 bloques nombrados anteriormente y disponiéndolos en los lugares que corresponde a la equivalencia del diagrama de bloques oficial, obtenemos que por medio de circuitos electrónicos se podrán simular los bloques del sistema de segundo orden, como describe la figura 2-4:



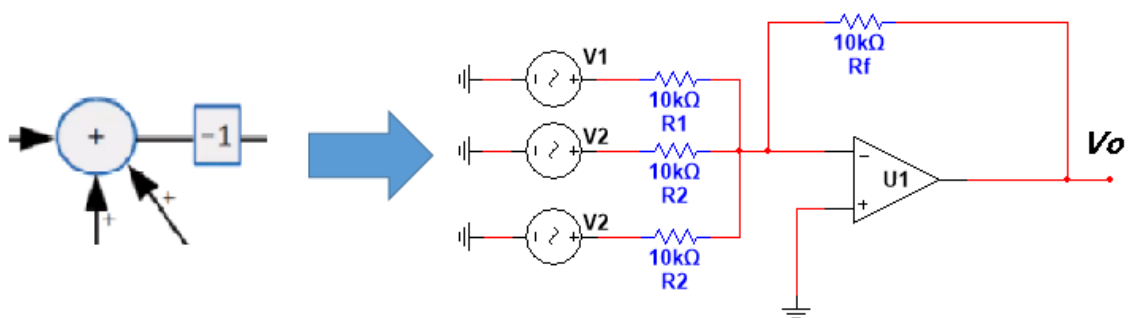
Fuente: elaboración propia

Figura 2-4. Diagrama de bloques traducido a equivalencia electrónica.

2.2.1.1. Bloque sumador inversor

En este bloque se tiene el inicio del sistema, en donde existe un nodo que reúne todos los posibles valores de voltaje que se desean sumar, independiente de su valor y su polaridad, seguido de esto, este nodo debe ingresar a la entrada inversora del amplificador operacional para realizar la suma ponderada del total de valores reunidos en el nodo, es decir, que dentro del sistema se tomarán ciertos valores intermedios de voltaje (salida V_o del 1° y 2° integrador) para ingresarlos en este sumador y así restar el valor del escalón (negativo) con las salidas de los integradores y obtener la relación entre el error y la referencia.

A continuación se describe el bloque sumador en la figura 2-5 proveniente del diagrama anterior.

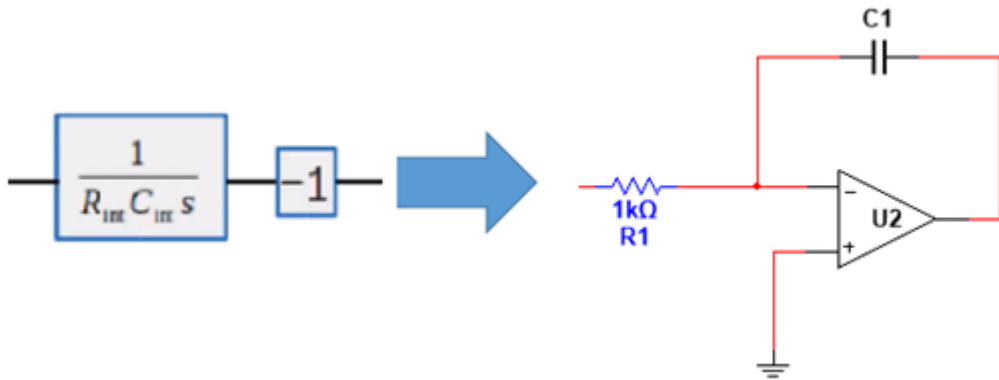


Fuente: elaboración propia

Figura 2-5. Equivalencia electrónica (amplificador operacional) del diagrama del bloque sumador.

2.2.1.2. Bloque integrador 1

En este primer bloque integrador se recibe la señal saliente del sumador, donde el amplificador integrador realiza la función matemática de la integración, es decir, la señal de salida es la integral de la señal de entrada. Esto se realiza por la entrada inversora del amplificador operacional para retroalimentarla con una capacitancia obteniendo la carga de este como señal de salida, como lo señala la figura 2-6, en donde se observa la equivalencia del diagrama de bloques a la electrónica aplicada.



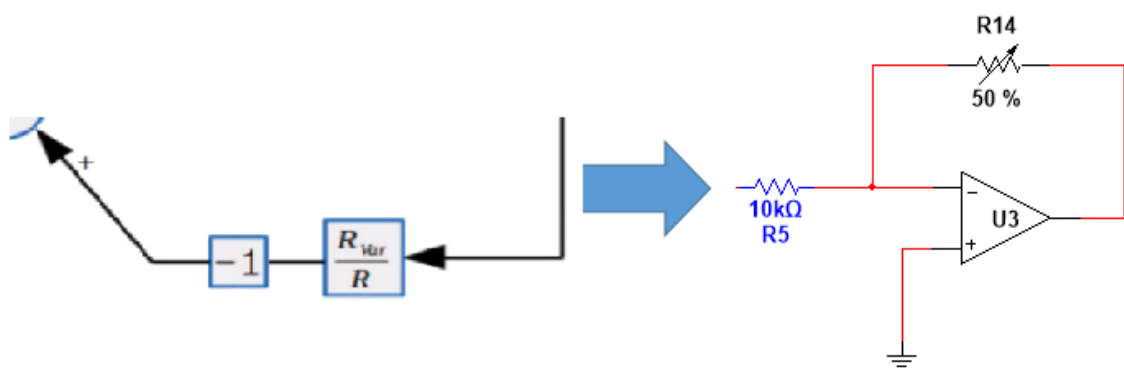
Fuente: elaboración propia

Figura 2-6. Equivalencia electrónica (amplificador operacional) del diagrama del bloque integrador 1.

2.2.1.3. Bloque de retroalimentación con ganancia variable

En este bloque se tiene la primera retroalimentación (lazo cerrado) hacia el sumador desde la salida del 1° integrador, esto se logra con un seguidor de tensión (si no se desea dar una ganancia regulable) o con un amplificador inversor, el cual ofrece una ganancia que puede ser regulable, y permite regular la primera integración que corresponde a error, por lo tanto se puede variar el $\text{Shi} (\xi)$ conocido como el factor de amortiguamiento, como lo muestra la figura 2-7.

Logrando así integrar el error para poder disminuirlo y lograr con certeza que el sistema se estabilizará en el tiempo.



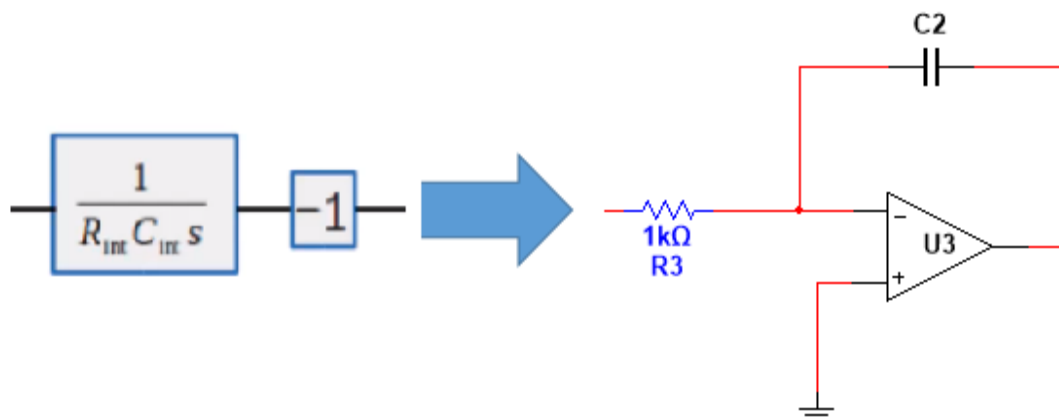
Fuente: elaboración propia

Figura 2-7. Equivalencia electrónica (amplificador operacional) del diagrama de retroalimentación con ganancia regulable.

2.2.1.4. Bloque integrador 2

En este cuarto bloque se tiene el segundo integrador que al igual que el primero tiene como función integrar el valor ingresado en su entrada inversora para mostrarlo en la salida como la carga de un condensador frente a una forma de corriente, ya sea cuadrada, triangular y/o sinusoidal, la que en este caso corresponde a que este amplificador integrador está generando la segunda integración del sistema transformándolo en uno de segundo orden.

Entonces considerando lo anterior se obtiene el cuarto bloque con el que se logra simular el diagrama inicial, como lo muestra la figura 2-8:

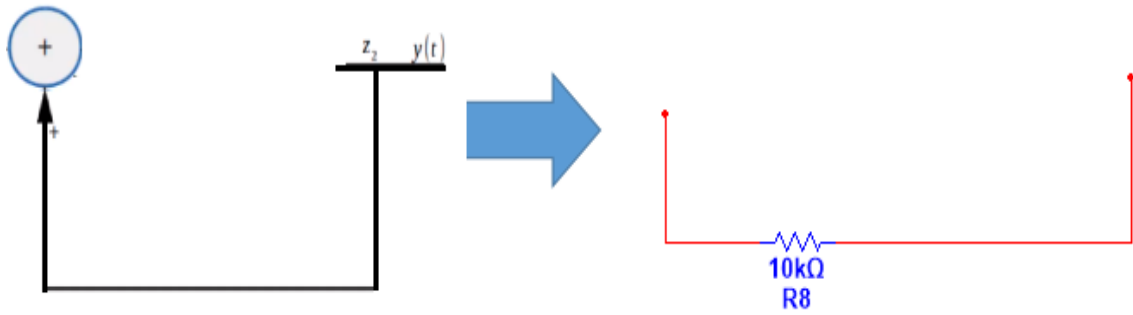


Fuente: elaboración propia

Figura 2-8. Equivalencia electrónica (amplificador operacional) del diagrama de bloque del integrador 2.

2.2.1.5. Bloque de retroalimentación unitaria

Este bloque hace referencia a la última retroalimentación existente en el diagrama final, en donde se retroalimenta la salida final del sistema correspondiente al V_o del 2° integrador, incorporándola al bloque sumador ubicado al inicio del sistema, logrando así corregir el error como un sistema de segundo orden, cerrando el circuito total equivalente a un sistema en lazo cerrado, a continuación en la figura 2-9, se indican los bloques equivalentes para esta parte del diagrama.

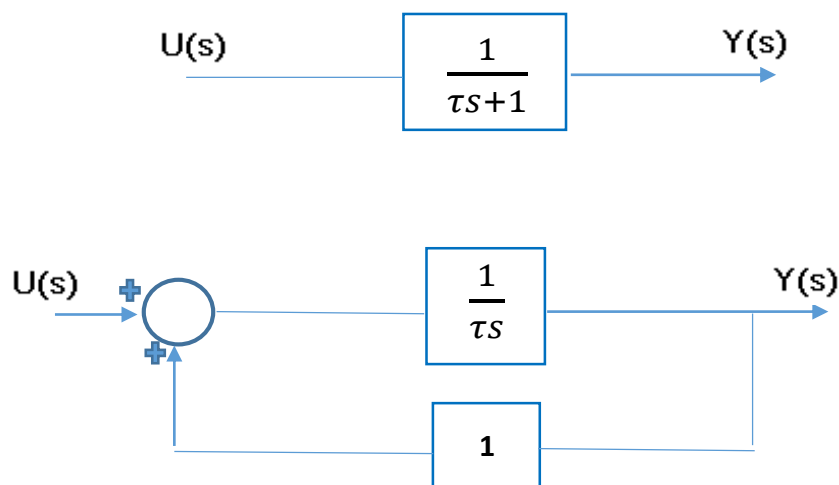


Fuente: elaboración propia

Figura 2-9. Equivalencia electrónica del diagrama de bloque de retroalimentación unitaria.

2.3. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SISTEMA DE PRIMER ORDEN

En este caso los sistemas de primer orden presentan un diagrama de bloques modelo que responde a una ecuación matemática de primer orden, por lo tanto, se puede obtener una equivalencia en circuitos electrónico para la simulación de estos sistemas, en donde podemos desglosar el diagrama de bloques modelo como lo señala la figura 2-10.



Fuente: elaboración propia

Figura 2-10. Desglose de la función modelo de sistemas de primero orden para equivalencia electrónica y posterior implementación.

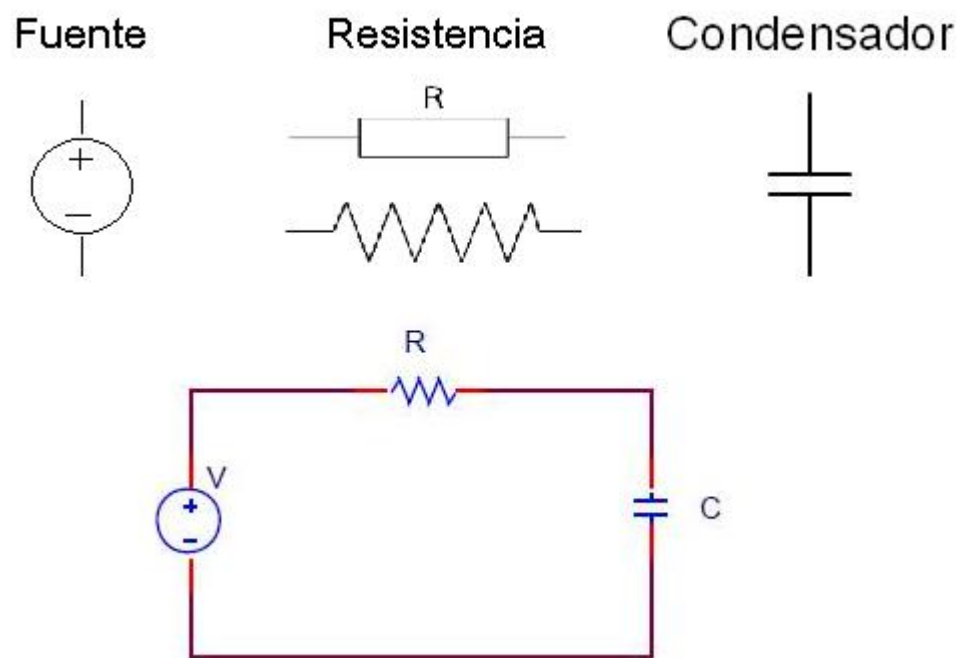
Siendo este el máximo desglose del diagrama de bloques de un sistema de primer orden, se puede buscar alguna manera de simular este sistema por medio de electrónica, que en este caso será explicada y analizada en el siguiente punto (Circuito electrónico del sistema de primer orden), para así demostrar cómo se puede relacionar

este tipo de sistemas con sus respectivos componentes electrónicos para las etapas en este caso 2 del sistema antes nombrados.

2.3.1. Circuito electrónico del sistema de primer orden

Al igual como se trabajó con el sistema anterior, se procederá con la explicación y análisis de una malla RC (resistencia y condensador) para la simulación del sistema de primer orden, considerando cada ecuación necesaria para un circuito RC, se trabajará en base a la transformada de Laplace para obtener sus respectivos bloques en un diagrama completo, y poder realizar su equivalencia a circuito electrónico.

El circuito de una malla RC consta de 3 elementos básicos para realizarlo, estos son, una fuente de alimentación o señal de entrada normalmente medida en Volts, luego una resistencia medida en Ohm y finalmente un condensador medido en faradios, disponiéndolos como un circuito serie, en donde la corriente producida, circula por un único camino hasta retornar a la fuente, permite realizar la carga del condensador en el tiempo por medio de la resistencia antes nombrada de la que depende dicho tiempo de carga, de esta manera esta resistencia variará el "Te" correspondiente al tiempo de estabilización del sistema y así poder simular una sistema de primer orden que responderá a cualquier excitación de entrada hasta alcanzar su valor, como lo explica la figura 2-11.



Fuente: elaboración propia

Figura 2-11. Circuito RC para modelación del sistema de primer orden.

Seguido del esquema del circuito RC, se analizará la malla para dar origen a las ecuaciones que se necesitan para modelar el diagrama de bloques del sistema de primer orden por medio de la ley de Kirchhoff.

Entonces se tiene:

El voltaje del condensador, está dado por:	$V_c = \frac{1}{C} \int i(t) dt$
El voltaje en la resistencia, está dado por:	$V_r = R * i(t)$
El voltaje en la fuente, está dado por:	$V_f = V_r + V_c$

Por lo tanto, las ecuaciones anteriores se transforman al dominio de la frecuencia, más común, como se indicó al inicio del T.T., se aplica la transformada de Laplace, obteniendo las siguientes ecuaciones:

$$V_c(t) = \frac{1}{C} \int i(t) dt$$

$$V_C(s) = \frac{1}{C} * \frac{1}{s} * i(s)$$

$$V_r(t) = R * i(t)$$

$$V_R(s) = R * i(s)$$

$$V_f(t) = V_r + V_c$$

$$V_F(s) = \left(R + \frac{1}{Cs} \right) i(s)$$

Finalmente, teniendo los valores de la ecuación de la malla RC, pero transformados al dominio de Laplace, se procede a armar la función de transferencia correspondiente a este circuito que de igual manera tiene su equivalencia al sistema de primer orden que se intenta simular.

Recordando la función de transferencia indicada al inicio de los sistemas de primer orden, se entiende que es la relación de la señal de salida sobre la señal de entrada, es decir, $G(s) = Y(s)/U(s)$. Considerando que la señal de entrada corresponde a la fuente de alimentación (V_f) y la señal de salida corresponde al voltaje del condensador. En consecuencia al análisis hecho en la malla RC, se puede realizar la equivalencia de esta función de transferencia con las ecuaciones antes resueltas.

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)}$$

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{\frac{1}{Cs} * i(s)}{\left(R + \frac{1}{Cs}\right) i(s)}$$

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{\frac{1}{Cs}}{\left(R + \frac{1}{Cs}\right)}$$

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{1}{RCs + 1}$$

Ahora teniendo la función de transferencia resultante es posible hacer una equivalencia respecto a RC y tau, donde:

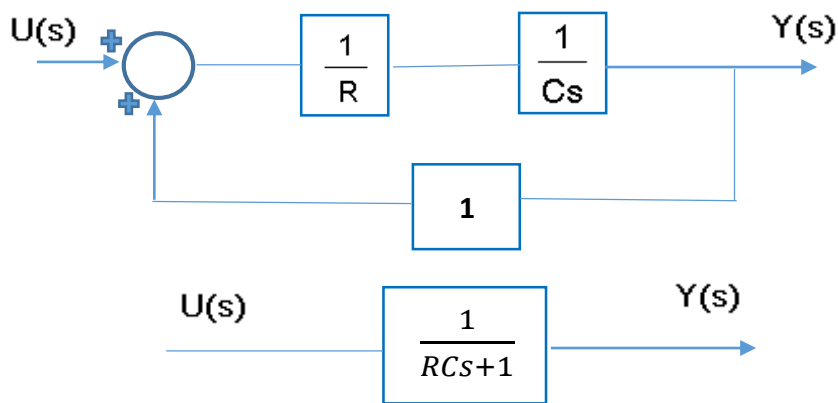
$$RC = \tau$$

Entonces:

$$G(s) = \frac{1}{\tau s + 1}$$

Obteniendo así el resultado final de un sistema de primer orden para una representación y simulación en circuitos electrónico por medio de una malla resistiva capacitiva en un circuito serie.

Por último, se plantea el diagrama de bloques resultante y equivalente al circuito electrónico representado por la malla RC, como lo muestra la figura 2-12:



Fuente: elaboración propia

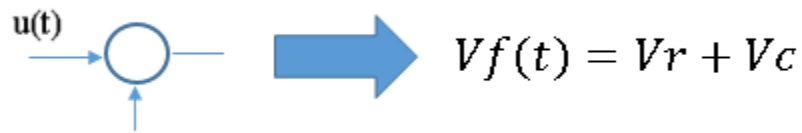
Figura 2-12. Diagrama de bloques traducido a equivalencia electrónica ($RC=\tau$).

2.3.1.1. Bloque sumador

Este bloque responde al voltaje en la fuente, como se indicó anteriormente, se expresaba:

$$V_f(t) = V_r + V_c$$

Y su equivalencia desde el diagrama de bloques a ecuación de la malla RC se muestra en la figura 2-13



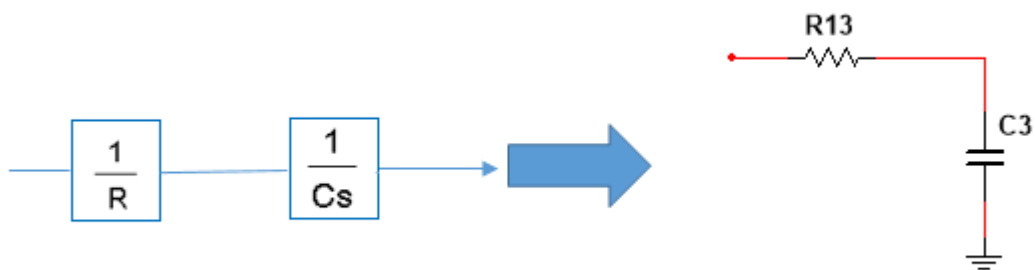
Fuente: elaboración propia

Figura 2-13. Análisis equivalente del diagrama de bloques a ecuación del voltaje en la fuente (V_f).

Donde V_f es la entrada $u(t)$ y V_c es la salida retroalimentada $y(t)$.

2.3.1.2. Bloque RC

En esta etapa se tiene la malla RC, en donde se produce la carga del condensador, la cual tiene una gráfica de tipo exponencial, y ofrece una respuesta idéntica a la que presentan los sistemas estudiados, en este caso representativa a un sistema de primer orden. Por lo tanto, variando su capacitancia, se logra variar la componente $1/C_s$ para observar directamente el cambio en el tiempo de estabilización del sistema en cuestión, ósea, cuanto demora el sistema en estabilizarse en función de la señal de entrada, es decir, se estará modificando el parámetro conocido como Tau (τ) que es de quien depende el tiempo de carga del condensador y finalmente el del sistema, y su equivalente electrónico es el valor de capacidad del condensador (Faradios), que para efectos prácticos y demostrativos dispondrá de un condensador variable o trimmer. A continuación la figura 2-14 muestra la relación entre el diagrama de bloques y el circuito electrónico.



Fuente: elaboración propia

Figura 2-14. Equivalencia del diagrama de bloques a la malla RC.

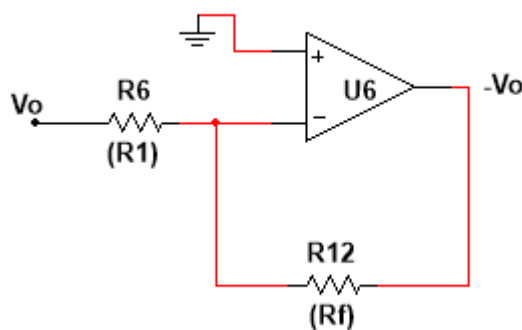
2.3.1.3. Bloque inversor

Este bloque tiene un propósito demostrativo, permite observar la señal de salida del condensador, pero con un valor negativo (-) reflejado sobre la abscisa, es decir, este bloque compuesto por un amplificador operacional inversor con ganancia unitaria, invierte la señal proveniente del condensador, que para efectos de aplicación se alimenta con la misma fuente que se excita el sistema de segundo orden, por lo tanto, si la fuente tiene un valor negativo, la carga del condensador tiende a su mismo valor negativo, entonces para invertir la señal se usa este inversor permitiendo mejores efectos demostrativos.

La ecuación característica es:
$$\frac{V_{out}}{V_{int}} = -\frac{R_f}{R_1}$$

Si R_f y R_1 son iguales, la ganancia es:
$$\frac{V_{out}}{V_{int}} = -1$$

En el circuito se debería tener alguna familia de los amplificadores operacionales (741), pero con la misma configuración que muestra la figura 2-15:

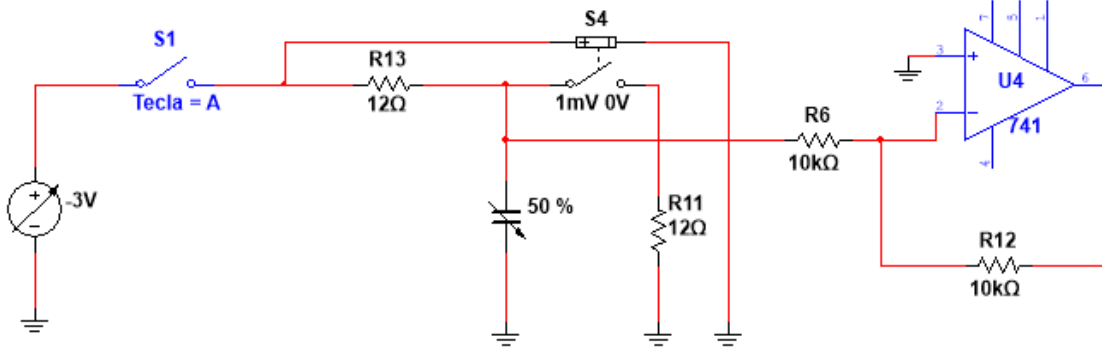


Fuente: elaboración propia

Figura 2-15. Circuito del amplificador inversor con ganancia unitaria.

2.4. CIRCUITO GENERAL

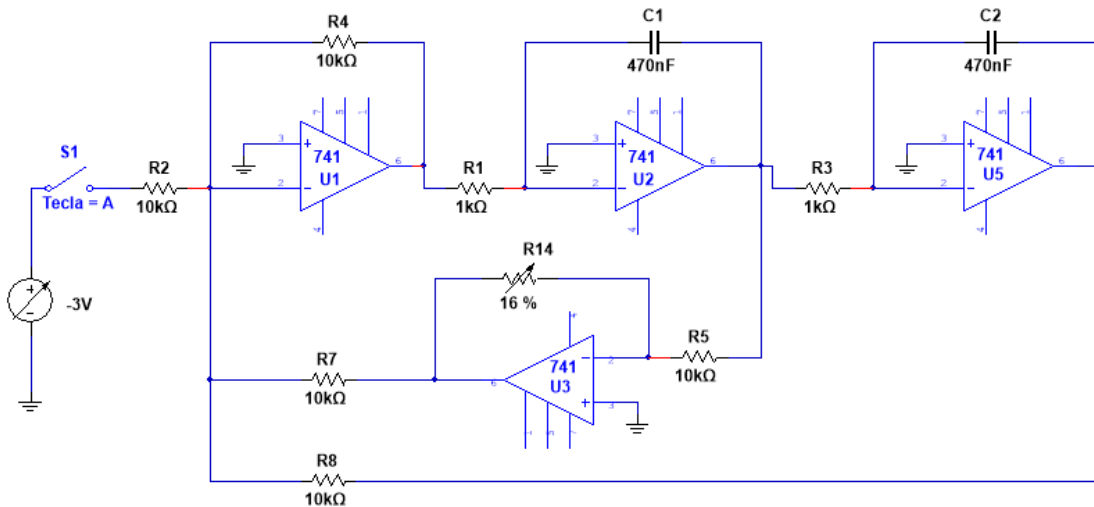
Finalmente luego de la explicación y análisis de los diagramas de bloques y el armado de parcial de los circuitos equivalentes a dichos diagramas, se obtiene el circuito final completo que incorpora el sistema de primer orden, basado en una malla RC y un operacional para acoples y seguidor de tensión, como se señala en la figura 2-16.



Fuente: elaboración propia

Figura 2-16. Circuito completo, simulador de sistema de primer orden.

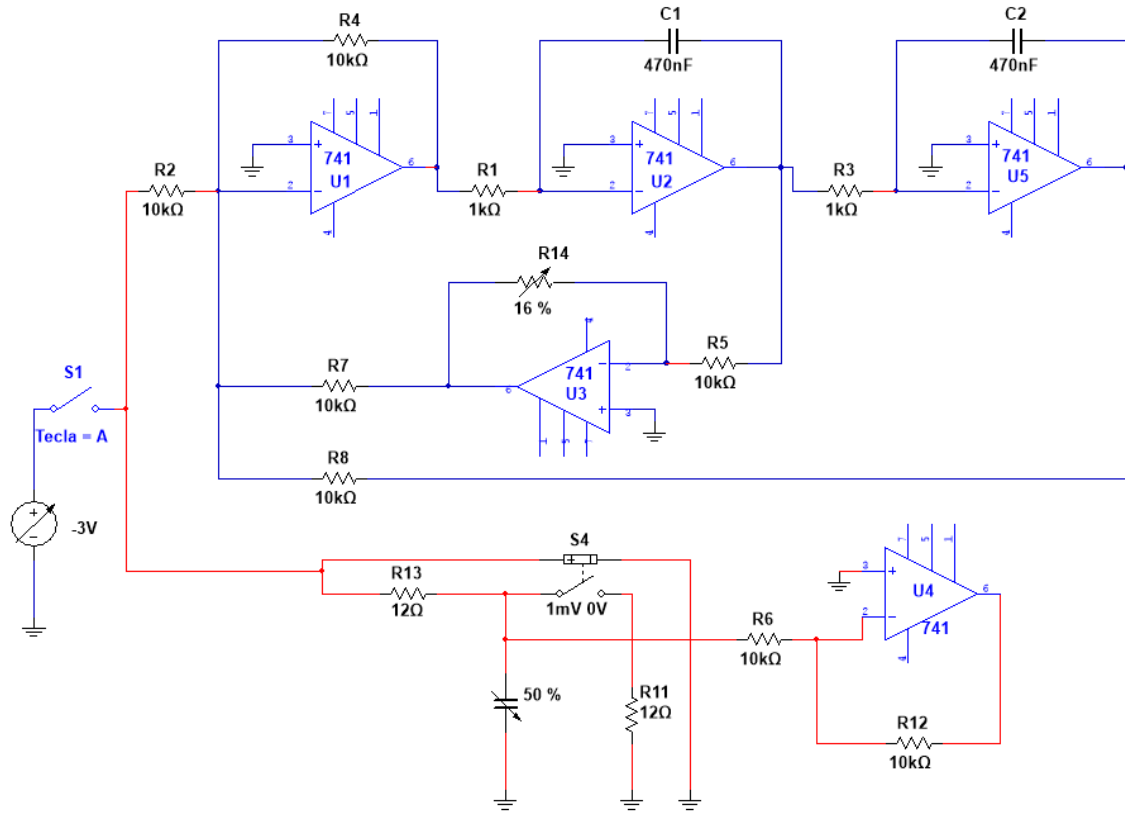
Por otra parte se tiene formulado el circuito simulador completo del sistema de segundo orden, compuesto por los bloques nombrados en sus correspondientes ítems, obteniendo así los circuitos parciales de cada uno y que en conjunto logra simular el sistema de segundo orden completo como se observa en la figura 2-17.



Fuente: elaboración propia

Figura 2-17. Circuito completo, simulador de sistema de segundo orden.

Finalmente la circuitería completa que será implementada en el módulo corresponde a un circuito doble uno para los sistemas de primer orden y otro para los sistemas de segundo, resultando un diseño electrónico como lo muestra la figura 2-18.



Fuente: elaboración propia

Figura 2-18. Circuito completo incorporado en el módulo, simulador de sistema de primer y segundo orden.

CAPÍTULO 3: RESULTADOS OBTENIDOS Y COSTOS ASOCIADOS

3. RESULTADOS OBTENIDOS Y COSTOS ASOCIADOS

En este capítulo se presentarán los resultados obtenidos después de todo el desarrollo del proyecto, tanto en el ámbito del estudio de los sistemas, la simulación en los softwares correspondiente y la implementación del diseño real en el módulo práctico. Además de los costos y valores asociados al desarrollo del proyecto haciendo referencia a los componentes y materiales utilizados para la realización de este y también el recurso humano dedicado al desarrollo analítico, de pruebas y finalmente de implementación de los sistemas en cuestión.

Todo esto con el fin de observar la viabilidad que este proyecto presenta frente al crecimiento pedagógico y el aporte al espíritu Sansano, en cuanto a generar nuevas formas de enseñanzas y utilización de elementos para el mejor y más fácil entendimiento del alumnado frente a temas relevante y abstractos, como los son alguna materias en la asignatura de Control de Procesos perteneciente a la carrera de Ingeniería de Ejecución en Control e Instrumentación Industrial.

3.1. RESULTADOS OBTENIDOS

Comenzando por entender que el primer resultado necesario para el proyecto proviene de la descomposición de la función de transferencia en donde se modelan de manera eficiente las partes de dicha función para ser representadas en diagramas de bloque y luego realizar una equivalencia a circuito electrónico.

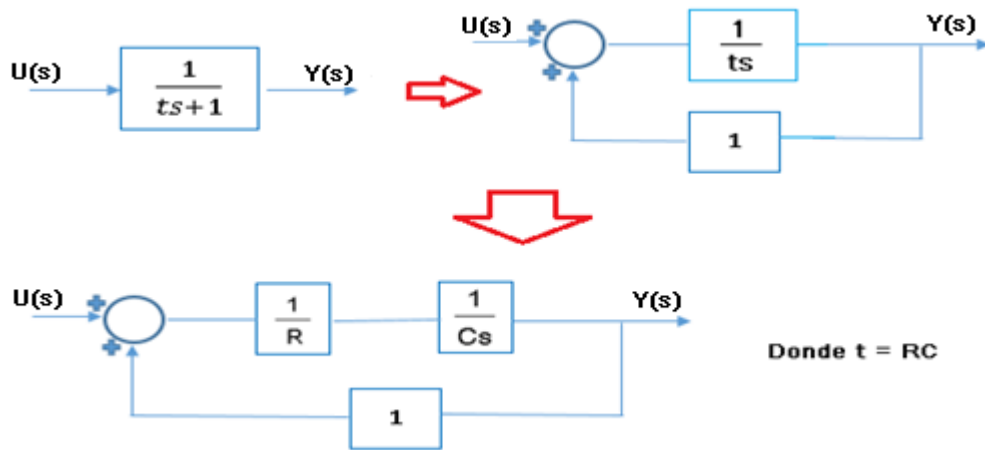
Seguido de esto y ya conociendo el posible circuito que simulará las plantas de primer y segundo orden, se obtiene un diseño de circuito electrónico a base de amplificadores operacionales, y otros componentes electrónicos que permiten la equivalencia a los diagramas de bloques finales. También para este mismo paso se necesita el apoyo de un software de simulación electrónica, para comprobar el funcionamiento dinámico del sistema y otro para la fabricación de placa impresa que será utilizada para ello.

Finalmente, el resultado observado será la aplicación física real del circuito simulador de sistemas, es decir, el resultado obtenido al término de la implementación de todos los componentes en la placa fabricada, considerando diseño, layout, montaje, soldadura, fabricación de gabinete (módulo), perforación de bornes y ajuste para verificación de funcionamiento.

3.1.1. Resultados obtenidos en modelación de los sistemas

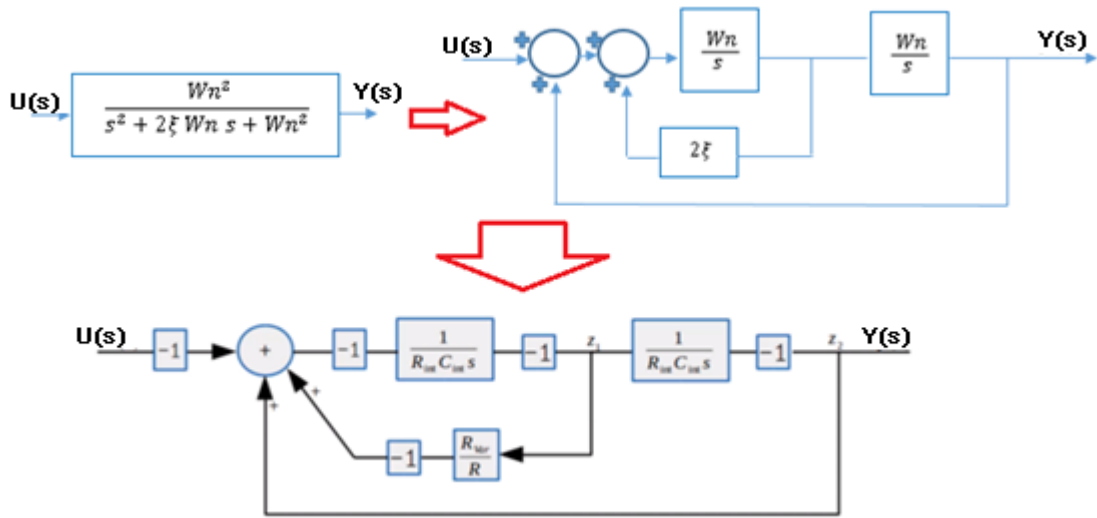
Como se indicó al inicio del escrito, es necesario hacer una acomodación de la función de transferencia del sistema de primer orden $G(s) = \frac{1}{\tau s + 1}$ con el propósito de desglosar sus bloques para proseguir con la equivalencia electrónica correspondiente, de igual manera se realizó con la función de transferencia $G(s) = \frac{W_n^2}{s^2 + 2\xi W_n s + W_n^2}$ del sistema de segundo orden, para la posible traducción a circuito electrónico.

Por lo tanto, el primer resultado obtenido corresponde a la equivalencia expresada en la figura 3-1 y 3-2 respectivamente.



Fuente: elaboración propia.

Figura 3-1. Resultado final de la descomposición de la función de transferencia de primer orden, para equivalencia en circuito electrónico.



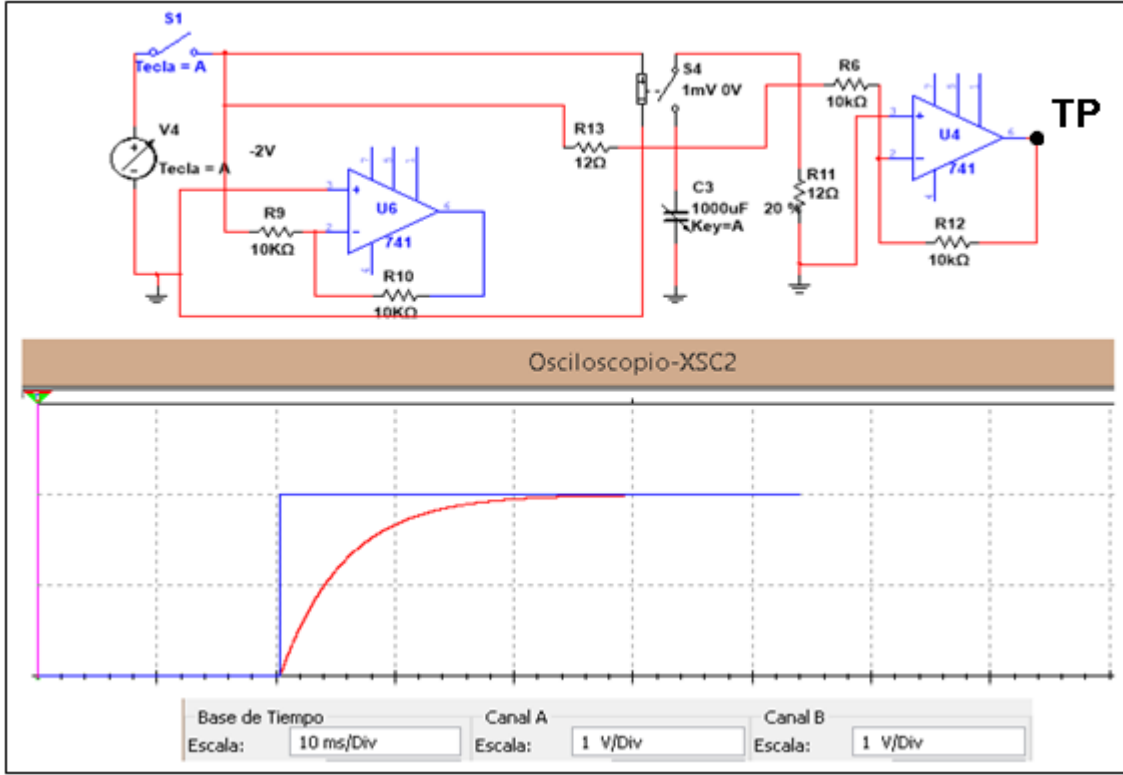
Fuente: elaboración propia.

Figura 3-2. Resultado final de la descomposición de la función de transferencia de segundo orden, para equivalencia en circuito electrónico.

3.1.2. Resultados obtenidos en la simulación virtual de los sistemas

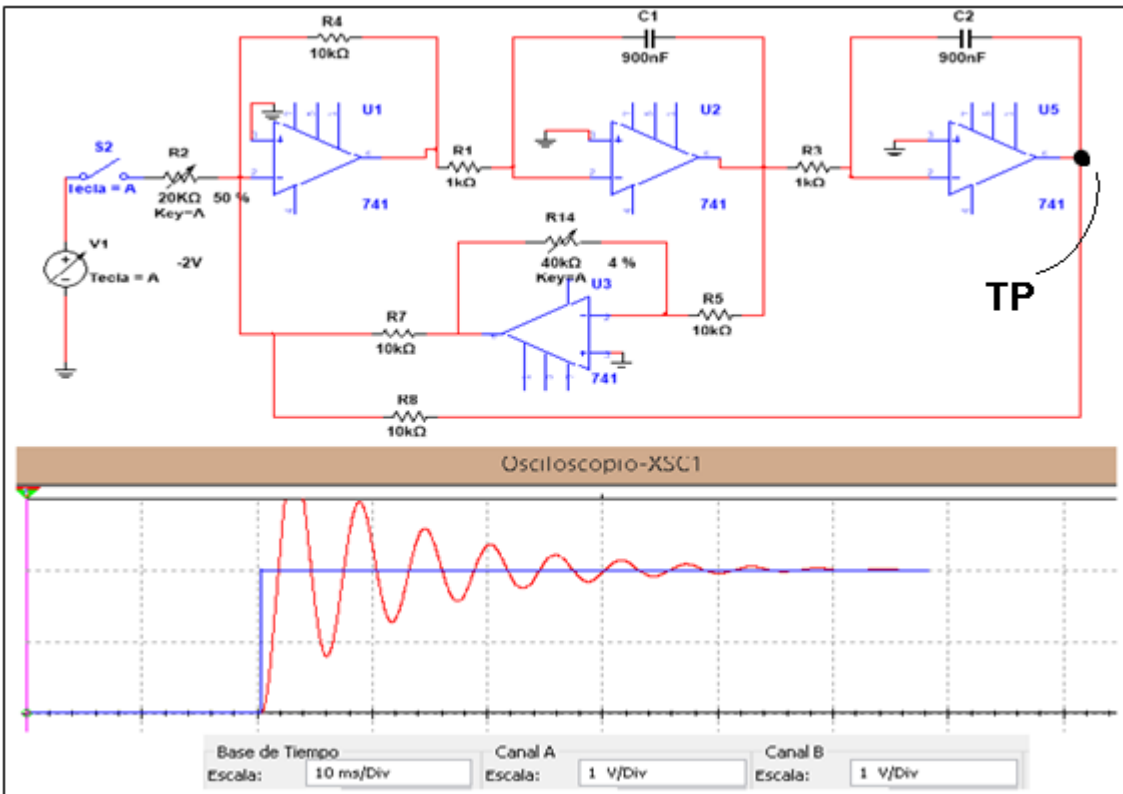
Para poder respaldar la equivalencia electrónica anteriormente realizada, se puede recurrir al apoyo de software de simulación para corroborar el funcionamiento de estos. Luego de obtener la posible circuitería que simulará estos sistemas, pueden ser implementados en software de simulaciones electrónica y así verificar si dicho sistema responde de la forma esperada, además de permitir la captura de esquemas electrónicos en conjunto con programas de diseños de circuito, de lo contrario se pueden realizar ajustes inmediatos en el circuito en cuestión, para así mejorar, cambiar, o simplemente anular componentes o bloques del circuito total, sin embargo, no se debe olvidar que estos simuladores trabajan de forma ideal, por ende, en ciertas circunstancias los diseños realizados en los simuladores pueden funcionar de forma correcta, pero en la realidad las condiciones cambian y no son ideales, varía la temperatura, las características reales de los componentes, las curvas de trabajo, la variación porcentual de la tolerancia, entre otros tantos factores que modifican la respuesta real en comparación a la simulación.

En consecuencia se utilizaron dos software de simulación para este proyecto, el primero corresponde a Multisim en donde se implementó toda la circuitería posible que se necesita incorporar en la placa, y así dar paso a las pruebas en donde resultó bastante directo y poco errado el funcionamiento, ya que luego de algunos ajustes en los valores de capacitancia, la elección correcta del amplificador operacional a utilizar, y un arreglo de switches para la correcta carga y descarga del sistema de primer orden, se obtuvo los siguientes resultados como lo muestran las figuras 3-3 y 3-4, respectivamente.



Fuente: Ni Multisim.

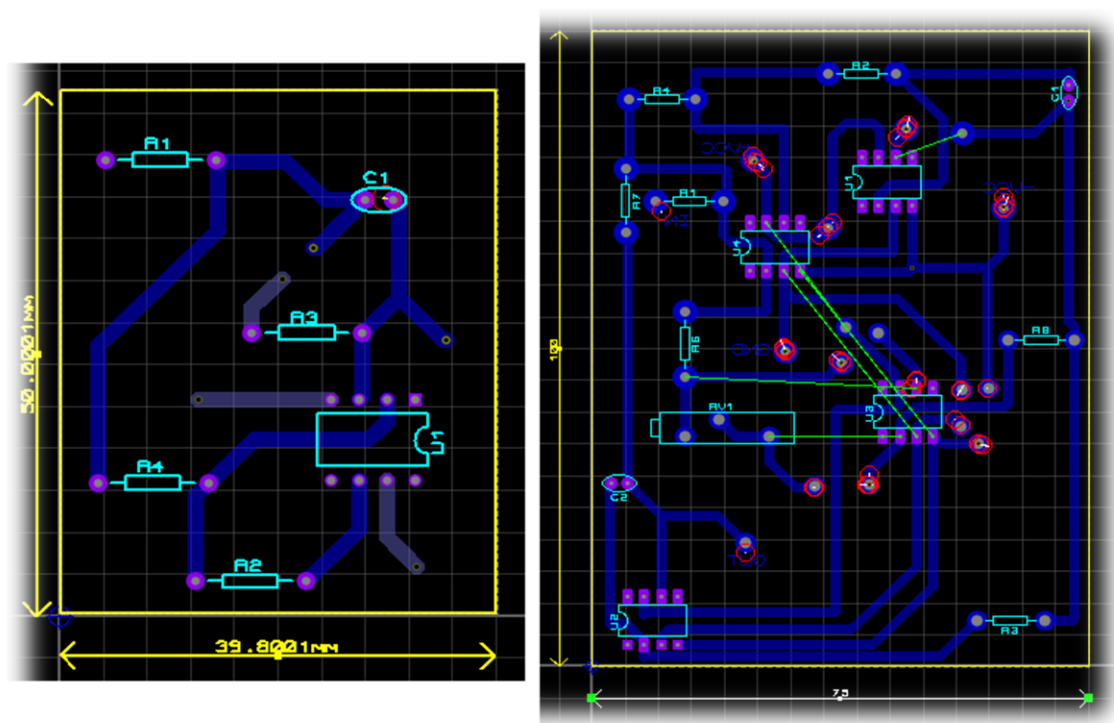
Figura 3-3. Respuesta del circuito simulador de 1° orden, simulado en Multisim.



Fuente: Ni Multisim.

Figura 3-4. Respuesta del circuito simulador de 2° orden, simulado en Multisim.

Finalmente, es necesario recurrir al apoyo de otro simulador llamado Proteus (versión 8 Professional) con el fin de realizar la una placa PCB o circuito impreso, ya que este software permite además de la implementación electrónica del circuito en su plataforma, el traspaso al diseño PCB del mismo. Este simulador consta de dos programas principales para su funcionamiento, uno es ARES y el otro es Electra. El primero (ARES) es aquel que permite en forma manual el diseño de la placa PCB como se señala en la figura 3-5, todo esto con el fin de realizar un circuito ordenado, profesional, y principalmente más eficiente que uno implementado en protoboard, ya que anula en gran proporción la interferencia de ruidos y la suma de capacitancias parásitas producidas por la protoboard.

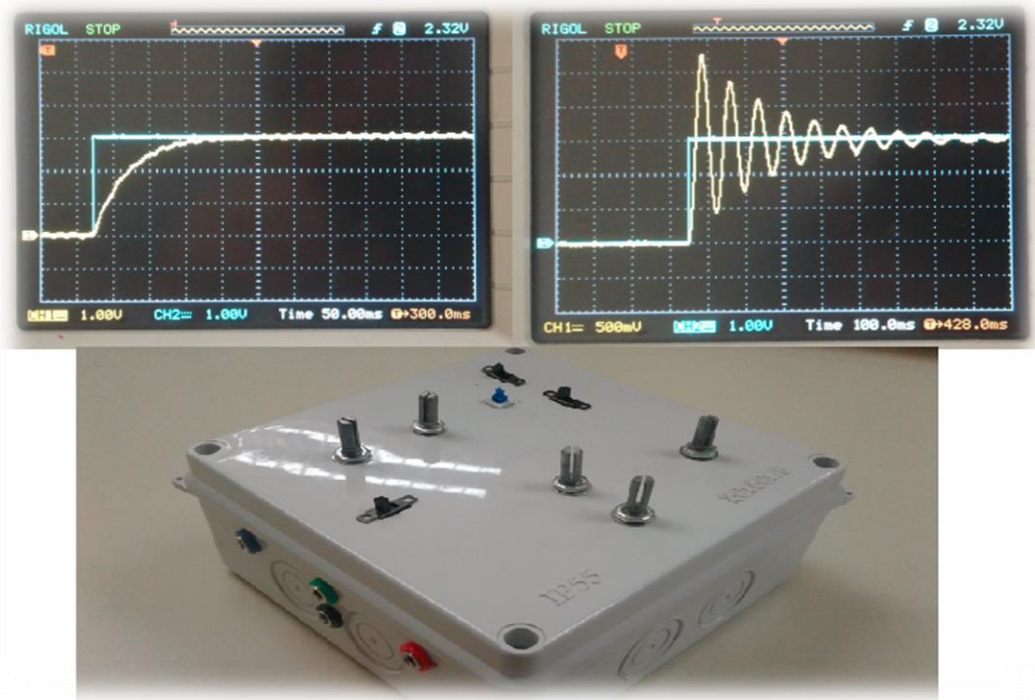


soldadura de estos sobre los Pads dispuestos para cada pin del componente en cuestión, previamente revisados con el diseño que mantiene Proteus en su plataforma y así no caer en errores de posición, polaridad, componente, corto circuito etc...

Terminado el proceso anterior y ya armada la placa impresa (PCB) se procede a la conexión de los bornes de alimentación (+12v, -12v y tierra), bornes de salida (out) del sistema y por último los bornes de la entrada para el escalón de excitación al que responderá el sistemas, siendo éste el último paso para terminar con la fabricación del circuito, se estará en condiciones para dar funcionamiento al sistema completo, al cual solo será necesario conectar los siguientes elementos:

- **Bornes de alimentación:** Este módulo posee 3 bornes de alimentación para el voltaje positivo (+), el negativo (-) y tierra. Se debe conectar una fuente de voltaje continua, que entregue +/- 12 o 15 (V) y un común (tierra).
- **Bornes de salida:** El módulo posee 4 bornes de salida, uno para salida de 1 orden y otro para 2 orden, un tercero para entrada invertida, además de la tierra. Se debe conectar un osciloscopio en los bornes para observar las respuestas.
- **Bornes de entrada:** Estos son 2 bornes que permiten ingresar el valor de entrada al que el sistema responderá. Se debe conectar una fuente de voltaje continuo.

Ya terminada las conexiones para el funcionamiento del circuito, se observan los resultados señalados en la figura 3-6.



Fuente: elaboración propia, realizada en los laboratorios de electrónica de la UTFSM

Figura 3-6. Resultado final de todo el proceso, respuestas del módulo a ambos sistemas y módulo físico con sus elementos de interacción.

3.2. ESTUDIOS DE COSTOS

En este capítulo también se profundizará acerca de los valores y costos asociados para escoger los mejores elementos a utilizar y no generar gastos innecesarios en este módulo interactivo, sin olvidar que se busca la mejor utilización de los materiales, elementos y componentes para obtener un módulo de gran calidad que responda frente a cualquier situación, aun cuando afecten factores externos y así no interfiera con el funcionamiento de esta maqueta cuando el alumno esté haciendo uso de ella.

Para ello se deben considerar los costos asociados al estudio, desarrollo e implementación correspondientes al proyecto, evaluando si es viable o no, lo que debido al bajo costo de implementación versus el aporte pedagógico generado, este proyecto presenta una notable viabilidad, aun considerando que se debe fabricar una cantidad de módulos acorde al número de estudiantes que posea el curso, sin embargo, el número se reduce al ser posible trabajar en grupos hasta de 2 alumnos, reduciendo la cantidad de módulos a la mitad dependiendo del total de alumnos. Todo esto con el propósito de determinar valores exactos asociados a la fabricación e implementación necesaria para darle funcionamiento a la solución presentada.

Antes de comenzar con el análisis de costos es necesario considerar un aspecto general, relacionado al área a la que va dirigida el proyecto presentado, por lo tanto, recordando que el módulo propuesto tiene intenciones pedagógicas de apoyo a la asignatura de Control de Proceso, por ende, a la carrera de Ingeniería de Ejecución en Control e Instrumentación Industrial y en consecuencia al Departamento de Electrotecnia e Informática, los gastos asociados a la implementación del proyecto se adjudican a dicho departamento.

3.2.1. Costos de estudio y desarrollo del proyecto

Referente al estudio del proyecto se requiere profundizar en el conocimiento de los sistemas, para este caso, en base a sistemas de primer y segundo orden. Por lo tanto, especializarse en sistemas, plantas, procesos y control es algo completamente necesario para el estudio y posterior desarrollo de este módulo.

En consecuencia, a lo anterior se entiende que es necesario el estudio y comprensión profundo de este tema para poder intentar transformar lo que parte de una función modelo como los son los $G(s)$ o funciones de transferencia y llegar a una ecuación equivalente que pueda ser representada por circuitos electrónicos para llevarla al plano

real y así obtener este módulo que permita la interacción física con él para entender cómo funcionan los sistemas en estudio. Todo esto luego de haber separado en bloques y desglosado en circuitos parciales el sistema completo, con el propósito de encontrar la mejor equivalencia electrónica que represente a cada bloque dentro del diagrama general.

Ya que esto requiere de análisis complejos y cálculos bastante exactos, además de conocimientos generales como:

- ❖ Sistemas lineales y no lineales.
- ❖ Control de procesos.
- ❖ Diagramas de bloques.
- ❖ Utilización de software de simulación electrónica.
- ❖ Utilización de software de diseños de placas.
- ❖ Electrónica.

Se entiende que la persona encargada de realizar estas tareas debe ser un especialista en temas de control y sistemas, lo que conlleva un valor asociado detallado en la tabla 3-1.

Tabla 3-1. Requerimientos del proyecto.

Valor actual de la UF en Chile, 3 de diciembre de 2018 = \$27.543,79 Con tendencia al cambio creciente para 9 diciembre de 2018 = \$27.565,79					
	Costo UF/3Hrs	Valor en \$	Cant. de días	Horas por día	Total \$
Ing. en Control e Instrumentación Industrial.	1,2	27.543	41	3	1.355.115

Fuente: elaboración propia, basada en los tiempos de trabajo y valor actual de la UF

3.2.2. Costos de material, componentes e implementación del proyecto

Para iniciar con el costo de materiales y componentes involucrados en la circuitería que se necesita para la realización del proyecto considerando ambos sistemas, el de primer y segundo orden, además de la estructura externa o carcasa en la que se incorporará dicho circuito, y que estará diseñada en una placa PCB para disminuir posibles ruidos por cableado, consta de ciertos elementos.

Entre los materiales generales es posible diferenciar entre:

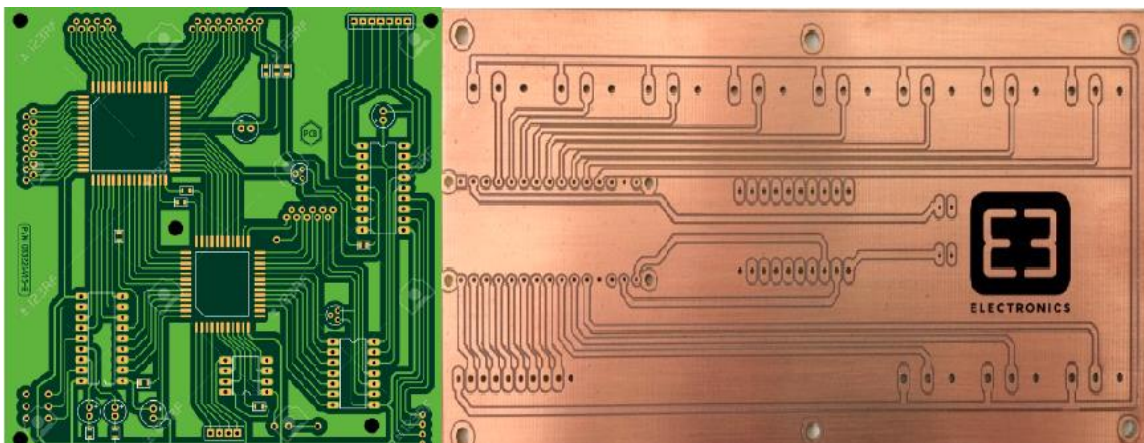
- Base del diseño
- Estructura externa
- Componentes electrónicos
- Elementos de conexión

3.2.2.1. Base del diseño

En esta etapa se desarrollará el tipo de plataforma en la que se instalarán los circuitos ya que en ciertas etapas de los sistemas existen sensibilidades a los ruidos, los que pueden alterar la respuesta o salida del sistema y no obtener los resultados esperados.

Entre las opciones de diseño está la posibilidad de implementar la maqueta en protoboard para luego incorporarla en un molde o caja negra que contendrá esta protoboard y dicho circuito, la que por sus características hace necesario el uso de cables para la unión de los pines de cualquier componente que no corresponda a su fila, y también aporta una cierta capacitancia por las placas utilizadas en su interior para la interconexión de los elementos dispuestos en ella.

Por lo tanto, se decide la opción de utilizar una placa PCB, la que corresponde a un circuito impreso en una placa o tarjeta de material aislante como plástico, baquelita, vidrio entre otros, que posee pistas o caminos de cobre (conductor) para unir los diversos componentes y elementos que contenga el circuito en cuestión, como el ejemplo que muestra la figura 3-7.



Fuente: Dhemax y google pictures

Figura 3-7. Estilos de placas PCB con circuitos impresos a modo de ejemplos.

En la tabla 3-2, se pueden encontrar los detalles de los costos asociados a la fabricación de placas PCB o circuitos impresos, necesarios en este proyecto:

Tabla 3-2. Costos asociados a la fabricación de placas PCB.

	Valor US\$	Valor CLP	mm ²	Cant. de placas	Total \$
Placas PCB	14.94	10.000	7x9 - 9x15	3	30.000

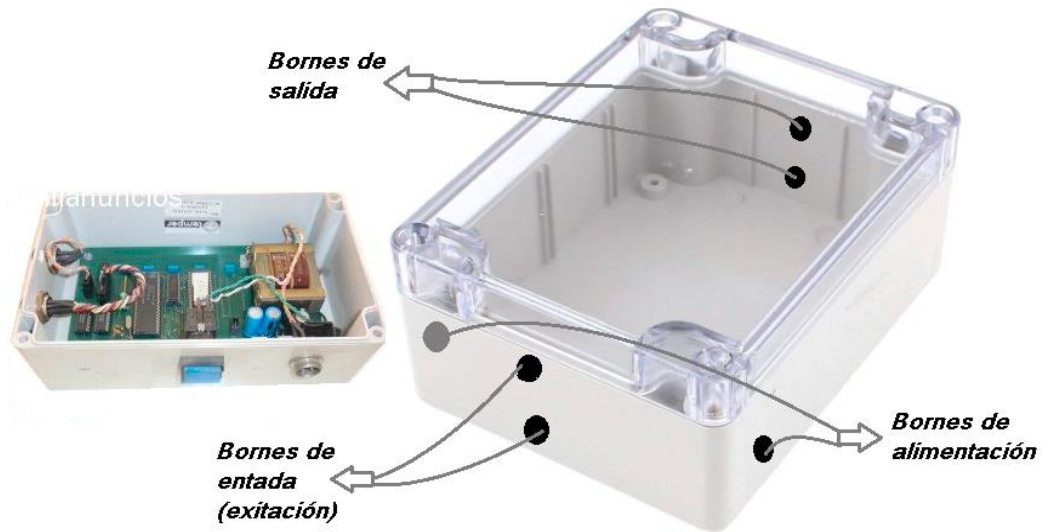
Fuente: elaboración propia con estándares comerciales de la quinta región.

3.2.2.2. Estructura externa

La maqueta o caja negra en la que se incorporará la placa impresa que contiene el circuito, estará diseñada acorde a las medidas de la placa impresa que se diseñó previamente, de la que se estima tendrá una medida aproximada de 15 x 15 x 7.5 cm para disponer de un cuerpo lo bastante robusto para que el alumno pueda interactuar con el módulo, ya que es posible reducir el circuito y la placa a medidas mucho más pequeñas, pero que serán difíciles de manipular considerando que se pretende variar perilleros y componentes como potenciómetros que estarán dispuestos en la cara superior de dicha caja.

Esta caja no requiere mayores especificaciones, ya que sólo aporta rigidez y cubierta para no exponer la circuitería interna, además, de aportar las cavidades para los bornes de conexión necesarios que requiere el circuito ya sea para alimentación, ingresar señal de entrada y medición de la señal de salida.

Entonces como se indicó anteriormente, la caja no posee especificaciones relevantes, se dispuso realizarla por medio del apoyo de una impresora 3D perteneciente al Departamento de Electrotecnia e Informática, con la que se puede reducir costos y materiales de fabricación, además de realizar la modelación a gusto, permitiendo mayor facilidad y eficiencia en el diseño, ya que al término de la fabricación de la caja, no se deberá intervenir para moldear y perforar con el fin de incorporar los bornes y elementos que necesiten de exposición al exterior para hacer posible su variación y conexión. Este módulo tendrá un aspecto similar al que señala la figura 3-8.



Fuente: elaboración propia

Figura 3-8. Estilo de caja o carcasa que contendrá toda la electrónica del módulo.

Los costos asociados a esta parte del proyecto se presentan en la tabla 3-3, considerando una comparativa entre la compra y la fabricación personal (impresora 3D) de la carcasa deseada para incorporar la circuitería.

Tabla 3-3. Costos estándares de cajas modulares plásticas.

	Valor US\$	Valor CLP	mm ²	Cantidad de placas que contendrá	Total \$
Cajas Elct.	8.19	5.500	150x150x75	3	5.500

Fuente: elaboración propia, basada en datos de electrónica embajadores

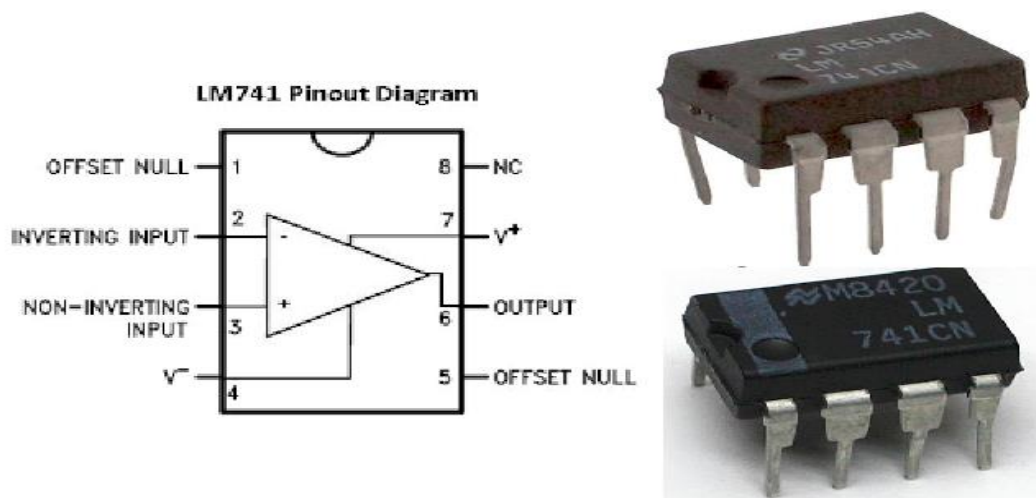
3.2.2.3. Componentes electrónicos

Aquí se listarán todos los componentes electrónicos necesarios para la implementación del circuito simulador de sistemas de primer y segundo orden como: resistencias, condensadores, trimmers capacitivos y resistivos o potenciómetros, amplificadores operacionales, entre otros.

3.2.2.3.1. Amplificador Operacional LM741

El LM741 es un amplificador operacional monolítico de altas características. Se ha diseñado para una amplia gama de aplicaciones lógicas. Un alto rango de voltaje en modo común y ausencia de latch-up, este LM741 tiende a ser ideal para usarlo en diferentes configuraciones, sus utilidades más comunes son seguidor de tensión (ganancia unitaria), amplificador inversor y no inversor, amplificador inversor integrador y derivador, diferenciadores, comparadores, etc... Para el caso de los circuitos simuladores de los sistemas propuestos, tendrá utilidades de sumador inversor, amplificador integrador y amplificador inversor con ganancia variable. Este amplificador se puede observar en la figura 3-9 con su correspondiente configuración interna. Las características típicas de este amplificador son:

- No requiere compensación en frecuencia.
- Está protegido contra corto circuitos.
- Tiene capacidad para anular el voltaje offset.
- Posee un alto rango de tensión en modo común y voltaje.



Fuente: elaboración propia

Figura 3-9. Amplificador Operacional LM741 de propósitos generales.

En relación al costo de este tipo de amplificadores, poseen un valor bastante reducido, dependiendo el propósito y el fabricante, sin embargo, para esta proyecto como se indicó anteriormente el amplificador escogido es de propósitos generales, considerando que, se pueden usar amplificadores alternativos que cumplen la misma

función pero no poseen las mismas características como podrían ser el amplificador operacional OP07, LM324, entre otros y su valor se detalla en la siguiente tabla 3-4 a continuación.

Tabla 3-4. Comparación de Amplificadores Operacionales.

Amp. Oper.	Amp. integrado	Valor US	Valor Pesos \$	Escogido
LM741	1	0.37	276	√
LM324	4	0.33	222	
OP07	1	1.08	728	

Fuente elaboración propia basada en las opciones posibles.

3.2.2.3.2. Resistencias y Potenciómetros

Para el circuito son necesarias resistencias variables para la posible manipulación de los parámetros del sistema de segundo orden como el nivel de ganancia K , que puede ser variada a la entrada del escalón con un potenciómetro ubicado a la entrada del sumador, para variar la ganancia estática del sistema (K), este componente permite una variación desde 1 ($K\Omega$) a 20 ($K\Omega$) variando la ganancia entre $A=0.5$ (incluso menos) atenuando y $A=10$ amplificando. Por otra parte, se tiene un potenciómetro dispuesto en la retroalimentación del amplificador inversor con ganancia variable, el cual permite variar el Shi (ξ) para decidir el tipo de amortiguamiento que el sistema tendrá, este potenciómetro varía sus valores entre 0 (Ω) (oscilatorio puro) y 40 ($K\Omega$) (sub amortiguado), los valores de estos elementos estarán señalados en la tabla 3-5.

Finalmente, las resistencias utilizadas en el circuito (2° orden) tienen un valor de 10($K\Omega$) para mantener parámetros constantes. En casos puntuales se usa resistencias de 1 ($K\Omega$) para la rapidez del sistema, que pueden ser cambiadas por 10 ($K\Omega$) permitiendo una estabilización más lenta y observable, que gracias al osciloscopio no significa un problema.

En la tabla 3-5, se detallan los valores de los componentes antes indicados.

Tabla 3-5. Costos asociados y comparación de elementos resistivos.

Sist. 1° ORDEN	Ohm (Ω)	Watts (W)	UD\$	CLP\$	cantidad	Total \$
Resistencia	1K	1	0.12	80	2	160
Resistencia	1 M	1/4	0.02	13	4	52
*potenciómetro doble	20	--	0.28	189	1	189
Sist. 2° ORDEN	Ohm (Ω)	Watts (W)	UD\$	CLP\$	cantidad	Total \$
Potenciómetro	20 K	--	0.17	114	1	114
Potenciómetro	40 K	--	0.17	114	1	114
Resistencia	10 K	1/4	0.02	13	5	65
Resistencia	1 K	1/4	0.02	13	2	26

Fuente: elaboración propia con respaldo en líneas de productos

Los tipos de resistencias antes mencionadas pueden ser observadas en la figura 3-10, para familiarizarse con los componentes resistivos que se usarán en el circuito.



Fuente: google

Figura 3-10. Resistencias y potenciómetros utilizados en el circuito diseñado.

3.2.2.3.3. Condensadores y Trimmers

Para terminar con el listado de componentes necesarios para este proyecto, se debe incluir los condensadores o capacitancias variables, lo que implica un problema para el detalle de sus valores y costos, ya que por el hecho de estar simulado en un software, este presenta condiciones ideales y no discrimina respecto a los valores que pueden tomar, es decir, si en la simulación se ocupó un capacitor variable o trimmer con un valor superior a 1 (μF), en términos reales estos condensadores variables no existen en el mercado, por lo que para neutralizar esta falla en el dimensionamiento de

capacidades, se hará un arreglo de condensadores que en conjunto con un jumper permitirá cambiar de un arreglo a otro con distinto valor capacitivo. Entonces a continuación se presenta la tabla 3-6 con los posibles condensadores necesarios para los arreglos en el circuito.

Tabla 3-6. Costos asociados a condensadores y arreglos capacitivos.

Sist. 1° ORDEN	Faradio (F)	UD\$	CLP\$	cantidad	Total \$
Cond. Variable	40 u	*	*	1	*
*Arreglo de condensadores (no polarizado)	10 u / 50 (v)	2.2	1.474	4	5896

Sist. 2° ORDEN	Faradio (F)	UD\$	CLP\$	cantidad	Total \$
Condensador	820 n	0.24	159	2	318
Trimmer o condensador variable	0-1200 n	*	*	*	*
*Arreglo de condensadores	470 n	0.098	61	6	366

Fuente: elaboración propia basada en MundoElectrónica y Cetronic

Para conocer el diseño y forma de estos condensadores, la figura 3-11 muestra los posibles componentes que se utilizarán en el circuito.

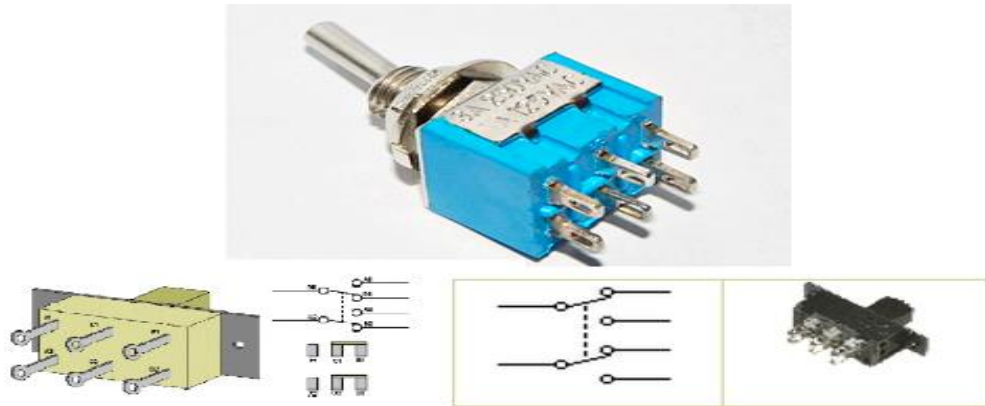


Fuente: google

Figura 3-11. Condensadores y trimmers utilizados para el circuito.

3.2.2.3.4. Switches

Este pequeño ítem contiene los únicos 2 switch que se necesitan para el circuito, el primero necesario para la incorporación del escalón de entrada, y el segundo para el switcheo inverso utilizado en la descarga del condensador simulador del sistema de primer orden. Los switches utilizados en el circuito son mostrados en la figura 3-12 y sus costos asociados se detallan en la tabla 3-7 respectivamente.



Fuente: elaboración propia

Figura 3-12. Switches utilizados en el circuito para carga y descarga.

Tabla 3-7. Costos de switches necesarios para el inicio y conmutación del sistema.

	UD\$	CLP \$	cantidad	Total \$
Switch 2 pines	1.65	1104	1	1.104
Switch 6 pines (inversor)	1.69	1.131	1	1.131

Fuente: elaboración propia basada en ABC y Amazon.es

3.2.2.4. Elementos de conexión

Terminando con los elementos que incorpora el módulo, se tiene los bornes de conexión, los cuales permiten la interconexión de los elementos dispuesto en la placa PCB dentro del módulo, y los elementos externos al módulo que son necesarios para la alimentación, medición de salida e incorporación de señal de entrada, como por ejemplo, las fuentes de +/- 12 o 15 V, el osciloscopio y la fuente constante de entrada (escalón). Para ello se presenta a continuación la tabla 3-8 que detalla sus costos asociados, y la figura 3-13 que indica los tipos de bornes que se utilizarán para las interconexiones necesarias.

Tabla 3-8. Bornes necesarios para la interconexión del módulo.

	tipo	UD\$	CLP \$	Cantidad	Total \$
Bornes	Banana 38(mm)	1.54	1040	6	6.240

Fuente: Elaboración propia, basado global chile



Fuente: google

Figura 3-13. Bornes de conexión múltiples para módulo demostrativo.

CONCLUSIONES

Para iniciar con las conclusiones de este informe, se debe recordar los puntos destacados al final del primer capítulo, es decir, retomar el objetivo principal y los objetivos específicos predispuestos en un inicio para luego dar cumplimiento a ellos en función del desarrollo del proyecto.

Comenzando por los objetivos específicos, se observa que, se busca contextualizar el ambiente de aprendizaje de la asignatura de Control de Procesos, esto se logró de buena forma, ya que la interacción con el módulo permite notablemente relacionarse con la temática de la asignatura, es decir, permite entender que es un sistema, los tipos, y sus respuesta, demostrando así que estas pueden cambiar dependiendo el requerimiento y el resultado deseado.

Por otra parte, se pretendía confeccionar un circuito electrónico que pudiese simular dichos sistemas, también se logró de sobremanera, ya que los circuitos diseñados simulan correctamente los sistemas de primer y segundo orden, además de obtener respuestas exactas, en todo su rango de variaciones.

Finalmente, buscando consolidar los circuitos simulados, se logró implementar estos circuitos en placas impresas (PCB) independientes que pueden trabajar en conjunto de forma real, permitiendo el mejoramiento en respuesta y evitando agregar distorsiones generales producidas por plataformas alternativas como protoboard.

En consecuencia a lo recién descrito, el proyecto resulta eficiente frente a los requerimientos propuestos, ya que con cada etapa se aportó a que finalmente se obtuviera un módulo real (físico) que permite modificar los parámetros de una función de transferencia ya sea de primer o segundo orden, variando así sus coeficientes parciales y por tanto la respuesta general del circuito.

Este proyecto nace en la motivación de ayudar al estudiantado Universitario a crecer en el conocimiento y a facilitar el entendimiento y traspaso de información entre docente y alumno, para así generar un ambiente de transición agradable y digerible en la asignatura de Control de Procesos, frente a temas abstractos y de difícil visualización para lograr su completo manejo y familiarizarse con estas materias.

BIBLIOGRAFÍA

1. SEÑALES Y SISTEMAS, Universidad Carlos III de Madrid Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática. [Documento en PDF].
2. CATALOGO GENERAL VICTRONICS, materiales, componentes y accesorios electrónicos [Pagina Web].
3. MAVIASA CONTROL DE PROCESOS, contenido general y específicos, [Documento PDF y Sitio Web].